



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Ben Huslage

Entwicklung eines universellen Softgreifers für Roboteranwendungen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Ben Huslage

**Entwicklung eines universellen
Softgreifers für Roboteranwendungen**



Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Konstruktion
mit Schwerpunkt Digital Engineering and Mobility
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Thomas Frischgesell
Zweitprüfer: Robin Auffermann

Abgabedatum: 11.03.2024

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Ben Huslage

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines universellen Softgreifers für Roboteranwendungen

Stichworte

Robotik, Automatisierung, Softgreifer, Granulat-basierter Greifer, Pick-and-Place Anwendung

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird der Softgreifer, basierend auf dem Verklemmen von körnigem Material, von Brown u.a. [1] entwickelt. Die Erfindung von Brown wird an einem Funktionsprototyp präzise analysiert und untersucht. Der Prototyp wird für einen Anwendungsfall ausgelegt, konzipiert, additiv gefertigt und mit allen notwendigen Komponenten an dem Kuka KR 6 R900 sixx, einem 6-gelenkigen Robotergreifarm, angebaut.

Durch verschiedenen systematische Versuche wird der Softgreifer optimiert, um seine Haltekraft zu maximieren und ungewollte Anpresskräfte zu minimieren. Die physikalischen Prinzipien der Haltekraft werden erläutert und an verschiedenen Versuchen deutlich.

Der finale Prototyp kann den Anwendungsfall erfolgreich bewältigen und darüber hinaus eine Vielzahl an Objekten greifen. Der Softgreifer schafft es Werkzeuge, verschiedene Bauteile, Obst, Gemüse und andere Lebensmittel zuverlässig zu greifen. Die Erfolgsquote beim Greifen von willkürlich ausgewählten Testobjekten, liegt bei 77,4%. Der Softgreifer kann Haltekraften von mehr als zehn Newton aufbringen, wobei die aufgebrachte Anpresskraft im Durchschnitt bei 55 Newton liegt.

Name of Student

Ben Huslage

Titel of the paper

Development of a universal soft gripper for robotic applications

Keywords

Robotics, Automation, Soft gripper, Granular-based gripper, Pick-and-Place application

Abstract

This thesis focuses on the development of a soft gripper based on the jamming of granular material, as proposed by Brown et al. [1]. Brown's invention is precisely analyzed and examined using a functional prototype. The prototype is designed, developed, additively manufactured, and integrated with all necessary components onto the Kuka KR 6 R900 sixx, a 6-axis robotic arm.

Through various systematic experiments, the soft gripper is optimized to maximize its holding force and minimize unwanted downward pressing forces. The physical principles of the holding force are explained and demonstrated through different experiments.

The final prototype successfully handles the use case and can hold a variety of objects. The soft gripper can reliably grab tools, various components, as well as fruits, vegetables, and other food items. The success rate of gripping randomly selected test objects is 77.4%. The soft gripper can exert holding forces of more than ten Newtons, with an average downward pressing force of 55 Newtons.



Aufgabenstellung

für die Bachelorarbeit

Von Herrn Ben Huslage

Matrikel-Nummer: XXXXXXXXXX

Thema

Entwicklung eines universellen Softgreifers für Roboteranwendungen

Schwerpunkte

Die Bachelorarbeit zum Thema „Entwicklung eines universellen Softgreifers für Roboteranwendungen“ soll einen sehr praktischen Anteil und ebenso eine ausführliche theoretische Untersuchung beinhalten. Vordergründig soll ein Softgreifer entwickelt werden, der für einen definierten Anwendungsfall, verschiedene Objekte mit verschiedenen Formen, Materialien und Oberflächen greifen kann. Der Softgreifer soll ein Ballon, gefüllt mit einem Granulat werden. Dieser gefüllte Ballon soll für den Greifprozess vakuumiert werden, um die eingeschlossenen Objekte zu halten. Der Aufbau und das Prinzip des Greifers soll sich an der Veröffentlichung „Universal robotic gripper based on the jamming of granular material“ (2010, Brown. at all.) orientieren. Durch verschiedene Tests sollen die optimalen Materialien, der beste Aufbau und Dimensionen des Greifers für den Anwendungsfall herausgefunden werden. Bei erfolgreicher Entwicklung des Softgreifers, sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Greifers analysiert und getestet werden.

Im theoretischen Anteil soll der Softgreifer und seine Möglichkeiten näher untersucht werden. Die zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien hinter dem Greifprinzip sollen analysiert und ausgewertet werden. Fragen, wie „Welche Anwendungsfälle gibt es für den Softgreifer?“, „Was für Vor- und Nachteile bietet die hohe Variabilität beim Greifen?“ und „Warum hat sich das Greifprinzip auf dem Markt bisher nicht durchgesetzt?“ sollen durch ausführliche Recherche, eine Marktanalyse und dessen Evaluierung ebenso beantwortet werden. Außerdem soll die praktische Arbeit beschrieben, Probleme bei der Entwicklung erläutert werden und Verbesserungsmöglichkeiten und ein Ausblick zum Ende festgehalten werden.

I. Inhaltsverzeichnis

II.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VI
III.	TABELLENVERZEICHNIS.....	VII
IV.	SYMBOLVERZEICHNIS.....	VII
1	EINLEITUNG & FORSCHUNGSFRAGE	1
2	SOFTROBOTIK	2
2.1	ÜBERBLICK UND STAND DER TECHNIK	2
2.2	GREIFER UND GREIFPRINZIPIEN DER SOFTROBOTIK	3
2.2.1	<i>Pneumatische Softgreifer</i>	3
2.2.2	<i>Mechanische Softgreifer</i>	7
2.2.3	<i>Elektrostatistische/Elektrochemische Softgreifer</i>	8
2.3	ANWENDUNGSFÄLLE VON SOFTGREIFERN	9
3	ENTWICKLUNG DES SOFTGREIFERS.....	10
3.1	GRUNDIDEE	10
3.2	ANWENDUNGSFALL.....	11
3.2.1	<i>Testobjekte</i>	12
3.2.2	<i>Weitere Testobjekte</i>	12
3.3	PRINZIP UND AUFBAU DES SOFTGREIFERS.....	13
3.4	KUKA ROBOTER	15
3.5	GRUNDLEGENDE PNEUMATIK.....	17
3.5.1	<i>Pneumatische Schaltung</i>	17
3.5.2	<i>Auswahl des Leitungsdurchmesser</i>	17
3.5.3	<i>Vakuumsaugdüse</i>	19
3.5.4	<i>Luftfilterauswahl</i>	21
3.6	ENTWICKLUNG DER GREIFER STRUKTUR	22
3.6.1	<i>Konkrete Anforderungen an die Konstruktion</i>	22
3.6.2	<i>Auswahl des Fertigungsverfahrens</i>	28
3.6.3	<i>Konstruktion der Softgreifer Struktur</i>	30
3.7	ZUSAMMENBAU DES SOFTGREIFERS.....	31
4	VERSUCHE ZUR OPTIMIERUNG UND ANALYSE DES SOFTGREIFERS	33
4.1	VERSUCH 1 – ERSTE FUNKTIONS- UND GREIFTESTS MIT SOFTGREIFER-PROTOTYP	33
4.1.1	<i>Einleitung</i>	33
4.1.2	<i>Material</i>	33
4.1.3	<i>Versuchsdurchführung</i>	33
4.1.4	<i>Ergebnisse</i>	36
4.1.5	<i>Auswertung</i>	37
4.2	ENTWICKLUNG VON SOFTGREIFER-PROTOTYP V2	39
4.2.1	<i>Ballonauswahl</i>	39
4.2.2	<i>Optimierung der Dichtung</i>	41
4.3	VERSUCH 2 – ERSTE FUNKTIONSTEST AM KUKA ROBOTER ZUR OPTIMIERUNG DES SOFTGREIFER-PROTOTYPS V2	42
4.3.1	<i>Einleitung</i>	42
4.3.2	<i>Material</i>	42
4.3.3	<i>Versuchsdurchführung</i>	42
4.3.4	<i>Ergebnisse</i>	44
4.3.5	<i>Auswertung</i>	49
4.4	VERSUCH 3 – UNTERSUCHUNG DER ANPRESSKRAFT.....	51

4.4.1	Einleitung.....	51
4.4.2	Versuchsdurchführung.....	51
4.4.3	Ergebnisse.....	52
4.4.4	Auswertung	55
4.5	VERSUCH 4 – UNTERSUCHUNG DER MÖGLICHKEITEN DES FINALEN SOFTGREIFERS	59
4.5.1	Einleitung.....	59
4.5.2	Versuchsdurchführung.....	59
4.5.3	Ergebnisse.....	60
4.5.4	Auswertung	62
5	ANALYSE DES GRANULAT-BASIEREN SOFTGREIFERS.....	63
5.1	DIE PHYSIKALISCHEN PRINZIPIEN DER HALTEKRAFT <i>FH</i>	63
5.2	VERBESSERUNGSMÖGLICHKEITEN DES PROTOTYPS	66
5.3	MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DES SOFTGREIFERS	67
5.4	MÖGLICHE ANWENDUNGSFÄLLE	68
5.5	WARUM HAT SICH DER GREIFER BISHER NICHT DURCHGESETZT?	70
6	FAZIT & AUSBLICK	73
	QUELLENVERZEICHNIS	74
	ANHANG A: PNEUMATIK SCHALTUNG	76
	ANHANG B: WEITERE TESTOBJEKTE.....	77
	ANHANG C: TECHNISCHE ZEICHNUNGEN.....	78
	ANHANG D: FOTOS UND VIDEOS	80

II. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 PNEUMATISCHER ANTRIEB VON SOFTGREIFERN [3].....	3
ABBILDUNG 2 SOFTGREIFER VON "SOFTGRIPPING" [7]	3
ABBILDUNG 3 SOFTGREIFER FÜR PROBENNAHME AN TIEFEN RIFFEN [9]	3
ABBILDUNG 4 KAFFEEPULVER BALLONGREIFER – FORSCHUNG DER CORNWELL UNIVERSITY [6]	4
ABBILDUNG 5 NBM-B40 DEXTEROUS AIRBAG MODULE BY SRT [13].....	5
ABBILDUNG 6 NBM-B40 MODUL IM EINSATZ [13]	5
ABBILDUNG 7 ADAPTIVER FORMGREIFER VON FESTO [14].....	5
ABBILDUNG 8 QUERSCHNITT DES FORMGREIFERS [15]	5
ABBILDUNG 9 RUNDSCHALENGREIFER MIT PNEUMATISCH-BETRIEBENEN INNENKAMMERN [8].....	6
ABBILDUNG 10 MECHANISCHER SOFTGREIFER VON FESTO [14]	7
ABBILDUNG 11 ONROBOT MECHANISCHER SOFTGREIFER [16].....	7
ABBILDUNG 12 ELEKTROSTATISCHE AKTIVIERUNG	8
ABBILDUNG 13 ELEKTROCHEMISCHE AKTIVIERUNG	8
ABBILDUNG 14 ELEKTROSTATISCHER SOFTGREIFER HEBT EIN ROHES EI [17].....	8
ABBILDUNG 15 KOMPLEXER GREIFER FÜR AUTOKAROSSERIE [19]	10
ABBILDUNG 16 SOFTGREIFER VON BROWN HÄLT EIN EI [6]	13
ABBILDUNG 17 KUKA KR 6 R900 SIXX [20].....	15
ABBILDUNG 18 ARBEITSRAUM DES KUKA KR 6 R900 SIXX [20].....	15
ABBILDUNG 19 FUNKTIONSDARSTELLUNG EINER VENTURI-DÜSE [21]	19
ABBILDUNG 20 BAURAUM DER SOFTGREIFER STRUKTUR	23
ABBILDUNG 21 TECHNISCHE ZEICHNUNG ROBOTERFLANSCH.....	24
ABBILDUNG 22 ANSCHLUSSPLATTE.....	24
ABBILDUNG 23 QUERSCHNITTSKIZZEN DER OBEREN SOFTGREIFER STRUKTUR	25
ABBILDUNG 24 PNEUMATIK STECKVERSCHRAUBUNG VON FESTO.....	25
ABBILDUNG 25 STECKVERSCHRAUBUNG MIT LUFTFILTER	25
ABBILDUNG 26 INTEGRATION PNEUMATIK ANSCHLUSS UND LEITUNG.....	26
ABBILDUNG 27 UNTERE HÄLFTE DES SOFTGREIFERS (SCHNITTDARSTELLUNG)	27
ABBILDUNG 28 OBERE HÄLFTE DES SOFTGREIFERS (SCHNITTDARSTELLUNG)	27
ABBILDUNG 29 GEWINDEEINSATZ FÜR ADDITIVE BAUTEILE [24].....	28
ABBILDUNG 30 CAD-KONSTRUKTION - OBERE SOFTGREIFER STRUKTUR	30
ABBILDUNG 31 CAD-KONSTRUKTION - UNTERE SOFTGREIFER STRUKTUR	30
ABBILDUNG 32 SCHNITTDARSTELLUNGEN DER CAD-KONSTRUKTION DES SOFTGREIFERS	30
ABBILDUNG 33 ZUSAMMENBAU DES SOFTGREIFERS	32
ABBILDUNG 34 VERSUCHSAUFBAU - VERSUCH 1	34
ABBILDUNG 35 VERSUCHSAUFBAU – VERSUCH 1.2.....	35
ABBILDUNG 36 VERSUCH 1.4 - GRANULAT-BEFÜLLTER BALLON PLATZT	37
ABBILDUNG 37 ABDRUCK DER FEDER NACH DEM GREIFVORGANG.....	38
ABBILDUNG 38 OPTIMIERUNG DER DICHTUNG (LINKS ALT, RECHTS NEU).....	41
ABBILDUNG 39 OPTIMIERTER 3D-DRUCK DER OBEREN SOFTGREIFER STRUKTUR	41
ABBILDUNG 40 PROGRAMMCODE GREIFVORGANG – ZEILE 1-14.....	43
ABBILDUNG 41 PROGRAMMCODE GREIFVORGANG – ZEILE 15-26.....	43
ABBILDUNG 42 AUFBAU VERSUCH 2 - SOFTGREIFER AM KUKA ROBOTER.....	45
ABBILDUNG 43 GREIFVORGANG AM ROBOTER	45
ABBILDUNG 44 VERSUCHSAUFBAU – VERSUCH 3.....	51
ABBILDUNG 45 HALTEKRAFT-ANPRESSKRAFT DIAGRAMM	55
ABBILDUNG 46 FEDERWEG-KRAFT DIAGRAMM	56

ABBILDUNG 47 SÄULENDIAGRAMM - ANPRESSKRAFT DER GREIFVORGÄNGE	58
ABBILDUNG 48 SOFTGREIFER GREIFT KAROTTE, ZUCCHINI & BANANE.....	60
ABBILDUNG 49 SOFTGREIFER GREIFT SCHRAUBENZIEHER, ZOLLSTOCK & MAULSCHLÜSSEL.....	60
ABBILDUNG 50 GEKOCHTES EI VON SOFTGREIFER ZERDRÜCKT	61
ABBILDUNG 51 SOFTGREIFER HEBT ZWEI OBJEKTE GLEICHZEITIG AUS EINER BOX	61
ABBILDUNG 52 SOFTGREIFER HALTEKRAFT F_h ALS FUNKTION DES KONTAKTWINKELS θ [1]	63
ABBILDUNG 53 JÄHRLICHE INSTALLIERUNGEN VON INDUSTRIEROBOTERN WELTWEIT [2]	70
ABBILDUNG 54 VERGLEICH VON VIER SOFTGREIFERN IN DREI TESTUMGEBUNGEN [26]	71
ABBILDUNG 55 VERSABALL VON EMPIRE ROBOTICS [29]	72

III. Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 TESTOBJEKTE	12
TABELLE 2 VERGLEICH VAKUUMSAUGDÜSEN VON FESTO [22].....	20
TABELLE 3 VERGLEICH LUFTFILTER VON FESTO [23].....	21
TABELLE 4 ERGEBNISSE - VERSUCH 1.1 ($p = 3 \text{ Bar}$)	36
TABELLE 5 ERGEBNISSE - VERSUCH 1.2 ($p = 5 \text{ Bar}$).....	36
TABELLE 6 ERGEBNISSE - VERSUCH 2.1	46
TABELLE 7 GRANULAT-MATERIAL EIGENSCHAFTEN.....	47
TABELLE 8 ERGEBNISSE - VERSUCH 2.2	47
TABELLE 9 ERGEBNISSE - VERSUCH 2.3	48
TABELLE 10 ERGEBNISSE - VERSUCH 3.1	53
TABELLE 11 ERGEBNISSE - VERSUCH 3.2	54
TABELLE 12 FEDERSTEIFIGKEIT DES SOFTGREIFERS.....	57

IV. Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
d	Korngröße	[μm]
D	Durchmesser	[mm]
D_{Luft}	Durchmesser des luft-befüllten Ballons	[mm]
$D_{Granulat}$	Durchmesser des Granulat-befüllten Ballons	[mm]
p	Betriebsdruck	[bar]
h	Höhe	[mm]
t	Wandstärke	[mm]
m	Masse	[g]
m_x	Eigenmasse von Testobjekt x	[g]
m_A	Anpressmasse	[kg]
Δm_p	Messungenauigkeit der Pesola	[g]

Δm_w	Messungenauigkeit der Personenwaage	[kg]
\vec{F}_H	Haltekraft	[N]
\vec{F}_p	Zugkraft der Pesola	[N]
\vec{F}_w	Kraft der Personenwaage	[N]
\vec{F}_g	Gewichtskraft der Testobjekte	[N]
\vec{F}_A	Anpresskraft	[N]
\vec{g}	Gravitationskonstante	$\left[\frac{Nm^2}{kg^2} \right]$
μ	Statischer Reibungskoeffizient	-
AA	Abstand der Softgreifer Struktur zur Arbeitsfläche	[mm]
s	Federweg	[mm]
D	Federkonstante	$\left[\frac{N}{mm} \right]$
θ	Kontaktwinkel	[rad]
σ^*	horizontale Spannung des Ballons um die Kugel	$\left[\frac{N}{m^2} \right]$
$\partial\theta$	Breite der Kontaktlinie des Ballons an der Kugel	[rad]
R	Radius der Kugel	[mm]
A_0	Kontaktfläche des Ballons an der Kugel	[m ²]
A^*	Horizontale Querschnittsfläche der Kugel	[m ²]
F_N	Normalkraft	[N]
F_f	Reibungskraft (friction)	[N]
F_s	Saugkraft (suction)	[N]
F_i	Kraft durch Formschlüssigkeit (interlocking)	[N]
P_g	Spaltdruck	[bar]
E	E-Modul des Granulat-befüllten Ballons	[pa]

1 Einleitung & Forschungsfrage

Die fortschreitende Entwicklung der Robotertechnik hat in den letzten Jahren zu einer wachsenden Vielfalt von Anwendungen und Möglichkeiten geführt. In Anbetracht eines stetigen Zuwachses von Roboterinstallationen in der Automobil- und Elektronikbranche und einem boomenden Servicerobotermarkt in der Gastronomie, Logistik, Landwirtschaft, Medizin und Reinigung [2], wird die Forschung an neuen Greifprinzipien und die Softrobotik immer relevanter. Mit flexiblen, anpassungsfähigen Materialien und neuen Methoden, inspiriert durch die Natur, schafft es die Softrobotik universelle Greifer, tierähnliche Forschungsroboter und menschliche Hände zu entwickeln [3]. Roboter werden vor allem für das Handling von unterschiedlichen Objekten eingesetzt und benötigt [2]. Insbesondere Forschungen im Bereich des universellen Greifens mit weichen anpassungsfähigen Methoden stellen damit einen entscheidenden Schritt dar, um die Einsatzbereiche der Robotik zu erweitern und die Effektivität zu erhöhen.

Diese Bachelorarbeit widmet sich der Entwicklung eines universellen Softgreifers für Roboteranwendungen. Das Ziel dieser Arbeit ist, den universellen Greifer, basierend auf dem Verklemmen von körnigem Material, von Brown u.a. erfunden und 2010 erstmalig veröffentlicht [1], zu entwickeln. Der Greifer und das Prinzip hinter der Haltekraft werden beschrieben, Vor- und Nachteile des Greifprinzips und des Softgreifers analysiert und mögliche Anwendungsfälle herausgefunden. Die folgende Forschungsfrage: *„Inwiefern ist der Granulatbasierte Softgreifer von Brown universell einsetzbar und kann er in Zukunft effektive Anwendung finden?“*, wird im Verlauf der Arbeit mit Hilfe verschiedener Versuche mit einem funktionstüchtigen Prototyp, der Analyse der Eigenschaften des Softgreifers, einer Marktanalyse und dem Vergleich mit anderen Greifprinzipien beantwortet.

Zunächst erfolgt ein Überblick über die Softrobotik, ihre verschiedenen Greifverfahren und Methoden und die aktuellen Einsatzgebiete der Technik. Den Hauptteil bilden die Konzeption, Konstruktion, Fertigung, Testung und Optimierung des Softgreifers. Dabei wird der Softgreifer für einen definierten Anwendungsfall ausgelegt. Das Ziel ist das erfolgreiche Greifen von acht unterschiedlichen Testobjekten. Durch eine Reihe von systematischen Versuchen wird der Softgreifer optimiert, um den Anwendungsfall zu bewältigen und ihn möglicherweise darüber hinaus einsetzbar zu machen.

Zum Abschluss der Arbeit werden die Möglichkeiten des Greifers getestet und die physikalischen Prinzipien erläutert. Durch eine Analyse der technischen und marktwirtschaftlichen Aspekte, wird das Potential des Softgreifers in Zukunft analysiert und die Forschungsfrage beantwortet.

2 Softrobotik

Im folgenden Kapitel wird der neue Forschungszweig „Softrobotik“ näher vorgestellt. Durch die Betrachtung des gesamten Forschungsfeldes und der verschiedenen Roboter mit ihren Greifmethoden, wird der „universelle“ Softgreifer, basierend auf dem Verkleben von körnigem Material [1], genauer eingeordnet und bewertet.

2.1 Überblick und Stand der Technik

Die Softrobotik ist ein neuer Bereich in der Robotik, der im Gegensatz zur herkömmlichen Technik mit weichen und anpassbaren Robotern, inspiriert aus der Natur, arbeitet. Die herkömmliche Robotik arbeitet mit hohen Kräften, steifen Greif-Methodiken, hoher Präzision und mit hoher Geschwindigkeit. Roboter und Greifer bestehen meist aus starren Materialien wie Aluminium oder Stahl und die Aufgaben der Roboter sind spezifisch und angepasst auf einzelne Probleme. Bei unerwarteten Situationen und Falländerungen, können die Roboter nicht darauf reagieren und scheitern an der Veränderung [3].

Die herkömmliche Technik ist gut geeignet für industrielle Prozesse mit gleichbleibenden Objekten und den gleichen Rahmenbedingungen. In natürlicher Umgebung variieren Prozesse, Objekte und Lebewesen stark, wodurch Homogenität nicht zwangsläufig vorherrscht. Hier setzt die Softrobotik an: *„Softroboter bestehen in der Regel aus weichen Materialien wie Silikon oder Schaumstoff. Dies ermöglicht große elastische Verformungen, begrenzt die auftretenden Kräfte und minimiert ihr Gefahrenpotenzial. Gleichzeitig können mit ein und demselben weichen Greifer sehr unterschiedliche Objekte gegriffen werden, da sich Softroboter leicht an verschiedene Formen anpassen können.“* [4]

Softroboter werden bereits in den verschiedensten Bereichen eingesetzt. Zum Beispiel in der Industrie am Fließband, zum Handling von Lebensmitteln wie Fleisch [5] oder auch zum Handling anderer Lebensmittel wie Gemüse und Obst [6][7][8]. Darüber hinaus werden Softroboter bereits zur Handhabung und Probenentnahme von empfindlichen Pflanzen an tiefen Korallenriffen Unterwasser eingesetzt [9]. Außerdem finden Softroboter Einsatz in der Medizin für die Endoskopie [10] und die Verabreichung von Medikamenten an empfindlichen Stellen im Körper [11].

2.2 Greifer und Greifprinzipien der Softrobotik

Um die Softrobotik und ihre Greif-Methodiken vorzustellen, werden im Folgenden verschiedene Softgreifer betrachtet. Softroboter zu Erkundungs- oder Untersuchungszwecken, die in der Medizin eingesetzt werden oder um die Unterwasserwelt in Form eines Fisches zu erkunden [12], werden hier nicht betrachtet. Thermische und magnetische Aktivierungsprinzipien der Roboter, die häufig in diesen Zusammenhängen verwendet werden, werden deshalb ausgelassen. Der Fokus liegt auf Greifanwendungen der Softrobotik. Der Softgreifer von Brown wird unter anderem in diese Übersicht integriert.

2.2.1 Pneumatische Softgreifer

Das Prinzip von pneumatischen Softgreifern ist immer ähnlich. Ein Greifer aus flexiblem Material, wie Silikon, besitzt einen Hohlraum. Dieser Hohlraum wird pneumatisch unter Druck gesetzt, um eine Bewegung und Ausdehnung des Greifers zu steuern. In Abbildung 1 wird das Prinzip an einem Finger veranschaulicht.

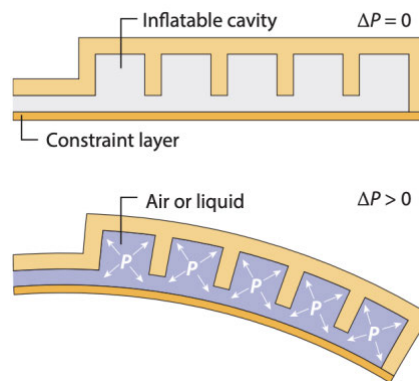


Abbildung 1 Pneumatischer Antrieb von Softgreifern [3]

Finger Methodiken

Die meistverbreitete Greifmethodik der Softrobotik sind pneumatisch-betriebene Finger. In besonderen Fällen werden diese auch hydraulisch angetrieben. In Abbildung 2 wird der Greifer bereits in einem typischen Anwendungsbereich, dem Lebensmittelhandling präsentiert. Abbildung 3 zeigt einen Softgreifer mit dieser Methodik, der Korallenproben Unterwasser nehmen kann.



Abbildung 2 Softgreifer von "SoftGripping" [7]

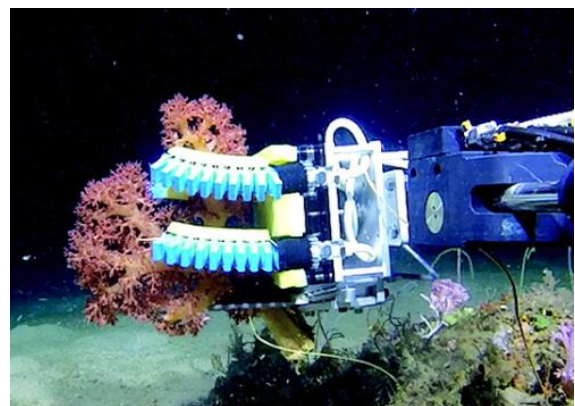


Abbildung 3 Softgreifer für Probennahme an tiefen Riffen [9]

Die flexiblen Finger der Greifer sind von innen hohl und werden an die Pneumatik des Roboters angeschlossen. Wenn der Greifer zugreifen soll, werden die hohlen Finger pneumatisch aufgeblasen, sodass die Finger zugreifen. Durch die Lamellen und die verschiedenen Wandstärken des Fingers, wird die Bewegung gesteuert, die beim Unterdrucksetzen ausgeführt werden soll. Durch das flexible Material werden die weichen Lebensmittel nicht beschädigt und gleichzeitig können verschiedene Formen und Größen mit dem gleichen Greifer gefasst werden. Dabei dürfen sich die Dimensionen nicht zu stark unterscheiden.

Der Greifer in Abbildung 2 ist von dem deutschen Softrobotik Unternehmen „SoftGripping“ entwickelt worden. Das Unternehmen bietet eine Vielzahl von Variationen der Softgripper an und zeigt die Möglichkeiten der Technik. Lebensmittel aller Art, wie Karotten, Zucchini, Lauch, Paprika, Toastbrot oder roher Teig werden beispielhaft gegriffen. Ähnliche Softgreifer stellt auch der amerikanische Hersteller „Soft Robotics“ und die chinesische Firma „SRT“ [13] her. Die Finger von den Greifern von SRT sind etwas kürzer und anders geformt, arbeiten aber nach dem gleichen Prinzip. Die Firma präsentiert ebenfalls ein sehr breites Einsatzgebiet der Greifer, in der Lebensmittelfabrik, beim Kochen oder beim Pakethandling im Lagerhaus.

Der Softgreifer aus Abbildung 3 ist in einem Forschungsprojekt entstanden, welches sich zum Ziel gesetzt hat, eine automatisierte und zerstörungsfreie Probenahme von benthischer Fauna in der Tiefsee umzusetzen. Vorige Lösungen in der Tiefseeforschung sollen von der Ölindustrie vorangetrieben worden sein, welche zu zerstörerischen Interaktionen mit der Unterwasserwelt geführt haben. Für den Softgreifer werden nachgiebige Materialien verwendet, die an die Empfindlichkeit der Organismen angepasst sind [9]. Ein Einsatz außerhalb der Industrie ist auch möglich.

Ballon Methodiken

Andere pneumatische Greifprinzipien arbeiten mit halben Ballons. In Abbildung 4 wurde an einem Greifer geforscht, der mit Kaffeepulver gefüllt ist. Durch das Erzeugen eines Vakuums in dem Ballon, verfestigt sich das Kaffeepulver in der eingenommenen Position. In dem Beispiel kann so ein Bierglas gehalten und bewegt werden. Es ist aber auch vorstellbar, dass verschiedene Objekte wie Bauteile, Lebensmittel oder Werkzeug mit diesem Prinzip gegriffen werden können. Die Forschungen der Cornell University an diesem Greifprinzip stammen aus dem Jahr 2010 und werden in dieser Arbeit untersucht. Bisher finden sich keine Unternehmen, die diese konkrete Technik einsetzen.



Abbildung 4 Kaffeepulver Ballongreifer – Forschung der Cornell University [6]

Eine andere Methode nutzt das NBM-B40 Softgreifer Modul von SRT (Abbildung 5 und Abbildung 6). Die Ballons sind von innen hohl, werden pneumatisch aufgeblasen und schließen sich um das Objekt. Um mit dem Greifer Objekte heben zu können, werden mindestens zwei Module von verschiedenen Seiten benötigt, die das Objekt zwischen sich einschließen. Mit diesem Prinzip können auch Objekte mit sehr großen Dimensionen gegriffen werden, wenn die Anschlussgeometrie der Greifer auf die bestimmte Größe angepasst wird. Die Einschränkung auf eine bestimmte Dimension und ein bestimmtes Objekt, ist bei diesem Greifprinzip jedoch notwendig. Für den flexiblen Einsatz verschiedenster Objekte ist dieses Greifprinzip nicht geeignet.

Objekte wie große Glasscheiben oder Karosseriebauteile können mit diesem Prinzip gut gegriffen werden. Der Kaffee-gefüllte Softgreifer könnte in der Form theoretisch auch eingesetzt werden.



Abbildung 5 NBM-B40 dexterous airbag module by SRT [13]



Abbildung 6 NBM-B40 Modul im Einsatz [13]

Ein ähnliches Prinzip verfolgt der adaptive Formgreifer von Festo. Die Form des Softgreifers ist allerdings länglich und nicht rund. Der Greifer kann sich in der Form besonders gut an Flaschen, Schrauben und kleine Objekte, wie auch Kugeln, anpassen. Der Latexkegel ist hohl, bis auf eine Kolbenstange in der Mitte. Beim Greifen wird die Kolbenstange nach oben in den Zylinder gedrückt. Der entstandene Hohlraum in dem oberen Zylinder wird unter Druck gesetzt und verhindert das Herunterrutschen des Kolbens. Die Objekte werden durch Formschlüssigkeit und Saugeffekte gehalten. Ein Querschnitt und der Einsatz des Greifers werden in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.

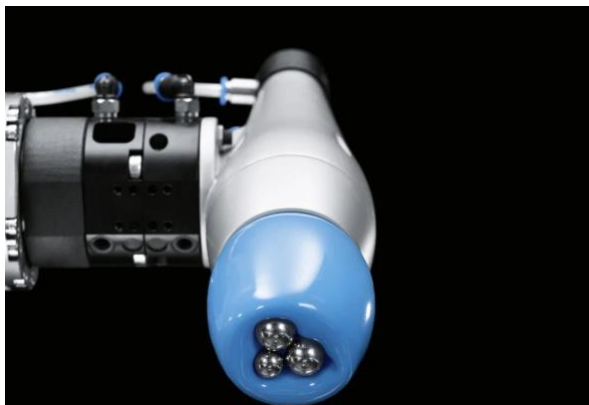


Abbildung 7 Adaptiver Formgreifer von Festo [14]

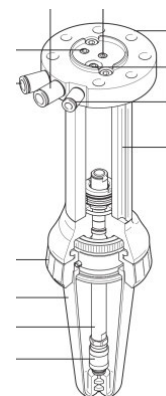


Abbildung 8 Querschnitt des Formgreifers [15]

Andere Methodik

Wiederum andere Softgreifer arbeiten mit einer Kombination aus starren und flexiblen Bauteilen. Der folgende Softgreifer besitzt eine starre, runde Außenschale mit vier weichen Luftkammern in der Mitte (Abbildung 9). Zur Aktivierung des Greifers, werden die Luftkammern pneumatisch unter Druck gesetzt und halten das umschlossene Objekt.

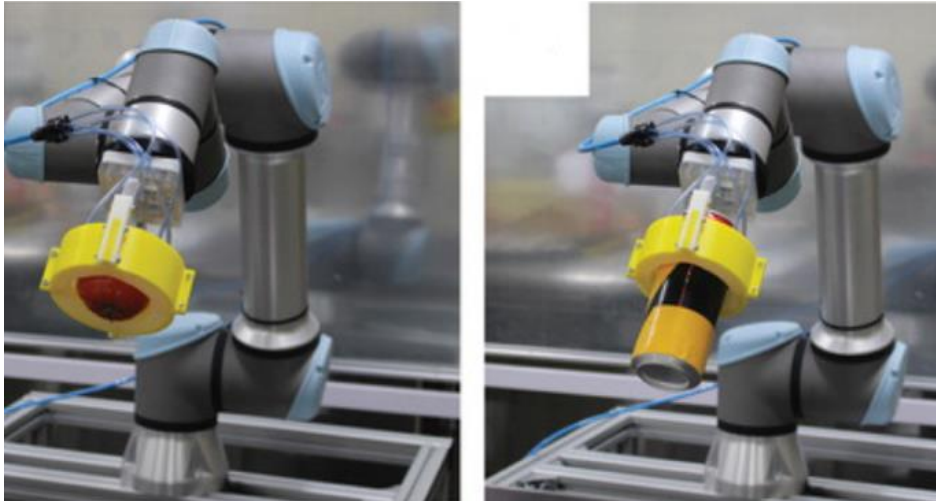


Abbildung 9 Rundschalengreifer mit pneumatisch-betriebenen Innenkammern [8]

Der pneumatisch-betriebene Rundschalengreifer kann einen Apfel (links) und eine Softdrink-Dose (rechts) zuverlässig halten. Durch seine starre Außenstruktur ist der Greifer in der Auswahl von Größe und Form des Objektes stark eingeschränkt und nicht universell einsetzbar.

2.2.2 Mechanische Softgreifer

Finger Methodik

Die Greifmethode, mit Fingern Objekte zu greifen, muss nicht pneumatisch oder hydraulisch betrieben werden. Es existiert eine Vielzahl von Softgreifern, die rein mechanisch funktionieren. Der Vorteil ist, dass keine extra Luftzufuhr notwendig ist. Das universelle Greifen verschiedener Objekte funktioniert ähnlich gut. Außerdem sind die flexiblen Finger sehr anpassbar und können empfindliche Objekte ohne Beschädigung greifen. In Abbildung 10 wird mit dem mechanischen Softgreifer von Festo ein Apfel zuverlässig gegriffen.

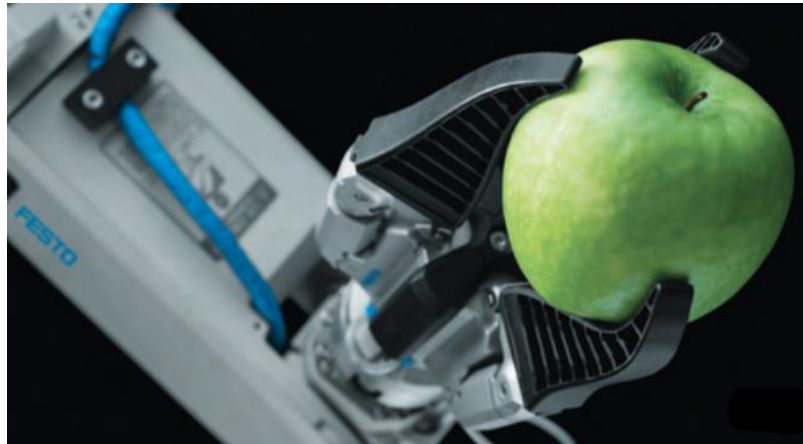


Abbildung 10 mechanischer Softgreifer von Festo [14]

Andere Methodik

Ein Greifer, der auch mechanisch betrieben wird, ist in Abbildung 11 dargestellt. Der OnRobot Greifer nutzt einen anderen Aufbau als die Fingermethode: Er ist rund, aus einem Guss und ohne separate Finger. Beispielsweise werden mit diesem Greifer Eier und Sushi gegriffen. Das Einsatzgebiet dieses Greifers ist jedoch eher klein, da das Objekt in Größe und Dimensionen stark eingeschränkt ist.



Abbildung 11 OnRobot mechanischer Softgreifer [16]

2.2.3 Elektrostatische/Elektrochemische Softgreifer

Elektrostatische und Elektrochemische Softgreifer arbeiten mit anderen Methodiken als die bisher vorgestellten Greifer. Die Bewegung wird durch die direkte Umsetzung von elektrischer Energie in die Verformung eines weichen Körpers gesteuert. Zwei gegenüberliegende dehnbare Elektroden werden durch ein Dielektrikum oder einer ionenleitenden Schicht getrennt.

Bei der *elektrostatischen Aktivierung* ziehen sich die gegenüberliegenden Elektroden beim Anlegen der Spannung an und drücken die flexible dielektrische Schicht in eine gewünschte Richtung. Je nach Anordnung der Elektroden und des Dielektrikums, kann die Bewegung gesteuert werden (Abbildung 12).

Bei der *elektrochemischen Aktivierung* liegt zwischen den Elektroden eine ionenleitende Schicht aus einem elastischen Polymer mit Kohlenstoffgerüst, bei dem die Kationen sich frei in dem Polymernetzwerk bewegen können. Beim Anlegen der Spannung und des daraus entstehenden elektrischen Feldes, sammeln sich die Kationen an der Kathode und verursachen eine Schwellung des Körpers. Diese lokale Schwellung und inhomogene Verteilung der Ionen löst die Verformung des Aktuators aus (Abbildung 13)[3].

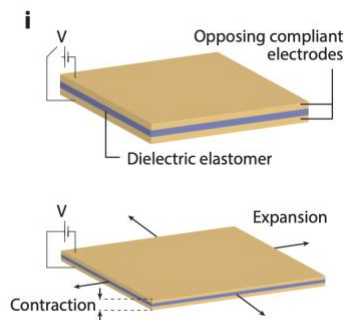


Abbildung 12 Elektrostatische Aktivierung

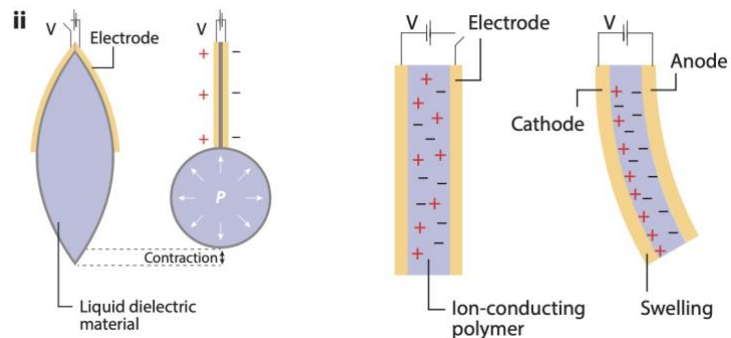


Abbildung 13 Elektrochemische Aktivierung

In dem folgenden Beispiel wird ein Softgreifer vorgestellt, der mit elektrostatischer Aktivierung arbeitet (Abbildung 14). Die dielektrische Schicht zwischen den Elektroden ist eine bereits gespannte Elastomer Schicht. Bei Anlegung der Spannung, wird die dielektrische Schicht durch die Maxwell-Spannung zwischen den Elektroden zu einer Kompression gezwungen. Die Kompression in der Höhe löst eine Ausdehnung in der Länge und Breite aus und sorgt für die Verformung in die Ausgangsposition der Elastomer Schicht. Der flexible Greifer kann so verschiedene empfindliche und leichte Objekte wie rohe Eier, einen Wasserballon, ein Blatt Papier und eine Öl Dose von 82,1g anheben. Die Objekte halten aufgrund der Elektroadhäsionskraft, die durch das Elektrische Feld in dem Greifer ausgelöst wird [17].



Abbildung 14 Elektrostatischer Softgreifer hebt ein rohes Ei [17]

2.3 Anwendungsfälle von Softgreifern

Die in den vorigen Abschnitten vorgestellten Softgreifer, variieren in ihrer Methodik, dem Aufbau und ihren Einsatzmöglichkeiten. Kein Greifprinzip eignet sich universell für alle Objekte und Anwendungen. Die Gemeinsamkeit der Greifer ist, dass sie die Nachgiebigkeit und Anpassungsfähigkeit von weichen Strukturen nutzen, um weiche Interaktionen zu ermöglichen. Sie können hohe Kräfte aufbauen, um eine Vielzahl an Objekten zu handhaben. Die Greifer kommen in den meisten Fällen ohne viel Sensorik aus, da ihre Anpassungsfähigkeit kleine Positionierungsfehler kompensieren kann und die auftretenden Kräfte durch die Flexibilität nicht sehr groß werden. Zur automatisierten Positionierung ist eine Objekterkennung notwendig.

Interaktionen im menschlichen Umfeld oder in anderen natürlichen Situationen sind vorstellbare Anwendungsgebiete. Es gibt bereits Softgreifer in Form einer menschlichen Hand [18]. Die Finger werden ebenfalls pneumatisch gesteuert. Die Hand kann an menschenähnliche Roboter angebaut werden und könnte als Assistenzroboter zum Einsatz kommen.

Anwendungsfälle, bei denen eine hohe Variationsfähigkeit notwendig ist. Also fast alle Anwendungsfälle außerhalb der Industrie und Produktion eignen sich, wenn der Roboter und Greifer auf die Anwendung angepasst wird. Zum Beispiel der Einsatz bei Expeditionen und Forschungen, die nicht von Menschen durchgeführt werden können. Das Beispiel der Tiefseeforschung wurde bereits erwähnt, aber auch der Einsatz im Weltall, auf dem Mars oder bei Expeditionen in Risikogebieten, mit hoher Radioaktivität, extremen Temperaturen, oder anderer gefährlicher Einflüsse bietet sich an.

Und selbst in der Industrie bei der Lebensmittelhandhabung, beim Verpacken, beim Sortieren oder beim Transportieren können Softgreifer zum Einsatz kommen.

Es ist auch vorstellbar Softgreifer in der Ernte von bestimmten Obst- oder Gemüsesorten einzusetzen. Bei diesen Aufgaben ist es wichtig eine hohe Anpassungsfähigkeit an die Form der Frucht zu haben, und gleichzeitig die empfindliche Frucht nicht zu zerdrücken. Zwei auszeichnende Merkmale der Technik.

3 Entwicklung des Softgreifers

Um der Beantwortung der Forschungsfrage einen Schritt näher zu kommen, wird in diesem Kapitel der Granulat-basierte Softgreifer von Brown entwickelt. Zunächst werden die Motivation und Idee hinter der Entwicklung des neuen Greifers erläutert und der Anwendungsfall festgelegt. Darauffolgend wird der Softgreifer mit den passenden Dimensionen und Funktionen ausgelegt, wodurch Bauteilentscheidungen getroffen werden können, um letztendlich die grundlegende Konstruktion zu entwickeln.

3.1 Grundidee

Die grundlegende Idee der Entwicklung ist es, einen Pick-and-Place Softgreifer zu entwickeln, der Objekte verschiedener Art greifen kann. Die Objekte sollen sich in der Form, der Oberfläche und dem Material unterscheiden können und trotzdem von demselben Greifer gegriffen werden können. Das ist bereits der größte Unterschied zu vielen klassischen industriellen Greifern, die zurzeit im Einsatz sind. Die klassischen Greifer sind für eine bestimmte Aufgabe ausgelegt. Die Roboter sollen möglichst schnell, mit hohen Taktzeiten und schnellen Verfahrgeschwindigkeiten arbeiten, wobei die Greifer genau auf das Objekt angepasst sind. Sie finden beispielsweise Einsatz in der Automobilbranche, um Karosserie am Fließband herzustellen. Hier werden Roboter benutzt, um die Teile von einer Arbeitsstation zur nächsten zu befördern, zu schweißen oder Nieten zu setzen. Der Roboter könnte in der Straße zur Herstellung der Kotflügel installiert sein und diese mit seinem optimierten Greifer sehr effizient handhaben. Dabei ist die Geometrie seines Greifers komplex und mit vielen Aktuatoren, Strukturen und Mechaniken ausgestattet (siehe Abbildung 15).

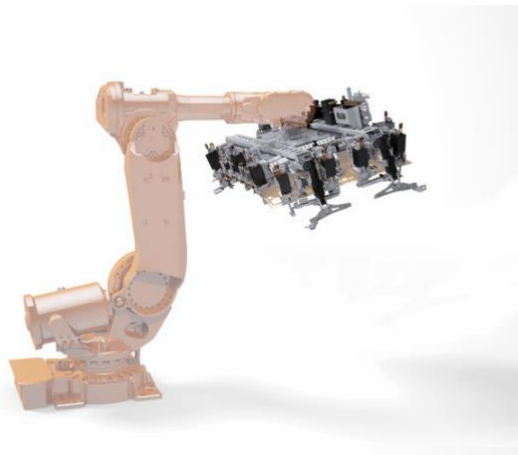


Abbildung 15 Komplexer Greifer für Autokarosserie [19]

Dieser Greifer kann lediglich Kotflügel greifen. Es wurde eine einzelne Produktionsstraße aufgebaut, um Kotflügel herzustellen. Jeder Roboter in dieser Straße benötigt einen speziell angepassten Greifer für die aktuelle Form des Kotflügels. Zwischendurch wird der Kotflügel nämlich gekantet und gebogen und verändert seine Form. Nach jeder Formänderung wird ein neuer Aufbau der Greifstruktur benötigt.

Hier setzt die Softrobotik an. Ein und derselbe Softgreifer soll jede Formänderung des Kotflügels greifen können. Er soll zudem nicht nur Kotflügel, sondern auch Seitentüren, Radhäuser, Seitenwände und andere Karosserieteile handhaben können. Ein solcher Greifer würde enorme wirtschaftliche Vorteile bringen. Es könnten Produktionsstraßen eingespart werden, weil die verschiedenen Bauteile in derselben Straße hergestellt werden könnten und weniger Roboter und Greifer benötigt werden würden. Die Greifer wären nicht mehr so komplex und außerdem kostengünstiger. Dies ist die Grundidee hinter der Softrobotik und dem Greifer, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird.

Es ist eine Optimierung und Einsparung von Arbeitsschritten möglich, die zuvor nicht erreichbar war. Obwohl der hier genutzte Softgreifer noch keine Kotflügel greifen kann, soll verdeutlicht werden, welche Möglichkeiten diese Technik im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und Effizienz haben kann. Dieses Beispiel könnte auf unzählige Anwendungen in verschiedenen Produktionsstraßen bezogen werden.

3.2 Anwendungsfall

In diesem Abschnitt wird der Anwendungsfall des Greifers konkret festgelegt. Die Hauptaufgabe besteht darin, verschiedene Testobjekte erfolgreich zu greifen. Die Testobjekte werden sich in den vier wesentlichen Eigenschaften: Material, Form, Gewicht und Oberfläche unterscheiden.

Ziel ist es, durch Tests und Analysen herauszufinden, welche spezifischen Eigenschaften ein Objekt besitzen muss, um zuverlässig von dem Greifer aufgenommen zu werden. Die maximale Größe der Testobjekte wird auf *Max. Objektgröße* = 50mm x 50 mm x 50 mm begrenzt.

Um die Auswirkungen der Materialeigenschaften zu untersuchen, werden Objekte aus unterschiedlichen Materialien ausgewählt. Dies sind Metalle (Aluminium, unlegierter Stahl, Edelstahl) und Kunststoffe (ABS, PLA, PE, TPE).

Durch die Variation des Materials, verändert sich auch die Oberfläche. Es werden glatte, raue und strukturierte Oberflächen untersucht und getestet. Der Fokus liegt darauf, wie der Greifer mit unterschiedlichen Oberflächen interagiert und ob dies Einfluss auf die Haltekraft hat.






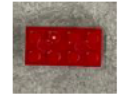


Zudem wird die Auswahl der Objekte verschiedene Formen umfassen. Kubische, zylindrische, sphärische, asymmetrisch und komplexe Formen werden betrachtet. Alle Testobjekte unterscheiden sich in ihrem Gewicht.

Die Ergebnisse werden analysiert, um Muster und Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Objekte und dem Greifverhalten festzustellen.

3.2.1 Testobjekte

Basierend auf dem festgelegtem Anwendungsfall werden acht Testobjekte ausgewählt, die sich in den beschriebenen Eigenschaften unterscheiden und die maximale Objektgröße nicht überschreiten. In Tabelle 1 sind die Testobjekte nach ihrem Material, ihrer Form, ihrer Oberfläche, ihrem Gewicht und ihren Abmaßen unterschieden.

Tabelle 1 Testobjekte

	Objekt	Material	Oberfläche	Form	Gewicht [g]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Abbildung
1	Quader	Stahl	glatt	kubisch	38,4	16	30	30	
2	Mutter M30	Stahl	glatt	hexagonal	55	16	30	30	
3	Feder	Stahl	strukturiert	zylindrisch-komplex	13,4	14	32	14	
4	Zahnrad klein	Stahl	rau	zylindrisch-komplex	6,7	14	13	14	
5	Globus	Aluminium	glatt	sphärisch	14,7	40	44	44	
6	Legostein	Kunststoff (ABS)	strukturiert	kubisch-komplex	2,4	12	32	16	
7	Ring	Kunststoff (PP)	glatt	zylindrisch	2,6	6	34	34	
8	Zahnrad groß	Kunststoff (ABS)	rau	zylindrisch-komplex	11,2	12	40	40	

3.2.2 Weitere Testobjekte

Sobald der Softgreifer erfolgreich optimiert und verbessert wurde und mit diesen Testobjekten erprobt wurde, soll der Anwendungsfall erweitert werden. Dafür werden alltägliche Objekte getestet, die größer als die maximale Objektgröße sind. Es werden Gegenstände ausgewählt, bei denen offensichtlich ist, warum es sinnvoll wäre, den Greifer dafür einzusetzen. Objekte wie Flaschen, Lebensmittel, Werkzeuge oder Stifte werden dafür ausgewählt. Die Übersicht der weiteren Testobjekte ist im Anhang B zu finden.

3.3 Prinzip und Aufbau des Softgreifers

Der Softgreifer wird sich bei der Konstruktion und dem Greifprinzip an der Veröffentlichung von Eric Brown u.a. [1] orientieren. In Abbildung 16 ist der Granulat-basierte Softgreifer dargestellt.



Abbildung 16 Softgreifer von Brown hält ein Ei [6]

Das Prinzip des Softgreifers ist das Vakuumieren eines Kaffee-befüllten Latexballons, um eingeschlossene Objekte zu halten. Durch das erzeugte Vakuum verfestigt sich der Kaffeeballon, weil sich die Körner des Granulats ineinander verklemmen. Dieses Grundprinzip wird in der Entwicklung beibehalten, allerdings sollen einige Optimierungen und Veränderungen getätigt werden.

Die neue Idee besteht darin den Ballon bei der Bewegung auf die Objekte mit Luft aufzupumpen, bevor das Vakuumieren beginnt. Damit soll eine bessere Verteilung des Granulats in dem Ballon erreicht werden. Die Annahme ist zudem, dass sich der Ballon besser um größere Objekte schließen und dessen Form annehmen kann.

Zudem soll das Granulat in dem Ballon verändert werden. Material mit anderen Korngrößen und Eigenschaften soll untersucht und ausgetestet werden, um den Softgreifer zu optimieren.

Um den Aufbau des Softgreifers zu erläutern, wird er in verschiedene Bereiche unterteilt. Der obere Teil der Struktur besitzt eine Verbindung zu der Anschlussgeometrie. Die Geometrie des Roboters ist entscheidend für die Schraubverbindung und hängt von dem spezifischen Model ab.

Für alle Versuche an einem Roboter wird der „Kuka KR 6 R900 sixx“ verwendet. Im Abschnitt 0 ist der Roboter dargestellt, seine Funktion und Anwendungsmöglichkeiten werden dort erklärt sowie die Entscheidung für diesen Roboter erläutert.

Zwischen dem Roboter und dem Greifer sitzt normalerweise eine Anschlussplatte. Der Greifer wird zunächst an dieser Anschlussplatte befestigt, um dann am Roboter befestigt zu werden. Ihre Geometrie ist dementsprechend entscheidend für die Konstruktion des Greifers.

Zur Aktivierung des Greifvorgangs muss Pneumatik in den Greifer integriert werden. Mit einer Schraubverbindung soll der Schlauch an den Greifer angeschlossen werden. Eine Leitung innerhalb des Greifers muss die Zu- und Ableitung von Luft in den Ballon ermöglichen. Dabei

ist sehr wichtig, dass die gesamte Leitung und alle Verbindungsstellen luftdicht sind. Wenn die Luft an einer Stelle entweichen kann, ist es schwer das Vakuum aufrecht zu halten. Es muss eine Dichtung innerhalb des Greifers vorgesehen werden.

Um beim Ansaugen der Luft aus dem Ballon das Granulat nicht mit einzusaugen, ist ein Luftfilter notwendig. Der Luftfilter darf keine größeren Löcher als die Korngröße des Granulats besitzen. Der Filter muss in beide Richtungen funktionieren und darf keinen großen Widerstand leisten, da sonst die Taktzeit des Greifers darunter leidet. Der Luftfilter sollte ebenfalls an den Greifer angeschraubt werden, da eine Klebe- oder Steckverbindung nicht so zuverlässig ist.

Der Hauptteil des Softgreifers ist der Granulat-befüllte verformbare Ballon. Der Luftfilter sollte in den Ballon ragen, um die Luftzufuhr zu gewährleisten. Das Ballonmaterial muss belastbar sein, um das Gewicht der Objekte zu halten und auf den Greifer übertragen zu können. Der Ballon muss fest mit der Struktur des Greifers verbunden sein und dabei luftdicht bleiben.

Die Zweiteilung der Greifer-Struktur ist dafür eine geeignete Lösung, da der Dichtungsring zwischen den Hälften platziert werden kann und der Ballon austauschfähig wird.

Um Schwingung des Ballons beim Verfahren zu vermeiden, sollte die Greifer Struktur eine konkave Kuppel für den Ballon besitzen. Der Ballon soll im Idealfall mit seinen Außenwänden in diese Kuppel gepresst werden. Vor allem für den Greifvorgang ist diese Struktur entscheidend, da die starre Kuppel verhindert, dass der flexible Ballon zu den Seiten wegfließt, wenn er auf das Objekt gepresst wird. Der Ballon soll sich hauptsächlich um das Objekt schließen.

Der beschriebene Aufbau des Granulat-basierten Softgreifers wird im Kapitel 0 „Konstruktion der Softgreifer Struktur“ erneut aufgenommen und in die Realität umgesetzt.

3.4 Kuka Roboter

Der Roboter, der für alle Tests und Versuche verwendet wird, ist der KUKA KR 6 R900 sixx (Abbildung 17).



Abbildung 17 KUKA KR 6 R900 sixx [20]

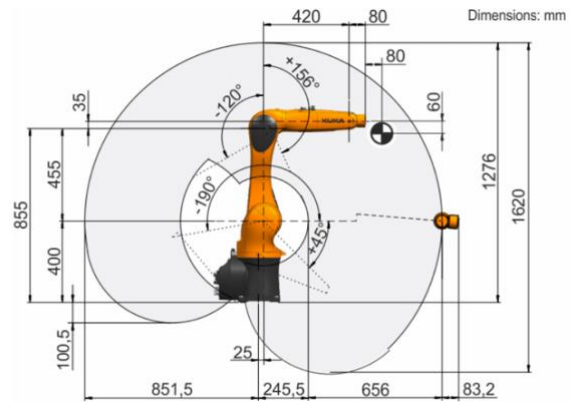


Abbildung 18 Arbeitsraum des KUKA KR 6 R900 sixx [20]

Der Softgreifer wird für diesen Roboterarm ausgelegt und konstruiert. Das heißt nicht, dass der Greifer an keinen anderen Roboter angeschlossen werden kann. Der Softgreifer soll universell an jeden Roboter angeschlossen werden können. Die einzigen Voraussetzungen sind die richtige Anschlussgeometrie und die notwendige Pneumatik.

Der Roboterarm von Kuka besitzt sechs Gelenke und damit sechs Freiheitsgrade. Durch die sechs Freiheitsgrade, hat der Arm einen dreidimensionalen Arbeitsraum. In diesem Arbeitsraum kann der Roboter jeden Punkt in jeder Endeffektor Verdrehung anfahren. Da der Softgreifer rotationssymmetrisch sein wird, ist die Endeffektor Orientierung nicht relevant.

Wie in Abbildung 18 dargestellt, ist der Arbeitsraum kein reiner Kreis. Das Standbein des Roboters, begrenzt ihn in seiner Bewegung nach unten. Die einzelnen Achsen sind nicht alle um 360° verfahrbar. Der Greifarm kann nach vorne weiter als nach hinten verfahren und in der Geometrie und Anordnung des Unter- und Oberarms bei Achse 3, ist ein kleiner Versatz. Dadurch hat der Arm nach vorne eine maximale Reichweite von 901,5mm und nach hinten nur 876,5mm. Die 900 in der Typenbezeichnung des Roboters steht für die maximale Reichweite des Arms, die circa 900 mm beträgt. Durch den Anbau eines Greifers, kann die Reichweite vergrößert werden.

Der Roboterarm wurde für eine Nennlast von 3 kg ausgelegt, um die dynamische Leistung des Roboters zu optimieren. Durch reduzierte Lastmittelpunktabstände und günstige Zusatzlasten kann eine maximale Nutzlast von bis zu 6 kg montiert werden. Alle Daten zu dem Roboter können auch der Bedienungsanleitung und dem Datenblatt des Roboters entnommen werden [20].

Die Entscheidung fiel auf diesen Roboter, weil der Roboter unbenutzt war und im Labor zur Verfügung stand. Zudem erfüllt der Roboter die folgenden Anforderungen des Greifers und des Anwendungsfalls. Für die Tests des Softgreifers ist ein Roboter notwendig, der simple Pick-and-Place Aufgaben ausführen kann. Der Fokus der Forschung liegt auf der Greiftechnik. Der Anwendungsfall beschreibt, dass die Testobjekte zuverlässig gegriffen werden sollen können.

Ein anschließendes kontrolliertes Ablegen rundet den Prozess ab. Eine Aufgabe die im Rahmen des Arbeitsraumes und der Nennlast des Roboters ausführbar ist.

Zudem ist eine integrierte Pneumatik in dem Roboter notwendig, um den Softgreifer anzusteuern. Der Kuka besitzt sechs Pneumatik Ausgänge, hinter denen drei 5/2-Wege Ventile sitzen. Die Ventile können über die Robotersteuerung angesprochen werden. Die Voraussetzung sind damit gegeben das Vakuumieren und das Aufpusten über den Roboter zu steuern.

Außerdem kann für den gesamten Greifvorgang eine Steuerung programmiert werden, welche immer die gleichen Schritte wiederholt. Die Aufpumpzeit, die Geschwindigkeiten und die Kräfte bleiben für jeden Greifvorgang gleich und eine hohe Wiederholgenauigkeit wird erreicht. Ein manueller Versuchsaufbau kann diese Genauigkeit nicht erlangen.

3.5 Grundlegende Pneumatik

Die Entwicklung und Integration des pneumatischen Systems spielen eine entscheidende Rolle für die Entwicklung der Softgreifers. In diesem Kapitel wird die pneumatische Steuerung des Greifers für den Kuka-Roboter im Detail betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf dem Aufbau der pneumatischen Schaltung, der Auswahl des Leitungsdurchmessers, der Auswahl der Vakuumsaugdüse und der Auswahl des Luftfilters. Die Gestaltung dieser Aspekte ist von entscheidender Bedeutung, um eine effiziente und präzise Steuerung des Greifers zu erzielen. Die genaue Verschaltung zu planen und die notwendigen Bauteile auszuwählen, ist einer der ersten Schritte der Entwicklung. Die Konstruktion baut darauf auf, welche konkreten Bauteile mit dem Softgreifer kombiniert werden müssen. Die Gewindegrößen, die Anzahl der integrierten Leitungen und andere Parameter hängen davon ab.

3.5.1 Pneumatische Schaltung

Die Grundlage der Pneumatik bildet die Schaltung, welche die Luftzufuhr, das Vakuumieren und damit die Steuerung der Greifer Bewegung ermöglicht. Ein gutes Verständnis der Schaltung ist notwendig für die Optimierung der Gesamtleistung des Softgreifers. Vakuumierungszeiten, Druckaufbauzeiten und die daraus resultierende Taktzeit hängen unter anderem von der Schaltung ab. Der geplante Schaltplan der Pneumatik ist im Anhang A festgehalten.

Die pneumatische Schaltung für den Softgreifer ist nicht kompliziert aufgebaut. Alle Ventile sind in ausgeschalteter Position dargestellt. Wie in der Schaltung erkennbar, wird das untere der drei 5/2-Ventile in dem Roboter nicht verwendet.

Mit dem obersten 5/2-Ventil wird der Unterdruck gesteuert. Entweder wird die Druckluft von Eingang 1 auf Ausgang 2 geleitet und der Unterdruck ist deaktiviert, oder das Ventil wird umgeschaltet und die Druckluft wird von Eingang 1 auf Ausgang 4 geleitet. Dadurch wird die Vakuumsaugdüse angesteuert und der Unterdruck ist aktiviert. Wenn der Softgreifer auf ein Objekt gefahren wäre, würde er nun das Objekt festhalten.

Nach dem gleichen Prinzip wird die Druckluftzufuhr mit dem mittleren 5/2-Ventil gesteuert. Bei der Schaltung von Eingang 1 auf Ausgang 2, ist die Druckluft deaktiviert. Von Eingang 1 auf Ausgang 4, ist die Druckluft aktiviert und der Ballon würde aufgepustet werden. Die Steuerung der Druckluft ist bei angeschlossenem Softgreifer mit Vorsicht zu behandeln, weil der Ballon platzen kann.

3.5.2 Auswahl des Leitungsdurchmesser

Der Leitungsdurchmesser ist ein entscheidender Faktor für die Effizienz und Geschwindigkeit der Druckluftübertragung. Eine präzise Auswahl ist notwendig, um einen ausgewogenen Volumenstrom zu gewährleisten und gleichzeitig die Energieeffizienz zu maximieren. In diesem Abschnitt wird der Entscheidungsprozess bei der Auswahl des optimalen Leitungsdurchmessers für die Anforderungen des Softgreifers und seiner Bauteile erläutert.

Es gilt, je größer der Leitungsdurchmesser, desto höher der Volumenstrom der Druckluft. Mit höherem Volumenstrom kann mehr Luft in kürzerem Zeitraum bewegt werden. Um möglichst effizient zu arbeiten ist das Ziel die Greifzeit und Taktzeit zu minimieren. Schnelles

Vakuuieren und Unterdruck setzen des Granulat-befüllten Ballons ist dafür erforderlich, welches nur durch einen maximierten Volumenstrom ermöglicht werden kann.

Begrenzend für einen konstanten Leitungsdurchmesser sind die vorhandenen Pneumatik Anschlüsse. Der Roboter hat Pneumatik Ausgänge mit einem Durchmesser von 4mm. Die Pneumatik Aufsätze, die auf die Ausgänge geschraubt werden, haben sogar einen geringeren Durchmesser. Diese Anschlussstellen sind Nadelöhre, welche den Volumenstrom stark begrenzen und Verwirbelungen und Turbulenzen in der Leitung auslösen.

Die genormten Leitungsgrößen sind 4mm, 6mm, 8mm, 10mm und 12mm. Zuleitungen und die Druckluft Versorgung wird meist mit Leitungen von 8-12mm umgesetzt. Die Weiterleitung geschieht in der Regel mit einer 6mm Leitung. Je nach Anwendung bleibt die Leitungsgröße 6mm oder wird auf die kleinste Größe 4mm umgestellt.

Die Auswahl liegt dementsprechend nur zwischen 4mm und 6mm. Die Weiterleitung im Labor ist bereits auf 6mm. Um die Möglichkeiten nicht weiter zu begrenzen, soll der Durchmesser nicht verkleinert werden und die Auswahl fällt auf einen *Leitungsdurchmesser = 6mm*. Mit diesem Leitungsdurchmesser können die anderen pneumatischen Bauteile wie die Vakuumsaugdüse und der Luftfilter ausgewählt werden.

3.5.3 Vakuumsaugdüse

Die Auswahl der Vakuumsaugdüse beeinflusst maßgeblich die Greifqualität und -effizienz. Durch die Betrachtung verschiedener Parameter, wie dem Saugvolumenstrom und dem konstruktiven Aufbau, werden verschiedene Vakuumsaugdüsen miteinander verglichen und eine begründete Auswahl getroffen. Zudem wird Vakuumerzeugung mit der Düse erläutert.

Funktion Vakuumsaugdüse

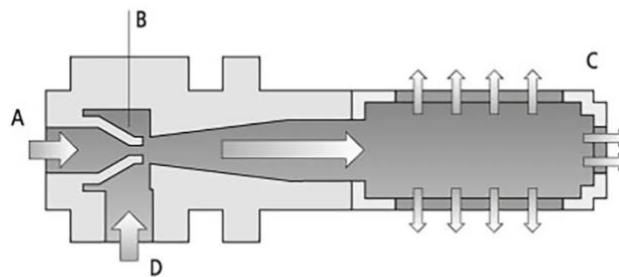





Abbildung 19 Funktionsdarstellung einer Venturi-Düse [21]

Die Funktionsweise pneumatischer Vakuumsaugdüsen basiert auf dem Venturi-Prinzip, welches an der Funktionsdarstellung in Abbildung 19 erklärt werden kann: „Druckluft wird in den Ejektor (A) eingeleitet. Durch die Querschnittsverengung der Treibdüse, auch Venturi-Düse genannt (B), wird die Druckluft beschleunigt. Dabei steigt der dynamische Druck, während gleichzeitig der statische Druck der Luft abnimmt. Nachdem die Luft die Treibdüse passiert hat, entspannt sie sich, und es entsteht ein Vakuum. Dieses Vakuum zieht Luft durch den Vakuumanschluss (D) in den Ejektor, wodurch ein "Saugeffekt" erzeugt wird. Schließlich tritt die Druckluft zusammen mit der angesaugten Luft durch den Schalldämpfer (C) aus dem Ejektor aus. Dieser Prozess ermöglicht die effektive Erzeugung von Vakuum mithilfe von Druckluft und ist besonders in der Handhabung von Objekten und im Bereich der Automation weit verbreitet.“ [21]

Auswahl der Vakuumsaugdüse

Die Auswahl der Venturi-Düse erfolgt nach verschiedenen Kriterien. Die Düse soll bei einem Betriebsdruck von 5 Bar betrieben werden. Dabei soll der Volumenstrom so groß wie möglich sein, um den Ballon schnellstmöglich zu Vakuumieren. Für die austretende Luft soll ein Schalldämpfer am Ausgang installiert sein, um die Lärmbelastung zu reduzieren. Der Anschluss der Leitungen soll mit Steckanschlüssen möglich sein und der Durchmesser der Leitungen soll 6mm betragen. Beim Vergleich sind drei der Vakuumsaugdüsen in die nähere Auswahl gefallen, da sie alle Anforderungen erfüllen. In Tabelle 2 werden sie verglichen.

Tabelle 2 Vergleich Vakuumsaugdüsen von Festo [22]

	Option 1	Option 2	Option 3
Bezeichnung	VN-07-L-T3-PQ2-VQ2-RO1	VN-05-M-T3-PQ2-VQ2-RO1	VN-07-H-T3-PQ2-VQ2-RO1
Abbildung			
Nennweite Lavaldüse	0.7 mm	0.45 mm	0.7 mm
Max. Saugvolumenstrom bei Betriebsdruck	38,8 l/min (bei 6.2 bar)	6.1 l/min (bei 6.3 bar)	16 l/min (bei 2.1 bar)
Konstruktiver Aufbau	T-Form	Gerade Form	T-Form
Max. Vakuum	86 % (bei 5.8 bar)	86 % (bei 6 bar)	88 % (bei 4.7 bar)

Es gibt von Festo zwei verschiedene Gehäusetypen, die T-Form und die gerade Form, in denen die Vakuumsaugdüse erhältlich ist. Die gerade Form bietet sich an, weil der Eingang der Druckluft und der Ausgang des Unterdrucks in einer Linie angeordnet sind. Option 2 könnte sehr eng an den Roboter angebaut werden und die Leitungen würden nicht abstehen. Das Risiko, dass Leitungen den Roboter in der Bewegung einschränken, würde minimiert werden. Da diese Vakuumsaugdüse einen geringen Saugvolumenstrom von 6.1 l/min hat, kommt sie allerdings nicht in Frage. Es muss eine T-Form gewählt werden, die einen höheren Volumenstrom erzeugen kann.

Option 3 kann ausgeschlossen werden, da der maximale Saugvolumenstrom nur 16 l/min beträgt. Option 1 ist eindeutig die beste Vakuumsaugdüse für diesen Anwendungsfall, da sie mit 38,8 l/min den größten Saugvolumenstrom besitzt. Die Auswahl fällt auf die „VN-07-L-T3-PQ2-VQ2-RO1“ von Festo.




3.5.4 Luftfilterauswahl

Am Ende der pneumatischen Schaltung sitzt der Softgreifer mit dem Granulat-befüllten Ballon. Damit die Luft in den Ballon gelangen kann und vor allem herausgesogen werden kann, ist eine Zuleitung erforderlich, die konstruktiv in den Greifer integriert wird. Damit beim Absaugen kein Dreck und Granulat Partikel in die Pneumatik gesogen werden, muss ein Luftfilter am Ende der Leitung sitzen. Der Luftfilter muss an die integrierte Pneumatik Leitung des additiv gefertigten Bauteils anschließbar sein. Außerdem muss der Filter so fein sein, dass kein Korn des Granulats hindurch passen kann. Er sollte außerdem keinen großen Luftwiderstand besitzen, also ebenfalls einen möglichst hohen Volumenstrom zulassen können. Zudem muss der Filter in beide Richtungen funktionieren.

Die Idee ist es einen typischen Schalldämpfer als Filter zu nehmen. Die klassischen Schalldämpfer für pneumatische Anwendungen können einfach mit einem Steckanschluss oder einem Gewinde an die Leitungen angeschlossen werden. Außerdem sind die Löcher meist sehr fein, um die Luft zu verstreuen und Lärmemissionen zu verhindern.

Zur Auswahl stehen verschiedene Modelle, die in Tabelle 3 dargestellt werden.

Tabelle 3 Vergleich Luftfilter von Festo [23]

	Option 1	Option 2	Option 3
Bezeichnung	AMTE-M-LH-M5	UC-QS-4H	U-PK-4
Abbildung			
max. Volumenstrom	255 l/min	350 l/min	580 l/min
Material	Bronze	PE	Bronze
Anschluss	M5 Gewinde	Steckhülse 4mm (QS 4)	Stecknippel 4mm (PK-4)

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Luftfilter von den Materialien, der Anschlussart und dem maximalen Volumenstrom. Der Volumenstrom ist bei den drei Optionen so groß, dass alle in Frage kommen. Die Venturi-Düse begrenzt den Volumenstrom beim Absaugen schon auf maximal 38,8 L/min.

Wichtig ist, dass die Filterlöcher kleiner sind als das Granulat, damit der Filter nicht verstopft. Option 1 und 3 haben grobe Strukturen und neigen zur Verstopfung. Option 2 besitzt eine glatte Oberfläche mit sehr feinen Löchern und bietet sich deshalb an.

Die Auswahl fällt auf Option 2, den Luftfilter „UC-QS-4H“ von Festo. Zudem ist dieser Filter im Labor vorhanden. Der Filter wird auf einen Pneumatik Anschluss gesteckt, der dann in die Greifer Struktur geschraubt wird.

3.6 Entwicklung der Greifer Struktur

Die Konstruktion des Softgreifers erfolgt mit dem klaren Ziel, an die bewährte Struktur von der Veröffentlichung von Brown anzuknüpfen, während gleichzeitig die konkreten Anforderungen und Randbedingungen berücksichtigt werden. In diesem Kapitel wird der detaillierte Aufbau der Greifer Struktur erläutert, indem aus den grundlegenden Anforderungen an die Konstruktion, Dimensionen und Bauteilentscheidungen abgeleitet werden.

Es wird darauffolgend das kosteneffizienteste, schnellste und sinnvollste Fertigungsverfahren für dieses Bauteil ausgewählt, um am Ende die konkrete Umsetzung in der Konstruktion vorzustellen.

3.6.1 Konkrete Anforderungen an die Konstruktion

Der grundlegende Anwendungsfall des Greifers steht fest. Die verschiedenen Bauteile wurden ausgewählt. Jetzt fehlt noch der Korpus des Greifers, der die verschiedenen Bauteile so verbinden muss, dass die Funktionen erfüllt werden. Die Bauteile müssen anbaufähig sein und auch der Greifer selbst muss an dem Roboter befestigt werden können.

Für die Konstruktion wird nach dem Top-Down Prinzip vorgegangen. Von den äußeren Anforderungen von dem Roboter und den Objekten, wird auf die groben äußeren Dimensionen des Greifers und den Bauraum geschlossen. Die einzelnen Funktionen werden in kleinere Untereinheiten und Subsysteme aufgeteilt, um dann in dem definierten Bauraum zusammengefügt zu werden.

Dimensionierung des Softgreifers

In dem Anwendungsfall wurde die maximale Objektgröße auf 50x50x50 mm festgelegt. Das Ziel ist es alle Objekte, die in diesen Dimensionen liegen mit dem Greifer aufzunehmen. Unabhängig von der Form, des Materials und anderer Eigenschaften des Objektes. Der Greifer soll universell sein.

Da für das Greifen ein gefüllter sphärischer Ballon verwendet wird, wie es auch bei Brown gemacht wurde, ist die Dimension dieses Ballons entscheidend für die Dimension des gesamten Greifers.

Die Festlegung des optimalen Ballondurchmessers für diese Objektgrößen, kann vorher nur schwer präzise bestimmt werden. Der beste Durchmesser kann nur durch verschiedene Tests herausgefunden werden. Es ist eine gute Abschätzung notwendig, die sich an den Forschungen von Brown orientiert, und die physikalischen Prinzipien des Greifprinzips in Betracht zieht. Der Ballon sollte größer sein als das Objekt, da er sich um das Objekt herumschließen muss. Das zunächst offensichtliche und logischste Greifprinzip ist die Formschlüssigkeit und der Grad der umschlossenen Hinterschneidungen. Je mehr Material und Volumen zur Verfügung stehen, um die Objekte zu umschließen, desto besser.

Es wird zunächst ein Ballondurchmesser gewählt, der doppelt so groß ist wie die Objekte. Annähernd soll der Durchmesser:

$$D_{Ballon} = 100mm$$

erreicht werden.

Dieser Durchmesser soll den Bauraum in der Länge und Breite beschränken. Die Greifer Struktur soll nicht über den Ballon hinausragen. Es gilt $D_{Ballon} = D_{Bauraum}$.

Die Höhe des Bauraums ergibt sich aus der Integration aller Schraubenverbindungen und der Pneumatik. Eine grobe Annäherung ist eine Höhe von:

$$h_{Bauraum} = 100mm$$

Zu Hoch sollte der Greifer nicht werden, da die Hebelwirkung sonst zu groß werden kann. Der zur Verfügung stehende Bauraum ist dementsprechend ein Zylinder, wie in Abbildung 20 dargestellt.

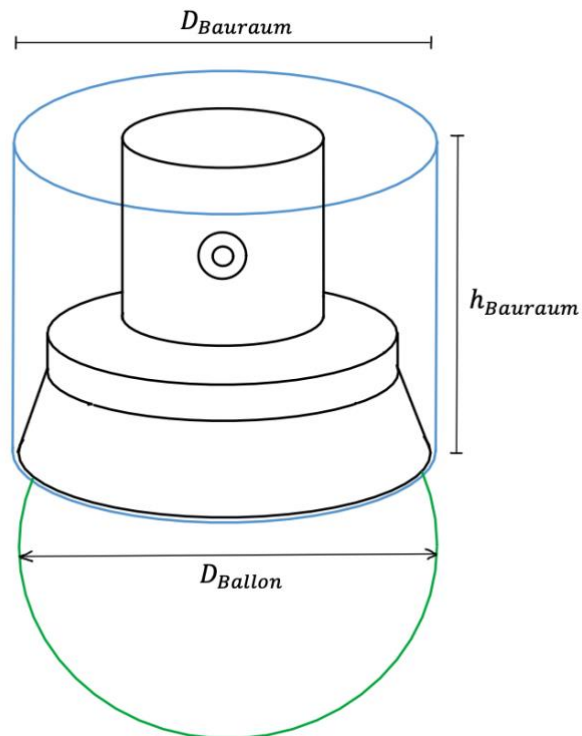


Abbildung 20 Bauraum der Softgreifer Struktur

In der Skizze wird die Struktur des Greifers bereits angedeutet. Die Dimensionen der anderen Durchmesser und Längen, lassen sich mit dem definierten Bauraum nun gut abschätzen und festlegen. Der Rahmen ist erstmal gesetzt.

Anbaufähigkeit an den Roboter

Für die Anbaufähigkeit des Greifers an den Roboter, ist die Anschlussplatte für den Roboter Greifer entscheidend, sowie der Flansch des Roboters. Es soll eine Schraubenverbindung vorgesehen werden, die den Greifer am Roboterarm fixiert. Die Schraubengrößen hängen von den vorhandenen Gewinden am Roboter ab. Dadurch ergibt sich der Durchmesser der Durchgangsbohrungen, sowie die vorgegebene Platzierung der Löcher. In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die technische Zeichnung des Roboterflansches sowie die Anschlussplatte abgebildet.

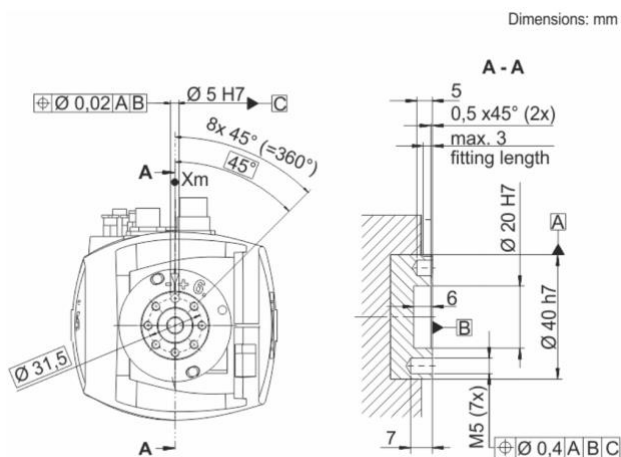


Abbildung 21 Technische Zeichnung Roboterflansch



Abbildung 22 Anschlussplatte

Der Anbau des Greifers an den Roboter verläuft in zwei Schritten. Erst wird die Anschlussplatte aus Aluminium mit dem Softgreifer verschraubt. Dann wird der Greifer mit der fixierten Anschlussplatte an den Roboter angebaut.

Für den Anbau der Anschlussplatte an die Greifer Struktur, müssen zwei Gewindebohrungen in dem Bauteil vorgesehen werden. Diese sollten auf dem Kreis mit Durchmesser $D_{1A} = 31,5\text{mm}$ liegen. Um einheitliche Schraubengrößen zu verwenden, sollten dies M5 Gewindebohrungen sein.

Für den zweiten Schritt, den Anbau des Greifers mit der Anschlussplatte, an den Roboter, gibt es konstruktiv zwei Optionen diese Verbindung umzusetzen.

Entweder es wird ein Kranz um den Hauptzylinder des Bauteils konstruiert, auf dem die Schrauben platziert werden, so wie es beim Softgreifer in Abbildung 16 von Brown realisiert wurde (Option 1). Oder es wird eine Aussparung für die Schrauben in dem Hauptzylinder des Greifers gelassen, sodass die Schrauben nicht außerhalb des Hauptzylinders liegen. Die Aussparungen müssten so groß sein, dass die Schrauben eingesetzt werden können und dann mit einem Schraubenschlüssel festgezogen werden können (Option 2).

Würde ein Kranz vorgesehen werden, auf dem die Schrauben liegen, der außen um den Hauptzylinder liegt, dann würde der Hauptzylinder auf einen Durchmesser von etwa 23mm schrumpfen müssen (siehe Abbildung 23, Option 1). Mit der Integration der Schrauben in den Zylinder, kann der Durchmesser auf 40mm bleiben (siehe Abbildung 23, Option 2).

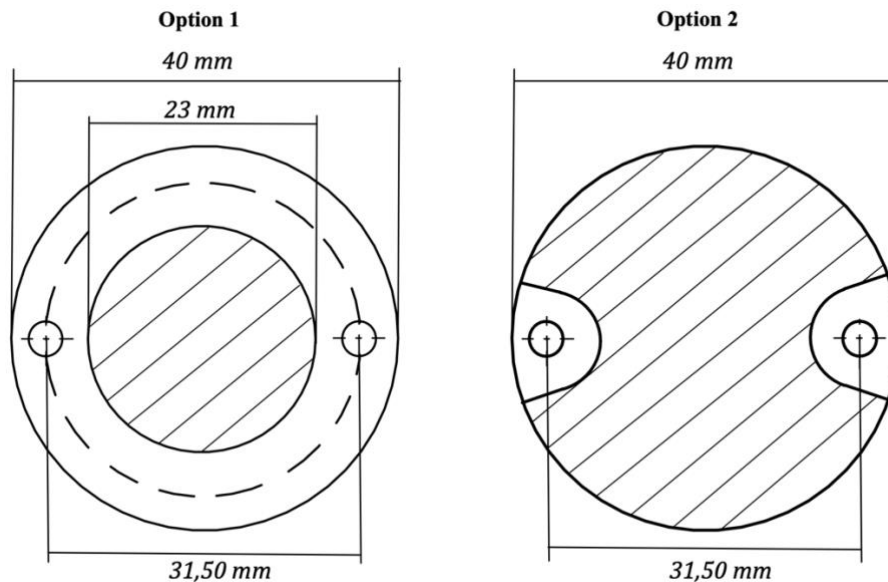


Abbildung 23 Querschnittsskizzen der oberen Softgreifer Struktur

Der Querschnitt des Hauptzylinders bleibt bei der Konstruktion von Option 2 am größten. Je größer die Querschnittsfläche, desto größer die Belastungsfähigkeit und Stabilität des Greifers. Kerbwirkungen werden durch die Abrundungen vermieden. Die Auswahl fällt auf Option 2.

Integration der Pneumatik

Um die Druckluft in den Greifer zu führen und absaugen zu können, muss der 6mm Druckluftschlauch an die Softgreifer Struktur angeschlossen werden können. Eine Schraubverbindung dafür vorzusehen ist die klassische Methode. Ein Adapter mit einem M5 Gewinde und einer Steckanschlussmöglichkeit für den Schlauch kann an den Softgreifer geschraubt werden. Der geeignete Adapter ist in Abbildung 24 dargestellt.



Abbildung 24 Pneumatik Steckverschraubung von Festo



Abbildung 25 Steckverschraubung mit Luftfilter

Um diesen Adapter an den Hauptzylinder des Softgreifers anzubauen, muss zunächst ein entsprechendes M5 Gewinde in die Struktur integriert werden. Außerdem sollte die Verschraubung nicht direkt an die gekrümmte Fläche des Zylinders vorgesehen werden. Es sollte konstruktiv eine ebene Fläche für die Verschraubung geschaffen werden, sodass der Adapter gleichmäßig an die Struktur gepresst wird und luftdicht bleibt.

Hinter dem Pneumatik Anschluss sollte dann eine Druckluftleitung vorgesehen werden, die die Luft von dem Eingang zum Ausgang leitet. Am Ausgang muss der Luftfilter sitzen, der

verhindert, dass das Granulat in die Leitungen gesaugt wird. Dies könnte wie in der Skizze in Abbildung 26 umgesetzt werden.

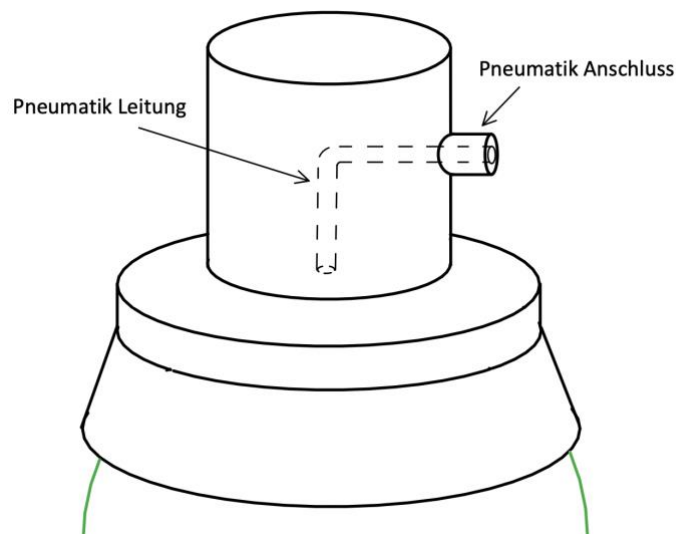


Abbildung 26 Integration Pneumatik Anschluss und Leitung

Der Luftfilter kann, wie die Leitungen, in eine Pneumatik Steckverschraubung von Festo gesteckt werden. Die Steckverschraubung kann wie bereits beim Eingang in ein M5 Gewinde geschraubt werden. Der vorhandene Luftfilter besitzt allerdings nur einen Leitungsdurchmesser von 4mm. Es wird dafür eine kleinere Steckverschraubung benötigt. Die Gewindegröße bleibt gleich. In Abbildung 25 ist der Luftfilter mit der Steckverschraubung abgebildet, der an das Bauteil angeschraubt wird.

Luftdichter Anschluss des Ballons

Für den Anbau des Granulat-befüllten Ballons müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Der Ballon muss anbaufähig sein, er muss austauschbar sein und er muss luftdicht mit der Pneumatik verbunden werden.

Um den luftdichten Anbau des Ballons zu gewährleisten, muss der Greifer zweigeteilt sein, so wie der Greifer von Brown. Eine Schraubverbindung zwischen den beiden Bauteilen ist deshalb notwendigerweise vorzusehen, um die beiden Teile miteinander zu verbinden.

Um die Verbindung luftdicht zu gestalten, muss eine Dichtung integriert werden. Dieser Dichtungsring sollte zwischen den beiden Bauteilen des Softgreifers liegen. Mit der Schraubverbindung muss ein Anpressdruck auf den Dichtungsring erzeugt werden, der dafür sorgt, dass keine Luft entweichen kann. Zwischen den Bauteilen muss also ein Spalt vorgesehen werden. Wenn der Dichtungsring eingesetzt wird, sollte er über das Bauteil herausragen, um den ersten Kontakt zum oberen Bauteil zu schaffen, um dann von den Schrauben zwischen den Bauteilen gepresst zu werden.

Den Ballon an dem unteren Bauteil zu befestigen ist nicht trivial. Es soll ein typischer Luftballon verwendet werden, wobei die Größe und Stärke für die Versuche variiert wird. Der Aufbau des Ballons wird trotzdem ähnlich sein. Die Ballons haben typischerweise eine kleine Öffnung mit einem längeren Hals, bevor die Kugelförmige Ausbuchtung anfängt. An der Öffnung ist ein stärkerer Gummiring. Bei der Befestigung muss der Ballon unbeschädigt bleiben und die Elastizität vom Latex muss genutzt werden. Der Ballon sollte mit seinem

Öffnungsring über eine Struktur gestülpt werden. Die Struktur muss oben dicker sein als unten, damit der Öffnungsring des Ballons nicht zurück über die Struktur rutschen kann.

An dem unteren Bauteil muss in der Mitte ein Loch vorgesehen werden, durch die der Hals des Ballons von unten durchgezogen werden kann. Auf der oberen Seite muss eine zylinderförmige Struktur sitzen, die oben dicker ist als unten, um den Öffnungsring des Ballons dort drüber zu stülpen. Durch dieses Loch, durch den der Ballon durchgezogen wird, muss außerdem der Luftfilter passen, um in den Ballon zu ragen.

Oben an der verjüngten Zylinderförmigen Struktur, muss der Dichtungsring platziert werden. Durch die weiter außen liegende Schraubenverbindung wird der Dichtungsring angepresst und die Verbindung abgeschlossen. In der Skizze in Abbildung 27 wird verdeutlicht, wie dieses untere Bauteil des Softgreifers aussehen könnte. Der Ballon und der Dichtungsring werden ebenfalls dargestellt.

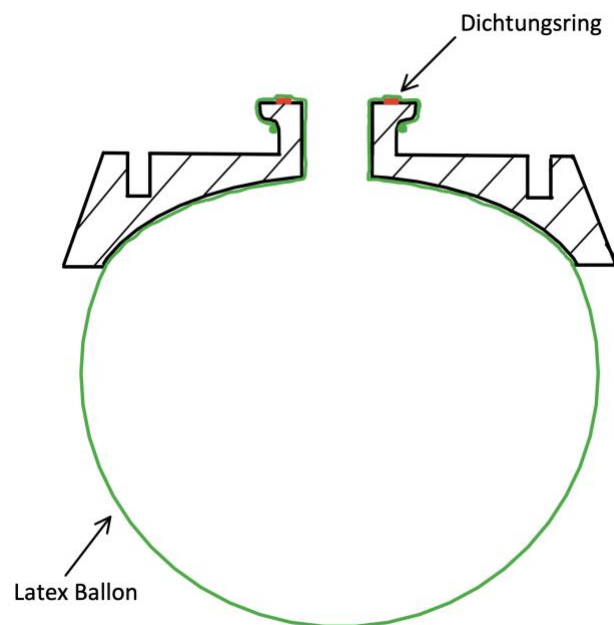


Abbildung 27 Untere Hälfte des Softgreifers (Schnittdarstellung)

Durch den hervorstehenden Zylinder der unteren Hälfte, muss die obere Hälfte ebenfalls angepasst werden. Es muss eine Zylinderförmige Aussparung in der oberen Struktur vorgesehen werden. Es muss genug Platz sein für das Latex des Ballons, wenn er über den Zylinder gestülpt wird. Die obere Hälfte der Softgreifer-Struktur könnte wie in der Skizze (Abbildung 28) aussehen.

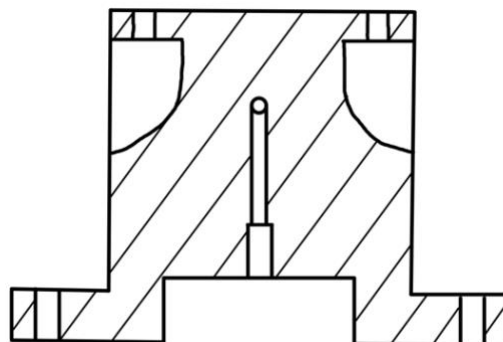


Abbildung 28 Obere Hälfte des Softgreifers (Schnittdarstellung)

Gewindeintegration

Die Integration von Gewinden in die beiden Bauteile des Softgreifers ist essenziell für den Anbau der Steckverschraubung für die Pneumatik, sowie für die Schraubenverbindung zwischen den beiden Bauteilhälften. Klassischerweise werden Gewinde mit einem Gewindebohrer in Metall geschnitten. Allerdings wird das Bauteil voraussichtlich additiv gefertigt, um den Prototyp möglichst schnell und kosteneffizient zu fertigen. Bei additiven Bauteilen aus Materialien wie Kunststoff oder Harz kann die klassische Schneidmethode nicht direkt übernommen werden. Das Gewinde in eine Kunststoffbohrung zu schneiden, birgt die Gefahr, dass die Belastung nicht ausgehalten wird. Die Schraube kann schnell überdrehen, was zu einer Beschädigung des Gewindes und seiner Zacken führen kann und die Funktionalität unmöglich macht. Bei additiven Bauteilen kann das Gewinde außerdem direkt in die Konstruktion integriert werden und 3D-gedruckt werden. Diese Möglichkeit birgt allerdings die gleichen Gefahren, zudem kann eine Druckungenauigkeit das Gewinde von Anfang an unbrauchbar machen.

Die sicherste Methode ein brauchbares und belastbares Gewinde in additive Bauteile zu integrieren ist der Einsatz von Gewindeeinsätzen (Abbildung 29). Diese Messingeingsätze werden in die vorgesehene Bohrung eingeschmolzen. Die Einsätze haben an ihrer Außenwand gegenüberliegende spiralförmige Rändelmutter. Dieses Muster an der Außenwand, verhindert die Verdrehung und Verschiebung nach dem Einschmelzen.



Abbildung 29 Gewindeeinsatz für additive Bauteile [24]

Diese Methode der Gewindeintegration ist die Zuverlässigste für additive Bauteile und wird deshalb für den Prototyp verwendet.

3.6.2 Auswahl des Fertigungsverfahrens

Die Auswahl des geeigneten Fertigungsverfahrens erfolgt unter verschiedenen Kriterien. Das Bauteil soll ein Funktionsprototyp werden. Der Prototyp soll nicht nur zur Anschauung dienen. Die Fertigung sollte deshalb kostengünstig und schnell sein, damit eine erneute Iteration möglich ist und nicht zu teuer wird, falls Fehler auftreten.

Es müssen außerdem Bauteilanforderungen berücksichtigt werden. Das Bauteil benötigt eine integrierte Leitung für die Pneumatik und besitzt einige Hinterschnidungen. Viele Fertigungsverfahren stoßen bei diesen Herausforderungen an ihre Grenzen. Die einzigen Fertigungsverfahren, die eine eingeschlossene Leitung präzise fertigen können, sind das Gießen, CNC-Bearbeitung oder die additive Fertigung. Die Bauteile zu gießen, erfordert eine speziell angefertigte Gussform. Der gesamte Prozess ist sehr kosten- und zeitaufwendig und kommt auf keinen Fall für die Fertigung eines Prototyps in Frage.

Eine CNC-Bearbeitung ist für dieses Bauteil außerdem sehr aufwendig und würde zu keinem guten Ergebnis führen. Die eingeschlossene Leitung ist die größte Herausforderung.

Die kosten- und zeiteffizienteste Lösung ist die additive Fertigung. Gerade durch die Möglichkeit, komplexe Bauteile, ohne einen erhöhten Kosten- oder Zeitaufwand zu fertigen, zeichnet sie sich aus. Kleine Anpassungen können schnell und einfach in das Bauteil integriert werden. Die Bauteile sind leichter und es wird nur wenig Material verschwendet. Die additive Fertigung eignet sich optimal für die Fertigung des Softgreifer-Prototyps.

Auswahl des additiven Verfahrens

Die additive Fertigung bietet eine Menge verschiedener Verfahren. Für die Fertigung dieses Prototyps kommen zunächst nur SLA, SLS oder FDM in Frage. Die Verfahren werden knapp vorgestellt, um danach eine begründete Auswahl zu treffen.

Bei der Stereolithografie (SLA) wird flüssiges Photopolymer durch einen UV-Laser schichtweise ausgehärtet. Es eignet sich gut für präzise, hochauflösende Modelle und Prototypen. Die Bauteile sind außerdem sehr belastbar. Komplexe innere Geometrien, wie eingeschlossene Leitungen können problemlos hergestellt werden.

Beim Selektiven Lasersintern (SLS) wird Pulvermaterial schichtweise aufgetragen und dann durch einen Laser lokal erhitzt und verschmolzen. Dieses Verfahren ermöglicht die Verwendung einer Vielzahl von Materialien wie Kunststoffe, Metalle und Keramiken. Der Vorteil des SLS-Verfahrens liegt in seiner Fähigkeit, komplexe Bauteile ohne Stützstrukturen und mit einer hohen Materialausnutzung herzustellen. Es eignet sich besonders für Funktionsprototypen, Kleinserienproduktion und Anwendungen, bei denen hohe Festigkeit und Detailgenauigkeit erforderlich sind.

Fused Deposition Modeling (FDM) ist eine der am weitesten verbreiteten 3D-Drucktechnologien. Ein thermoplastisches Filament wird durch eine beheizte Düse extrudiert und schichtweise abgelegt, um das gewünschte Objekt aufzubauen. Es wird für Prototypen, maßgeschneiderte Bauteile und Anwendungen eingesetzt, bei denen eine hohe Flexibilität und schnelle Produktion erforderlich sind. [25]

Mit allen drei Verfahren können die Bauteile für den Softgreifer problemlos hergestellt werden. Die Leitung in dem Bauteil ist kein Problem und der Zeitaufwand ist bei allen Verfahren ähnlich. Die größten Unterschiede bei den Verfahren liegen in der Präzision, der Belastungsfähigkeit und der Kosten. FDM ist das kostengünstigste Verfahren mit keiner hohen Präzision oder Belastungsfähigkeit. SLA ist sehr präzise bei hoch komplexen und kleinen Bauteilen, ist aber dementsprechend teurer. SLS hingegen überzeugt durch seine Belastungsfähigkeit, da Metall als Pulvermaterial eingesetzt werden kann. Das Metallpulver ist, sowie das Harz für das SLA-Verfahren kostspielig.

Das FDM-Verfahren ist ausreichend, da keine hohe Präzision und keine extreme Belastungsfähigkeit notwendig sind.

3.6.3 Konstruktion der Softgreifer Struktur

Der letzte Schritt nach der ausführlichen Planung und Auslegung der Softgreifer Struktur, ist die Konstruktion. Nach der Berücksichtigung der verschiedenen Faktoren, wie der Funktionsintegration, der Zusammenbaufähigkeit, der Fertigung und der Kostenfaktoren, müssen die abgeleiteten Dimensionen und Skizzen in CAD konstruiert werden.

Die obere Greifer Struktur (Abbildung 30, links), ist der Teil, der mit dem Roboter verschraubt wird. Außerdem ist der Eingang, sowie der Ausgang für die Pneumatik in diese Struktur integriert. Am Ausgang der Pneumatik sitzt später der ausgewählte Luftfilter.

Die untere Struktur des Softgreifers (Abbildung 31, rechts), erfüllt die Funktion den Granulatbefüllten Ballon zu halten. Sie sorgt ebenso dafür dem Ballon eine Stützstruktur zu liefern und besitzt die Aussparung für die Dichtung und den Ballon. Die technischen Zeichnungen beider Bauteile sind im Anhang C angefügt.

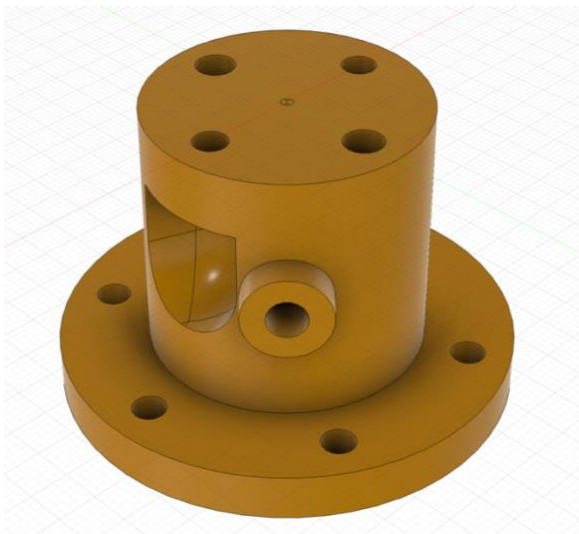


Abbildung 30 CAD-Konstruktion - Obere Softgreifer Struktur



Abbildung 31 CAD-Konstruktion - Untere Softgreifer Struktur

Beim Zusammensetzen der beiden Hälften und der Schnittdarstellung des Softgreifers, wird die Funktionsweise und der Zusammenbau deutlich. In Abbildung 32 werden zwei Schnittdarstellungen abgebildet, um das Innere der Bauteile zu verstehen.

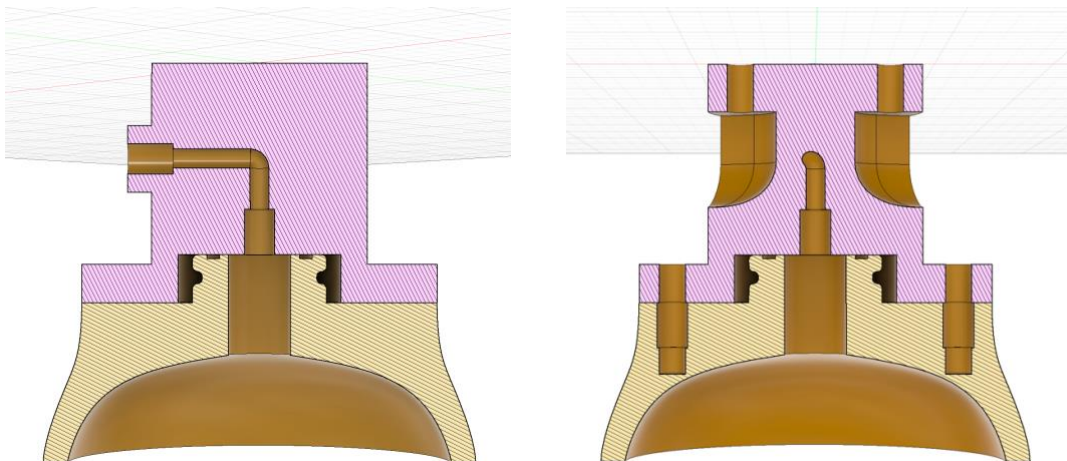


Abbildung 32 Schnittdarstellungen der CAD-Konstruktion des Softgreifers

3.7 Zusammenbau des Softgreifers

In diesem Kapitel wird der gesamte Prozess von der Konstruktion und dem CAD-Modell, bis hin zu dem finalen funktionstüchtigen Softgreifer beschrieben. Der Zusammenbau wird in sechs Schritten beschrieben.

1. Bauteile im FDM-Verfahren drucken

Im ersten Schritt müssen die digitalen CAD-Modelle additiv gefertigt werden. Für die Fertigung wird zunächst das CAD-Modell in das richtige Dateiformat exportiert. Im Slicing-Programm werden beide Bauteile im Bauraum platziert und die Orientierung im Drucker festgelegt. Durch die richtige Orientierung wird die Oberflächenqualität und die Materialnutzung optimiert. Verschiedene Druckparameter wie Wandstärke, Ausfüll-Muster und Düsentemperatur werden festgelegt, bevor der G-Code für den Druck erstellt wird. Als Druckmaterial wird PLA ausgewählt, da es kostengünstig und simpel zu verarbeiten ist. Nach dem Druck werden die Stützstrukturen entfernt und beide Bauteile sind fertiggestellt.

2. Gewindebuchsen einbauen

Im nächsten Schritt müssen die Gewinde integriert werden. Im Kapitel 3.6.1 wurde bereits erläutert, dass hierfür Gewindebuchsen in die Bauteile eingesetzt werden sollen. Die Gewindebuchsen aus Messing werden mit einem LötKolben erhitzt und in die vorgesehenen Bohrungen eingeschmolzen. Der Druck der Bauteile ist sehr gut und präzise geworden. Die Bohrungen sind maßgetreu und die Gewindebuchsen lassen sich wie geplant, in die Bauteile einschmelzen (Abbildung 33).

3. Luftfilter, Druckluftanschluss und Schrauben anbauen

Mit den eingeschmolzenen Gewindebuchsen können alle weiteren Bauteile an die Greifer Struktur angeschraubt werden und der Greifer ist bereit, um fertiggestellt zu werden. Es werden am oberen Bauteil des Greifers, der Luftfilter, die Pneumatik-Steckverbindung und die Schrauben eingesetzt (Abbildung 33). In diesem Schritt fällt auf, dass die Durchgangsbohrungen für die sechs Schrauben, zu klein ausgelegt wurden. Die Schrauben mussten mit Gewalt in das Plastik geschraubt werden, obwohl sie ohne Widerstand durch das Loch passen sollten. Die Löcher wurden erneut aufgebohrt, um das Problem zu lösen. Die Steckverbindungen für die Pneumatik konnte problemlos an das Bauteil geschraubt werden. Sowohl die innere Leitung als auch die beiden Anschlussstellen sind luftdicht.

4. Luftballon und Dichtungsring anbauen

Im nächsten Schritt muss die Greifeinheit des Softgreifers vorbereitet werden. Dazu wird ein handelsüblicher Luftballon mit 30cm Durchmesser (Luft befüllt) verwendet. Der Ballon und der Dichtungsring werden an das untere Bauteil angebaut. Als erstes wird der Dichtungsring in die vorgesehene Aussparung gelegt. Darauf folgend wird der Hals des Ballons von unten durch das Loch in der Mitte gezogen. Der Ballon wird dann über die Struktur und den Dichtungsring gestülpt und bleibt in der Position hängen. In Abbildung 33 wird dieser Arbeitsschritt deutlich.

5. Ballon mit Granulat befüllen

Der Luftballon wird mit Hilfe eines Trichters mit gemahlenem Kaffee als Granulat befüllt. Das Granulat wird so weit aufgefüllt, bis der Ballon komplett aufgefüllt ist und leicht unter Spannung steht. Bei der Entwicklung der zweiten Version des Softgreifers in Kapitel 4.2, wird die Auswahl des Ballons und des Granulats näher betrachtet und optimiert.

6. Beide Greifer Hälften verbinden

Im letzten Schritt müssen die beiden Hälften des Softgreifers miteinander verschraubt werden. Für eine bessere Kraftverteilung in dem Bauteil, werden Unterlegscheiben eingesetzt.

Der Luftaustritt sollte im Idealfall durch die Anpresskraft der Schrauben auf den Dichtungsring verhindert werden. Das Ende der Pneumatik Leitung ragt in Form des Luftfilters in den Ballon hinein und ermöglicht das Absaugen und Aufpusten der Luft. Damit ist der erste Prototyp des Softgreifers fertiggestellt.

Die sechs Schritte des Zusammenbaus sind in Abbildung 33 dargestellt.

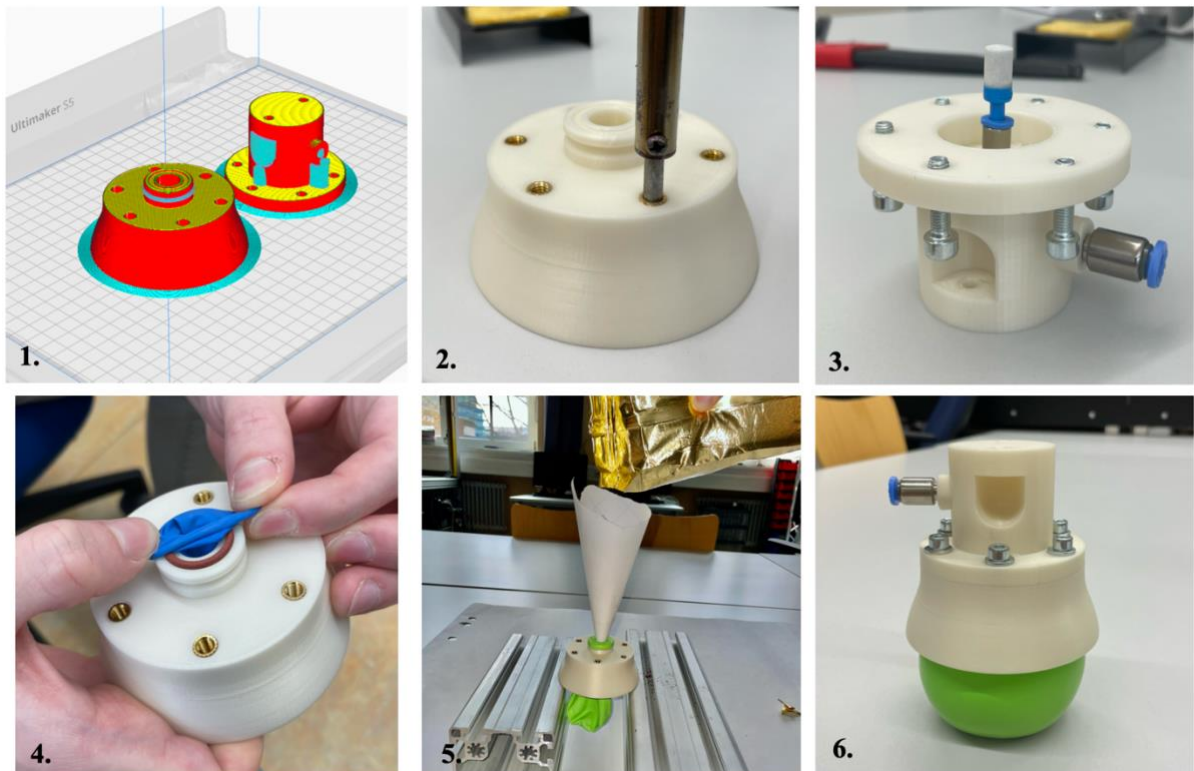


Abbildung 33 Zusammenbau des Softgreifers

4 Versuche zur Optimierung und Analyse des Softgreifers

In diesem Kapitel soll jeder Aspekt des Softgreifer Prototyps und seines Greifvorgangs systematisch betrachtet werden, um ein näheres Verständnis der Technik zu erhalten. Zunächst soll der Softgreifer optimiert werden. Dafür werden der Aufbau, die Funktion, der Betriebsdruck, der Ballon, das Granulat, die Fertigung und die Haltekräfte des Softgreifers in den ersten beiden Versuchen analysiert. Im Versuch 3 liegt der Fokus auf der Anpresskraft und der physikalischen Beschreibung des Softgreifers. Im abschließenden Versuch 4, wird der finale Prototyp mit willkürlichen Testobjekten getestet, um eine Aussage zu der Universalität des Greifers treffen zu können und den ersten Teil der Forschungsfrage zu beantworten. Aus der allgemeinen Arbeit mit dem Softgreifer und vor allem aus der Analyse von Versuch 3 sollen Aussagen zum zweiten Teil der Forschungsfrage, den zukünftigen effektiven Einsatzgebieten und Anwendungsmöglichkeiten, getroffen werden.

4.1 Versuch 1 – Erste Funktions- und Greiftests mit Softgreifer-Prototyp

4.1.1 Einleitung

Der Versuch 1 mit dem Prototyp des Softgreifers, soll die Funktionsweise des Softgreifers testen. Es soll erprobt werden, ob alle Leitungen und Anschlüsse luftdicht sind. Es soll herausgefunden werden, ob die Pneumatik mit den ausgewählten Bauteilen und Leitungsdurchmesser ausreicht, um das Granulat in dem Ballon zu verfestigen und die Testobjekte zu halten. Außerdem können erste Beobachtungen gemacht werden, ob der Ballon und das Granulat gut ausgewählt wurden, um dauerhaft eingesetzt zu werden.

4.1.2 Material

- Softgreifer-Prototyp V1:
 - o Granulat
 - Gemahlener Kaffee
 - Mahlgrad: Mittel
 - Korngröße: $d_{\text{kaffee}} \approx 600 - 1200\mu\text{m}$
 - o Ballon
 - Material: Naturkautschuklatex (Latex)
 - Ballondurchmesser luft-befüllt: $D_{\text{Luft}} = 300\text{mm}$
 - Ballondurchmesser granulat-befüllt: $D_{\text{Granulat}} = 78\text{mm}$
 - Wandstärke: $t = 0,25\text{mm}$
- Testobjekte (siehe Kapitel 0)
- Vakuumsaugdüse „VN-07-L-T3-PQ2-VQ2-RO1“ von Festo
- Pesola Federwaage 1000g/10g mit $\Delta m_p = \pm 25\text{g}$

4.1.3 Versuchsdurchführung

Der Softgreifer-Prototyp V1 wird an eine pneumatische Schaltung angeschlossen, bei der ein manuell gesteuertes Ventil, die Druckluftzufuhr steuert. Der Betriebsdruck wird zunächst auf $p = 3\text{ Bar}$ eingestellt. Zwischen den Softgreifer und das Ventil wird die Vakuumsaugdüse in

Reihe geschaltet. Bei Öffnung des Ventils wird durch die Unterdruckerzeugung in der Lavaldüse, die Luft aus dem granulat-befüllten Ballon des Softgreifers gesaugt. Durch diesen Unterdruck soll sich der befüllte Ballon verfestigen und eingeschlossene Objekte halten. In Abbildung 34 wird der Versuchsaufbau dargestellt.

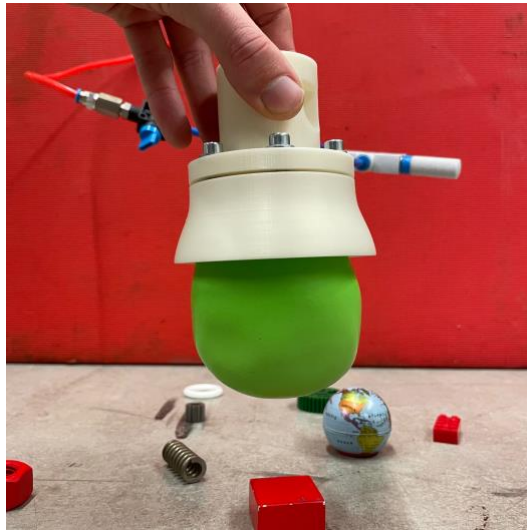


Abbildung 34 Versuchsaufbau - Versuch 1

Der Greifvorgang:

1. Kneten des granulat-befüllten Ballons, für eine gleichmäßige Verteilung des Granulats
2. Den Softgreifer manuell auf ein Objekt drücken, sodass sich der Ballon um das Objekt schließt
3. Öffnung des Ventils, zur Aktivierung des Unterdrucks
4. Anheben des Softgreifers

Versuch 1.1

Der beschriebene Greifvorgang wird mit allen acht Testobjekten durchgeführt. Für die Auswertung wird an den Testobjekten gezogen und die maximale Haltekraft wird qualitativ dokumentiert. Der Betriebsdruck wird auf $p = 3 \text{ Bar}$ eingestellt.

Versuch 1.2

Im nächsten Versuch wird der Betriebsdruck auf $p = 5 \text{ Bar}$ erhöht und die acht Testobjekte werden erneut gegriffen. Die Annahme ist, dass bei erhöhtem Druck auch die maximale Haltekraft steigt.

Die maximale Haltekraft ($\vec{F}_{H,max}$) wird nun mithilfe der Pesola Federwaage bestimmt. Die Pesola wird an das Objekte geklemmt und so lange gezogen, bis das Objekt abfällt. Dadurch kann die Zugmasse der Pesola (m_p), und auch die Zugkraft (\vec{F}_p) der Pesola, stetig erhöht werden, bis die maximale Zugkraft erreicht ist. Unter Einberechnung der Gewichtskraft der Testobjekte (\vec{F}_g), mit ihrer Eigenmasse (m_x), ergibt sich daraus die maximale Haltekraft des Greifers für das Testobjekt.

Der Messaufbau und die verschiedenen Kräfte, werden in Abbildung 35 dargestellt.

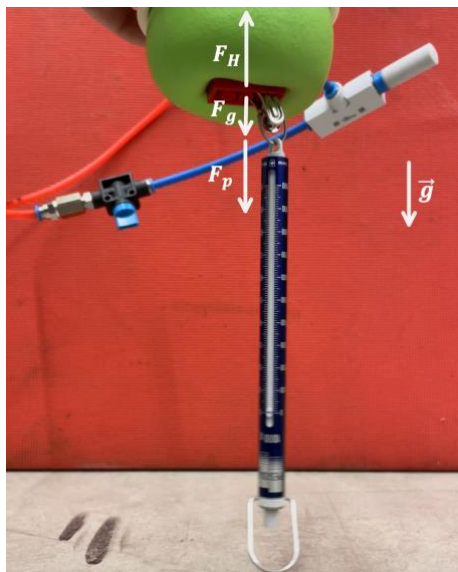


Abbildung 35 Versuchsaufbau – Versuch 1.2

Aus dem Messaufbau kann das Kräftegleichgewicht aufgestellt werden. Es gilt $\vec{F}_{ges} = 0$.

$$-\vec{F}_H + \vec{F}_g + \vec{F}_p = 0 \quad (1)$$

$$\vec{F}_H = \vec{F}_g + \vec{F}_p \quad (2)$$

Ein Objekt hält an dem Greifer, so lange gilt $\vec{F}_H \geq \vec{F}_g + \vec{F}_p$. Sobald $\vec{F}_H < \vec{F}_g + \vec{F}_p$ gilt, fällt das Objekt ab. Zu diesem Zeitpunkt muss die maximale Haltekraft bestimmt werden. Die maximale Haltekraft wird wie folgt bestimmt:

$$\vec{F}_{H,max} = m_x \vec{g} + m_{p,max} \vec{g} \quad (3)$$

Die Masse des Testobjekts verändert sich nicht, es gilt $m_x = const.$. Es muss folglich $m_{p,max}$ für jedes Testobjekt gemessen werden, um $\vec{F}_{H,max}$ zu bestimmen.

Versuch 1.3

Um zu testen, ob das System luftdicht ist, wird der Softgreifer kurz mit Luft aufgepustet. Dafür wird die Vakuumsaugdüse aus der Schaltung entfernt. Das Ventil wird für maximal eine Sekunde geöffnet, damit sich der Ballon leicht aufbläht. Wenn er danach die Luft nicht verliert, ist das System dicht.

Versuch 1.4

Im nächsten Versuch soll getestet werden, den Softgreifer leicht aufgeblasen auf das Objekt zu bewegen. Es wird vermutet, dass der Ballon sich leichter und mehr um die Testobjekte schließen kann und die maximale Haltekraft ebenso erhöht wird. Der Greifvorgang verändert sich in dem ersten Schritt, ansonsten bleibt der Ablauf der Gleiche. Es sollen ebenfalls alle acht Testobjekte gegriffen werden.

Die Pneumatik Schaltung soll so angepasst werden, dass die Luft manuell in den Softgreifer gepustet werden kann, um leicht aufgepustet auf das Objekt zu fahren.




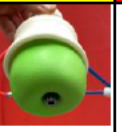
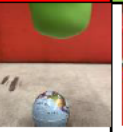
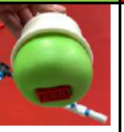


4.1.4 Ergebnisse

Versuch 1.1

Der erste Funktionstest des Softgreifers ist erfolgreich. Die Pneumatik-Schaltung und Bauteile funktionieren vernünftig. Der Granulat-befüllte Ballon verfestigt sich beim Aktivieren des Unterdrucks. Leichte externe Einwirkung auf den Ballon verändern seine Form nicht. Nach dem Deaktivieren ist der Ballon eine knetbare Masse, lässt sich verformen und kann sich mit leichtem Kraftaufwand um verschiedene Objekte herumschließen.

Die ersten Greiftests mit den acht Testobjekten sind ebenfalls erfolgreich. Fünf der Objekte können bei aktiviertem Unterdruck zuverlässig festgehalten werden. Der Aluminiumglobus, der Plastik Ring und das Plastik Zahnrad können nicht gehalten werden. Der Ring und das Zahnrad fallen nach kurzer Zeit ab. Der Globus kann nicht angehoben werden. Der Legostein kann am stärksten gehalten werden. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse mit entsprechenden Abbildungen zusammengefasst.

Tabelle 4 Ergebnisse - Versuch 1.1 ($p = 3 \text{ Bar}$)

	1	2	3	4	5	6	7	8
Testobjekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Legostein	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
maximale Haltekraft [qualitativ]	Hält okay	Hält okay	Hält okay	Hält okay	Hält nicht	Hält gut	Hält nur kurz	Hält nur kurz
Abbildung								

Versuch 1.2

Im zweiten Teil des Versuchs wird der Betriebsdruck auf 5 Bar erhöht. Zur quantitativen Kraftmessung wird die Pesola Federwaage verwendet. Die Federwaage kann das Haltegewicht nur bis maximal 1000g messen und die Skala ist in 10g Schritten. Beim Ablesen entsteht eine große Ungenauigkeit durch die menschliche Reaktionszeit, da die Kraft zu dem genauen Zeitpunkt abgelesen werden muss, wenn das Objekt abfällt. Zu dem Zeitpunkt schnellte die Federwaage zurück in ihre Ursprungsposition. Alle Messergebnisse mit der Pesola sind deshalb mit einem systematischen Fehler von $\Delta m_p = \pm 25 \text{ g}$ zu betrachten. Die Ergebnisse von Versuch 1.2 sind in Tabelle 5 festgehalten.

Tabelle 5 Ergebnisse - Versuch 1.2 ($p = 5 \text{ Bar}$)

	1	2	3	4	5	6	7	8
Testobjekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Legostein	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
m_x [g]	38,4	55	13,4	6,7	14,7	2,4	2,6	11,2
$m_{p,max}$ [g]	700	300	250	200	0	>1000	0	150
$\vec{F}_{H,max}$ [N]	7,24	3,48	2,58	2,03	0,00	>9,81	0,00	1,58

Versuch 1.3

Bei dem Test den Ballon aufzupusten hat der Ballon nach kurzer Zeit die Luft verloren. Die Dichtung zwischen den beiden Softgreiferhälften konnte die Luft nicht in dem System halten.

Versuch 1.4

Der vierte Teil des Versuches endet nach ein paar Greifversuchen schnell. Der Ballon wird manuell aufgepustet und auf den Quader bewegt. Es ist möglich den Quader einmal anzuheben. Die maximale Haltekraft scheint sehr hoch zu sein, weil das Objekt besser umschlossen werden konnte als vorher. Allerdings ist die Luftdurchlässigkeit des Systems für das Aufpusten des Ballons problematisch. Die Luft entweicht zu schnell, bevor das Testobjekt erreicht wird.

Der Versuch endet, weil der Ballon beim Aufpusten platzt. Der Kaffee verteilt sich auf dem Boden und der Softgreifer ist nicht weiter einsetzbar (Abbildung 36).



Abbildung 36 Versuch 1.4 - Granulat-befüllter Ballon platzt

4.1.5 Auswertung

Der erste Versuch mit dem Softgreifer ist sehr aufschlussreich und erfolgreich. Es sind viele Aspekte aufgefallen, die verbessert werden können. Sowohl Verbesserungsmöglichkeiten an dem Softgreifer, wie auch an dem Testaufbau und den Messmethoden. Zudem konnten erstmalig Objekte mit dem Softgreifer Prototypen gegriffen werden.

Im *Versuchsteil 1.1* ist aufgefallen, wie stark der Greifer auf die Objekte gepresst werden muss, damit der Greifer überhaupt eine Chance hat die Objekte zu greifen. Es ist eindeutig geworden, je mehr sich der Ballon um die Objekte schließt, desto zuverlässiger und stärker kann der Greifer die Objekte halten. Eine höhere Formschlüssigkeit führt zu einem besseren Greifergebnis.

Es ist außerdem aufgefallen, dass der Ballon sich ohne äußere Einwirkung, nach dem Greifvorgang, nicht allein in seine ursprüngliche Form bewegt. Es bleibt ein Abdruck des Objektes bestehen, wie in Abbildung 37 zu erkennen.

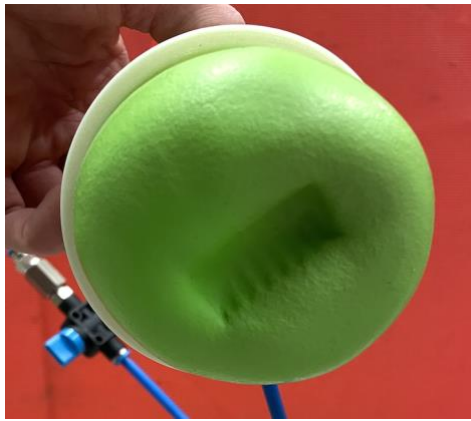


Abbildung 37 Abdruck der Feder nach dem Greifvorgang

Dieser Abdruck ist für den nächsten Greifvorgang von Nachteil. Die Verformung und Anpassung an das nächste Objekt fällt schwerer und ist mit einem größeren Kraftaufwand verbunden. Es ist notwendig den Ballon manuell in die Ausgangsform zu kneten.

Aus diesem Problem ist die Idee für den Versuchsteil 1.4 entstanden. Der Ballon kann leicht aufgepustet werden, um in die Ausgangslage versetzt zu werden. Gleichzeitig sollte auch getestet werden, wie sich das Greifverhalten verändert, wenn aufgepustet auf das Objekt verfahren wird.

Im *Versuchsteil 1.2* wurde der Betriebsdruck um 2 Bar erhöht. Das Resultat ist eine leichte Verbesserung der maximalen Haltekraft. Das Plastik Zahnrad kann das erste Mal gehalten werden. Der Quader wird etwas stärker gehalten. Ansonsten liefert der Versuch ein ähnliches Ergebnis.

Diese Schlussfolgerung ist jedoch mit Vorbehalt zu behandeln. Beim ersten Versuch wurde die Haltekraft rein qualitativ bewertet. Der Vergleich zu einer quantitativen Messung ist nicht sinnvoll. Zudem wurde der Softgreifer manuell auf die Objekte gepresst. Eine Variation in der Anpresskraft oder der Orientierung des Greifers, kann ebenso die leichte Verbesserung ausgelöst haben. Für eine aussagekräftige Messung müssen alle störenden Faktoren ausgeschlossen werden und für jeden Greifvorgang konstant bleiben. Einzig der Betriebsdruck wird dann verändert. Diese notwendige Wiederholgenauigkeit, kann nur mit Anschluss an den Roboter sichergestellt werden.

Außerdem fällt auf, dass die Kraftmessung mit der Pesola nicht sehr genau ist. Eine Messungenauigkeit von $\Delta m_p = \pm 25g$ ist hoch. Um kleine Änderungen festzustellen, reicht die Pesola nicht aus. Es können nur größere Veränderungen festgestellt werden.

Im *Versuchsteil 1.3* wird klar, dass das System undicht ist. Für eine höhere Effizienz beim vakuumieren und um den schnellen Austritt von Luft beim Aufpusten zu verhindern, sollt die Dichtung optimiert werden.

Versuchsteil 1.4 zeigt eindeutig, dass der Ballon nicht widerstandsfähig genug ist. Eine Wandstärke von $t = 0,25mm$ reicht nicht aus. Außerdem scheint der Ballon zu stark auf Spannung gewesen sein. Es sollte ein größerer Ballon gewählt werden als $D_{Luft} = 300mm$.

4.2 Entwicklung von Softgreifer-Prototyp V2

Im Funktionstest der ersten Version des Softgreifers sind einige Verbesserungsmöglichkeiten aufgefallen. Um diese zu verbessern, wird eine zweite Version des Prototyps entwickelt. Die wichtigsten Aspekte sind der Ballon und sein Material, sowie die Abdichtung gegen Luftaustritt.

4.2.1 Ballonauswahl

Bei der Auswahl des richtigen Ballons, sind die *Größe*, die *Stärke* und das *Material* die wichtigsten Eigenschaften.

Größe

Die Größe des Ballons entscheidet darüber, wie groß die zu greifenden Objekte sein können. Die Größe ist nicht unendlich ausweitbar, weil die physikalischen Prinzipien sich dann verändern. Der Anwendungsfall liefert hier zunächst eine maximale Objektgröße von 50x50x50mm. Der Ballon wird bei dem Greifvorgang immer mindestens halb um das gesamte Objekt gestülpt. Das Objekt muss von allen Seiten mit dem gefüllten Ballon umgeben sein, um seine Funktion zuverlässig auszuführen. In den Versuchen ist deutlich geworden, dass eine höhere Formschlüssigkeit zu einem besseren Greifergebnis führt. Der Granulat-befüllte Ballondurchmesser war $D_{Granulat} = 78mm$. Eine Vergrößerung auf etwa $D_{Granulat} = 100mm$ ist notwendig. Damit ist der Durchmesser doppelt so groß wie die maximale Objektgröße und sollte eine Verbesserung bewirken.

Bei der Befüllung des Ballons mit einem Granulat sollte der Ballon etwas auf Spannung sein, damit er seine runde Form annimmt. Er sollte nicht stark auf Spannung sein, weil er dann keine weiteren Spannungen beim Greifvorgang aushalten kann. Es sollte außerdem so wenig Luft wie möglich in dem Ballon sein, damit das Vakuumieren schnell abläuft. Die optimale Granulat Menge muss beim Befüllen herausgefunden werden.

Material

Das Material des Ballons liefert die Grundlage für das Greifprinzip des Ballons. Zum einen ist die *Elastizität* und *Dehnbarkeit* des Materials sehr wichtig, um sich an die verschiedenen Objektformen möglichst gut anzupassen. Zudem muss der Ballon gefüllt und aufgepustet werden und sollte gleichzeitig die ursprüngliche Form wieder einnehmen können. Um die Adhäsion zu maximieren sollte der Ballon so eng wie möglich an den Objekten liegen und viel Berührungsfläche mit den Objekten haben. Eine hohe *Flexibilität* ist dafür ebenfalls wichtig.

Das Material sollte außerdem eine hohe *Reißfestigkeit* besitzen, da der Ballon beim Eindrücken des Objektes stark gespannt wird. Die Objekte können auch Spitz und uneben sein. Der Ballon sollte diesen punktuellen Belastungen standhalten können.

Die *Luftdichtigkeit* des Materials ist außerdem wichtig, da das gesamte System luftdicht sein soll. Der Ballon muss diese Eigenschaft ebenso erfüllen.

Materialien diese Voraussetzungen besitzen sind Elastomere Kunststoffe. Elastomere wie Naturkautschuk (Latex), Polyisopren und Nitrilkautschuk (Synthetische Kautschuke), Silikonelastomere, Polyurethan (PU) oder Polyethylen (PE) kommen in Frage. Klassische Luftballons sind in der Regel aus Latex. Deren Beschaffung ist am simpelsten und

kostengünstigsten. Als Ballonmaterial wird deshalb weiterhin Latex verwendet. Sollte das Material erneut Schwächen zeigen, kann auf einen Silikon- oder PU-Ballon umgestellt werden.

Wandstärke

Die Wandstärke des Ballons ist für die Eigenschaften des Greifers entscheidend. Durch eine höhere Stärke des Ballons, wird der Ballon robuster. Die Gefahr zu reißen, tritt nicht so schnell ein, weil die Punktlastigkeit und Widerstandsfähigkeit verbessert werden.

Allerdings schränkt eine höhere Wandstärke die Verformbarkeit ein. Komplexe Objekte mit vielen Hinterschneidungen werden dadurch schwerer zu handhaben.

Die Wandstärke im ersten Versuch war $t = 0,25\text{mm}$. Es sollte in Zukunft mindestens die doppelte Stärke von $t = 0,50\text{ mm}$ gewählt werden.

Es wird ein Riesenballon aus Latex mit einem $D_{Luft} = 600\text{mm}$ gewählt. Der Ballon sollte Granulat-befüllt mindestens einen Durchmesser von $D_{Granulat} = 100\text{mm}$ erreichen.

4.2.2 Optimierung der Dichtung

Der Dichtungsring hat nicht gut funktioniert und konnte den Luftaustritt nicht verhindern. Es wurde ein Fiber-Dichtring G 3/8 verwendet (Abbildung 38, links). Das Material schient zu porös und unflexibel. Außerdem ist die Fläche, an die der Dichtungsring gepresst wird, sehr rau. Aufgrund der Orientierung im 3D-Druck, wurde diese Fläche auf Stützstruktur gedruckt. Die Oberflächenqualität hat darunter gelitten. Durch die Rauheit und die Rillen in der Oberfläche kann Luft ausgetreten sein. Beide Faktoren spielen bei diesem Problem zusammen. Zunächst wird die Dichtung ausgetauscht durch eine dickere und größere Silikondichtung (Abbildung 38, rechts). Das Silikon ist flexibler als das Fiber Material. Außerdem ist sie höher, wodurch noch mehr Anpresskraft auf die Dichtung ausgeübt werden kann, weil der Luftspalt zwischen den beiden Hälften größer wird.

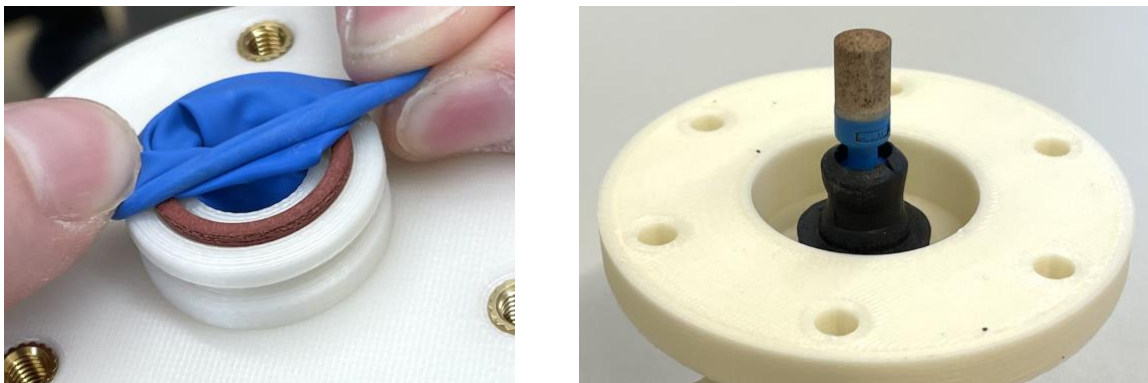


Abbildung 38 Optimierung der Dichtung (links alt, rechts neu)

Um die Oberfläche der Anpressfläche zu verbessern, muss die obere Softgreiferhälfte in einer anderen Orientierung erneut gedruckt werden. Das Bauteil muss um 180° im Bauraum gedreht werden, damit die Fläche als letztes gedruckt wird und nicht mehr auf die Stützstruktur aufgebaut wird. In Abbildung 39 wird die Orientierung im Bauraum des Druckers dargestellt, um die gewünschte Oberfläche zu verbessern. Die Bahnen für den Druck wurden bereits berechnet und die Supportstruktur (hellblau) hinzugefügt. In der Konstruktion wurde für die neue Dichtung eine größere Aussparung eingeplant.

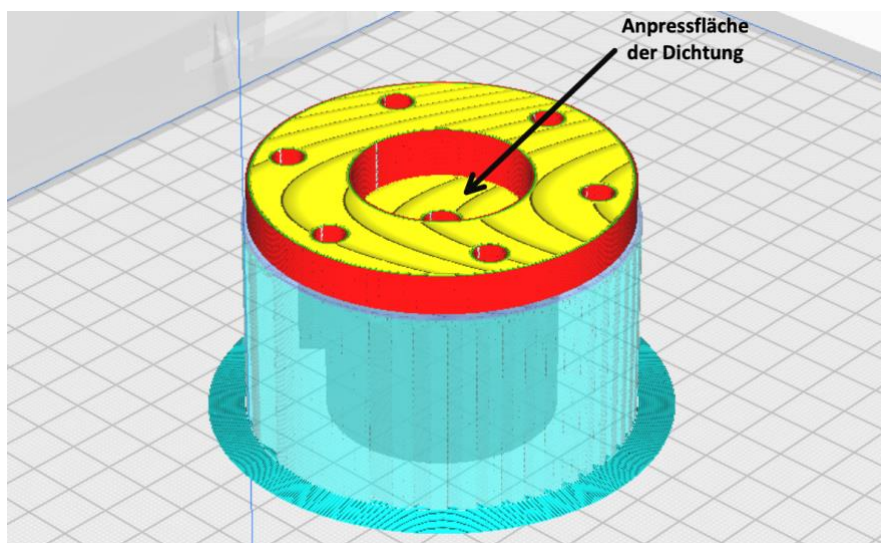


Abbildung 39 Optimierter 3D-Druck der oberen Softgreifer Struktur

4.3 Versuch 2 – Erste Funktionstest am Kuka Roboter zur Optimierung des Softgreifer-Prototyps V2

4.3.1 Einleitung

Im zweiten Versuch mit dem Softgreifer wird die verbesserte Version V2 des Prototyps verwendet. Es soll getestet werden, ob die Veränderungen die erwünschten Effekte erzielen. Zudem wird der Softgreifer erstmalig an den Roboter angeschlossen. Die Pneumatik soll über die Robotersteuerung angesprochen werden und die Bewegung von dem Roboter durchgeführt werden. Es soll keinen manuellen Eingriff in den Greifvorgang mehr geben.

Mit diesem realen Messaufbau soll der Softgreifer weiter optimiert werden. Dazu wird in verschiedenen Teilen des Versuches der Betriebsdruck, das Granulat in dem Ballon und der Greifvorgang variiert. Ziel ist es die optimalen Parameter für den Softgreifer herauszufinden, um die Universalität und Einsatzmöglichkeiten des Greifers zu bewerten.

4.3.2 Material

- KUKA KR 6 R900 sixx
- Softgreifer-Prototyp V2:
 - o Granulat
 - Gemahlener Kaffee
 - Mahlgrad: Mittel
 - Korngröße: $d_{\text{kaffee}} \approx 600 - 1200\mu\text{m}$
 - o Latexballon
 - Ballondurchmesser luft-befüllt: $D_{\text{Luft}} = 600\text{mm}$
 - Ballondurchmesser granulat-befüllt: $D_{\text{Granulat}} = 100\text{mm}$
 - Wandstärke: $t = 0,25\text{mm}$
- Testobjekte (siehe Kapitel 0)
- Vakuumsaugdüse „VN-07-L-T3-PQ2-VQ2-RO1“ von Festo
- Pesola Federwaage 1000g/10g mit $\Delta m_p = \pm 25\text{g}$

4.3.3 Versuchsdurchführung

Der Softgreifer-Prototyp V2 wird am KUKA-Roboter montiert. Für die Montage wird die Anschlussplatte (Abbildung 22) zunächst an den Softgreifer geschraubt. Der Greifer wird dann mit der Platte am Roboterflansch verschraubt.

Im zweiten Schritt wird der Greifer an die richtigen Pneumatik Ausgänge des Roboters angeschlossen. Zur Inbetriebnahme der Ausgänge des Roboters werden die digitalen Ausgänge mit den realen Ausgängen verknüpft. Um die Roboteroutputs im Programm anzusprechen, werden die sechs realen Outputs mit den digitalen Outputs verknüpft. Hinter den sechs Outputs des Roboters liegen drei 5/2-Wege Ventile, wie auch in der Pneumatik Schaltung (Anhang A) erkennbar. Die Schläuche und die Vakuumsaugdüse werden, wie in der Schaltung gekennzeichnet, an den Roboter und den Greifer angeschlossen.

Programmierung des Greifvorgangs

Der Greifvorgang am KUKA-Roboter soll ähnlich wie im Versuch 1 ablaufen. Allerdings muss der Roboter für diesen Vorgang konkrete Positionen und Befehle für die Verfahrenswege erhalten, um die gewünschte Bewegung auszuführen. Der Greifvorgang wird kleinteilig beschrieben, damit er für den Programmcode direkt übertragbar ist. Zu jedem Schritt wird die Zeilennummer im Programmcode (Abbildung 40 und Abbildung 41) angegeben.

Der Greifvorgang am Roboter:

1. Anfahren der Ausgangsposition P1 – Ausgangskonfiguration (Zeile 1-2)
2. Schließen aller Pneumatik Ausgänge (Zeile 3-6)
3. Knapp über das Objekt auf Position P4 fahren (Zeile 7)
4. Ballon für zwei Sekunden aufpusten und warten bis Luft entweicht (Zeile 8-13)
5. Langsam auf das Objekt verfahren und in Position P2 anhalten (Zeile 14)
6. Aktivieren des Unterdrucks (Zeile 15-16)
7. Das Objekt langsam anheben bis Position P4 (Zeile 18)
8. Das Objekt auf Position P8 ablegen (Zeile 19-26)

Die acht Schritte des Greifvorgangs werden im Programm zur Robotersteuerung wie folgt umgesetzt:

```
1  INI
2  PTP P1 CONT Ue1=100 % PDAT1 Tool[1]:Greifer 98mm
   ↳ Base[0]
3  OUT 1 '' State=FALSE
4  OUT 2 '' State=TRUE
5  OUT 5 '' State=FALSE
6  OUT 6 '' State=TRUE
7  LIN P4 CONT Ue1=2 m/s CPDAT3 Tool[1]:Greifer 98mm
   ↳ Base[0]
8  OUT 1 '' State=TRUE
9  OUT 2 '' State=FALSE
10 WAIT Time=2 sec
11 OUT 1 '' State=FALSE
12 OUT 2 '' State=TRUE
13 WAIT Time=3 sec
14 LIN P2 Ue1=0.05 m/s CPDAT1 Tool[1]:Greifer 98mm
   ↳ Base[0]
15 OUT 5 '' State=TRUE
16 OUT 6 '' State=FALSE
17 WAIT Time=2 sec
18 LIN P4 CONT Ue1=0.5 m/s CPDAT5 Tool[1]:Greifer 98mm
   ↳ Base[0]
19 PTP P5 Ue1=100 % PDAT6 Tool[1]:Greifer 98mm Base[0]
20 PTP P6 Ue1=100 % PDAT4 Tool[1]:Greifer 98mm Base[0]
21 LIN P7 Ue1=0.1 m/s CPDAT4 Tool[1]:Greifer 98mm
   ↳ Base[0]
22 WAIT Time=1 sec
23 OUT 5 '' State=FALSE
24 OUT 6 '' State=TRUE
25 PTP P8 Ue1=100 % PDAT5 Tool[1]:Greifer 98mm Base[0]
26 →PTP P1 Ue1=100 % PDAT2 Tool[1]:Greifer 98mm Base[0]
```

Abbildung 40 Programmcode Greifvorgang – Zeile 1-14

Abbildung 41 Programmcode Greifvorgang – Zeile 15-26

Die verwendeten Funktionen PTP, LIN, WAIT und OUT sind vordefinierte Funktionen von Kuka. PTP initiiert eine „Point-to-Point“-Bewegung, bei der von einem definierten Start zu einem definierten Zielpunkt im Raum, unter vorgegebener Geschwindigkeit und Beschleunigung gefahren wird. Es wird der schnellste Weg verwendet. Keine Punkte auf dem Weg werden berücksichtigt.

LIN definiert eine Linearfahrt des Roboters, mit gleichmäßiger und kontinuierlicher Bewegung entlang einer Linie, von einem definierten Start zu einem Zielpunkt. Die Verfahrensgeschwindigkeit muss ebenfalls vorgegeben werden.

WAIT pausiert den Vorgang für eine vorgegebene Zeit und mit OUT können die verschiedenen Pneumatik Ausgänge angesteuert werden.

Für alle präzisen Bewegungen, wird deshalb eine Linearfahrt verwendet, wie beim Aufnehmen des Objektes in Zeile 14 und 18. Für alle anderen Bewegungen, die möglichst schnell ausgeführt werden müssen, werden PTP-Fahrten verwendet.

Zum Aktivieren der Pneumatik oder Aktivieren der Druckluft müssen immer zwei Ausgänge mit OUT angesprochen werden. Hinter den beiden Ausgängen „OUT 1“ und „OUT 2“ sitzt nämlich ein 5/2-Wege-Ventil. Wenn ein Ausgang „OUT 1“ mit dem Status „TRUE“ geöffnet wird, muss automatisch der Ausgang „OUT 2“ mit dem Status „FALSE“ geschlossen werden (Bsp. Zeile 8-9). In dem 5/2-Wege-Ventil wird eine Weiche von dem einen auf den anderen Ausgang verstellt, weshalb nie beide Ausgänge gleichzeitig geöffnet oder geschlossen werden können.

Versuch 2.1

Im ersten Teil des Versuchs, soll die Auswirkung des Betriebsdruck auf das Greifverhalten erneut getestet werden, da die Messung im *Versuch 1.2* mit einem fehleranfälligen Messaufbau manuell durchgeführt wurde. Zudem soll die Druckdifferenz erhöht werden, um klarere Ergebnisse feststellen zu können. Alle Testobjekte sollen einmal bei einem Betriebsdruck von $p_1 = 2 \text{ Bar}$ und bei $p_2 = 5 \text{ Bar}$ gegriffen werden.

Versuch 2.2

Im zweiten Teil des Versuchs soll das Granulat in dem Ballon verändert werden. Die Auswirkung von verschiedenen Dichten, Korngrößen und Materialien sollen herausgefunden werden. Der Ballon des Softgreifers soll mit Kaffee, Salz und Mehl befüllt werden und jeweils alle Testobjekte greifen. Von den Granulat-Eigenschaften soll auf das Greifverhalten geschlossen werden. Zur genaueren Analyse sollen die Körner unter dem Mikroskop betrachtet werden.

Versuch 2.3

Im dritten Teil des Versuchs soll der Greifvorgang optimiert werden. Es gibt drei verschiedene Abfolgen, die ausgetestet werden sollen. Entweder wird der Greifer gar nicht aufgepustet, er wird kurz vor dem Greifvorgang aufgepustet oder er wird aufgepustet auf das Objekt verfahren. Alle drei Möglichkeiten sollen mit den acht Testobjekten durchgeführt werden. Die Auswirkungen auf das Greifverhalten sollen analysiert werden.

4.3.4 Ergebnisse

Der Anbau des Softgreifers an den Kuka Roboter funktioniert nicht wie geplant. Der Anbau der Anschlussplatte an den Greifer funktioniert einwandfrei. Die Aussparung für die Schrauben in der Oberen Softgreifer Struktur ist allerdings zu klein. Die notwendigen Schrauben sind zu lang, um eingebaut zu werden. Um das Problem zu lösen, müssen kürzere Schrauben verwendet

werden und die Anschlussplatte muss weggelassen werden. Die Greifer-Funktion wird dadurch nicht eingeschränkt. Die Pneumatik wird wie im Schaltplan an den Roboter angeschlossen und funktioniert einwandfrei. In Abbildung 42 wird der Aufbau dargestellt.



Abbildung 42 Aufbau Versuch 2 - Softgreifer am KUKA Roboter

Der Greifvorgang am Roboter

Der zuvor programmierte Greifvorgang des Roboters, kann nun am Roboter durchgeführt werden. In Abbildung 43 wird der Vorgang in sechs Schritten dargestellt. Von der Ausgangsposition, zum kurzen Aufpusten des Softgreifers, zum Greifen des Objektes, zum Bewegen des Objektes und dem finalen Absetzen des Testobjektes.

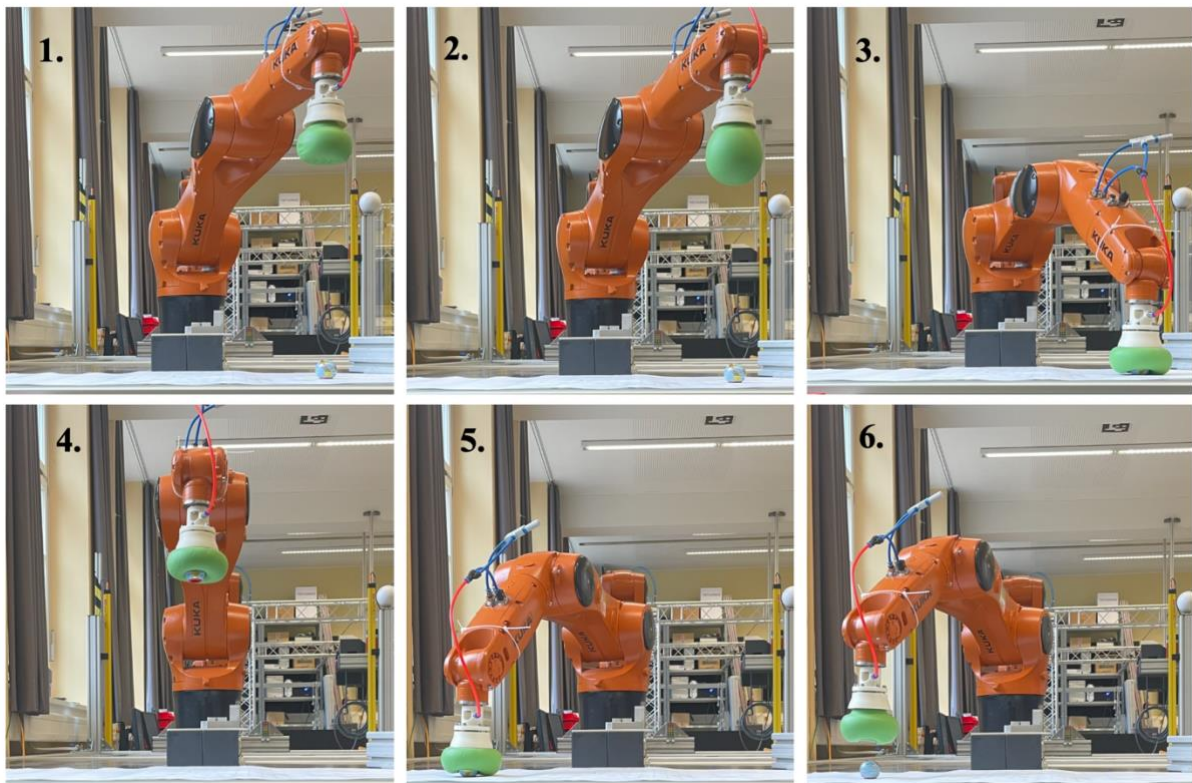


Abbildung 43 Greifvorgang am Roboter

Versuch 2.1

Im ersten Teil des Versuchs wird unter den verschiedenen Betriebsdrücken gearbeitet. Es werden die gleichen acht Testobjekte wie im Versuch 1 verwendet. Das Haltegewicht wird erneut mit der Pesola Federwaage gemessen ($m_{p,max}$). Die maximale Haltekraft ($\vec{F}_{H,max}$) wird wie in Versuch 1, mit Formel (3) bestimmt. Der Greifvorgang läuft wie beschrieben ab und es wird die Version 2 des Prototyps, mit dem größeren Ballon ($D_{Luft} = 600mm$), Kaffee-befüllt verwendet. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 6 Ergebnisse - Versuch 2.1



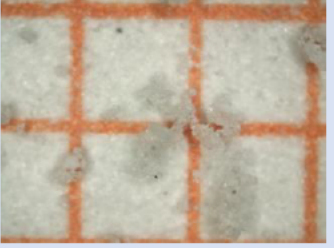
		1	2	3	4	5	6	7	8
	Testobjekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Legostein	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
	m_x [g]	38,4	55	13,4	6,7	14,7	2,4	2,6	11,2
$p_2 =$ 5 Bar	$m_{p,max}$ [g]	700	250	50	Hält nicht	>1000	1000	50	500
	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	7,24	2,99	0,62	Hält nicht	>9,81	9,83	0,52	5,01
$p_1 =$ 2 Bar	$m_{p,max}$ [g]	200	350	Hält nicht	Hält nicht	800	50	50	150
	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	2,34	3,97	Hält nicht	Hält nicht	7,99	0,51	0,52	1,58

Bei einem Betriebsdruck von 5 Bar können sieben der acht Testobjekte gehalten werden. Der Aluminiumglobus, der Legostein und der Quader werden dabei mit einer Haltekraft von mindestens sieben Newton gehalten. Das kleine Metall Zahnrad kann nicht gehalten werden. Bei einem Betriebsdruck von 2 Bar kann außer dem Zahnrad, auch die Feder nicht gehalten werden. Die Haltekräfte sind bei allen Objekten geringer oder gleichbleibend.

Versuch 2.2

Im zweiten Versuchsteil werden weitere Materialien für das Granulat in dem Ballon getestet. Die Materialien unterscheiden sich in vielen Eigenschaften, wie ihrer Dichte, ihrer Korngröße, der Kornoberflächen und Kornform. Die Materialien wurden dafür unter dem Mikroskop untersucht. In Tabelle 7 werden die Materialeigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 7 Granulat-Material Eigenschaften

	Kaffee	Salz	Mehl
Körner			
Korngröße	600 – 1200µm	300 – 1000µm	50 – 300µm
Kornoberfläche	rau, körnig, uneben	glatt, kantig	fein, glatt, porös
Form	eckig, kantig, willkürlich	Polyeder (Hexaeder, Oktaeder, etc.)	unregelmäßig, willkürlich
Dichte	$0,3 \frac{g}{cm^3}$	$2,16 \frac{g}{cm^3}$	$0,56 \frac{g}{cm^3}$

Die drei Materialien unterscheiden sich stark. Der *gemahlene Kaffee* hat sehr ungleichmäßig große Körner mit rauen und unebenen Oberflächen. Die Körner sind sehr unterschiedlich geformt und haben willkürliche Ecken und Kanten. Seine Dichte ist sehr gering.

Die *Salzkörner* haben eine ähnliche Größe, sind allerdings von ihrer Struktur und Oberfläche sehr verschieden. Die Oberfläche ist sehr glatt und die Körner ähneln Hexa- und Oktaedern (Polyeder). Die Dichte ist sehr groß.

Das *Mehl* liegt in einer anderen Größenordnung. Die Körner sind etwa zehnmal kleiner, sehr fein und glatt. Die einzelnen Körner sind schwer voneinander unterscheidbar, weil sie aneinanderkleben. Die Dichte ist mit $0,56 \frac{g}{cm^3}$ etwas größer als die vom gemahlene Kaffee.

Die drei Granulate wurden jeweils in einen Ballon ($D_{Luft} = 600mm$) gefüllt und so weit befüllt, bis der Ballon einen Durchmesser von $D_{Granulat} = 100 mm$ erreicht hat.

Für den Versuch wurden die befüllten Ballons an den Softgreifer angebaut. Die acht Testobjekte wurden mit dem beschriebenen Greifvorgang gegriffen. Der Betriebsdruck lag bei $p = 5 Bar$. Der Luftfilter hat bei jedem Granulat seine Funktion erfüllt und ist nicht verstopft. Es wurden eine Vielzahl von Objekten gehalten. Die Zusammenfassung ist in Tabelle 8 festgehalten.

Tabelle 8 Ergebnisse - Versuch 2.2

		1	2	3	4	5	6	7	8
	Testobjekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Lego- stein	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
	m_x [g]	38,4	55	13,4	6,7	14,7	2,4	2,6	11,2
Kaffee	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	7,24	2,99	0,62	Hält nicht	>9,81	9,83	0,52	5,01
Salz	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	2,34	1,52	0,62	Hält nicht	9,95	1,00	0,52	1,58
Mehl	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	>9,81	Hält nicht	Hält nicht	Hält nicht	>9,81	0,51	0,52	1,09

Bei den Versuchen fällt auf, dass der Mehl-befüllte Softgreifer sechs der acht Objekte nicht halten kann. Allerdings hält er den Quader und den Globus sehr stark. Ein unregelmäßiges Verhalten, was bisher nicht aufgetreten ist.

Der Salz-befüllte Greifer kann so viele Objekte, wie der Kaffee-befüllte Softgreifer halten. Er hält allerdings durchschnittlich mit einer geringeren Haltekraft. Vor allem bei dem Legostein, bei dem Quader und bei dem Plastik Zahnrad fällt der Unterschied stark auf.

Es fällt außerdem auf, dass der Salz-befüllte Ballon am Ansatz sehr stark gedehnt wird. Sein Eigengewicht beträgt 645g. Im Gegensatz zum Kaffee befüllten Ballon, der ein Gewicht von 320g hat und der Mehl Ballon von 484g. Es liegt damit bereits eine hohe Last auf dem Ansatz des Ballons, bevor überhaupt ein Objekt gegriffen wird.

Es fällt außerdem auf, dass alle Ballons bei den Bewegungen schwanken und ein bis zwei Sekunden benötigen, bis sie ruhig stehen bleiben, um die Objekte zuverlässig zu greifen. Der Salz-befüllte Ballon schwingt bei den Bewegungen stärker als die anderen Ballons.

Versuch 2.3

Im dritten Teil des Versuchs zur Optimierung des Softgreifers wird der Greifvorgang verändert. Der Ballon wird vorher aufgepustet und auch aufgepustet auf die Testobjekte verfahren. Die acht Testobjekte werden jeweils mit den drei Greifverfahren „kein Aufpusten“, „vorher kurz Aufpusten“ und „Aufgepustet auf Objekt fahren“ gegriffen. Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 9 festgehalten.

Tabelle 9 Ergebnisse - Versuch 2.3

		1	2	3	4	5	6	7	8
	Test-objekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Lego-stein	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
	m_x [g]	38,4	55	13,4	6,7	14,7	2,4	2,6	11,2
vorher kurz Aufpusten	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	7,24	2,99	0,62	Hält nicht	>9,81	9,83	0,52	5,01
kein Aufpusten	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	7,24	1,03	0,62	Hält nicht	>9,81	0,51	Hält nicht	1,58
Aufgepustet auf Objekt fahren	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	>9,81	3,97	0,62	Hält nicht	>9,81	1,00	0,52	9,92

Beim Vergleich der verschiedenen Greifverfahren fallen kleine Unterschiede in Bezug auf die Haltekraft auf. Es können fast alle Objekte bis auf das Metall Zahnrad gegriffen, werden, welches bei keinem Greifverfahren gehalten hat. Der Plastik Ring sticht heraus, da er einmal nicht gehalten werden kann, als der Ballon nicht aufgepustet wurde. Generell fällt auf, dass das Verfahren „kein Aufpusten“, die schlechtesten Ergebnisse liefert.

Das Verfahren „aufgepustet auf Objekte fahren“ liefert die besten Ergebnisse. Der Quader wird mit mehr als 9,81 N gehalten und das Plastik Zahnrad mit 9,92 N, so stark wie bei keinem

anderen Versuch. Allerdings fällt der Legostein aus der Reihe, der nur mit einem Newton gehalten wird.

4.3.5 Auswertung

Versuch 2.1

Das Ergebnis ist eindeutig. Bei höherem Betriebsdruck steigt die Greifkraft $\vec{F}_{H,max}$. Es sollte in Zukunft immer mit dem höheren Betriebsdruck von $p = 5 \text{ Bar}$ gearbeitet werden.

Die Erklärung ist ebenso trivial. Bei höherem Betriebsdruck kann ein höherer Unterdruck in dem Ballon erzeugt werden. Je höher der Unterdruck im Ballon, desto stärker wird das Material des Ballons zusammengezogen, desto stärker ziehen sich die Körner zusammen und desto stärker verklemmen sich die einzelnen Körner ineinander und verfestigen den gesamten Ballon, um die Objekte zu halten.

Versuch 2.2

Auch das Ergebnis des zweiten Versuchsteil ist eindeutig. Als Granulat für den Ballon eignet sich Mehl schlecht, da die Haltekräfte zu gering sind und teilweise Objekte nicht gehalten werden können. Beim Salz ist das Ergebnis unerwartet gut, kann aber nicht mit den Haltekräften von dem Kaffee-befüllten Greifer mithalten. In Zukunft sollte weiterhin gemahlener Kaffee als Granulat verwendet werden.

Warum sich Kaffee von diesen drei Materialien am besten eignet, ist nicht einfach zu erklären. Die Körner des Mehls sind zu klein und fein, so dass der Verklemm-Effekt zwischen den Körnern beim Vakuumieren nicht so stark ist. Die Annahme, je feiner die Körner des Granulats sind, desto stärker wirkt der Verklemm Effekt und desto höher ist die Verfestigung des Ballons, trifft nicht zu. Es kann zum einen an einer glatten Oberfläche der Mehl-Körner liegen, die ein Verklemmen erschweren. Es kann zum anderen auch sein, dass der Betriebsdruck zu gering ist, um die Körner in einer starren Position zu halten. Bei dem feinen Mehl bilden sich nicht genug Freiräume für die Luft, die abgesaugt werden muss.

Beim Kaffee bilden sich durch die groben unregelmäßigen Strukturen der Körner viele Freiräume und bereits bei geringerem Druck, verklemmen die Körner stark. Das Mehl ist zu fein, um bei diesem Betriebsdruck eine feste Struktur behalten zu können.

Die Salzkörner sind ähnlich groß wie die Kaffeekörner, allerdings schwächen die glatte Oberfläche und die regelmäßigen Formen der Polyeder den Verklemm Effekt ab. Die Festigkeit des Ballons unter Druck ist nicht so hoch, wie beim Kaffee-befüllten Ballon, was sich auch in den Haltekräften widerspiegelt.

Versuch 2.3

Das Ergebnis des dritten Teilversuchs fällt ähnlich aus wie vermutet und ist dennoch lehrreich und wichtig. Das Greifverfahren „kein Aufpusten“ liefert die schlechtesten Ergebnisse. Dadurch dass der Ballon nicht aufgepustet wird, wird das Granulat nicht erneut verteilt. Das bereits im Versuch 1 beschriebene Problem tritt auf; Der Abdruck des vorigen Objektes bleibt im Ballon (siehe Abbildung 37) und der Ballon kann sich schlechter an das nächste Objekt anpassen.

„Aufgepustet auf das Objekt fahren“ liefert die besten Haltekräfte. Bei der Beobachtung fällt auf, dass die Objekte zu einem großen Grad von dem Ballon umschlossen werden. Zu einem größeren Grad, als wenn der Ballon nur vorher kurz aufgepustet wird. Eine höhere Kontaktfläche von Ballon und Objekt führt zu einem besseren Greifverhalten. Dieses Verhalten kann durch zwei Effekte erklärt werden und es kommt auf das Objekt an, welcher Effekt dadurch mehr verstärkt wird.

Die Latexoberfläche des Ballons hat einen hohen „Grip“, also einen hohen Reibungskoeffizient μ . Bei erhöhtem Flächenkontakt erhöht sich folglich die Greifkraft durch eine erhöhte Oberflächenreibung. Zudem wird durch einen höheren Flächenkontakt die Formschlüssigkeit erhöht. Es ist wahrscheinlicher, dass Überstände, Kanten und Hinterschneidungen umschlossen werden und beim Vakuumieren von dem Ballon eingeklemmt werden. Beim Vakuumieren schrumpft das Volumen des Ballons minimal und verursacht dadurch ein Einklemmen der Objekte [1]. Je nach Objekt und seiner Beschaffenheit, werden diese Effekte unterschiedlich verstärkt.

Es fällt bei allen Greifverfahren auf, dass eine sehr hohe Anpresskraft auf die Objekte wirkt. Vor allem bei dem Vorgang „Aufgepustet auf das Objekt fahren“ scheint die Anpresskraft sehr hoch zu sein. Durch das simultane unter Druck setzen des Ballons beim Greifen, wirkt eine zusätzliche Kraft auf das Objekt. Die Anpresskraft sollte in folgenden Versuchen näher untersucht werden, vor allem in Bezug auf den Greifvorgang. Das Verfahren „vorher kurz aufpusten“ liefert nicht so große Greifkräfte, benötigt aber vermutlich geringere Anpresskräfte. Anwendungsfall abhängig kann das Greifverfahren „vorher kurz aufpusten“ deshalb trotzdem interessant sein. Nicht jedes Objekt kann hohe Anpresskräfte aushalten.

4.4 Versuch 3 – Untersuchung der Anpresskraft

4.4.1 Einleitung

Wie im Versuch 2 beschrieben, fällt auf, dass die Anpresskraft des Softgreifers auf die Testobjekte sehr hoch ist. Hohe Anpresskräfte können die Einsatzgebiete und Anwendungsfälle des Greifers stark einschränken und müssen deshalb genauer untersucht werden.

In diesem Versuch sollen die konkreten Anpresskräfte gemessen werden, die der Greifer bei den verschiedenen Testobjekten ausübt. Zudem soll der Zusammenhang zwischen der Anpresskraft und der Haltekraft bestimmt werden. Dazu muss die Anpresskraft variiert und die Haltekraft jeweils gemessen werden. Die Anpresskraft des Softgreifers wird durch verschiedene Abstände des Softgreifers zum Objekt verändert. Aus diesen Messdaten soll ebenfalls eine Aussage zu der Federsteifigkeit des Softgreifer-Ballons getätigt werden.

Darüber hinaus soll die Auswirkung des Greifvorgangs auf die Anpresskraft untersucht werden, da im Versuch 2 große Unterschiede festgestellt wurden.

Für den gesamten Versuch 3 wird das gleiche Material wie in Versuch 2 im Kapitel 4.3.2 verwendet und deshalb nicht erneut aufgeführt. Zur Messung der Anpresskraft wird eine Personenwaage „Glas Body Scale TGB-930“ (max. 150 kg) verwendet. Alle Messergebnisse mit der Personenwaage sind mit einer Messgenauigkeit von $\Delta m_w = \pm 0,1 \text{ kg}$ zu betrachten.

4.4.2 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wird weitestgehend der gleiche Versuchsaufbau wie in Versuch 2 verwendet. Der Softgreifer bleibt an dem Kuka Roboter installiert. Es wird der beschriebene Greifvorgang „vorher kurz Aufpusten“ durchgeführt (siehe Abschnitt 4.3.3) und der Betriebsdruck bleibt bei 5 Bar.

Der Messaufbau (Abbildung 44) unterscheidet sich darin, dass unter die Testobjekte die Personenwaage platziert wird, um das Anpressgewicht (m_A) und damit die Anpresskraft (F_A) zu bestimmen. Der Abstand von der Softgreifer Struktur zur Arbeitsfläche wird $AA =$ Abstand Arbeitsfläche genannt.

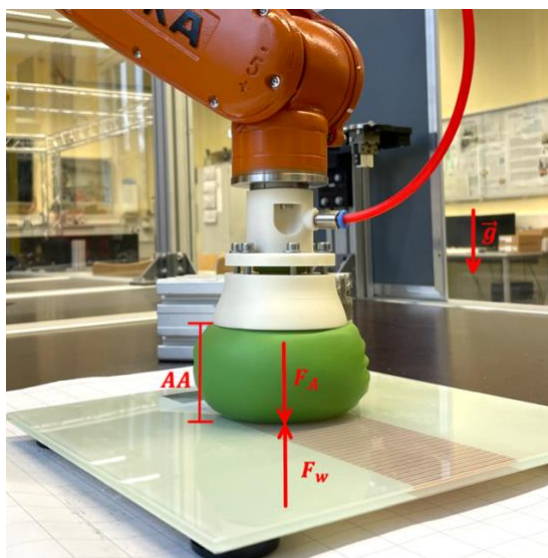


Abbildung 44 Versuchsaufbau – Versuch 3

Aus dem einfachen Kraftgleichgewicht mit der Kraft der Waage (\vec{F}_w) ergibt sich die Anpresskraft des Softgreifers:

$$\vec{F}_{ges} = 0 \quad (4)$$

$$0 = \vec{F}_A - \vec{F}_w \quad (5)$$

$$\vec{F}_A = \vec{F}_w = m_w \vec{g} \quad (6)$$

Versuch 3.1

Im ersten Teil des Versuches sollen die Auswirkung von verschiedenen Anpresskräften des Softgreifers auf die Haltekraft untersucht werden. Dazu soll der Softgreifer die Testobjekte in drei verschiedenen Aufnahmepositionen anheben. Die Aufnahmepositionen sollen sich in der Höhe um 5mm unterscheiden, sodass über den Unterschied des Abstandes zur Arbeitsfläche die Anpresskraft variiert wird. Die erste Position soll dabei so gewählt werden, dass der Softgreifer ohne Objekte, gerade keine Anpresskraft auf die Arbeitsfläche ausübt.

Versuch 3.2

Im zweiten Teil des Versuchs soll die Anpresskraft bei den verschiedenen Greifvorgängen „vorher kurz Aufpusten“ und „Aufgepustet auf das Objekt fahren“ gemessen werden. Dadurch sollen die Greifvorgänge besser bewertet und verglichen werden können. Es sollen dazu alle acht Testobjekte mit beiden Greifverfahren gegriffen werden. Außerdem soll die Anpresskraft gemessen werden, wenn kein Objekt auf der Arbeitsfläche liegt. Dadurch soll der objektunabhängige Unterschied der Greifvorgänge, bezogen auf die Anpresskraft, aufgezeigt werden.

Der Greifvorgang „kein Aufpusten“ wird nicht betrachtet, weil er in Versuch 2.3 keine guten Ergebnisse geliefert hat.

4.4.3 Ergebnisse

Versuch 3.1

Die Ausgangsposition für den Versuch liegt bei einem Abstand der Softgreifer Struktur zur Arbeitsfläche von $AA_0 = 58mm$. Bei dieser Position wirkt gerade keine Anpresskraft auf die Arbeitsfläche ohne ein Testobjekt.

Aus der Ausgangsposition ergeben sich die zwei weiteren Messpositionen $AA_1 = 53mm$ und $AA_2 = 48mm$ mit jeweils 5mm Abstand zueinander.

Beim Greifen der acht Testobjekte werden in den drei Positionen jeweils die Anpresskraft und die Haltekraft gemessen. Für jede Höhe wird zudem die Anpresskraft ohne ein Objekt gemessen. In Tabelle 10 sind die Messergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 10 Ergebnisse - Versuch 3.1

		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Testobjekt		kein Objekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Legosteine	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
Höhe Objekt [mm]		0	16	16	14	14	40	12	6	12
$AA_0 = 58mm$	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	-	2,94	1,18	1,47	0,49	>9,81	0,49	0,98	1,96
	\vec{F}_A [N]	0,00	31,39	26,49	21,58	22,56	117,72	19,62	19,62	28,45
$AA_1 = 53mm$	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	-	6,87	2,45	0,49	0	>9,81	9,81	0,49	4,91
	\vec{F}_A [N]	31,39	39,24	45,13	40,22	41,20	169,71	45,13	36,30	81,42
$AA_2 = 48mm$	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	-	>9,81	4,41	2,70	0	>9,81	0,98	0,49	9,81
	\vec{F}_A [N]	168,73	238,38	186,39	208,9	166,77	353,16	163,83	180,50	231,52

Der Softgreifer wird bei den drei Messpositionen (AA_0 , AA_1 & AA_2) immer um 5 mm näher an die Arbeitsfläche gefahren. Am Anfang erhöht sich die Anpresskraft um etwa 30 Newton ohne ein Objekt. Bei den nächsten 5mm steigt die Anpresskraft um 130 Newton an. Diese ungleichmäßige Erhöhung der Anpresskraft ist auf die Steifigkeit des Granulat-befüllten Ballons zurückzuführen.

Im Durchschnitt liegt die Anpresskraft in Position AA_0 mit Objekt bei $\overline{\vec{F}_{A,AA0}} \approx 36N$. Der Globus ist im Gegensatz zu den anderen Objekten sehr hoch und weist dadurch die größte Anpresskraft von $\vec{F}_{A,5} = 117,7N$ auf. Gleichzeitig kann der Greifer den Globus mit der höchsten maximalen Haltekraft von mindestens 9,81 Newton halten. Die maximalen Haltekraft bei den anderen Testobjekten steigen in dieser Position AA_0 nicht über drei Newton.

In Position AA_1 steigt die durchschnittliche Anpresskraft mit Objekt auf $\overline{\vec{F}_{A,AA1}} \approx 62N$. Die durchschnittliche maximale Haltekraft steigt ebenfalls von $\overline{\vec{F}_{H,max,AA0}} = 2,42N$ auf $\overline{\vec{F}_{H,max,AA1}} = 4,35N$.

In der letzten Position AA_2 steigt die durchschnittliche Anpresskraft enorm, die Haltekraft vergrößert sich gleichzeitig nicht sehr stark. Der Durchschnitt der Anpresskraft liegt bei $\overline{\vec{F}_{A,AA2}} \approx 216N$ und die maximale Haltekraft bei $\overline{\vec{F}_{H,max,AA2}} = 4,75N$.

Versuch 3.2

Im zweiten Teil des Versuchs werden die beiden Greifverfahren „vorher kurz Aufpusten“ und „Aufgepustet auf das Objekt fahren“ in Bezug auf ihre Anpresskraft verglichen. Der Abstand zur Arbeitsfläche wird konstant bei $AA_1 = 53\text{mm}$ gelassen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11 Ergebnisse - Versuch 3.2

		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Testobjekt		kein Objekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Lego -stein	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
Höhe Objekt [mm]		0	16	16	14	14	40	12	6	12
vorher kurz Aufpusten	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	-	7,24	2,99	0,62	0	>9,81	9,83	0,52	5,01
	\vec{F}_A [N]	31,39	39,24	45,13	40,22	41,20	169,71	45,1	36,29	81,42
Aufgepustet auf Objekt fahren	$\vec{F}_{H,max}$ [N]	-	>9,81	3,97	0,62	0	>9,81	1,00	0,52	9,92
	\vec{F}_A [N]	51,99	56,89	51,99	56,89	52,97	60,82	53,9	54,94	54,93

Die Anpresskraft ist bereits ohne ein Objekt 20 Newton größer, wenn der Ballon aufgepustet auf die Arbeitsfläche gedrückt wird.

Zudem fällt auf, dass die maximale Anpresskraft bei beiden Greifvorgängen bei dem Globus auftritt. Bei dem Greifvorgang „Aufgepustet auf das Objekt fahren“, liegt der maximal Wert mit $\vec{F}_{A,max,2} = 60,82\text{N}$ mehr als ein hundert Newton unter dem maximalen Wert $\vec{F}_{A,max,1} = 169,71\text{N}$ des Greifvorgangs „vorher kurz Aufpusten“. Auch die Durchschnittliche Anpresskraft beim Vorgang „Aufgepustet auf das Objekt fahren“ liegt mit $\overline{\vec{F}_{A,2}} = 55,43\text{N}$ unter dem Durchschnitt beim „vorher kurz Aufpusten“ mit $\overline{\vec{F}_{A,1}} = 62,29\text{N}$. Hauptsächlich liegt dies an den hohen Ausschlägen der Anpresskraft, bei dem Globus und dem Plastik Zahnrad.

Ballons getroffen werden. Allerdings unterscheidet sich der Softgreifer-Ballon stark von einer Feder. Der Ballon ist nicht reversibel wie eine Feder, er muss dafür mit Luft aufgepustet werden. Außerdem sind die Form und das Material nicht ähnlich zu eine Feder.

Bei der Messung der Kräfte wurde nur an drei Positionen gemessen. In Abbildung 46 wird das Kraft-Weg Diagramm dargestellt, indem der Zusammenhang für jedes Objekt einzeln dargestellt wird. Die Steigung des Graphen beschreibt die Federkonstante D (Federsteifigkeit).

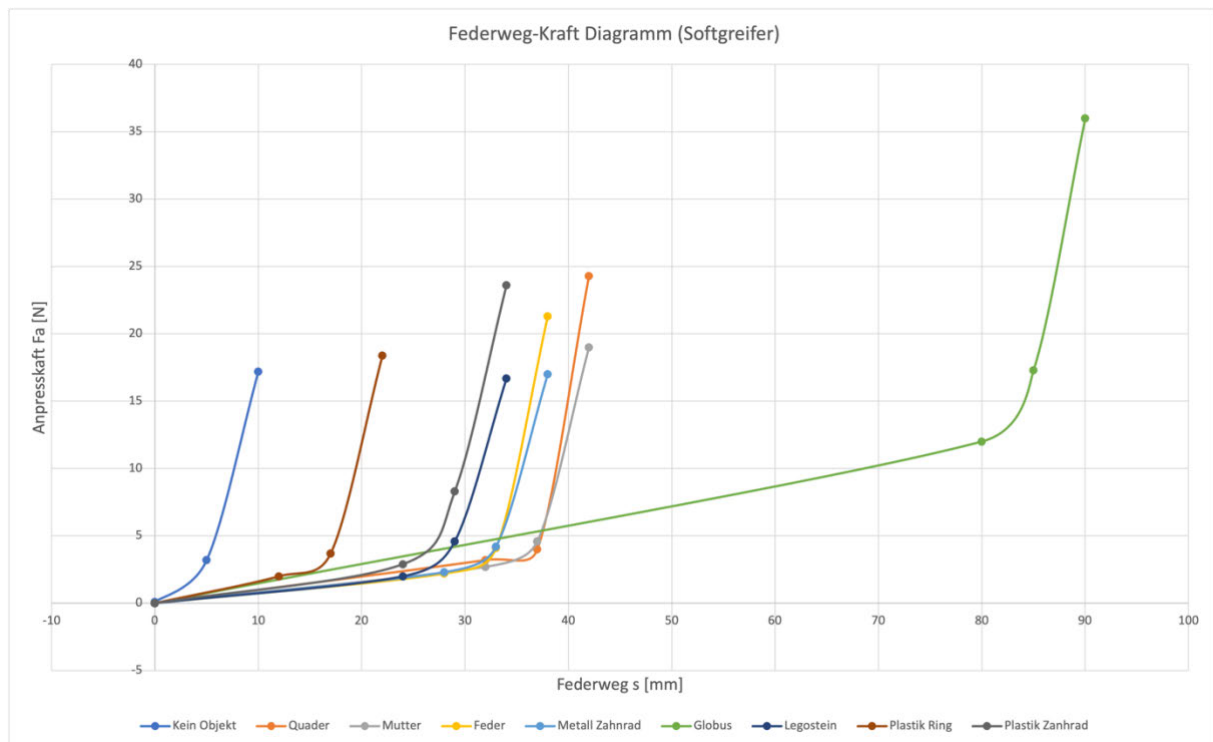


Abbildung 46 Federweg-Kraft Diagramm

Die Verläufe der Graphen der einzelnen Testobjekte sind alle sehr ähnlich. Durch die verschiedenen Objekthöhen und Formen sind die Graphen verschoben. Da bei allen Objekten der gleiche Greifer verwendet wird, ist das Steifigkeitsverhalten sehr ähnlich. Das Verhalten des Softgreifer-Ballons ist vergleichbar mit dem einer Druckfeder, die nicht reversibel ist. Das Verhalten wirkt wie einer quadratische oder kubische Potenzfunktion.

Mit den vorhandenen Messpunkten lässt sich nur eine Annäherung für den Verlauf der Federsteifigkeit tätigen. Es scheint, dass sich am Ende des Verlaufs bei allen Objekten eine lineare Federsteifigkeit einstellt. Diese Federsteifigkeit, zwischen den beiden letzten Messpunkten soll bestimmt werden, um eine quantitative Aussage zu dem Steifigkeitsverhalten des Softgreifers zu treffen. Über die Durchschnittswerte von allen Messungen, lässt sich auch annähernde eine Aussage treffen, wie sich dieses Verhalten beim Greifen von kleinen Objekten verändert.

Die Federkonstante berechnet sich wie folgt:

$$D = \frac{F_A}{s} \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (7)$$

Die lineare Steigung (Federkonstante) zwischen den letzten beiden Messpunkten berechnet sich wie folgt:

$$D_{23} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{F_{A3} - F_{A2}}{s_3 - s_2} \quad (8)$$

In Tabelle 12 wird die Berechnung für alle Testobjekte durchgeführt.

Tabelle 12 Federsteifigkeit des Softgreifers

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Test-objekt	kein Objekt	Quader	Mutter	Feder	Metall Zahnrad	Globus	Legosteine	Plastik Ring	Plastik Zahnrad
s_2 [mm]	5	37	37	33	33	85	29	17	29
s_3 [mm]	10	42	42	38	38	90	34	22	34
F_{A2} [N]	3,2	4	4,6	4,1	4,2	17,3	4,6	3,7	8,3
F_{A3} [N]	17,2	24,3	19	21,3	17	36	16,7	18,4	23,6
$D_{23} \left[\frac{N}{mm} \right]$	2,8	4,06	2,88	3,44	2,56	3,74	2,42	2,94	3,06

Ohne Testobjekt stellt sich eine Federsteifigkeit von $D_{23} \approx 2,8 \frac{N}{mm}$ des Softgreifers ein. Der Durchschnitt der Federsteifigkeit beim Greifen der acht Testobjekte ergibt $\overline{D_{23, mit Objekt}} \approx 3,14 \frac{N}{mm}$ des Softgreifers.

Bei geringerem oder höherem Federweg treten andere Steifigkeiten ein. Diese Berechnungen sind nur für den bestimmten Federweg s_2 bis s_3 bestimmt worden und sollen als Annäherung dienen.

Die Federsteifigkeit des Softgreifers wirkt sehr hoch und sollte möglichst minimiert werden. Je höher die Federsteifigkeit des Ballons ist, desto höher ist die Anpresskraft, die auf die Objekte wirkt. Die Anpresskraft sollte, wie bereits erwähnt, so gering wie möglich sein.

Versuch 3.2

Im zweiten Teil des Versuchs wurden die beiden Greifvorgänge in Bezug auf die Anpresskraft verglichen. Die erhöhte Anpresskraft beim „Aufgepustet auf das Objekt fahren“ ohne ein Objekt, ist darauf zurückzuführen, dass die Druckluft als zusätzliche Kraft, zu der Druckkraft des Roboterarms, auf die Arbeitsfläche wirkt. Diese Anpresskrafteerhöhung im Gegensatz zum „vorher kurz aufpusten“ von 10-20 Newton tritt bei allen flachen Testobjekten ein und ist zunächst als negativ zu bewerten.

Der große Vorteil des Greifvorgangs „Aufgepustet auf das Objekt fahren“, wird deutlich bei den höheren Testobjekten, dem Globus und dem Plastik Zahnrad. Die Anpresskraft erhöht sich bei den Objekten um maximal zehn Newton. Beim „vorher kurz aufpusten“ hingegen steigt die Anpresskraft bei den beiden Objekten um bis zu 130 Newton an.

Im folgenden Diagramm in Abbildung 47 werden diese starken Ausschläge sehr deutlich. Die Nummerierung der Testobjekte wird wie in Tabelle 12 beibehalten.

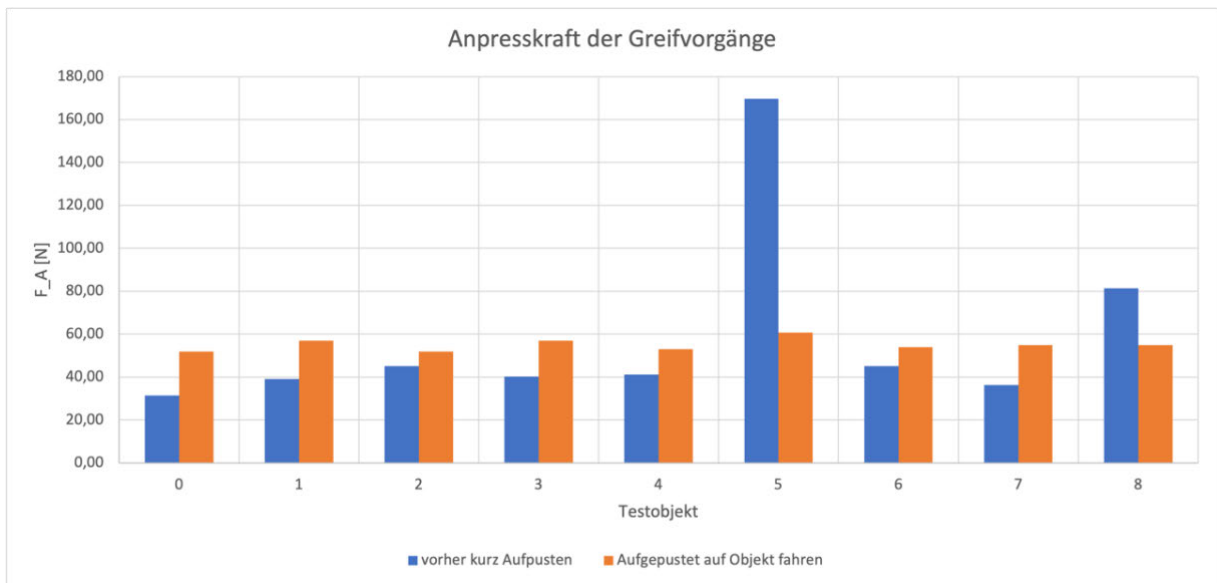


Abbildung 47 Säulendiagramm - Anpresskraft der Greifvorgänge

Diese hohen Ausschläge der Anpresskraft sind sehr unvorteilhaft für einen universellen Einsatz für verschiedene Objekte. Größere Objekte können schnell zerstört werden, weil sie unvorhersehbare große Kräfte aushalten müssen. Auch der Greifer und der Roboter können dabei beschädigt werden.

In Zukunft sollte immer der Greifvorgang „Aufgepustet auf Objekt fahren“ durchgeführt werden. Im Durchschnitt ist die Anpresskraft geringer, und die gefährlichen Ausschläge der Anpresskraft können vermieden werden.

Zurückzuführen sind diese Ausschläge auf den gleichen Effekt, der auch für die hohe Festigkeit beim Greifen entscheidend ist. Die Körner des gemahlene Kaffees Verkleben und Verfestigen sich stark unter hohem Druck. Bei dem eigentlichen Halteprozess ist diese Eigenschaft essenziell und ausschlaggebend für den Erfolg des Greifvorgangs.

Bei der Bewegung auf das Objekt und das Umschließen des Objektes, wünscht man sich allerdings keine hohe Steifigkeit. Durch den Druck, den das Anpressen auslöst, verkleben die Kaffeekörner zu stark und können sich nicht leicht bewegen und anpassen.

Beim Greifvorgang „Aufgepustet auf Objekt fahren“ ermöglicht die Luftzufuhr in den Ballon dem Kaffee eine breite Verteilung in alle Richtungen, sodass der Verkleb-Effekt minimiert wird und damit die Anpresskraft nicht stark ansteigt. Die zuvor berechnete Federsteifigkeit trifft für diesen Greifvorgang nicht mehr zu, wenn der Ballon aufgepustet wird. Die geringere Federsteifigkeit durch die Luftzufuhr ist der Grund, warum sich dieses Greifverfahren besser eignet.

4.5 Versuch 4 – Untersuchung der Möglichkeiten des finalen Softgreifers

4.5.1 Einleitung

In den vorangegangenen Versuchen zur Optimierung des Softgreifer wurden alle Parameter des Softgreifers untersucht und weitestgehend optimiert. Die Softgreifer Struktur wurde im Prototyp V2 angepasst und ebenso wurde die Dichtung und der Ballon verbessert. Das Granulat in dem Ballon wurde ebenfalls untersucht, eine Änderung ist nicht notwendig gewesen. Außerdem wurde der Greifvorgang optimiert, um geringere Anpresskräfte und gleichzeitig höhere Haltekräfte zu erzielen. Zudem wurde ein objektabhängiger optimaler Betriebspunkt gefunden, über den die optimale Aufnahmeposition für das jeweilige Objekt bestimmt werden kann. Das erste Ziel wurde erfolgreich erreicht. Die acht Testobjekte konnten alle von dem Softgreifer gehalten werden.

Nun sollen in diesem Versuch alle Anpassungen und Optimierungen des Softgreifers auf die Probe gestellt werden. Die Testobjekte sollen um die verschiedensten Objekte aus dem Alltag erweitert werden. Es sollen willkürliche Objekte wie Werkzeug, Büroutensilien und Lebensmittel getestet werden, um die Universalität des Greifers zu bewerten. Die in dem Anwendungsfall definierte maximale Objektgröße soll überschritten werden.

Für diesen Versuch wird das gleiche Material wie im letzten Versuch verwendet. Die weiteren Testobjekte, die nun verwendet werden sind im Anhang B aufgeführt.

4.5.2 Versuchsdurchführung

In diesem Versuch verändert sich der Messaufbau zu den vorherigen Versuchen nicht. Der Softgreifer wird nacheinander alle weiteren Testobjekte greifen. Es wird das Greifverfahren „Aufgepustet auf Objekt fahren“ angewendet, weil es sich in dem letzten Versuch bewährt hat. Der Abstand zur Arbeitsfläche wird bei $AA = 53\text{mm}$ belassen. Nur für sehr hohe Objekte, wie die Flasche, wird der Abstand angepasst. Es wird getestet ob die Objekte gehalten werden können oder nicht.

4.5.3 Ergebnisse

Es wurden insgesamt 22 verschiedene Testobjekte ausgewählt. Von den 22 Testobjekten konnten 15 Stück gehalten werden, dies entspricht einer Erfolgsquote von 68%. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist ebenfalls im Anhang B festgehalten.

Herausstechend sind einige Lebensmittel, die trotz ihrer Größe und ihrem Gewicht sehr gut gehalten werden können. In Abbildung 48 wird Obst und Gemüse gehalten.



Abbildung 48 Softgreifer greift Karotte, Zucchini & Banane

Der Softgreifer hält eine Karotte (43g), eine Zucchini (260g) und eine Banane (119g) zuverlässig. Die drei Lebensmittel unterscheiden sich in ihrer Form, dem Gewicht und der Oberfläche und können trotzdem gehalten werden.

Es konnten außerdem verschiedene Werkzeuge gegriffen werden, wie in Abbildung 49 zu sehen.



Abbildung 49 Softgreifer greift Schraubenzieher, Zollstock & Maulschlüssel

Der Softgreifer greift zuverlässig einen Schraubenzieher (85g), einen Zollstock (114g) und einen Maulschlüssel (78g). Der Schraubenzieher wird an dem Griff aus Plastik gegriffen. Der Zollstock besteht aus Holz und der Maulschlüssel aus Edelstahl. Die Oberflächen der drei Objekte unterscheiden sich ebenfalls: sie sind griffig, rau und glatt.

Andere Objekte wie eine Plastik Flasche, ein Tafelabzieher, eine Softdrink-Dose (330ml) mit großen Dimensionen können ebenfalls erfolgreich gehalten werden. Im Anhang D sind Abbildungen und Videos zu allen Greifvorgängen beigefügt.

Es können allerdings nicht alle Objekte gehalten werden. Objekte mit sehr glatten Oberflächen, wie ein Metall Kugelschreiber, sehr kleine Schrauben und Muttern oder schwere Porzellan Tassen mit glatter Oberfläche können nicht gehalten werden. Bei dem Versuch ein gekochtes Ei zu greifen ist erneut das Problem der hohen Anpresskraft deutlich geworden. Die Abbildung 50 zeigt das zerdrückte Ei.



Abbildung 50 Gekochtes Ei von Softgreifer zerdrückt

Objekte aus Box greifen

Der Softgreifer wurde für einen besonderen Anwendungsfall getestet, bei dem in einer Box verschiedene Testobjekte willkürlich verteilt liegen. Das Ziel ist es ein paar Objekte aus dieser Box zu entnehmen und sie daneben abzulegen, um sie dann weiter zu handhaben. Der Greifer kann die aufrechtstehenden Objekte aus der Box zuverlässig greifen und zwei bis drei Objekte gleichzeitig anheben, wie in Abbildung 51 zu sehen.

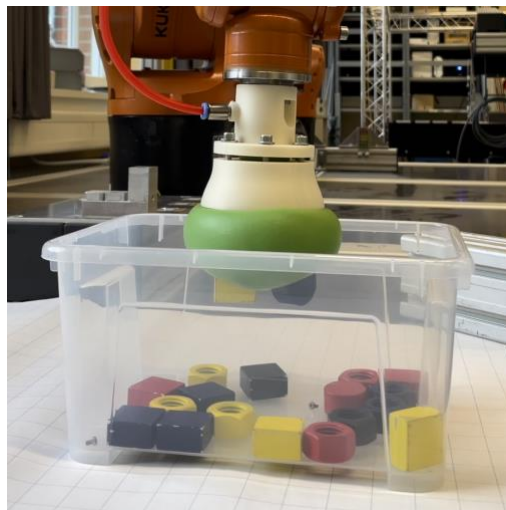


Abbildung 51 Softgreifer hebt zwei Objekte gleichzeitig aus einer Box

Das Problem bei den Objekten in der Box sind flach liegenden Objekte auf einer Höhe. Der Greifer kann dann keine Struktur richtig umschließen und einklemmen. Objekte aus den Ecken zu greifen kann ebenfalls ein Problem sein, da die Geometrie des Softgreifers früh an die Wände stößt. Durch Aufpusten des flexiblen Ballons könnten diese Probleme umgangen werden, sofern die Box an der Arbeitsfläche fixiert ist und nicht wegrutschen kann.

4.5.4 Auswertung

Mit diesem abschließenden Versuch kann der erste Teil der Forschungsfrage bereits beantwortet werden. Es ist deutlich geworden: Der Softgreifer ist nicht 100% universell einsetzbar. Bereits bei der Auswahl der Testobjekte wurde keine willkürliche Entscheidung getroffen. Es wurden nur Objekte gewählt, die von der Größe etwa maximal doppelt so groß sind wie der Softgreifer. Zudem wurden keine stark empfindlichen, flexiblen oder brüchigen Objekte gewählt. Die Objekte müssen für das Greifverfahren „Aufgepustet auf Objekt fahren“ im Durchschnitt 55 Newton aushalten können, ohne sich zu verformen, stark zu bewegen oder zerstört zu werden. Objekte wie Kleidung, die meisten Pflanzen, natürliche Objekte, Tiere oder empfindliche Lebensmittel und Produkte wurden ausgeschlossen und nicht getestet. Es konnten von den weiteren Testobjekten nur 68% der Objekte gehalten werden.

In diesem Versuch ist allerdings deutlich geworden, welche Eigenschaften ein Objekt haben muss, damit es von dem Softgreifer gehalten wird. Die wichtigsten Faktoren sind die *Objektgröße*, die *Objektform* und der davon abhängige *Grad der Umschließung des Objektes*. Der Ballon sollte die Objekte etwa zur Hälfte der Höhe des Objektes umschließen können, um hohe Haltekräfte zu erreichen. Objekte die nicht ausreichend umschlossen werden können, wie die beiden Tassen oder die flachliegenden Objekte in der Box, werden nicht gehalten. Oder der Greifer muss eine Struktur, wie eine Ecke, Kante oder eine Hinterschneidung umschließen, um die Objekte einzuklemmen und Formschlüssigkeit zu erreichen. Bei den Tassen ist das nicht der Fall und sie scheinen außerdem zu schwer und glatt.

Bei der Plastik Flasche ist dies gelungen. Die Form des Deckels und das Umschließen dieser Hinterschneidung am Deckel, reicht aus, um die Flasche zu halten, obwohl nur etwa 5% der Oberfläche von dem Greifer umschlossen wurde.

Bei sehr kleinen Objekten, wie dem kleinen Metall Zahnrad (Testobjekt 4), der M5 Mutter oder der M5 Schraube tritt ein Problem aufgrund der Größe auf. Diese Objekte werden mehr als zur Hälfte umschlossen, können aber trotzdem nicht gegriffen werden. Die Objekte und Strukturen sind zu klein und detailliert. Der Ballon kann nicht so eng an dem Objekt anliegen, weil er nicht flexibel genug ist. Für diese kleinen Objekte müsste ein dünneres Ballonmaterial verwendet werden.

Der zweit wichtigste Faktor ist die *Objektoberfläche*. Die Oberflächenreibung spielt eine wichtige Rolle für die Haltekraft. Diese Auswirkung ist zum Beispiel bei den Kugelschreibern zu erkennen. Der glatte Edelstahl Kugelschreiber kann nicht gehalten werden, der Plastik Kugelschreiber hingegen schon. Gleiches fällt auch in der Beobachtung beim Greifen des Maulschlüssels auf, der Schlüssel hält nicht sehr gut. Der grippige Griff des Schraubenziehers hält allerdings sehr gut.

Im Rahmen von diesen begrenzenden Faktoren, der richtigen Oberfläche, Form, Größe und Steifigkeit des Objektes, ist der Greifer sehr universell einsetzbar. Eine konkrete Benennung dieser Rahmendaten für alle möglichen Objekte fällt allerdings schwer. Auf dieser Konkretisierung müsste eine Vorhersage beruhen, ob ein Objekt gegriffen werden kann. Eine Annäherung gelingt Brown in seiner Untersuchung des Softgreifers und wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

5 Analyse des Granulat-basierten Softgreifers

5.1 Die physikalischen Prinzipien der Haltekraft F_H

In diesem Kapitel wird konkret zusammengefasst, welche physikalischen Effekte zu der Haltekraft des Softgreifers führen. Teilweise wurden die Effekte bereits in den Auswertungen der einzelnen Versuche angedeutet.

Es gibt laut Brown et al. [1] drei verschiedene Mechanismen; *Oberflächenreibung*, *Saugeffekte* und die *Formschlüssigkeit*. Die Effekte der *Oberflächenreibung* und der *Formschlüssigkeit* wurden bereits in Versuch 2 und 4 beobachtet. Der *Saugeffekt* ist nicht so leicht zu beobachten, da er zwischen der eingeschlossenen Objektoberfläche und dem Ballon entsteht.

Brown kann die drei Halteeffekte voneinander isolieren, indem das Testobjekt auf eine Acryl Kugel beschränkt wird. Eine Kugel bietet sich aufgrund der hohen Kontaktfläche und des dementsprechend guten Ergebnisses an (siehe Testobjekt 5 „Aluminium Globus“). Die Acryl-Kugel mit Radius R wird in einem Messaufbau mit dem Materialtester Instron 5869 in den Granulat-befüllten Ballon gepresst. Die maximale Haltekraft wird durch das Herausziehen der Kugel gemessen. Der Grad der Umschließung des Objektes wird durch den Kontakt-Winkel θ angegeben und gemessen (Abbildung 52). Durch das Plotten der maximalen Haltekraft F_h und dem Kontaktwinkel θ , können die verschiedenen Mechanismen eindeutig voneinander unterschieden werden.

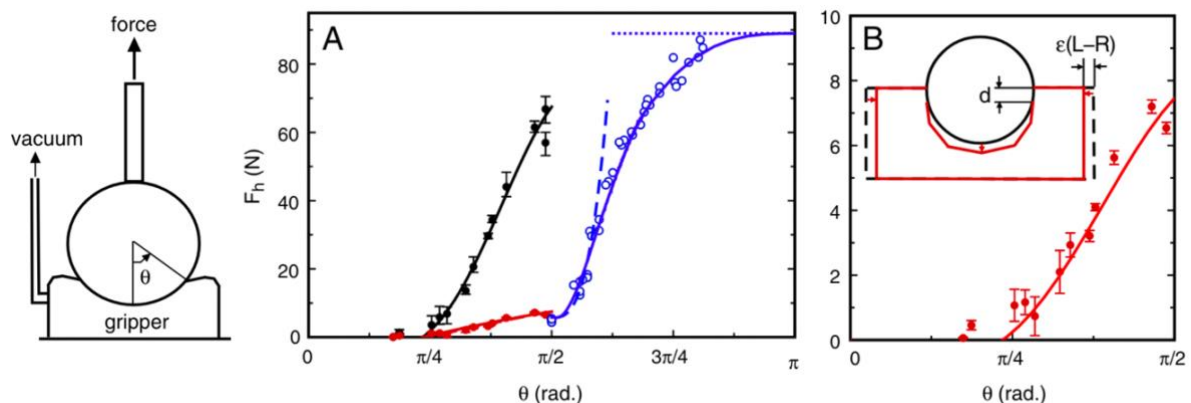


Abbildung 52 Softgreifer Haltekraft F_h als Funktion des Kontaktwinkels θ [1]

Um zunächst den *Saugeffekt* zu entfernen, wird eine poröse Kugel verwendet, bei der die Luft entweichen kann. Unter dem minimalen Kontakt-Winkel von $\theta \approx \frac{\pi}{4}$ werden keine Haltekräfte gemessen. Ab $\frac{\pi}{4}$ steigt die Haltekraft allerdings stark an (Rote Datenpunkte Abbildung 52 (A,B)). Diese Kraft ist allein auf den Effekt der *Oberflächenreibung* zurückzuführen.

Ab dem Kontaktwinkel $\theta > \frac{\pi}{2}$ wird die Kugel um mehr als 50% von dem Ballon umschlossen. Der Effekt der *Formschlüssigkeit* setzt ein und führt zu einer extremen Verstärkung der Haltekraft (Blaue Datenpunkte Abbildung 52 (A)).

Das Vakuumieren des Ballons und der konstante Abfall des Drucks über die Membran, verursacht eine Volumenkontraktion des Granulat-Ballons wie in der Skizze (Abbildung 52 (B)) verdeutlicht. Diese Kontraktion hat zwei Auswirkungen. Sie erhöht die Spannung

zwischen dem Ballon und der Kugel und zur gleichen Zeit verdichtet und härtet sie das Granulat in dem Ballon. Die Verhärtung ist essenziell, um das Objekt einzuklemmen.

In der Skizze (Abbildung 52 (B) ist zwischen der Kugel und der Membran bereits der Freiraum erkennbar, der den *Saugeffekt* verursacht. Um diesen Effekt hervorzurufen, wird nun eine feste Kugel ohne Poren verwendet. Die Haltekraft F_h erhöht sich viel stärker, zwischen dem Kontaktwinkel $\frac{\pi}{4}$ und $\frac{\pi}{2}$, als vorher (Schwarze Datenpunkte Abbildung 52 (A)). Der *Saugeffekt* und die *Reibung* addieren sich.

Außerdem gelingt es Brown eine quantitative Modellierung der Haltekraft herauszuarbeiten. Es wird angenommen, dass die Volumenänderung eine horizontale Spannung σ^* um die Kontaktlinie des Ballons auf der Kugel verursacht. Die horizontale Spannung wirkt auf einen schmalen Streifen mit der Breite $\partial\theta$ und mit der Mitte bei θ .

Die gequetschte Region verhält sich wie ein O-Ring mit einer Breite $d = R\delta\theta$ und einem Durchmesser $2\pi R\sin\theta$, der über eine Fläche $A_0 = 2\pi R d \sin\theta$ gegen die Kugel drückt, wie in Abbildung 52 (B) skizziert. Die resultierende Normalkraft auf die Kugel, $F_N = \sigma A_0 \sin\theta = 2\pi R d \sigma \sin 2\theta$, erzeugt eine tangentielle Reibungskraft von der Größe μF_N , wobei μ der statische Reibungskoeffizient an der Membran/Kugel-Schnittstelle ist. Das Ausbalancieren der vertikalen Komponenten dieser Kräfte ergibt dann die maximale vertikale Kraft, die angewendet werden kann, bevor die Schnittstelle rutscht, $F_f = F_N (\mu \sin\theta - \cos\theta)$. Für eine poröse Kugel, für die sich keine Vakuumdichtung bilden kann, ist die Haltekraft daher:

$$F_h = F_f = 2\pi R d \sigma^* (\mu \sin\theta - \cos\theta) \sin^2\theta \quad (9)$$

Bei einer festen normalen Kugel funktioniert der O-Ring außerdem wie eine Dichtung, welche das Vakuum in der Lücke zwischen der Kugel und dem Ballon hält.

Um den *Saugeffekt* zu messen, wurde von innen ein Loch in die Kugel gebohrt und dort ein Druckmessgerät installiert und der Vakuumdruck in der Lücke (P_g) gemessen.

Es wurde herausgefunden, dass nur vom Vakuumieren des Ballons kein *Saugeffekt* eintritt. Erst beim Ziehen an der Kugel, bildet sich eine Lücke zwischen der Kugel und dem Ballon und der *Saugeffekt* tritt ein. Die daraus resultierende vertikale Saugkraft ist $F_s = P_g A^*$, wobei A^* die horizontale Querschnittsfläche ist, die von der Kontaktlinie eingeschlossen ist. Für eine Kugel ist $A^* = \pi R^2 \sin^2\theta$. Der Druck auf den gequetschten O-Ring wird die Vakuumdichtung an Ort und Stelle halten, solange die Reibungsspannung größer ist als der Spaltdruck P_g . Der maximale Spaltdruck, bevor die Dichtung versagt, ist dementsprechend $P_g = F_f / A_0 = \sigma^* \sin\theta (\mu \sin\theta - \cos\theta)$. Daraus ergibt sich die gesamte Haltekraft, mit dem *Saugeffekt* und der *Reibung* zu:

$$F_h = F_s + F_f = \pi R^2 \sigma^* (\mu \sin\theta - \cos\theta) \sin^3\theta \left(1 + \frac{2d}{R \sin\theta}\right) \quad (10)$$

Ab einem Kontakt-Winkel von größer als $\frac{\pi}{2}$, spielt der dritte Mechanismus, die *Formschlüssigkeit*, eine Rolle. Es wird angenommen, dass die Haltekraft durch das Verzahnen (F_i ($i = interlocking$)) als Widerstand gegen eine Kombination von Biegung und Dehnung des vakuumierten Ballons abhängt. Über einen triaxialen Dehnungsversuch und einen 3-Punkt-Biegetest, werden Spannungs-Dehnungs Kurven für den vakuumierten Ballon erstellt und das E-Modul ermittelt.

Bei minimaler Verzahnung von $\theta - \pi / 2 \ll 1$, ist eine geringe Spannung notwendig, um die Kugel aus dem Greifer zu lösen. Für das kleine Limit $\varepsilon \approx 1 - \sin \theta$ ist zum Lösen der Kugel das Entgegenwirken gegen eine Vertikale Kraft durch den, um die Kugel geschlossenen Ring erforderlich: $F_i \approx \left(\frac{\pi}{2}\right) ER^2 \left(\frac{t}{l}\right)^3 \left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)^3$. t ist dabei die Dicke des Greifer Materials, welches um die Kugel geschlossen ist und l der Hebelarm. Zudem ist eine weitere Kraft notwendig, um den Hals des um die Kugel gewickelten Bereichs aufzudehnen, welche folgendermaßen beschrieben wird: $F_i \approx \left(\frac{ERt}{6}\right) \left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)^3$. Die genaue Messung des Hebelarms l ist nicht möglich, weil die Position der Biegung nicht eindeutig ist. Zudem ist die Dicke t ungleichmäßig, weil das Granulat sich unvorhersehbar bewegt.

Ab diesem Punkt kann nur mit Schätzungen und weiteren Annahmen gearbeitet werden. Die Modellierung stößt an ihre Grenzen. Es wird keine konkrete und eindeutige Gleichung zur Berechnung der Haltekraft durch die *Formschlüssigkeit* F_i gefunden. Gleiches gilt für den Fall von größerer Verzahnung bei $\theta \gg \pi / 2$. Es werden lediglich Relationen der Kraftanteile aus der blauen Kurve in Abbildung 52 entnommen. [1]

Brown zeigt in dieser Modellierung die drei verschiedenen Faktoren der Haltekraft und kann diese für eine Kugel sehr genau beschreiben. Diese Erkenntnisse können auf beliebige Objekte angewendet werden, auch wenn nur begrenzt konkrete Haltekräfte berechnet werden können. Für einen Quader oder einfache geometrische Figuren, wäre eine Übertragung der Formeln noch möglich. Bei komplexeren Objekten, wie einer Feder oder einem Zahnrad, können nur noch qualitative Aussagen zu der Entstehung der Haltekraft getroffen werden.

Eine Übertragung auf die acht untersuchten Testobjekte aus dem Anwendungsfall ist möglich. Bei dem kugelförmigen Aluminiumglobus spielen alle drei Effekte zusammen und die Haltekraft ist am stärksten. Beim Quader und dem Legostein, fällt der Effekt der *Formschlüssigkeit* weg, wodurch die Haltekraft geringer ausfällt. Der Ballon kann die Objekte nicht bis zur unteren Kante umschließen, um eine Verzahnung zu ermöglichen. Bei der Mutter fällt durch das Loch in der Mitte der *Saugeffekt* weg und ein starker Abfall der Haltekraft, im Gegensatz zum Quader ist erkennbar. Allein die Reibung an den vertikalen Flächen (wie Fläche A_0), an die der Ballon gepresst wird, erzeugt die Haltekraft. Gleiches gilt für die Feder, den Plastik Ring und die beiden Zahnräder. Die seitlichen Anpressflächen sind allerdings sehr klein und unterbrochen, deswegen kann selbst die Reibung keine große Haltekraft erzeugen. Das kleine Metall Zahnrad kann dementsprechend nicht stabil gehalten werden.

5.2 Verbesserungsmöglichkeiten des Prototyps

Der finale Prototyp des Softgreifers kann bereits eine Menge verschiedener Objekte greifen, und erfüllt seine Funktion sehr gut. Bei der Benutzung des Greifers fallen dennoch Verbesserungsmöglichkeiten auf.

Vor allem die Werkstoffe und Materialien, die bisher eingesetzt wurden, können noch optimiert werden. Für das Granulat wurden nur drei verschiedene Materialien getestet und auch für den Ballon, wurde sich auf Latex verlassen. Mit mehr Zeit und Budget, kann die Haltekraft, die Belastungsfähigkeit, die Reißfestigkeit und damit auch die Lebensdauer des Greifers, definitiv gesteigert werden. Bisher konnte der Greifer dennoch etwa 350 Greifvorgänge problemlos durchführen, ohne Ermüdungserscheinungen zu zeigen.

Außerdem kann die Softgreifer-Struktur noch optimiert werden. Die gesamte Konstruktion kann platzsparender konstruiert werden. Es kann Länge eingespart werden und auch der Spielraum des Ballons kann optimiert werden. Bisher schwingt der Ballon aufgrund seiner Eigenmasse teilweise sehr stark. Zudem ist die Rotationssteifigkeit sehr gering. Eine optimierte Aufnahmevorrichtung mit einer größeren Öffnung und einem anderen Spannmechanismus für den Ballon könnte dies verbessern.

Abgesehen von dem Softgreifer, sollte auch die Steuerung des Greifers optimiert werden, auch wenn Brown in seiner Veröffentlichung erwähnt, dass aktives Feedback nicht notwendig ist: „*Without the need for active feedback, this gripper achieves its versatility and remarkable holding strength [...]*“ [1], wird klar, dass eine gewisse Sensorik notwendig ist um den Greifer realistisch einzusetzen.

Bisher wird eine bestimmte Position im Raum angefahren und dort wird der Greifvorgang durchgeführt. Die Greifposition wird nicht an das Objekt, seine Höhe oder seine Lage angepasst. Es wäre allerdings empfehlenswert, die Anpresskraft auf das Objekt zu messen und auf das Objekt anzupassen, oder eine Anpresskraft von 50-60 Newton nicht zu überschreiten. Die Gefahr, den Greifer, die Objekte oder den Roboter zu beschädigen ist ansonsten groß. Bei sehr steifen Objekten könnte die Anpresskraft höher sein, müsste aber vorher jeweils an das Objekt angepasst werden. Die Messung der Kraft könnte über den Abstand zum Objekt mit einem Infrarot-Sensor berechnet werden. Alternativ kann ein Kraftsensor in den Softgreifer integriert werden, um die direkte Krafteinwirkung zu messen.

Zudem könnte in den gesamten Prozess eine Sensorik zur Objekterkennung eingebaut werden, damit der Roboter willkürlich verteilte Objekte in seinem Arbeitsraum finden und greifen kann. Dazu wäre mindestens eine Kamera notwendig, um den Mittelpunkt der Objekte festzustellen. Auch die Höhe der Objekte könnte damit gemessen werden.

5.3 Möglichkeiten und Grenzen des Softgreifers

Der entwickelte und im Detail untersuchte Softgreifer, ursprünglich erfunden von Brown u.a., hat viele Möglichkeiten in seinem Einsatz und besitzt große Chancen, die herkömmlichen Pick-and-Place Roboter-Greifer abzulösen. Gleichzeitig sind bei der Entwicklung des Greifers, bei den verschiedenen Versuchen und der Recherche zu dem Thema auch einige Grenzen des Prinzips und der Technik aufgefallen.

Der Granulat-basierte Softgreifer schafft es mit einer besonderen Greifmethodik auf den ersten Blick zu beeindrucken. Der Greifer kann, wie in Versuch 4 gezeigt, unzählige verschiedene Objektarten greifen. Die Objekte unterscheiden sich in ihren Materialien. Es werden Holz, Plastik, Metalle und natürliche Materialien gegriffen. Die Formen, Größen und das Gewicht der Objekte unterscheiden sich stark. Es werden Lebensmittel, Werkzeuge und verschiedene Bauteile gehalten. Es scheint fast, als wenn der Greifer „universell“ ist und jedes Objekt greifen kann.

Der Greifer ist von seinem Aktuator-Prinzip trivial. Er wird rein pneumatisch aktiviert und benötigt keine Mechanik. Ein Roboter muss ihn lediglich an die richtige Position fahren. Durch den flexiblen Ballon ist der Greifer zudem sehr verzeihbar. Die Positionierung muss nicht sehr genau sein. Auch Objekte, die ein paar Zentimeter von dem Ballonmittelpunkt entfernt liegen, können gegriffen werden. Zudem können sehr komplexe Objekte, dessen Form vorher möglicherweise unbekannt ist, gegriffen werden.

Außerdem sind durch das simple Greifprinzip die Entwicklung und eine zukünftige Produktion kostengünstig. Es werden lediglich die pneumatischen Schnittstellen, der Ballon mit dem Granulat und die Softgreifer Struktur benötigt. Eine Sensorik zum Messen der Anpresskraft oder eine Kamera zur Objekterkennung sind nicht unbedingt notwendig.

Der Granulat-basierte Softgreifer zeichnet sich zudem durch seine gute Haltekraft von mehr als 10 Newton aus. Überhaupt können die Haltekräfte des Greifers beim Zusammenspiel aller drei Greifmechanismen sehr stark werden, was diesen Greifer, laut O. Yasa u. a., von anderen Softgreifern absetzt und Potential bietet: *„In this group of soft robots, the ones that work with a jamming mechanism are the most promising for manipulating high-load objects with a minimal applied force“* [3].

Allerdings lässt sich nach der Entwicklung und vielen Versuchen mit dem Softgreifer feststellen, dass der Granulat-basierte Softgreifer nicht 100% universell einsetzbar, sondern nur für Objekte mit bestimmten Eigenschaften geeignet ist. Die größte Einschränkung, die der Softgreifer besitzt, ist seine Anpresskraft auf die Objekte.

Dadurch, dass eine vertikale Krafteinwirkung von mindestens 20-30 Newton auf die Objekte notwendig ist, um überhaupt ein einziges Objekt zu greifen, wird der Einsatz des Greifers enorm eingegrenzt. Daraus resultierend ergeben sich folgende Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung des Greifers. Die Objekte müssen steif sein und dürfen sich nicht leicht verformen können. Sie dürfen nicht zerbrechlich oder empfindlich sein, weil sie sonst zerstört werden können. Auf etwa 25-50% der gesamten Objektoberfläche wirkt die Flächenlast des Softgreifers.

Die Objekte müssen zudem auf einer waagerechten Oberfläche liegen und der Greifer muss senkrecht auf die Objekte fahren. Beim schrägen Anfahren oder bei geneigten Oberflächen,

rutschen die Objekte weg und sind nicht greifbar. Eine Fixierung der Objekte wäre notwendig. Außerdem ist das Greifen von Objekten, die in der Luft hängen oder Gegenstände, die nachgeben, weil sie nicht fest fixiert sind, unmöglich. Das gleiche Problem tritt auch bei anderen Softgreifern auf: *“However, the gripper was unable to handle low-profile objects, due to the downward pressing force; this was identified as a limitation of the proposed design.”* [8] Weitere Grenzen des Softgreifers ergeben sich aus den Prinzipien der Haltekraft und aus den durchgeführten Versuchen. Der Softgreifer hat Probleme sehr kleine Objekte zu greifen, weil der Ballon oft nicht flexibel genug ist, um ausreichend Kontaktfläche herzustellen. Der Softgreifer hat außerdem große Probleme bei flachen Objekten, da nicht genug senkrechte Flächen vorhanden sind, die der Greifer einklemmen kann. Zudem kann die Formschlüssigkeit und ein Saugeffekt meist auch nicht erreicht werden. Außerdem können Objekte, die zu glatt sind, nicht gehalten werden, weil die Oberflächenreibung zu gering ist. Dadurch ist auch der Saugeffekt nicht möglich und nur die Formschlüssigkeit kann die notwendige Haltekraft ermöglichen. Zudem sind für den Greifer spitze Objekte und hohe Temperaturen sehr gefährlich, da sie den Ballon zerstören könnten.

5.4 Mögliche Anwendungsfälle

Der Granulat-basierte Softgreifer hat aufgrund seiner Eigenschaften und Flexibilität eine breite Palette von Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Branchen und Szenarien.

Der Softgreifer kann vor allem vielfältig in Produktionsumgebungen eingesetzt werden. Zum Beispiel bei Sortier-, Pack- und Platzieranwendungen. Der Softgreifer eignet sich sehr gut für Pick-and-Place Anwendungen in der Industrierobotik.

Die Lebensmittelindustrie bietet sich dabei besonders an. Der Softgreifer hat die Möglichkeit, empfindliche Lebensmittelprodukte sicher zu handhaben, ohne sie zu beschädigen. Seine sanfte Greiftechnik eignet sich besonders für den Umgang mit Obst, Gemüse und anderen empfindlichen, aber steifen Lebensmitteln. Darüber hinaus kann der Greifer auch in der Handhabung aller Art von Verpackungen und Produkten eingesetzt werden.

Auch eine Kombination von mehreren Greifern ist denkbar. Es könnte so die Tragfähigkeit erhöht werden und gleichzeitig die Handhabung sehr großer, komplexer Objekte ermöglicht werden, die weit über die Greifer Größe hinausgehen. Beispielsweise Karosserieteile oder Gehäuse in der Automobilbranche, wie in der Grundidee des Softgreifers angerissen wurde.

Darüber hinaus könnte der Softgreifer in Assistenz- und Servicerobotern eingesetzt werden, um verschiedene Aufgaben in der menschlichen Umgebung zu erfüllen. Zum Beispiel als eine Unterstützung bei der Haushaltsarbeit für ältere oder behinderte Menschen. Der Einsatz an einem Roboter, der verschiedene Objekte holen und ausliefern kann, in einem Restaurant oder im Krankenhaus. Oder der Einsatz an einem Roboter, der beim Kochen oder beim Putzen hilft wäre vorstellbar. Aufgrund seiner Flexibilität ist der Greifer auch für den Umgang mit Menschen denkbar.

Außerdem bietet sich der Softgreifer für Expeditionen und Forschungseinsätze an. Beispielsweise könnte der Softgreifer aufgrund seiner Luftdichtigkeit und Anpassungsfähigkeit in der Raumfahrt bei einer Mars Expeditionen nützlich sein. Er könnte für das Greifen von

Proben oder das Handhaben von Ausrüstung in der Schwerelosigkeit eingesetzt werden. Durch seine Luftdichtigkeit wäre der Softgreifer auch für den Einsatz unter Wasser geeignet. In Unterwasserumgebungen könnte er zur Bergung von Gegenständen oder zur Unterstützung bei wissenschaftlichen Forschungsarbeiten eingesetzt werden.

Unabhängig von industriellen, Forschungs- oder Assistenzanwendungen kann auch der Einsatz in der Unterhaltungsbranche interessant sein. Der Softgreifer könnte in Spielautomaten eingesetzt werden, wo präzises Greifen und handhaben von Objekten gefragt ist. Durch seine besondere Greiftechnik könnte er ein interessantes Element sein und eine Herausforderung für Spieler darstellen.

Insgesamt bietet der Softgreifer eine große Bandbreite von Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen. Von der industriellen Produktion über die Lebensmittelindustrie bis hin zu anspruchsvollen Umgebungen wie dem Weltraum und dem Unterwasserbereich.

Ob der Granulat-basiert Softgreifer eingesetzt wird, hängt nicht nur von technischen Aspekten, sondern auch von wirtschaftlichen Faktoren ab. Der Greifer muss sich in der Branche und auf dem Markt gegen andere Softgreifer-Prinzipien durchsetzen und bestimmte Aufgaben besser und schneller lösen können. Es muss die Nachfrage und den Bedarf nach einer neuen Technik geben. Außerdem muss die Technik gut vermarktet und verkauft werden. Ein kurzer Anriss dieser Faktoren wird im nächsten Abschnitt betrachtet.

5.5 Warum hat sich der Greifer bisher nicht durchgesetzt?

In diesem Kapitel wird der Softgreifer nicht mehr rein technisch betrachtet. Es wird in Kürze der Markt und die Branche betrachtet, um das Potential des Softgreifers zu bewerten. Es soll erklärt werden, warum der Granulat-basiert Softgreifer bisher nicht auf dem Markt Fuß gefasst hat. Verschiedene Faktoren, wie die Marktentwicklung, Konkurrenz Produkte, die Reife der Technik, die Nachfrage und auch der erste Kommerzialisierungsversuch von Empire Robotics mit dem VERSABALL® Gripper werden berücksichtigt.

Zur Übersicht wird in Abbildung 53 die Entwicklung der jährlichen Installierungen von Industrierobotern weltweit dargestellt. Es ist ein klarer Wachstumstrend erkennbar.

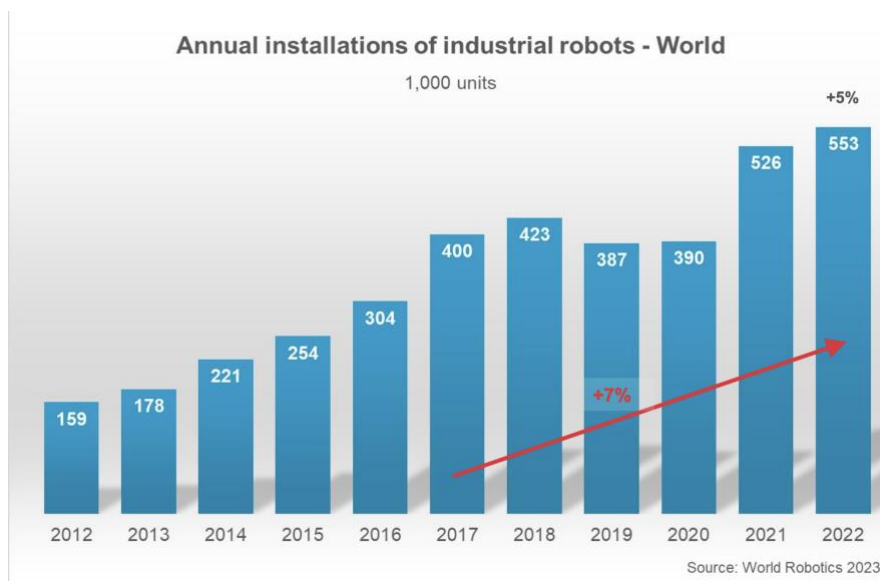


Abbildung 53 Jährliche Installierungen von Industrierobotern weltweit [2]

Ein noch größeres Wachstum kann die professionelle Servicerobotik verzeichnen, mit einem Wachstum von +48% auf 158,000 verkaufte Einheiten. Die Robotik Branche wächst stetig. Es ist eine steigende Automatisierung in allen Industriezweigen zu verzeichnen. Der Trend ist eindeutig. Das Potential für einen neuen Softgreifer, der Aufgaben übernimmt, die vorher nicht umsetzbar waren, ist da.

Marktwachstum und Potential sind nicht die einzigen Faktoren, die Konkurrenz auf dem Markt spielt auch eine Rolle. Im Kapitel 2 zum Stand der Technik der Softrobotik wurden bereits andere Softgreifer mit ähnlichen Qualitäten vorgestellt. Die pneumatisch-betriebenen Finger von Soft Gripping (Abbildung 2) oder die flexiblen mechanischen Finger von Festo (Abbildung 10) sind von den Funktionen und den Möglichkeiten ähnlich umfangreich. Die Softgreifer werden ebenfalls pneumatisch betrieben, können auch empfindliche Objekte Greifen und können auch relativ universell Objekte greifen. Zudem müssen diese Softgreifer nicht so stark auf die Objekte angepresst werden, sondern schließen die Objekte zwischen ihren Fingern ein, wie Menschen und Tiere es seit mehreren Millionen Jahren machen.

In einem Vergleich von vier verschiedenen Softgreifern, die pneumatisch-betriebenen Finger von Soft Gripping [7] (Gripper 1), dem pneumatischen Granulat-basiertem Softgreifer von Brown (Gripper 2), ein Greifer mit mechanischen Fingern, aktiviert durch Kabel (Gripper 3) und dem mechanischen Fingergreifer von Festo [14] (Gripper 4), schneidet der Softgreifer von Brown am schlechtesten ab. Es wird die Erfolgsrate beim Greifen von 12 verschiedenen Testobjekten in drei verschiedenen Umgebungen gemessen und in Abbildung 54 dargestellt.

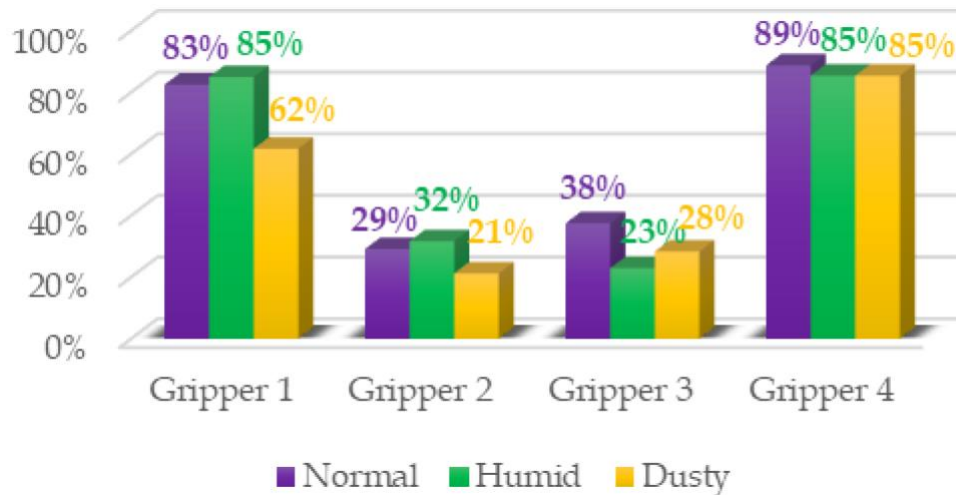


Abbildung 54 Vergleich von vier Softgreifern in drei Testumgebungen [26]

Dieser Versuch zeigt, dass die Variabilität des Granulat-basierten Softgreifers nicht so hoch ist, wie die von anderen Softgreifern. Dies ist ein Nachteil im Vergleich zu den Konkurrenzprodukten auf dem Markt.

Dem Granulat-basierten Softgreifer fehlt ein Alleinstellungsmerkmal. Die starke Haltekraft oder die hohe Anpassungsfähigkeit könnten so ein Merkmal werden.

Eine sehr konkrete Anwendung, bei der nur dieser Ballonförmige Greifer einsetzbar wäre, würde den Greifer ebenfalls herausstechen lassen. Bisher ist keine perfekte Anwendung für den Granulat-basierten Softgreifer gefunden worden.

Das beste Beispiel ist der gescheiterte Versuch von Empire Robotics, den Softgreifer in Form des Versaball Grippers zu kommerzialisieren (Abbildung 55). Das Unternehmen wurde 2012 gegründet und musste bereits 2016 Insolvenz anmelden, weil sie nicht erreichen konnten, ein nachhaltiges Unternehmen um die Technologie aufzubauen. Die Gründe werden in der Veröffentlichung „Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product“ [27] genauer erläutert. Eine schlechte Vermarktung, fehlende Nachfrage, schlechtes Management oder das bereits erwähnte, fehlende Alleinstellungsmerkmal, können Gründe für den Misserfolg gewesen sein. Der Greifer wurde von Empire Robotics bereits beim Bier Pong spielen, greifen von scharfen Glasscherben und rohen Eiern oder in der gefahrlosen menschlichen Interaktion präsentiert [28].



Abbildung 55 Versaball von Empire Robotics [29]

Aufgrund dieses Misserfolgs des Versaball Grippers, wurde ein erneuter Versuch bisher gemieden. Die Technik gilt scheinbar als abgeschrieben und wurde durch andere Softgreiferlösungen, wie in dem Vergleich aus Abbildung 54 ersetzt.

6 Fazit & Ausblick

Der Granulat-basierte Softgreifer von Brown u.a. ist ein außergewöhnlicher Robotergrifer. Durch das Verkleben und Verfestigen des Granulats in dem Ballon des Greifers beim Vakuumieren können Objekte gegriffen werden. Die hohe Verformungs- und Anpassungsfähigkeit des Greifers ermöglicht das Greifen von unzähligen Objekten. Am Ende dieser Arbeit wird gezeigt, wie der finale Prototyp verschiedenstes Obst und Gemüse, Werkzeuge und Bauteile mit den unterschiedlichsten Eigenschaften und Formen halten kann. Die Entwicklung des ersten Prototyps hat gezeigt, dass das Prinzip simpel und replizier fähig ist. Später ist in der Optimierung des Greifers aufgefallen, wie umfangreich die Technik wird, wenn alle Details betrachtet werden müssen.

Der final vorgestellte Prototyp ist nicht komplett ausgereift und bietet Optimierungspotential. Vor allem die Aspekte Materialauswahl, Ballonstabilität und Taktzeit könnten in Zukunft noch stärker fokussiert werden. Mit der Entwicklung des Softgreifers konnten alle notwendigen Analysen und Beobachtungen durchgeführt werden und der festgelegte Anwendungsfall wurde erfolgreich ausgeführt.

Durch die detaillierte Analyse der Versuche mit dem Softgreifer konnten die physikalischen Mechanismen der Haltekraft des Greifers beobachtet werden. Die Beschreibung der drei Mechanismen Reibung, Formschlüssigkeit und Saugeffekte liefert Brown. Durch diese physikalische Beschreibung können quantitative Vorhersagen für die Haltekraft von einfachen geometrischen Objekten, wie Kugeln oder Quadern getätigt werden. Für komplexere Objekte können durch dieses Verständnis auch bereits sehr gute qualitative Vorhersagen getroffen werden. Allerdings sind eine genaue Klassifizierung und Untersuchung der Objekte dafür notwendig. Für eine realistische Echtzeit Anwendung zur Vorhersage der Haltekraft des Softgreifers, könnte in Zukunft eine künstliche Intelligenz trainiert werden.

Die Analyse hat deutlich gemacht, dass die Anpresskraft das größte Problem des Softgreifers ist und ihn in seiner Universalität beträchtlich einschränkt. Der Greifer hat dadurch Probleme, verformbare, weiche und fragile Objekte zu greifen. Objekte benötigen eine gewisse Steifigkeit, um zuverlässig gegriffen werden zu können. Auch schräge Oberflächen oder frei hängende Objekte überfordern den Greifer. Der universelle Einsatz des Greifers ist also auf eine Pick-and-Place Anwendung mit steifen Objekten, unter Berücksichtigung der richtigen Eigenschaften beschränkt. Dies grenzt die Einsatzmöglichkeiten stark ein. Denkbar wäre ein Einsatz bei industriellen, Forschungs-, Unterhaltungs- oder Assistenzanwendungen.

Die abschließende Recherche und Marktanalyse zeigt, dass die Erfindung des Granulat-basierten Softgreifers etwas veraltet ist. Ein Kommerzialisierungsversuch in Form des Versaball Grippers von Empire Robotics im Jahr 2012 [29], ist im Jahr 2016 bereits gescheitert. Im Vergleich mit pneumatisch betriebenen Fingern von Soft Robotics [30], mechanischen Fingern oder einem adaptiven Formgreifer von Festo [31][15], schneidet das Granulat-basierte Greifverfahren schlechter ab.

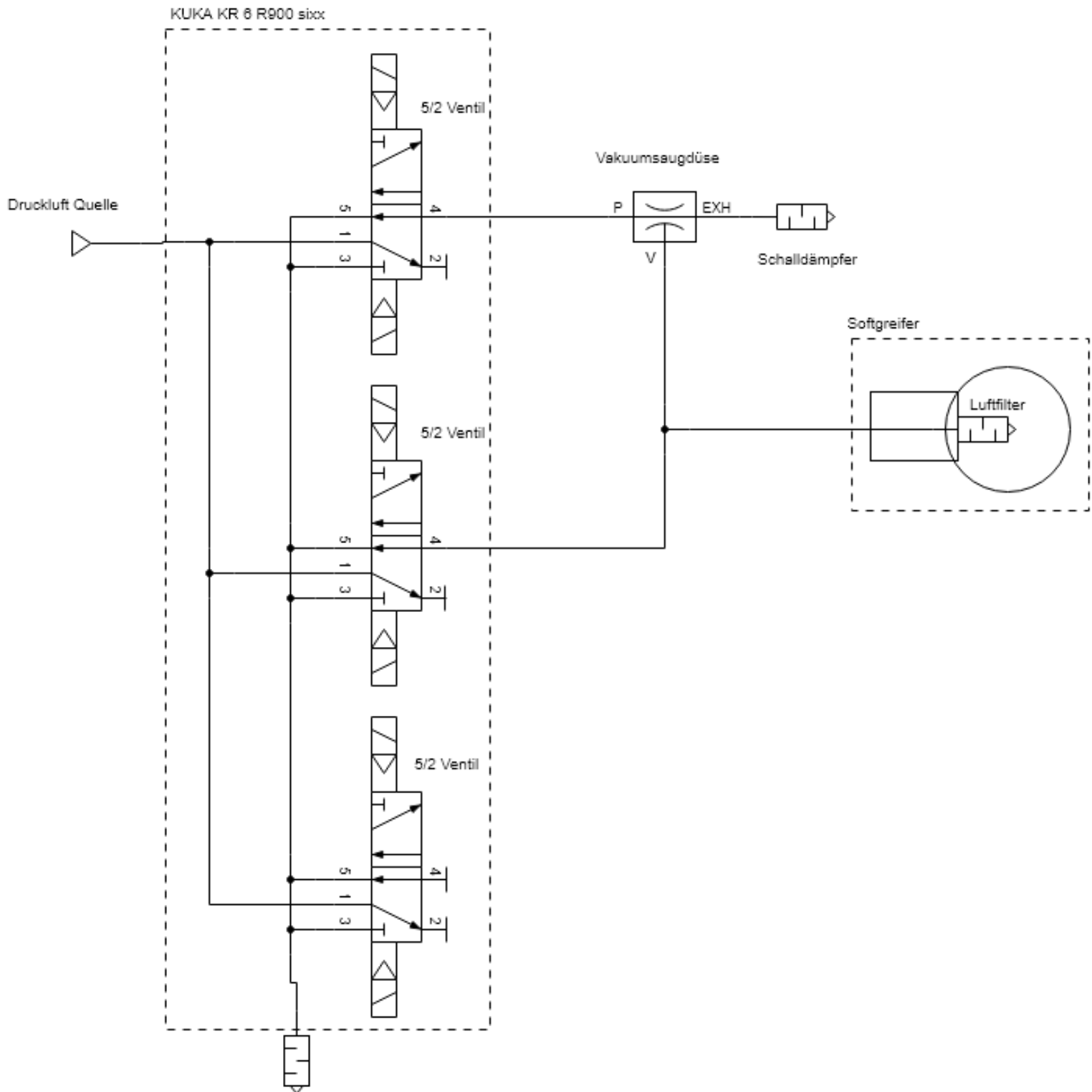
Die Erfindung des Softgreifers von Brown u.a. 2010 ist auf den ersten Blick beeindruckend, schafft es aber bis heute nicht sich auf dem Markt durchzusetzen. Die Technik kann in Zukunft Inspiration und Vorbild für abgeänderte Arten von adaptiven Formgreifern sein, wird aber wohl in dieser Form keine Zukunft auf dem Markt haben.

Quellenverzeichnis

- [1] E. Brown *u. a.*, „Universal robotic gripper based on the jamming of granular material“. Zugegriffen: 14. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1003250107>
- [2] IFR - International Federation of Robotics, „World Robotics 2023“, 2023.
- [3] O. Yasa *u. a.*, „An Overview of Soft Robotics“, *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, Bd. 6, Nr. 1, S. 1–29, 2023, doi: 10.1146/annurev-control-062322-100607.
- [4] TUHH, „MUM: Softrobotik“. Zugegriffen: 15. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuhh.de/mum/forschung/forschungsgebiete-und-projekte/softrobotik>
- [5] T. B. Jørgensen, S. H. N. Jensen, H. Aanæs, N. W. Hansen, und N. Krüger, „An Adaptive Robotic System for Doing Pick and Place Operations with Deformable Objects“, *J. Intell. Robot. Syst.*, Bd. 94, Nr. 1, S. 81–100, Apr. 2019, doi: 10.1007/s10846-018-0958-6.
- [6] „Soft Robotic Manipulation of Onions and Artichokes in the Food Industry“. Zugegriffen: 18. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1155/2014/345291>
- [7] SoftGripping, „Best Soft Gripper Manufacturer in 2023 - SoftGripping“. Zugegriffen: 9. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://soft-gripping.com/>
- [8] Z. Wang, R. Kanegae, und S. Hirai, „Circular Shell Gripper for Handling Food Products“, *Soft Robot.*, Bd. 8, Nr. 5, S. 542–554, Okt. 2021, doi: 10.1089/soro.2019.0140.
- [9] K. C. Galloway *u. a.*, „Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs“, *Soft Robot.*, Bd. 3, Nr. 1, S. 23–33, März 2016, doi: 10.1089/soro.2015.0019.
- [10] J. E. Bernth, A. Arezzo, und H. Liu, „A Novel Robotic Meshworm With Segment-Bending Anchoring for Colonoscopy“, *IEEE Robot. Autom. Lett.*, Bd. 2, Nr. 3, S. 1718–1724, Juli 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2678540.
- [11] W. Hu, G. Z. Lum, M. Mastrangeli, und M. Sitti, „Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion“, *Nature*, Bd. 554, Nr. 7690, Art. Nr. 7690, Feb. 2018, doi: 10.1038/nature25443.
- [12] R. K. Katzschmann, J. DelPreto, R. MacCurdy, und D. Rus, „Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish“, *Sci. Robot.*, Bd. 3, Nr. 16, S. eaar3449, März 2018, doi: 10.1126/scirobotics.aar3449.
- [13] SRT, „SRT软体机器人,柔性夹爪,末端执行器,气动夹爪,北京软体机器人科技股份有限公司“. Zugegriffen: 21. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.softrobottech.com/web/en/>
- [14] Festo, „Festo Gripper Selection | Festo USA“. Zugegriffen: 8. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/us/en/e/products/festo-gripper-selection-id_406053/
- [15] Festo, „Adaptive shape gripper DHEF | Festo USA“. Zugegriffen: 22. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/us/en/p/adaptive-shape-gripper-id_DHEF/
- [16] OnRobot, „Soft Gripper | Flexibler, lebensmittelechter Robotergreifer | Handhabung empfindlicher Objekte“, OnRobot. Zugegriffen: 21. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://onrobot.com/de/products/soft-gripper>
- [17] J. Shintake, S. Rosset, B. E. Schubert, D. Floreano, und H. Shea, Hrsg., „Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators“, *Adv. Mater.*, 2016, doi: 10.1002/adma.201504264.
- [18] C. Chen *u. a.*, „Pneumatic Bionic Hand with Rigid-Flexible Coupling Structure“, *Materials*, Bd. 15, Nr. 4, Art. Nr. 4, Jan. 2022, doi: 10.3390/ma15041358.
- [19] F.EE GMBH AUTOMATION, „EGT - Profilsysteme aus Aluminium - Robotergreifer | F.EE GmbH“. Zugegriffen: 4. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fee.de/automation-robotik/egt-aluminiumprofilsystem-und-robotergreifer>










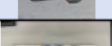



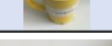
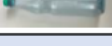








- [20] KUKA Deutschland GmbH, „KR 6 R900 sixx“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/0000205456_de.pdf?rev=76a71ccd941f48489bf359adc2feb7c8
- [21] Schmalz, „Funktionsprinzipien der Vakuum-Erzeugung“. Zugegriffen: 7. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schmalz.com/de-de/vakuum-wissen/basiswissen/funktionsprinzipien-der-vakuum-erzeugung/>
- [22] Festo DE, „Vakuumsaugdüse, pneumatisch VN online kaufen | Festo DE“. Zugegriffen: 7. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/de/de/p/vakuumsaugduese-pneumatisch-id_VN/?page=1&q=%7E%3AsortByCoreRangeAndSp2020%7E%3ACC_Vacuum_connection_C_FP_05-01-01%7E%3ACC_Vacuum_connection.VQ6%7E%3ACC_Additional_function_FP0501_C_FP_05-01-01%7E%3ACC_Additional_function_FP0501._
- [23] Festo DE, „Schalldämpfer Pneumatik online kaufen | Festo DE“. Zugegriffen: 7. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/de/de/c/produkte/fabrikautomation/sonstige-pneumatische-komponenten/schalldaempfer-pneumatik-id_pim163/?page=0
- [24] ruthex, „ruthex Gewindeeinsatz“, ruthex. Zugegriffen: 9. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ruthex.de/products/ruthex-komplett-set-m2-m3-m4-m5-sortimentskasten-m2-5-m6-m8-standard-gewindeeinsatz-m3s-m4s-m5s-short-1-4-zoll-gewindebuchsen-lotspitzen-set>
- [25] A. Gebhardt, „Additive Fertigungsverfahren - ,Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion“.
- [26] S. Terrile, M. Argüelles, und A. Barrientos, „Comparison of Different Technologies for Soft Robotics Grippers“, *Sensors*, Bd. 21, Nr. 9, Art. Nr. 9, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21093253.
- [27] J. Amend, N. Cheng, S. Fakhouri, und B. Culley, „Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product“, *Soft Robot.*, Bd. 3, Nr. 4, S. 213–222, Dez. 2016, doi: 10.1089/soro.2016.0021.
- [28] „Empire Robotics - YouTube“. Zugegriffen: 4. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/>
- [29] Empire Robotics, „Versaball Grippers“, Empire Robotics. Zugegriffen: 15. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.empirerobotics.com/products/>
- [30] Soft Robotics, „Soft Robotics Food Automation Solutions Combing 3D vision, Artificial Intelligence and Soft Grasping“. Zugegriffen: 22. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.softroboticsinc.com/>
- [31] Festo, „Adaptive gripper finger DHAS | Festo USA“. Zugegriffen: 22. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/us/en/p/adaptive-gripper-finger-id_DHAS_GF/

Anhang A: Pneumatik Schaltung



Pneumatische Schaltung des Softgreifers am Kuka Roboter

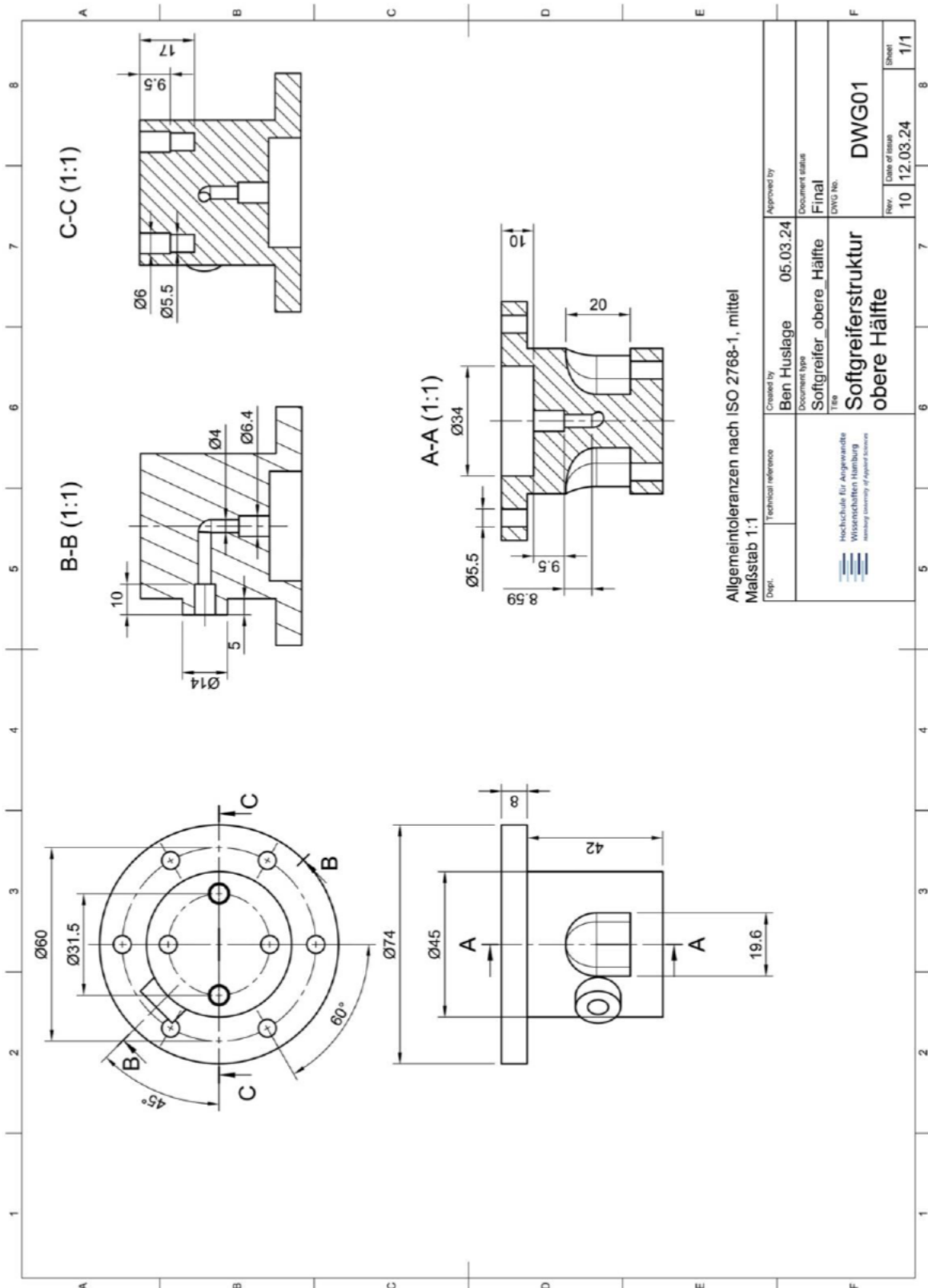
Anhang B: Weitere Testobjekte

	Objekt	Material	Oberfläche	Form	Gewicht [g]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Abbildung	Erfolgreich gehalten?
9	Schraubenschlüssel (klein)	Stahl + Plastik	glatt + rau	zylindrisch -komplex	26,8	20	175	20		Ja
10	Schraubenschlüssel (groß)	Stahl + Plastik	glatt + rau	zylindrisch -komplex	85	33	215	33		Ja
11	Kugelschreiber	Edelstahl	glatt	zylindrisch, länglich	23,2	10	145	10		Nein
12	Kugelschreiber	Kunststoff (ABS)	glatt	zylindrisch, länglich	7,3	10	140	10		Ja
13	Bleistift	Holz	rau	hexagonal, länglich	1,4	7	64	7		Nein
14	Zollstock	Holz	rau	rechteckig, länglich, komplex	114	34	240	16		Ja
15	Maulschlüssel	Edelstahl	glatt	länglich, komplex	77,6	10	165	17		Ja
16	Mutter M5	Edelstahl	glatt	hexagonal	2	10	10	10		Nein
17	Schraube M5	Edelstahl	rau	zylindrisch, länglich	3,8	10	16	16		Nein
18	Tafelabzieher	Kunststoff + Aluminium	glatt	komplex, länglich	92,8	40	450	155		Ja
19	Zufällig verteilte Objekte in der Kiste	Stahl	glatt	rechteckig+ hexagonal	siehe Objekt 1+ 2	siehe Objekt 1+ 2	siehe Objekt 1+ 2	siehe Objekt 1+ 2		Ja
20	Tasse 1	Porzellan	glatt	komplex	478,1	130	90	90		Nein
21	Tasse 2	Porzellan	glatt	komplex	239,6	90	85	85		Nein
22	Flasche	Kunststoff (PET)	rau	zylindrisch -komplex	67,3	310	80	80		Ja
23	Snickers	Kunststoff (PE)	glatt	rechteckig, länglich	81	20	150	35		Ja
24	Corny	Kunststoff (PE)	glatt	rechteckig, länglich	54	40	160	15		Ja
25	Twix	Kunststoff (PE)	glatt	rechteckig, länglich	48,8	40	130	15		Ja
26	Airwaves	Papierartig	glatt	rechteckig	18	20	80	10		Ja
27	CocaCola Dose	Alluminium	glatt	zylindrisch	356	145	57	57		Ja
28	Karotte	Lebensmittel	rau	konisch	43	25	135	25		Ja
29	Zucchini	Lebensmittel	rau	zylindrisch	260	50	210	210		Ja
30	gekochtes Ei	Lebensmittel	rau	Oval	55	45	60	45		Nein
31	Banane	Lebensmittel	rau	zylindrisch -komplex	119	40	150	40		Ja

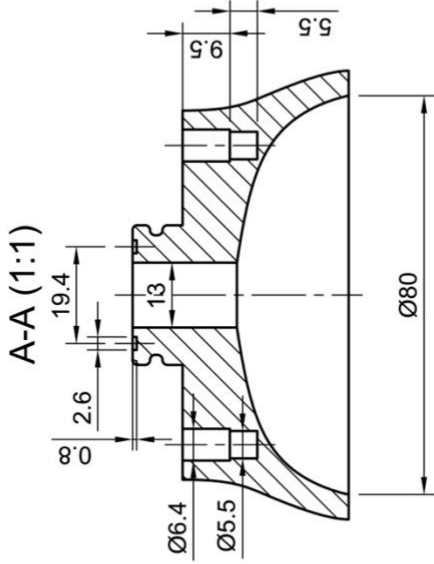
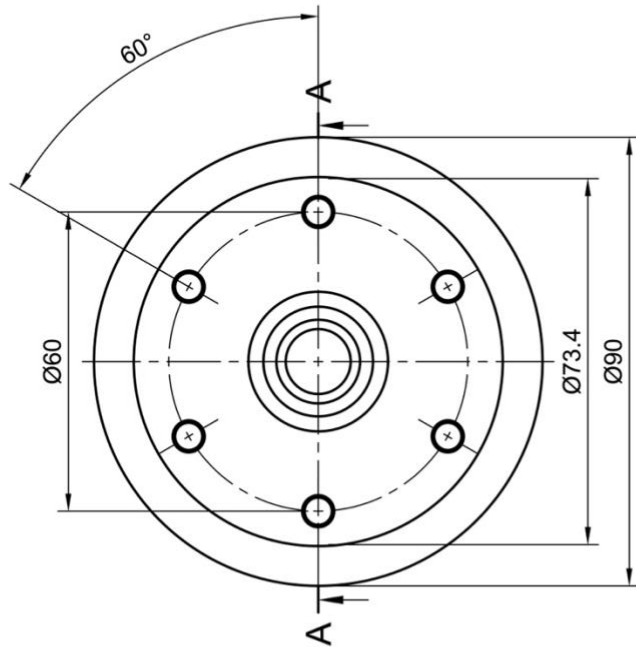
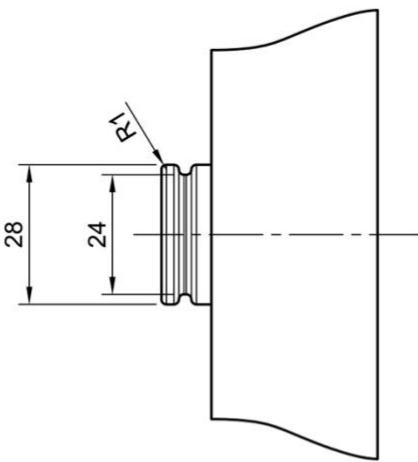
Weitere Testobjekte aus Versuch 4

Anhang C: Technische Zeichnungen


Die originalen PDF-Dateien der technischen Zeichnungen, sowie die 3D-Modelle der Bauteile sind im Ordner „AnhangC_Konstruktion“ auf der beigefügten CD gespeichert und im Teams Ordner für die Abgabe hochgeladen.



Technische Zeichnung - Softgreiferstruktur obere Hälfte



Allgemeintoleranzen nach ISO 2768-1, mittel
Maßstab 1:1

Dept.	Technical reference	Created by Ben Huslage	Approved by
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences	Document type Softgreifer_untere_Hälfte Title Softgreiferstruktur untere Hälfte	05.03.24	Document status Final
		DWG No. DWG02	Rev. 3
		Sheet 1/1	

Anhang D: Fotos und Videos

Weitere Fotos und Videos von dem Softgreifer, mit unterschiedlichem Granulat, in verschiedenen Versuchen und mit unterschiedlichen Greifvorgängen sind im Ordner „AnhangD_Fotos_Videos“ auf der beigefügten CD gespeichert und im Teams Ordner für die Abgabe hochgeladen.

