

Eigenständigkeitserklärung

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die den benutzten Quellen und Hilfsmitteln unverändert oder inhaltlich entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.
2. Sofern generative KI-Tools verwendet wurden, habe ich Produktnamen, Hersteller, die jeweils verwendete Softwareversion und die jeweiligen Einsatzzwecke (z.B. sprachliche Überprüfung und Verbesserung der Texte, systematische Recherche) benannt. Ich verantworte die Auswahl, die Übernahme und sämtliche Ergebnisse des von mir verwendeten KI-generierten Outputs vollumfänglich selbst.
3. Die Satzung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der TU Berlin vom 8. März 2017. https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10000060/FSC/Promotion_Habilitation/Dokumente/Grundsätze_gute_wissenschaftliche_Praxis_2017.pdf habe ich zur Kenntnis genommen.
4. Ich erkläre weiterhin, dass ich die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe.

Berlin, den

17.12.2025



.....
Unterschrift

Bachelorarbeit

**Entwicklung eines adaptiven Algorithmus
zur Optimierung des Greifprozesses
mit flexiblen, leckagetoleranten Sauggreifern
zur kontrollierten Handhabung von flexiblen Bauteilen**

Eingereicht von:

Frederik Hoeft

Matrikelnummer: 469593

Fakultät V: Handhabungs- und Montagetechnik

Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen

Berlin, 17. Dezember 2025

Aufgabensteller:

Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich

Betreuender Wissenschaftlicher Mitarbeiter:

Georg Siegemund

Technische Universität Berlin

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb

Pascalstraße 8 - 9

D - 10587 Berlin

Tel.: 030 / 314 - 22 014

Kurzfassung

In der modernen flexiblen Produktion gewinnen universelle Greifersysteme immer mehr an Bedeutung, um die Handhabung variierender Bauteilgeometrien in unstrukturierten Umgebungen zu ermöglichen. Granulare Vakuumgreifer basierend auf dem Granular Jamming Prinzip bieten hierfür großes Potential. Dieses Potential ist jedoch stark abhängig von Leckage, die aufgrund von Undichtigkeiten zwischen Greifer und Handhabungsobjekt entstehen und die die Prozessstabilität beeinträchtigen. Bisherige Systeme überprüfen den Unterdruck meist nur global an einem Messpunkt. Dies lässt jedoch keine Rückschlüsse auf die Position und Art der Leckage zu.

Diese Arbeit entwickelt und untersucht einen neuen Ansatz, bei dem die Druckverteilung innerhalb des Greifers lokal an mehreren Stellen gemessen wird. Hierfür wurde ein granularer Vakuumgreifer modifiziert und mit vier Druckmessstellen ausgestattet. Diese erlauben es, die Druckverhältnisse in der Nähe der Kontaktfläche zum Handhabungsobjekt zu erfassen. Auf Basis dieser Sensordaten wurde ein adaptiver Algorithmus entwickelt, der Leckage räumlich lokalisiert. Bei Erkennung von Leckage kann er autonom zwei unterschiedliche Strategien zur Kompensation der Leckage fahren, entweder durch eine translatorische Verschiebung oder eine Rotation des Greifers.

Die experimentelle Validierung an dem kollaborativen Industrieroboter UR10e der Firma Universal Robots zeigte den Erfolg dieses Ansatzes. In den durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Lokalisation von Leckage möglich, reproduzierbar und effektiv ist. In den Versuchen wirkte sich Leckage exponentiell negativ auf den Druckaufbau aus. Die rotative Strategie zur Leckagekompensation war aufgrund der Steifigkeit des Greifers durch die integrierten Messstellen limitiert. Die translatorische Verschiebung zeigte herausragende Ergebnisse. Bei den durchgeführten „Pick-Versuchen“ konnte eine Erfolgsquote von 100% bei der Korrektur von Fehlgriffen erzielt werden. Diese Korrektur ermöglichte nicht nur einen erfolgreichen Griff nach Fehlgriffen, sondern auch durch die Optimierung des Griffs eine Reduktion der Saugleistung. Die Energieeffizienz des Systems kann somit verbessert werden.

Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass lokale Druckmessungen eine Erkennung und Lokalisierung von Leckage ermöglichen und somit die Prozesssicherheit und Effizienz von leckagetoleranten Vakuumgreifern erhöhen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Formel- und Kurzzeichen	IV
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik	2
2.1 Physikalische Grundlagen der Vakuumhandhabung	2
2.2 Übersicht relevanter Greifersysteme	3
2.3 Granulare Sauggreifer	3
2.4 Griffvalidierungssysteme und Sensorik	5
2.4.1 Klassifizierung von Griffvalidierungssystemen	5
2.4.2 Unterdruckererkennung	6
3 Methodik und Systementwicklung	7
3.1 Analyse des Strömungsverhaltens durch CFD-Simulation	7
3.2 Analyse der Prozessparameter	8
3.2.1 Handhabungsobjekt	8
3.2.2 Feste Prozessparameter	8
3.2.3 Variable Prozessparameter	9
3.3 Experimenteller Aufbau	9
3.3.1 Roboter	10
3.3.2 Greifmodul	11
3.3.3 Saugmodul	11
3.3.4 Messsystem	12
3.4 Fertigung der Systemkomponenten und Testobjekte	13
3.4.1 Roboterarm	13
3.4.2 Haltering	14
3.4.3 Testobjekte	15
3.5 Entwicklung des Algorithmus	16
3.5.1 Grifferfolgserkennung	17
3.5.2 Verschiebung zur Leckagekompensation	20
3.5.3 Rotation zur Leckagekompensation	21
4 Messergebnisse	23
4.1 Leckagemessungen	23
4.2 Algorithmusmessungen	27
4.2.1 Verschiebung zur Leckagekompensation	27
4.2.2 Rotation zur Leckagekompensation	29
5 Diskussion der Ergebnisse	32
5.1 Leckageerkennung	32
5.2 Verschiebung zur Leckagekompensation	33
5.3 Rotation zur Leckagekompensation	34
6 Fazit und Ausblick	36
7 Literaturverzeichnis	37

Abbildungsverzeichnis

<u>Abbildung 2-1: Funktionsweise Granular Jamming Greifer</u>	<u>4</u>
<u>Abbildung 2-2: Effektivität nach Größe des Granulats im festen und unverfestigten Zustand [7]</u>	<u>5</u>
<u>Abbildung 2-3: Haltekraft in Abhängigkeit vom Glasgranulatanteil [8]</u>	<u>5</u>
<u>Abbildung 3-1: CFD-Simulation der Strömungsgeschwindigkeit im Inneren des Greifers bei seitlicher Leckage.....</u>	<u>7</u>
<u>Abbildung 3-2: Versuchsaufbau.....</u>	<u>10</u>
<u>Abbildung 3-3: Querschnitt Greifer</u>	<u>11</u>
<u>Abbildung 3-4: Roboterarm Vorderansicht.....</u>	<u>14</u>
<u>Abbildung 3-5: Roboterarm Querschnitt</u>	<u>14</u>
<u>Abbildung 3-6: Roboterarm Ansicht von unten</u>	<u>14</u>
<u>Abbildung 3-7: Haltering</u>	<u>15</u>
<u>Abbildung 3-8: Testobjekte 50 % Leckage.....</u>	<u>16</u>
<u>Abbildung 3-9: Testobjekte</u>	<u>16</u>
<u>Abbildung 3-10: Blockschema Algorithmus.....</u>	<u>17</u>
<u>Abbildung 3-11: Grundfunktion Verschiebung zur Leckagekompensation</u>	<u>21</u>
<u>Abbildung 3-12: Grundfunktion Rotation zur Leckagekompensation.....</u>	<u>22</u>
<u>Abbildung 4-1: 0 % Leckage Druckwerte</u>	<u>23</u>
<u>Abbildung 4-2: 10 % seitliche Leckage Druckwerte</u>	<u>24</u>
<u>Abbildung 4-3: 10 % mittige Leckage Druckwerte.....</u>	<u>24</u>
<u>Abbildung 4-4: 25 % mittige Leckage Druckwerte.....</u>	<u>25</u>
<u>Abbildung 4-5: 25 % mittige Leckage Druckwerte Ausschnitt 50 g</u>	<u>25</u>
<u>Abbildung 4-6: 25 % mittige Leckage Druckwerte Ausschnitt 114,16 g.....</u>	<u>26</u>
<u>Abbildung 4-7: benötigte Ansaugspannung zum Halten von Objekten.....</u>	<u>26</u>
<u>Abbildung 4-8: Parameter Verschiebung zur Leckagekompensation</u>	<u>28</u>
<u>Abbildung 4-9: Parameter Rotation zur Leckagekompensation</u>	<u>30</u>

Tabellenverzeichnis

<u>Tabelle 3-1</u> : Leistungsdaten des Saugmoduls M2	11
<u>Tabelle 3-2</u> : Ansaugspannung des Saugmoduls M2.....	12
<u>Tabelle 3-3</u> : Druckwerte 0 % Leakage	18
<u>Tabelle 3-4</u> : Position der Drucksensoren	19
<u>Tabelle 4-1</u> : Parameter der Versuchsreihe Verschiebung zur Leakagekompensation	27
<u>Tabelle 4-2</u> : Druckwerte Kompensation einseitige Leakage.....	28
<u>Tabelle 4-3</u> : Druckwerte Kompensation starke einseitige Leakage	29
<u>Tabelle 4-4</u> : Druckwerte Kompensation Leakage zwei Sensoren	29
<u>Tabelle 4-5</u> : Druckwerte Kompensation kleines Testobjekt.....	29
<u>Tabelle 4-6</u> : Parameter der Versuchsreihe Rotation zur Leakagekompensation	30
<u>Tabelle 4-7</u> : Druckwerte Kompensation Rotation einseitige Leakage.....	31
<u>Tabelle 4-8</u> : Druckwerte Kompensation Rotation starke einseitige Leakage	31
<u>Tabelle 4-9</u> : Druckwerte Kompensation Rotation einseitige Leakage Kartoffelmodell	31
<u>Tabelle 4-10</u> : Druckwerte Kompensation Rotation moderate einseitige Leakage Kartoffelmodell	31
<u>Tabelle 5-1</u> : Druckwerte 0 % Leakage und 25 % Leakage seitlich	32
<u>Tabelle 5-2</u> : Druckwerte Kompensation durch Verschiebung einseitige Leakage	33
<u>Tabelle 5-3</u> : Druckwerte Kompensation durch Verschiebung geringe einseitige Leakage....	33
<u>Tabelle 5-4</u> : Druckwerte Kompensation durch Rotation Kartoffelmodell	34

Formel- und Kurzzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A_E	m^2	Wirksame Fläche der Elektroden
ADS_i	-	Automation Device Specification
A_W	m^2	Druckwirksame Fläche
C	F	Elektrische Kapazität
CAD	-	Computer-Aided Design
CFD	-	Computational Fluid Dynamics
Cobot	-	Collaborative Roboter
D	m	Abstand zwischen Elektroden
D	mm	Auffahrdistanz
FDM	-	Fused Deposition Modeling
F_H	N	Haltekraft
H	mm	Auffahrhöhe (bei Rotation)
I/O	-	Input/Output
K	mm	Korrekturdistanz (bei Verschiebung)
KH	mm	Korrekturhöhe (bei Verschiebung)
L	-	Leckagevektor
p	Pa/mbar	Druck (allgemein)
$\bar{p}$	mbar	Durchschnittlicher Druck
p_A	Pa	Anfangsdruck
p_{atm}	Pa/mbar	Umgebungsdruck
p_E	Pa	Enddruck
p_i	mbar	Druckwert des Sensors i
p_{innen}	Pa/mbar	Greiferinnendruck
PLA	-	Polylactide
p_{ref}	mbar	Referenzdruck
R	-	Rotationsachse
RD	mm	Rücksetzdistanz
RGB	-	Rot-Grün-Blau
RTDE	-	Real-Time Data Exchange
STL	-	Standard Triangle Language

U	V	Ansaugspannung
UR10e	-	Universal Robot 10e
v	$\frac{m}{s}$	Strömungsgeschwindigkeit
X, Y, Z	m	Raumkoordinaten
Δp	Pa/mbar	Relativdruck
Δp_{lokal}	Pa	Lokaler Druckverlust
Δp_{max}	Mbar	Maximale Druckdifferenz zwischen Sensoren
$\Delta p_{\text{Verlust}}$	Pa	Gesamtdruckverlust
ϵ_0	$\frac{As}{Vm}$	Elektrische Feldkonstante
ϵ_r	-	Relative Permittivität
ζ	-	Widerstandsbeiwert
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte

1 Einleitung

In der industriellen Automatisierung haben sich in den letzten Jahren flexible Greifersysteme für die Handhabung von unterschiedlichsten Bauteilen als wichtige Technologie entwickelt. Steigende Produktionszahlen von unterschiedlichsten Produkten können letztendlich nur mit Hilfe von flexiblen Greifersystemen bewältigt werden. Deren Leckagetoleranz bestimmt maßgeblich ihre Einsatzfähigkeit. Die vorliegende Arbeit untersucht deshalb die Leckagetoleranz flexibler Sauggreifer.

Während konventionelle Greifer häufig auf eine feste Geometrie beschränkt sind, können universelle Greifer unterschiedliche Bauteile, im Folgenden Handhabungsobjekte oder kurz Objekte genannt, greifen. Ein vielversprechender Ansatz in diesem Bereich sind granulare Vakuumbreifer, die auf dem Prinzip des Granular Jamming basieren. Sie nutzen ein mit Granulat gefülltes flexibles Membrankissen, das sich formschlüssig an komplexe Objektkonturen anpassen kann. Durch das Evakuieren der Luft innerhalb der Membran verfestigt sich das Granulat, wodurch eine feste, formschlüssige Struktur um das Handhabungsobjekt geschaffen wird.

Um ein Objekt zu halten, wird innerhalb des Greifers ein Unterdruck erzeugt. Dieser saugt das Objekt an den Greifer. Die hierbei erzeugte Haltekraft wird jedoch signifikant von Leckage beeinträchtigt. Leckage ist ein Volumenstrom vom höheren Druck außerhalb des Greifers in den Bereich des niedrigeren Drucks innerhalb des Greifers. Dies geschieht bei einem nicht luftdichten Kontakt zwischen Handhabungsobjekt und Innenraum des Greifers und kann, z.B. durch Objektkanten und Bohrungen, erzeugt werden.

Eine wesentliche Einschränkung herkömmlicher Systeme besteht darin, dass die Überwachung des Greifprozesses meist nur über eine globale Druckmessung an einer zentralen Stelle erfolgt. Ein einziger globaler Messwert kann zwar Auskunft darüber geben, ob ein Unterdruck aufgebaut wird. Er lässt aber keine Rückschlüsse auf Ort und Ausmaß von Leckage zu. Folglich kann ein herkömmliches System zwar einen Fehlgriff erkennen, aber ohne lokale Druckinformationen ist eine Korrektur des Griffes durch den Roboter in der Regel nicht möglich. Dies kann zu Prozessunterbrechungen oder einem ineffizienten Energieeinsatz führen, da Leckage bei leckagetoleranten Greifern durch eine erhöhte Saugleistung kompensiert werden muss.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein adaptiver Algorithmus entwickelt, implementiert und getestet, der aus lokalen Druckmessungen eine Kompensation der Leckage ermöglichen soll. Dafür wurde ein granulares Vakuumbreifmodul so modifiziert, dass es im Inneren mit vier Messstellen für Drucksensoren ausgestattet wurde. Dieser Aufbau soll es ermöglichen, Leckage nicht nur zu detektieren, sondern auch räumlich zu lokalisieren. Darauf aufbauend wurden zwei Strategien entwickelt: eine translatorische Verschiebung und eine Rotation des Greifers. Diese sollen autonom ausgeführt werden.

Im Anschluss wurden diese Strategien an einem UR10e Roboter der Firma Universal Robots, Odense, Dänemark, getestet und validiert. Der Fokus lag hierbei auf der verbesserten Prozesssicherheit und einer gesteigerten Energieeffizienz durch einen optimierten Griff.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Physikalische Grundlagen der Vakuumhandhabung

Leckagetolerante Sauggreifer zeichnen sich dadurch aus, dass sie auch dann Haltekraft ermöglichen, wenn die Abdichtung zwischen Greifer und Objekt nicht vollkommen luftdicht ist. Die Haltekraft entsteht durch einen hinreichend starken Unterdruck, der durch das Saugmodul generiert wird. Die Haltekraft, die beim Anheben des Objekts wirkt, wird durch die Formel 2.1 beschrieben.

$$F_H = \Delta p \cdot A_W \quad (2.1)$$

$$\Delta p = p_{\text{atm}} - p_{\text{innen}}$$

F_H : Haltekraft; p_{innen} : Greiferinnendruck; p_{atm} : Umgebungsdruck; Δp : Relativdruck;
 A_W : Druckwirksame Fläche

Die Leistungsfähigkeit des Greifers wird vorrangig durch die erzeugbare Haltekraft bestimmt. Diese wird jedoch stark von Leckage eingeschränkt. Physikalisch betrachtet beschreibt Leckage einen Volumenstrom vom Bereich höheren Drucks (Umgebungsdruck p_{atm}) in den Bereich niedrigeren Drucks (Greiferinnendruck p_{innen}). Dieser Prozess resultiert aus dem Bestreben der Luft das Druckgefälle Δp auszugleichen. Dies setzt einen Weg für die Luft zwischen beiden Umgebungen voraus, hier also eine nicht luftdichte Verbindung zwischen Membran und Handhabungsobjekt. Durch Leckage verringert sich die Haltekraft F_G , indem der Relativdruck Δp lokal an der Stelle der Leckage und global im gesamten Inneren des Greifers sinkt. Außerdem verringert sich die Fläche A_W , auf die der Unterdruck wirkt. Leckagetolerante Greifer können, wie der Name bereits besagt, Leckage durch einen erhöhten Volumenstrom des Saugmoduls bis zu einem gewissen Grad tolerieren und kompensieren.

Der möglich erzeugbare Unterdruck hängt sowohl von der Leistung des Saugmoduls als auch den Rohrverlusten und Strömungswiderständen in Schläuchen, Ventilen und Düsen ab. Diese lassen sich durch die Bernoulli-Gleichung in Formel 2.2 beschreiben:

$$p_A + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_E + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Delta p_{\text{Verlust}} \quad (2.2)$$

$$\Delta p_{\text{lokal}} = \zeta \frac{\rho v^2}{2}$$

$$\Delta p_{\text{Verlust}} = \Delta p_{\text{Rohr}} + \sum \Delta p_{\text{lokal}}$$

p_A : Anfangsdruck; p_E : Enddruck; v_1 : Anfangsströmungsgeschwindigkeit;
 v_2 : Endströmungsgeschwindigkeit; ρ : Dichte; ζ : Widerstandsbeiwert; $\Delta p_{\text{Verlust}}$: Druckverlust

2.2 Übersicht relevanter Greifersysteme

In der Robotik existiert eine Vielfalt an Greifersystemen mit unterschiedlichen Anwendungs- und Einsatzgebieten je nach Material, Masse und Geometrie des Handhabungsobjektes. Eine klassische Einteilung nach Monkman et al. gliedert sie in vier Hauptkategorien: impaktive, ingressive, astriktive und contigutive Greifer [1].

Impaktive Greifer, häufig auch als mechanische Greifer bezeichnet, fassen das Objekt durch direkten physischen Kontakt mittels Friktion oder Formschluss. Ein Beispiel sind Greifer mit Fingern, die sich zur Montage oder zum Verpacken eignen, da sie sich gut an verschiedene Objektformen anpassen können.

Ingressive Greifer dringen mit spitzen Nadeln oder Haken in das Objekt ein. Sie werden für die Arbeit mit z.B. Textilien eingesetzt [2].

Contigutive Greifer nutzen Oberflächenadhäsion durch direkten Kontakt z.B. mittels Klebstoffen oder Oberflächenspannung.

Der Greifer, der in dieser Arbeit genutzt wurde, ist ein astriktiver Greifer. Astriktive Greifer nutzen anziehende Kräfte wie z.B. Magnetismus, Elektroadhäsion oder, wie im vorliegenden Fall, Unterdruck. Es existieren noch weitere Greiferprinzipien darunter Bernoulli-Greifer, Kapillar-, Kryo-, Ultraschall- oder Laser-Greifer, die in spezialisierten Gebieten, etwa in der Mikromanipulation eingesetzt werden.

2.3 Granulare Sauggreifer

Die Entwicklung robotischer Greifersysteme bewegt sich zunehmend hin zu flexiblen adaptiven Systemen, die in der Lage sind, mit unstrukturierten Umgebungen und variierenden Objektgeometrien zu interagieren [3].

Der in dieser Arbeit genutzte Greifer ist ein granularer Sauggreifer, oft auch Granular Jamming Greifer genannt, von der Firma FORMHAND. Er besteht aus einer zylindrischen Membran, die mit feinkörnigem Granulat gefüllt ist. Im Ruhezustand ist das Granulat lose und verhält sich wie eine Flüssigkeit. Die Membran kann sich flexibel um das Handhabungsobjekt legen oder es auch vollständig umschließen.

Sobald die Membran das Objekt umschließt, wird mit einem Saugmodul die Luft aus dem Inneren der Membran abgesaugt. Dadurch entsteht ein Vakuum, worauf sich das Granulat „verkeilt“ und sich wie ein fester, starrer Körper verhält. Dieser Übergang ist als Granular Jamming bekannt [4].

Das Handhabungsobjekt wird durch einen Unterdruck im Inneren des Greifers angesaugt und gehalten. Dieser Unterdruck wird durch ein externes Saugmodul erzeugt.

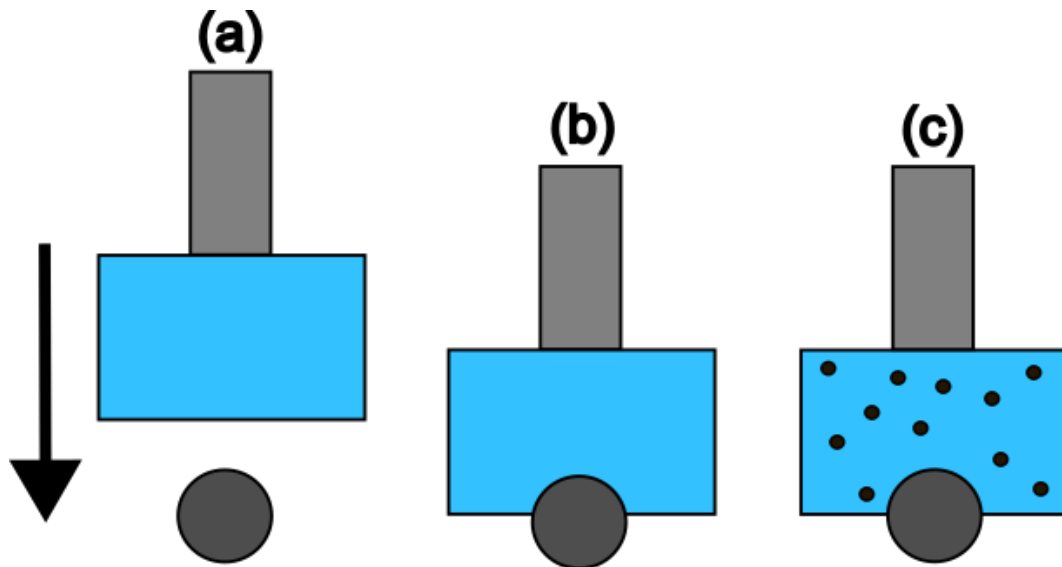


Abbildung 2-1: Funktionsweise Granular Jamming Greifer

(a): Greifer fährt Objekt in unverfestigtem Zustand an; (b): Greifer deformiert um Objekt; (c): Verfestigung des Greifers durch Vakuumierung

Diese flexiblen Greifer gewinnen immer mehr an Bedeutung in Applikationen, in denen Prozesssicherheit eine große Rolle spielt, wie z.B. im Gesundheitssystem [5]. Trotz ihrer Flexibilität und Anpassungsfähigkeit ist die Leistungsfähigkeit dieser Greifer abhängig und limitiert durch die Luftdichtigkeit zwischen der Membran und dem Objekt. Ist keine vollständige Luftdichtigkeit gegeben, entsteht Leckage. Diese Leckage beschreibt den ungewollten Eintritt von Umgebungsluft in das evakuierte Volumen des Greifers. Selbst geringfügige Leckage kann den Unterdruckaufbau verringern oder sogar einen Griff des Objektes ganz verhindern. Leckagen können durch Objektkanten, Bohrungen, unebene Oberflächen oder auch, wenn der Roboter das Objekt falsch anfährt, entstehen [6].

Wie zuvor beschrieben, ist die Flexibilität des Greifers von großer Wichtigkeit. Maßgeblich ist, dass die Struktur des Greifers bei Kontakt mit dem zu hebenden Objekt nachgibt. Hierdurch dichtet sich der Greifer selbst ab, indem er sich an die Form des Objekts anpasst.

Der in dieser Arbeit verwendete Granular Jamming Greifer arbeitet, indem die Membran des Greifers nach der Anpassung an das Handhabungsobjekt vakuumiert wird. Hierdurch wird eine feste Struktur um das Handhabungsobjekt geschaffen. Die Fähigkeit des Greifers dies zu tun, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Wesentlich sind das Granulat, das Material der Membran des Greifers, der Volumenfüllgrad des Granulatbeutels und die Form der Membran.

Beim Granulat bestimmen die Form, die Korngröße und das Material, wie weich und formbar der Greifer im unkomprimierten Zustand ist. Davon ist abhängig, wie gut sich der Greifer an das Handhabungsobjekt anpassen kann und später im verfestigten Zustand einen guten Formschluss ermöglicht, woraus eine gute Haltekraft resultiert. Hierbei wurde die Korngröße als einer der wichtigsten Parameter identifiziert. Eine mittlere Körnung von 35-60 Mesh ermöglicht hierbei nach Amend et al. (2016) sowohl die größte Festigkeit im komprimierten Zustand wie auch die fluideste und flexibelste Membran im unkomprimierten Zustand [7].

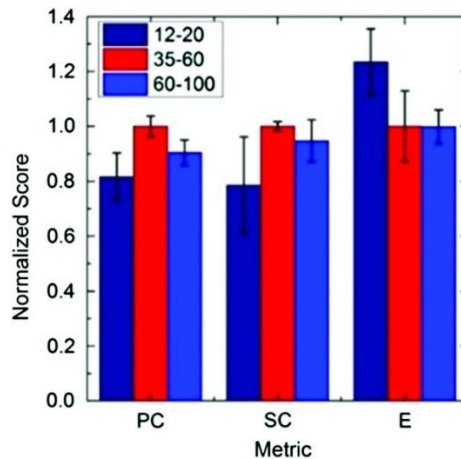


Abbildung 2-2: Effektivität nach Größe des Granulats im festen und unverfestigten Zustand [7]

Untersuchungen zeigen, dass sich eine Granulatmischung mit variierender Größe und unterschiedlichem Material sich förderlich auf die maximale Haltekraft auswirkt. Die maximale Haltekraft von Expanded Polystyrene mit einem Durchmesser von 4.2 ± 0.5 mm beträgt das 3,5-fache als mit Glasgranulat 4.0 ± 0.3 mm. Eine Mischung aus 90 % Expanded Polystyrene und 10 % Glasgranulat zeigt die höchste Haltekraft [8].

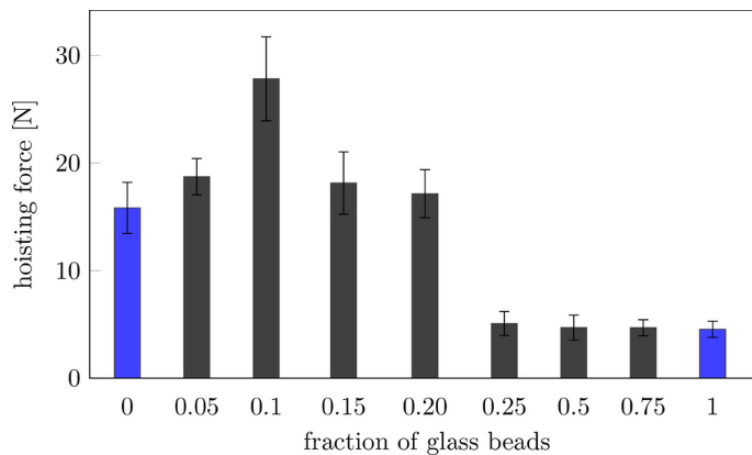


Abbildung 2-3: Haltekraft in Abhängigkeit vom Glasgranulatanteil [8]

Auch die Geometrie und das Material der Membran des Greifers haben Einfluss auf die Haltekraft des Greifers. Die Form des Greifers ist außerdem für die Berechnung der Leckage zu beachten [7].

2.4 Griffvalidierungssysteme und Sensorik

2.4.1 Klassifizierung von Griffvalidierungssystemen

Zur Erkennung, ob ein Handhabungsobjekt gegriffen wurde, wurden verschiedene Methoden und Systeme abhängig vom Greifertyp, der Umgebung und den Anforderungen an das System verwendet. Es wird in globale und lokale Systeme unterschieden. In der Praxis werden häufig auch mehrere Methoden für mehr Präzision und Redundanz gleichzeitig verwendet.

Eine globale Erkennung geschieht mit visuellen Verfahren. Lasersensoren, RGB- und Tiefenkameras erfassen Daten über Position, Form und Bewegung, die mithilfe von Objekterkennung, Segmentierung und Bewegungsverfolgung ausgewertet werden. So lässt sich feststellen, ob sich das Handhabungsobjekt synchron mit dem Greifer bewegt oder am

ursprünglichen Ort liegen bleibt. Die Vorteile visueller Systeme liegen in der Vielseitigkeit. Unter anderem können sie auch zur Erkennung von Objekten und deren Unterscheidung anhand von z.B. der Farbe eingesetzt werden. Außerdem können sie kostengünstig implementiert werden. Herausforderungen bestehen in der Erkennung unter schlechten Lichtbedingungen oder von komplexen Oberflächen, was die Erkennungsgenauigkeit einschränken oder sogar eine Erkennung ganz verhindern kann [9], [10].

Im Bereich der lokalen Erkennung können für taktile Kontakterkennung entweder Kraft- oder Biegesensoren verwendet werden. Ein Biegesensor erkennt eine relative Widerstandserhöhung, wenn sich seine Krümmung erhöht [11], [12].

Durch Slip-Sensoren kann ein Abrutschen des Handhabungsobjekts aus dem Greifer erkannt werden [13], [14], [15].

2.4.2 Unterdruckererkennung

Die Messung des Unterdrucks erfolgt auf Basis der Druckdifferenz zwischen dem erzeugten Unterdruck innerhalb des Greifers und der Umgebung. Es wird der Relativdruck Δp gemessen. Für die Messung des Drucks existieren verschiedene Typen von Drucksensoren, jedoch können im vorliegenden Anwendungsfall nicht alle genutzt werden. Folgende Typen von Drucksensoren sind gängig. Kapazitive Drucksensoren können für die vorliegende Unterdruckmessung genutzt werden. Sie messen Druck, indem die Kapazitätsänderung zwischen zwei Elektroden gemessen wird, welche durch eine druckempfindliche Membran getrennt sind. Durch Druckeinwirkungen ändert sich der Abstand der Elektroden und damit die Kapazität [16].

$$C = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * A_E}{d} \quad (2.3)$$

C: Kapazität; ϵ_0 : elektrische Feldkonstante; ϵ_r : relative Permittivität; A_E : wirksame Fläche der Elektroden; d: Abstand zwischen den Elektroden

Piezoelektrische Drucksensoren, sind bei der vorliegenden Versuchsanordnung ungeeignet, da sie nur Überdruck messen können. Sie funktionieren, indem ein piezoelektrischer Kristall, z.B. Quarz, durch anliegenden Druck verformt wird und die vom Kristall erzeugte elektrische Ladung, die proportional zum anliegenden Druck ist, gemessen wird [17].

Die in dieser Arbeit genutzten Drucksensoren sind piezoresistive Drucksensoren. Sie nutzen den piezoresistiven Effekt von Halbleitermaterialien wie Silizium. Ein anliegender Druck deformiert eine Membran, wodurch sich der elektrische Widerstand eines eingebetteten Messgitters proportional zu mechanischer Spannung ändert. Die resultierende Widerstandsänderung wird über eine Wheatstone-Brücke in Spannungssignale umgewandelt [16].

Konventionelle Leckagemessungen nutzen meist einen globalen Messpunkt innerhalb des Greifers. Der gewonnene Messwert kann zwar Informationen darüber geben, ob ein Unterdruck aufgebaut werden konnte und somit das Objekt gegriffen wurde. Allerdings sagt er nichts über Art und Umfang einer Leckage aus [18]. Durch Leckage sinkt zwar global im gesamten Greifer der aufgebaute Unterdruck. Durch einen globalen Messpunkt lässt sich jedoch keine Aussage darüber treffen, wo sich die Leckage innerhalb des Greifers befindet. Diese Arbeit geht davon aus, dass lokal, also direkt an der Kontaktfläche zwischen Membran und Handhabungsobjekt, Drücke gemessen werden können, die Leckage und keine Leckage unterscheidbar machen können.

3 Methodik und Systementwicklung

3.1 Analyse des Strömungsverhaltens durch CFD-Simulation

Zur Visualisierung der Strömungsdynamik innerhalb des Greifers bei seitlicher Leckage wurde eine Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation mit der Software SimScale, München, durchgeführt und in Inkscape grafisch nachbearbeitet. Abbildung 3-1 zeigt das Strömungsprofil im Inneren des Greifmoduls.

Für die Simulation wurden die folgenden Randbedingungen definiert. Für die Innenwände des Greifers wurde eine „No-Slip-Condition“ angenommen, bei der die Strömungsgeschwindigkeit direkt an der Wand null beträgt. Am oberen Ausgang des Greifers wurde ein „Velocity Outlet“ mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 50 m/s definiert. Dieser Wert orientiert sich an der maximalen Saugleistung des in diesem Versuchsaufbau genutzten Saugmoduls. Der Einlass an der Position der Leckage wurde als „Pressure Inlet“ definiert, was das Einströmen von Umgebungsluft simulieren soll.

Abbildung 3-1 zeigt das Entstehen eines signifikanten Volumenstroms von der Leckagestelle in das Innere des Greifers. Die durchgeführte Simulation bestätigt, dass durch die einströmende Umgebungsluft eine turbulente Strömung entsteht, die den Aufbau eines Unterdrucks verhindert bzw. einschränkt. Durch den geringeren Unterdruck an den Stellen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit nähert sich der messbare Relativdruck dem Umgebungsdruck an.

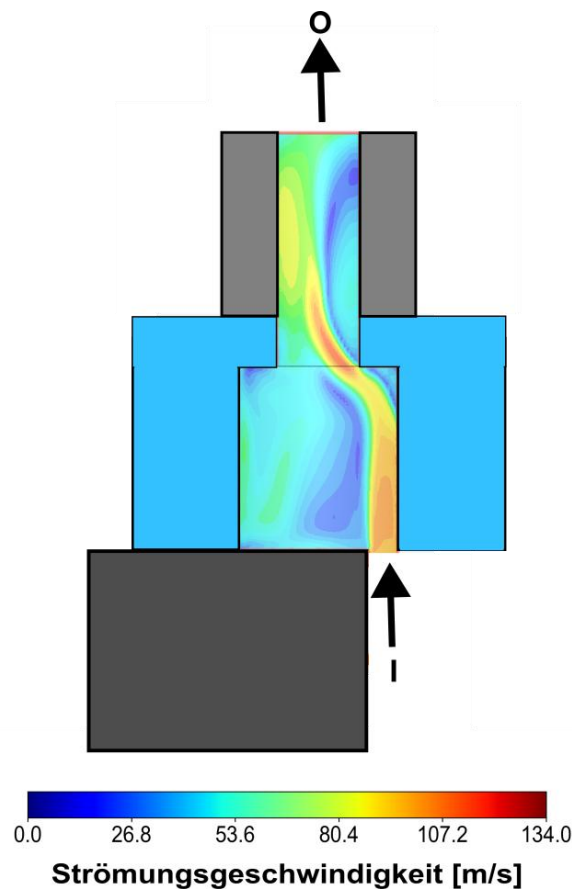


Abbildung 3-1: CFD-Simulation der Strömungsgeschwindigkeit im Inneren des Greifers bei seitlicher Leckage

O: Velocity Outlet; I: Pressure Inlet

3.2 Analyse der Prozessparameter

Durch die Eigenschaften des leckagetoleranten Greifers entstehen neue relevante Prozessparameter, die betrachtet werden müssen, um den Greifferfolg des Roboters zu evaluieren. In dieser Arbeit wird zwischen fest vorgegebenen Parametern, also Parametern, die durch die Konstruktion und das Systemdesigns des Greifers vorgegeben sind, und variablen Parametern, die vor, während oder nach einem Greifprozess verändert werden können, unterscheiden. Außerdem spielen für den Prozess die Eigenschaften des Handhabungsobjektes eine Rolle.

3.2.1 Handhabungsobjekt

Das Handhabungsobjekt stellt den wichtigsten Einflussfaktor für den Greifferfolg dar. Seine Oberflächenbeschaffenheit, Masse und insbesondere die Geometrie bestimmen maßgeblich, wie gut der Greifer eine Abdichtung erzielen kann. Eine glatte homogene Oberfläche minimiert Leckagen und sorgt für eine gleichmäßige Druckverteilung. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Greifer ist die Oberflächenbeschaffenheit weniger wesentlich, weil er sich bis zu einem gewissen Maß an die Oberfläche anpassen kann. Raue oder poröse Oberflächen führen bei diesem Greifer nicht zu Mikro-Leckagen, die den Unterdruck verringern würden.

Die Masse des Handhabungsobjektes ist ebenfalls zu berücksichtigen. Nicht nur, dass für eine höhere Masse ein höherer Unterdruck für den Hebeerfolg benötigt wird, sondern auch, dass sich die Schwerpunktlage auf das Entstehen von Leckagen auswirken kann. Optimal für den Hebeerfolg ist ein zentraler Schwerpunkt, da sich hierbei die Gewichtskraft auf die ganze Fläche des Greifers verteilt. Bei einem Schwerpunkt am Rande des Objektes kann es geschehen, dass das Saugmodul einen hinreichend starken Unterdruck innerhalb des Greifers erzeugen kann, dass das Handhabungsobjekt aber trotzdem nicht gehoben werden kann. Verantwortlich dafür sind Scherkräfte am Schwerpunkt des Handhabungsobjektes und die damit auftretende Leckage, welche zu einem Abfall des Unterdruckes sorgt.

Die Geometrie des Objektes wirkt sich ebenfalls auf den Hebeerfolg aus: Kanten, Bohrungen oder konkave Strukturen können zu ungleichmäßigen Kontaktbedingungen zwischen Greifer und Objekt sorgen. Leckage kann sowohl an einem Ort als auch durch sehr komplexe Geometrien an mehreren Stellen entstehen. Bohrungen sorgen dafür, dass bei einem guten Formschluss am Rand trotzdem mittig Leckage entsteht.

In dieser Arbeit wurden die Materialeigenschaften des Handhabungsobjekts nicht untersucht. Weiche oder nachgiebige Materialien, wie verschiedene Kunststoffe oder Gummi, können sich unter dem Einfluss des Unterdrucks verformen, wodurch sich lokale Dichtbereiche verbessern oder verschlechtern können. Harte Materialien hingegen bieten stabile Kontaktflächen.

3.2.2 Feste Prozessparameter

Die Besonderheit an der in dieser Arbeit entwickelten Greiferkennung durch Unterdruckmessungen ist die Nutzung von mehreren Drucksensoren innerhalb des Greifers. In der Regel wird nur ein Drucksensor verwendet. Außerdem wurden die Sensoren in der Nähe des Handhabungsobjektes innerhalb des Greifers angebracht anstatt - wie üblicherweise - innerhalb des Ansaugschlauchs des Saugmoduls. Ziel des Messaufbaus war die Lokalisation der Leckage. Je näher sich der Sensor an der Leckage befindet, umso mehr konvergiert der gemessene Relativdruck Δp Richtung 0 bar. Je weiter die Sensoren von der Leckage entfernt sind, umso schwerer ist es, diese zu erkennen.

Die zwei wichtigsten festen Prozessparameter sind die Positionierung der Messstellen und deren Anzahl. Eine höhere Anzahl von Messstellen ermöglicht eine höhere Auflösung des Leckagebildes. Die Position der Leckage kann somit präziser erfasst werden. Der Nachteil ist ein komplexerer Aufbau innerhalb des Greifers. Werden zu viele Messstellen verbaut, kann dies innerhalb des Greifers dazu führen, dass das Saugmodul keinen ausreichenden Unterdruck aufbauen kann. Der untersuchte Versuchsaufbau limitiert durch die Größe innerhalb des Greifers und die Nutzung von Pneumatikschläuchen die Anzahl der Messstellen auf maximal acht. Auch diese Anzahl ist aufgrund von Platzproblemen innerhalb des Greifers praktisch nicht zu erreichen.

Die Positionierung der Messstellen innerhalb des Greifers ist aus den gleichen Gründen relevant. Wird eine zentralere Leckageerkennung, von z.B. Bohrungen, gewollt, sollten die Messstellen entsprechend positioniert werden. In den meisten Fällen ist die Erkennung von Leckage am Rand von höherer Bedeutung und die Messstellen sollten vorrangig am Rand positioniert werden. Auch der Abstand der Messstellen zur Öffnung des Greifers spielt eine Rolle. Je näher am Handhabungsobjekt gemessen wird, umso präziser kann Leckage erfasst werden, da der Relativdruck dichter am Objekt und damit an der Leckage gemessen werden kann. In der Praxis müssen die Messstellen aber tiefer innerhalb des flexiblen Greifers liegen, da sie sonst bei starkem Auffahren auf ein Objekt verdeckt oder beschädigt werden können.

Bei der Auswertung der Drucksensoren muss ebenfalls beachtet werden, dass je nach Sensor eine unterschiedliche Auflösung der Druckwerte möglich ist. Ein Algorithmus, welcher in Echtzeit versucht, Leckage zu kompensieren, muss die Messgeschwindigkeit der Sensoren berücksichtigen.

3.2.3 Variable Prozessparameter

Der wichtigste variable Prozessparameter, der sich auf den gemessenen Unterdruck auswirkt, ist die Saugleistung des Saugmoduls. Leckagefähige Greifer kompensieren wie bereits beschrieben Leckage durch eine erhöhte Saugleistung, um damit einen höheren Unterdruck aufzubauen. Die Saugleistung kann abhängig von der Masse des Handhabungsobjektes angepasst werden. Um eine Leckageerfassung automatisiert zu ermöglichen, muss in jedem Versuchsaufbau geprüft werden, welche Druckwerte je nach Saugleistung gemessen werden.

Auch die Geschwindigkeit und Positionierung des Roboters sind variabel. Eine zu schnelle Korrektur durch den Algorithmus könnte dazu führen, dass sich Druckwerte nach dem Anfahren einer neuen Position noch nicht stabilisiert haben. Wie der Roboter durch Positionsänderungen versucht die Leckage zu kompensieren wird im Folgenden analysiert.

3.3 Experimenteller Aufbau

Der in dieser Arbeit entwickelte Versuchsaufbau besteht aus einem kollaborativen Industrieroboter, einem leckagefähigen und vakuumbasierten Greifmodul, einem externen Saugmodul zur Unterdruckerzeugung sowie einem Messsystem zur Erfassung der Druckverläufe an vier Messstellen. Mechanische Modifikationen am Roboter Aufbau, spezifisch im Roboterarm und im Inneren des Greifmoduls, wurden durchgeführt, um vier definierte Messstellen innerhalb des Greifmoduls realisieren zu können. Des Weiteren wurden Handhabungsobjekte zur Entwicklung und Validierung des Algorithmus konstruiert und im 3D-Druckverfahren gefertigt.

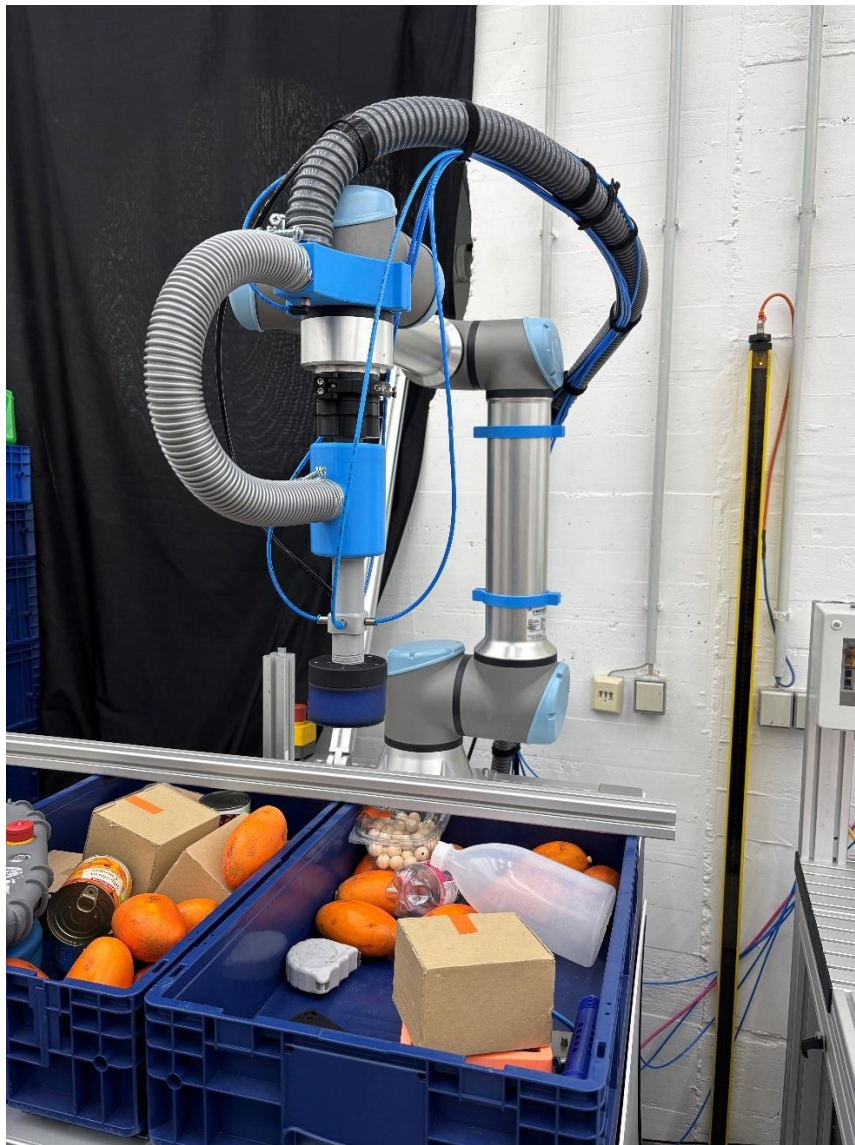


Abbildung 3-2: Versuchsaufbau

3.3.1 Roboter

Der Roboter, der in den folgenden Versuchsreihen genutzt wird, ist der UR10e von Universal Robots. Er gehört zu den kollaborativen Industrierobotern (Cobots), ist also für den sicheren Betrieb in unmittelbarer Nähe mit Menschen ausgelegt. Durch die integrierte Kraft- und Momentumsensorik kann der Roboter auf äußere Einwirkungen reagieren und seine Bewegungen automatisch verlangsamen und stoppen. Diese Arbeit nutzt diese Fähigkeiten besonders im Bezug auf die Bewegung bis zur Berührung eines Objektes durch eine „move_till_contact“ Funktion. Dadurch wird ein präzises, mm-genaues Heranfahren an das Objekt ermöglicht. Über das RTDE-Protokoll (Real-Time Data Exchange) werden Bewegungsbefehle, I/O-Signale und Sensordaten in Echtzeit ausgetauscht. Der Roboter arbeitet hierbei mit 500 Hz und ermöglicht somit eine dynamische Anpassung von Positionen oder Orientierungen während der Versuchsreihen. Die Steuerung des Saugmoduls ist ebenfalls über das Teach Pendant von Universal Robots möglich. Es besteht die Möglichkeit, die Saugleistung dynamisch während des Griffvorgangs anzupassen.

3.3.2 Greifmodul

Beim eingesetzten Greifmodul handelt es sich um einen Greifer, der Firma FORMHAND Automation GmbH, Braunschweig, der nach dem beschriebenen Granular-Jamming-Prinzip funktioniert. Er besitzt einen Innendurchmesser von 50 mm und einen Außendurchmesser von 80 mm. Zentrales Bauteil ist eine elastische, luftdichte Membran, die mit einem granularen Füllmaterial befüllt ist. Der Greifer kann sich formschlüssig an die Kontur und Oberfläche des Handhabungsobjektes anpassen und durch Vakuumieren der Membran das Objekt kraftschlüssig fixieren. Durch diesen Typ des Greifers soll es möglich sein, unterschiedliche Geometrien, wie die der nachfolgenden Testobjekte, zu handhaben. Dies macht ihn interessant für flexible Produktionen sowie für unstrukturierte Umgebungen, in denen Bauteile nicht exakt positioniert oder geometrisch standardisiert sind. Der Nachteil liegt in der Abhängigkeit vom Unterdruck, was eine genaue Prozessüberwachung, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurde, erforderlich macht.

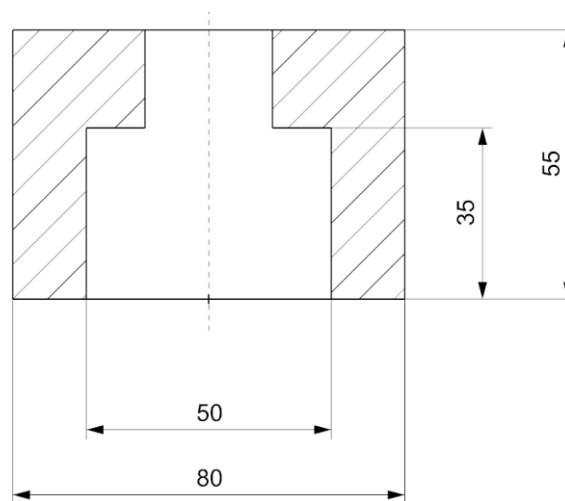


Abbildung 3-3: Querschnitt Greifer (Maße in mm)

3.3.3 Saugmodul

Das genutzte Saugmodul ist vom Typ M2 der Firma FORMHAND. Das Aggregat wird über die Robotersteuerung des UR10e angesteuert. Dadurch kann es im Teach Pendant durch den in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus dynamisch geregelt werden. Dies ermöglicht eine automatisierte Anpassung der Saugleistung während des Versuchsablaufs.

Die wichtigsten technischen Daten des Saugmoduls sind in [Tabelle 3-1](#) aufgeführt.

Tabelle 3-1: Leistungsdaten des Saugmoduls M2

Typ	Saugmodul Typ M2
Baujahr	2023
Betriebsspannung	400 V/50 Hz
Volllaststrom	8.6 A
Max. Vakuum	-420 mbar
Max. Volumenstrom	175 m ³ /h

Ein in dieser Arbeit maßgeblich betrachteter Parameter ist die Ansaugspannung (in V). Diese beschreibt den Wert, der an das Teach Pendant vom Algorithmus übergeben wird, um die Saugleistung zu regulieren. Hierbei entspricht 1 V 10 % der Leistung des Saugmoduls und 10 V entsprechen 100 % der Leistung (Zielunterdruck: -420 mbar). Während der durchgeführten Versuchsreihen zeigte sich, dass das Saugmodul kurzfristig 7 kW Leistungsaufnahme erreicht. Diese Leistung wurde jedoch nur kurz genutzt, da nach wenigen Sekunden das System die Leistungsaufnahme aufgrund einer thermischen Leistungsgrenze automatisch reduziert. Diese Eigenschaft reguliert bei 100 % Auslastung auf eine Aufnahme von 3,8 kW und bei 50 % auf 994 W. Leistungsaufnahme, aufgebauter Unterdruck und Ansaugspannung sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Ansaugspannung des Saugmoduls M2

Ansaugspannung	Aufgebauter Unterdruck	Leistungsaufnahme
0 V	0 mbar	0 W
1 V	-17 mbar	147 W
2 V	-59 mbar	243 W
3 V	-120 mbar	404 W
4 V	-190 mbar	645 W
5 V	-261 mbar	994 W
7,5 V	-370 mbar	2156 W
10 V	-420 mbar	3800 W

3.3.4 Messsystem

Die Messung des Druckes erfolgte bei dem in dieser Arbeit entwickelten Versuchsaufbau an vier Stellen. Der dort bestehende Druck wird über Pneumatikschläuche an zwei analoge Eingangsklemmen EM3712 geleitet. Diese wie auch alle anderen Komponenten des Messsystems sind von der Firma Beckhoff Automation, Verl. Diese messen den Druckwert als Differenz zur Umgebung im Messbereich ± 1 bar. Dies geschieht nach dem bereits zuvor beschriebenen piezoresistiven Prinzip und somit wird ein Relativdruck ausgegeben.

Die Messgeschwindigkeit beträgt nach Angaben des Herstellers 4 ms. Da jede der Klemmen zwei Druckanschlüsse besitzt, reichen zwei Klemmen für vier Messstellen. Weiter verbaut im Messsystem sind zwei EL6090 Displays zur Visualisierung der gemessenen Drücke. Gesteuert wird das Ganze von einem CX9020 Basic CPU Grundmodul, welches als zentrales Steuerungsmodul fungiert. Die weiteren Komponenten des Messsystems sind ein EL2004 als digitale Ausgangsklemme auf 4-Kanälen und ein EL1004 als 4-Kanal digitale Eingangsklemme. Die gesamte Beckhoff-Steuerung besitzt bei aktueller Konfiguration eine Abtastrate von 1000 Hz.

Die Kommunikation zwischen dem Steuerungsmodul und einem externen PC erfolgt über das Automation Device Specification (ADS)-Protokoll von TwinCAT. Über eine in Python implementierte Schnittstelle können so die Drucksensorwerte der EM3712-Klemmen ausgelesen werden. Diese direkte Kommunikation ermöglicht eine echtzeitnahe Datenverarbeitung.

3.4 Fertigung der Systemkomponenten und Testobjekte

Für die Fertigung der Testobjekte und des Roboterarms wurde das Verfahren des 3D-Drucks verwendet. Der 3D-Druck erfolgte mit zwei FDM-3D-Druckern: der K1C von Creality, Shenzhen, China und der P1 von Bambu Lab, Shenzhen, China. Beide Systeme eignen sich für die präzise und schnelle Herstellung von Prototypen. Als Druckmaterial wurde PLA-Filament verwendet, da es für den vorgesehen Versuchsaufbau stabil und präzise genug ist. Beide Drucker ermöglichen Schichtstärken zwischen 0,1 mm und 0,4 mm und eignen sich somit auch zur Fertigung von präzisen Kanälen oder Gewinden.

Die zur Fertigung notwendigen CAD-Modelle wurden mit den Programmen Siemens NX und Siemens Solid Edge erstellt. Diese Softwarelösungen von Siemens, München, erlauben eine präzise Modellierung der Geometrien an die Anforderungen des Aufbaus. Die in STL exportierten Modelle wurden anschließend in den jeweiligen Slicer-Programmen (Creality Print bzw. Bambu Studio) für den 3D-Druck aufbereitet.

Durch den Einsatz der additiven Fertigung konnten die benötigten Bauteile und Handhabungsobjekte schnell und kostengünstig hergestellt werden und bei Änderungen des Prototyps neu gedruckt werden. Zudem ermöglicht das Verfahren die Integration funktioneller Elemente wie beispielsweise Gewinde, direkt in den Bauteilen. Unpräzise Stellen an Drucken, wie z.B. Durchführungen, wurden mechanisch nachbearbeitet.

3.4.1 Roboterarm

Für die experimentelle Untersuchung des Leckageverhaltens war eine mechanische Anpassung des Roboterarms nötig, um die Integration von vier Pneumatikschläuchen für die Druckmessung zu ermöglichen.

Die Pneumatikkanäle beginnen im oberen Bereich des Armes, wo sie über ein M5-Gewinde mit der externen Pneumatik- und Messtechnik verbunden werden (Abbildung 3-4). Als Anschlüsse werden standardisierte Festo-Pneumatikschraubungen verwendet, die den Anschluss von 4-mm-Pneumatikschläuchen ermöglichen und gleichzeitig eine luftdichte Verbindung ermöglichen. Die Leitungen werden von hier am Roboterarm mit Klettbandhaltern befestigt und zum Messsystem gelegt.

Das Innere des Roboterarms wurde so konstruiert, dass die vier Leitungen weiter vollständig innerhalb Armes verlaufen und so die Unterdruckerzeugung des Greifers nicht beeinträchtigen (Abbildung 3-5).

An der Unterseite des Roboterarms treten die vier Messkanäle aus (Abbildung 3-6). Während die Kanäle im Inneren des Armes einen Durchmesser von 4 mm besitzen, verjüngen sie sich am Ausgang des Roboterarms auf 3,8 mm. Dies ermöglicht eine Presseinpassung der 4-mm-Schläuche, welche zum Haltering führen.

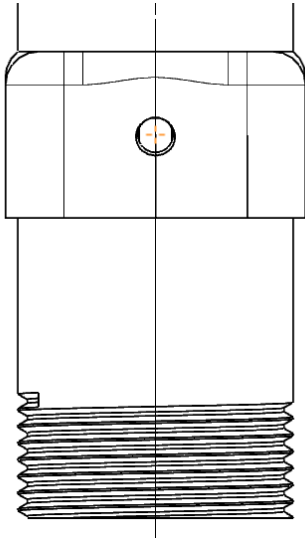


Abbildung 3-4: Roboterarm Vorderansicht

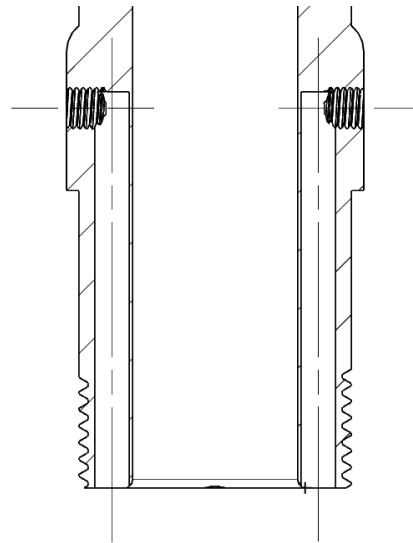


Abbildung 3-5: Roboterarm Querschnitt

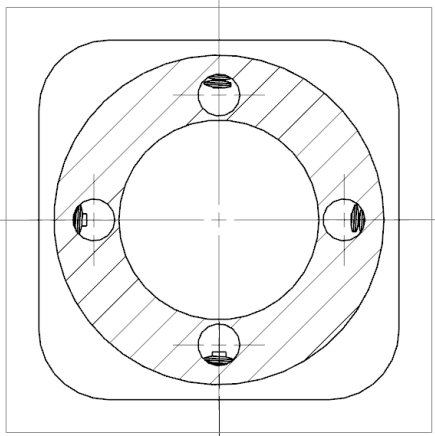


Abbildung 3-6: Roboterarm Ansicht von unten

3.4.2 Haltering

Der Haltering dient dazu, die vier Pneumatikschläuche zuverlässig an ihren Messstellen zu positionieren und zu verhindern, dass sich diese vor oder während des Greifvorganges verschieben. Dies stellt sicher, dass sich die Messstellen stets an den vordefinierten Positionen befinden und reproduzierbare Druckwerte erfasst werden können.

Es wurden zwei Varianten des Halterings gefertigt und getestet, beide Ringe wurden aufgrund von Druckungenauigkeiten bei kleinen Objekten maschinell nachbearbeitet. Beide Ringe wurden etwa 10 mm entfernt von der Greiferöffnung angebracht und die Schläuche auf Höhe des Rings abgetrennt. Hierdurch befinden sich die Messstellen auf Höhe des Rings.

Der erste gefertigte Haltering besitzt einen Außendurchmesser von 51 mm und vier radial angeordneten Durchführungen mit 4 mm Durchmesser, die jeweils entlang der X- und Y-Achse in 90-Grad-Abständen positioniert wurden. Der Ring wird durch Reibschluss direkt im Inneren des 50 mm großen Greifers fixiert. Diese Konstruktion erlaubt eine sehr nahe Randmessung mit einem Abstand zum Rand des Greifers von 2,5 mm je Messpunkt. Gleichzeitig erhöht dies jedoch die Steifigkeit der Membran, da sich der starre Ring formschlüssig an der Membran

abstützt. Bei zu starker Verformung der Membran können außerdem Schäden an Ring oder Pneumatikschläuchen auftreten.

Um diesen Einfluss auf die Membranflexibilität zu reduzieren, wurde eine zweite Ringvariante konstruiert, welche aber nicht in den finalen Versuchen zum Einsatz kam. Hier hatte der Ring einen Außendurchmesser von 46mm, ist also nicht mehr formschlüssig mit der Membran. Er wird über die Reibung mit den eingeführten Pneumatikschläuchen gehalten. Durch den Abstand zur Membran bleibt die elastische Verformbarkeit der Membran weitgehend erhalten, da keine zusätzlich starre Struktur gegen die Innenwand drückt. Da bei diesem Versuchsaufbau die Messpunkte 6 mm von der Innenwand entfernt sind, ist eine seitlichere Leckageerkennung schwieriger.

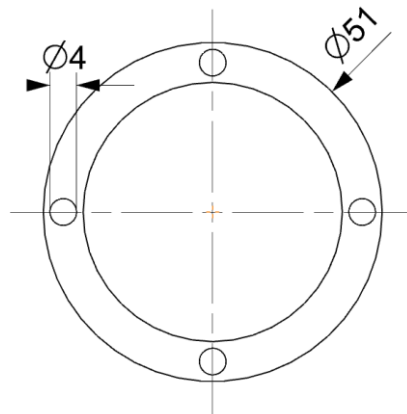
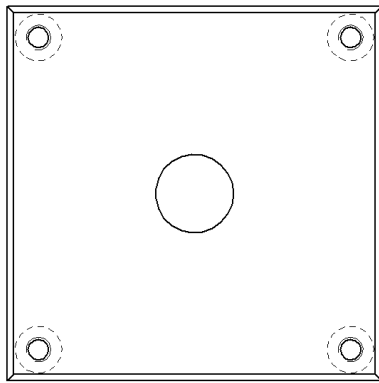


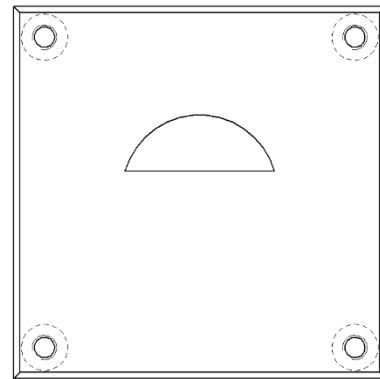
Abbildung 3-7: Haltering (Maße in mm)

3.4.3 Testobjekte

Zur standardisierten Messung der Leckage wurden plattenförmige Testobjekte mit definierten Leckageanteilen von 0 %, 10 %, 25 % und 50 % gefertigt (Abbildung 3-8). Auch eine Platte mit 75 % Leckage wurde gefertigt, konnte allerdings in Versuchen nie gehalten werden und wird deswegen nicht weiter betrachtet. Jede der Leckageausprägungen liegt in zwei Varianten vor: eine Ausführung mit zentraler kreisförmiger Leckage, sowie eine Ausführung mit halbkreisförmiger seitlicher Leckage. Um zusätzlich den Einfluss von Masse auf den Greifvorgang zu analysieren, wurden alle Platten mit vier Passbohrungen für M8-Schrauben an den Rändern versehen. Dadurch kann Zusatzmasse durch Schrauben, Muttern oder durch die Montage von Aluminiumprofilen der Baureihe Nut 8 (40 mm x 40 mm, 100 mm Länge) an den Platten montiert werden und der Einfluss durch Masse evaluiert werden. Zur Evaluation des Algorithmus wurden eine quadratische Box (530 g), ein Kartoffelmodell und eine Konservendose (312 g) genutzt (Abbildung 3-9).

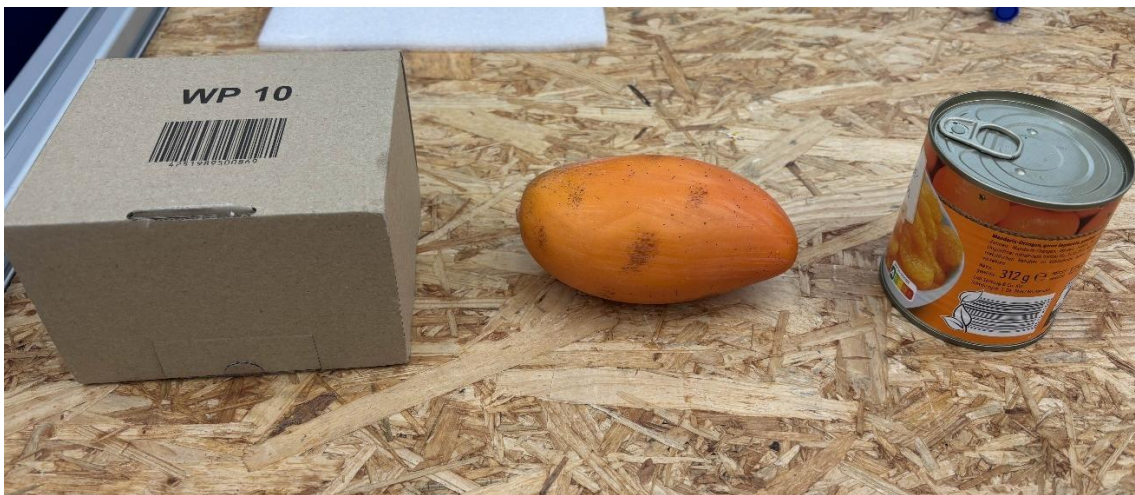


(a)



(b)

Abbildung 3-8: Testobjekte 50 % Leakage
(a): mittige; (b) seitliche Leakage



(a)

(b)

(c)

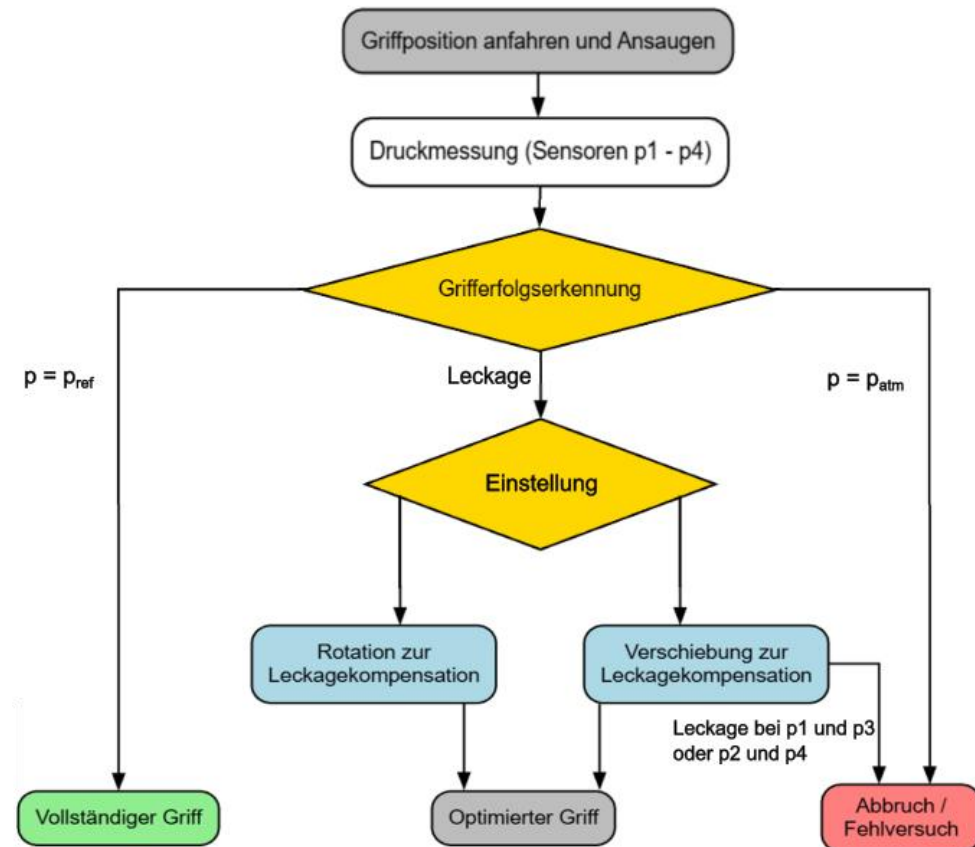
Abbildung 3-9: Testobjekte
(a): Box; (b): Kartoffelmodell; (c): Konservendose

3.5 Entwicklung des Algorithmus

Der Algorithmus wurde entwickelt, um die vollständige Auswertung des Greifvorgangs, sowie die adaptive Bewegung auf Grundlage der gemessenen Druckwerte zur Verbesserung des Griffes zu übernehmen. Nach dem Anfahren der Griffposition und der Aktivierung des Unterdruckes werden die Drucksensoren ausgelesen und bewertet. Anschließend soll der Algorithmus aus dem bewerteten Griffzustand Korrekturbewegungen zur Optimierung des Griffes bestimmen und einleiten.

Die Programmierung des Algorithmus erfolgte vollständig in Python und läuft auf einem externen Rechner in einer Linux-Umgebung. Die Kommunikation mit den beiden Hauptkomponenten, dem Roboter UR10e und dem Beckhoff-Messsystem, erfolgt über zwei unabhängige Schnittstellen. Der Roboter empfängt und sendet über das RTDE-Protokoll (Real-Time-Data-Exchange) Bewegungsbefehle, analoge und digitale Signale (Ansaugspannung). Dies geschieht mit einer Frequenz von 500 Hz.

Das Beckhoff-Messsystem wird über die Twin-Cat-ADS Schnittstelle (Automation Device Specification) ausgelesen. Dadurch können die vier Messstellen der EM3712-Klemmen mit einer Abtastrate von 1 kHz ausgelesen werden. Die Datenübertragung wird vom Rechner angefordert und jeder Greifvorgang kann somit ohne Verzögerung ausgewertet werden.



Abbildungung 3-10: Blockschema Algorithmus

Der Algorithmus wurde in drei Funktionen unterteilt:

1. Grifferfolgserkennung

Aus den vier Drucksensorwerten wird ermittelt, ob ein stabiler Griff vorliegt oder Leckage vorhanden ist. Dies geschieht aufgrund der Auswertung des durchschnittlichen Drucks und der maximalen Druckdifferenz. Des Weiteren wird, wenn möglich der Ort und das Ausmaß der Leckage bestimmt.

2. Verschiebung zur Leckagekompensation

Bei erkannter Leckage wird der Roboter translatorisch bewegt. Dies erfolgt sowohl in X-, in Y- sowie in Z-Richtung und ist abhängig von der Druckmessung. Ziel ist es, einen Griffpunkt ohne Leckage, zu erreichen.

3. Rotation zur Leckagekompensation

Um die erkannte Leckage zu kompensieren, wird ein Rotationspunkt bestimmt und um diesen mit 0,6 rad rotiert. Im Anschluss wird auf das Handhabungsobjekt aufgefahren.

3.5.1 Grifferfolgserkennung

Die Bewertung des Grifferfolgs erfolgt aufgrund der Druckwerte der vier Drucksensoren und dem erwarteten Druck für 0% Leckage abhängig von der Ansaugspannung (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Druckwerte 0 % Leckage

p [mbar]	Ansaugspannung [V]
-315	6
-302	5,8
-288	5,6
-275	5,4
-261	5,2
-248	5
-235	4,8
-222	4,6
-209	4,4
-196	4,2
-183	4
-169	3,8
-156	3,6
-142	3,4
-129	3,2
-116	3
-102	2,8
-90	2,6
-78	2,4
-67	2,2
-56	2
-46	1,8
-37	1,6
-29	1,4
-22	1,2
-16	1
-11	0,8
-7	0,6
-4	0,4
-2	0,2

Anhand der Druckmesswerte entscheidet der Algorithmus, welcher der folgenden drei Fälle aufgetreten ist. Die gemessenen Einzeldrücke der Drucksensoren (p_1, p_2, p_3, p_4) werden im Folgenden als p_i (mit Index $i = 1, 2, 3, 4$) bezeichnet.

1. Fehlversuch

Bei einem Fehlversuch sind sowohl die durchschnittlichen als auch die einzelnen Druckmesswerte gleich dem Umgebungsdruck p_{atm} und somit ist der gemessene Relativdruck $\Delta p = 0$ mbar.

$$\bar{p} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i \quad (3.1)$$

$$p_i = \bar{p} = p_{\text{atm}} = 0$$

2. Vollständiger Griff

Ein vollständiger Griff erfolgt wird erkannt, wenn für alle Sensoren gilt:

$$p_i \neq p_{\text{atm}} \quad (3.2)$$

Außerdem darf die maximale Druckdifferenz Δp_{max} zwischen den Sensorwerten nicht über einem selbstgewählten Grenzwert liegen. Dieser Grenzwert kann je nach Sensorgenauigkeit verändert werden. In vorliegenden Versuchsaufbau wurden 2 mbar gewählt. Dies sorgt dafür, dass Leckage an einem Sensor schon bei kleinsten Abweichungen erkannt wird und den Griff invalidiert.

$$\Delta p_{\text{max}} = \max_i(p_i) - \min_i(p_i) \leq 2 \text{ mbar} \quad (3.3)$$

Zudem darf der gemessene Druck keine große Abweichung zu den Werten der Tabelle 3-3, die als Referenzwerte p_{ref} genutzt werden, vorweisen. In dieser Arbeit wurde hierfür ein Grenzwert von 4 mbar gewählt, dieser hängt jedoch ebenfalls vom genutzten Versuchsaufbau ab und sollte bei einem anderen Aufbau unter Umständen, anders gewählt werden.

$$\max_i |p_i - p_{\text{ref}}| \leq 4 \text{ mbar} \quad (3.4)$$

3. Leckageerkennung

Wenn weder ein Fehlgriff noch ein vollständiger Griff vorliegt, beginnt die Leckageerkennung. Ziel der Erkennung ist es, sowohl Ausmaß als auch räumliche Lage der Leckage zu bestimmen. Nur Letzteres wird allerdings für die nachfolgende Kompensation betrachtet.

Grundlage der Analyse bieten erneut die Tabelle 3-3 und die Druckwerte der vier Sensoren. Die Positionen der Sensoren im kartesischen Koordinatensystem sind aufgrund des Halterings bekannt. Der Koordinatenursprung für die Tabelle 3-4 ist die Mitte des Halterings.

Tabelle 3-4: Position der Drucksensoren (in mm)

	X-Koordinate	Y-Koordinate	Z-Koordinate
Sensor 1	0	-22,5	0
Sensor 2	-22,5	0	0
Sensor 3	0	22,5	0
Sensor 4	22,5	0	0

Zur Erkennung einer seitlichen Leckage werden erneut die relativen Druckabweichungen der Sensoren untereinander ausgewertet. Bei hoher Abweichung auf einem oder mehreren Sensoren, also einem niedrigeren Unterdruck schließt der Algorithmus auf Leckage an dieser Stelle. Mithilfe der bekannten Lage der Sensoren lokalisiert der Algorithmus die Leckage.

Zusätzlich wird die gemessene Druckverteilung mit den Referenzwerten der Tabelle 3-3 verglichen. Liegt eine Abweichung von mehr als 4 mbar aller vier Sensoren von den erwarteten Werten vor, sind sie aber untereinander noch ähnlich, wird dies als zentrale mittige Leckage interpretiert.

Durch den Vergleich mit Referenzwerten von anteiligen Leckagen kann auch das Ausmaß der Leckage bestimmt werden. Wenn die Masse des Objektes bekannt ist, kann auch die benötigte Spannung zum Anheben bestimmt werden.

Die Kombination beider Auswertungsstrategien erlaubt dem Algorithmus zwischen zentraler und seitlicher Leckage zu unterscheiden und zugleich deren räumliche Position zu bestimmen. Diese Informationen dienen als Grundlage für die folgenden adaptiven Bewegungsstrategien des Roboters.

3.5.2 Verschiebung zur Leckagekompensation

Die Verschiebung zur Leckagekompensation basiert hauptsächlich auf einer iterativen Funktion. Eine Bewegung erfolgt entgegengesetzt zur erkannten Leckagerichtung. Bei zwei erkannten Leckagen erfolgt die Bewegung in zwei Richtungen. Dies geschieht nicht, wenn Leckage auf zwei gegenüberliegenden Sensoren gemessen wird. Hierfür fährt der Roboter nach der Erkennung der Leckage zunächst hoch über das Objekt, danach entgegen der Leckagerichtung und nun wieder auf das Objekt. Die Bewegung über das Objekt und auch die Distanz, die der Roboter entgegengesetzt der Leckage fährt, sind zwei Parameter, welche nach Präzision und Zeitaufwand individuell eingestellt werden können. Nach dem erneuten Auffahren wird der Relativdruck Δp wieder überprüft. Ist die Leckage noch immer vorhanden, wird der Ablauf wiederholt. Dies geschieht so lange, bis ein vollständiger Griff erreicht wird. Geschieht dies nicht und es wird Leckage auf der gegenüberliegenden Seite zur ursprünglichen Leckage gemessen, bricht der Algorithmus ab. Dies wird so interpretiert, dass die Fläche zum Greifen entweder zu klein oder die gewählte Distanz für einen neuen Griffversuch zu groß ist.

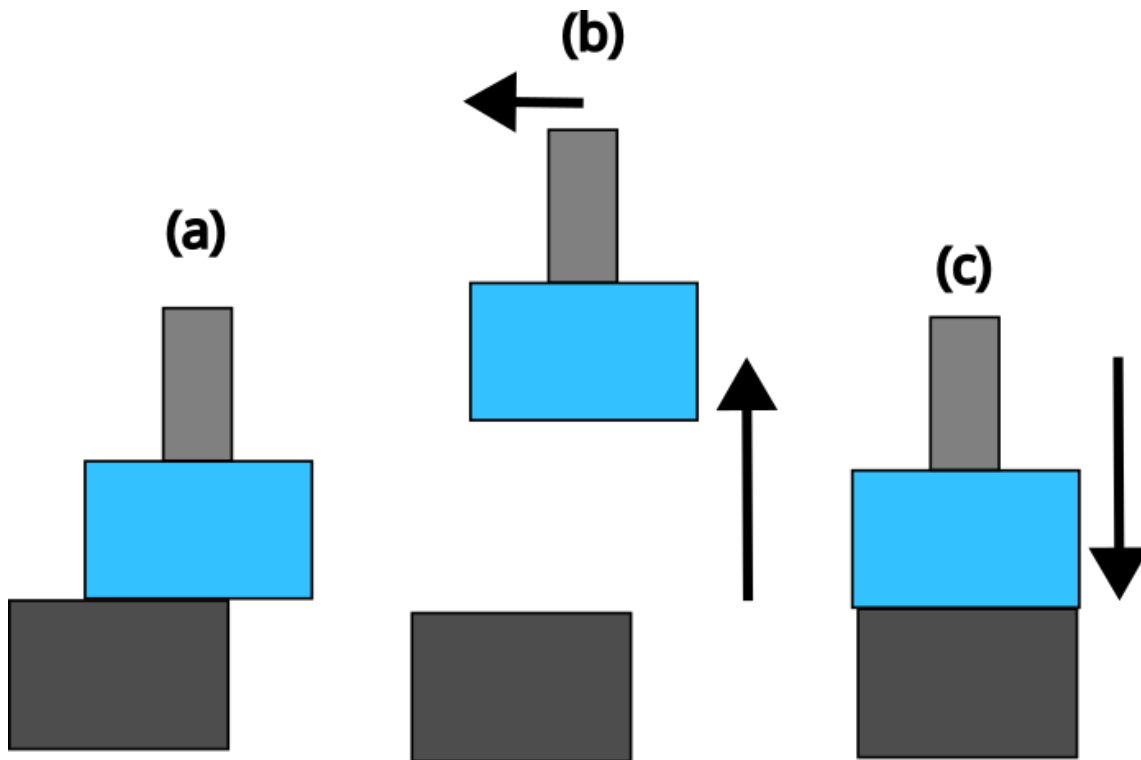


Abbildung 3-11: Grundfunktion Verschiebung zur Leckagekompensation

(a): Erkennung der Leckage; (b) Bewegung nach oben und entgegengesetzt der Leckage; (c): Anfahren des Objekts und erneutes Überprüfen der Leckage

Eine weitere Möglichkeit der translatorischen Leckagekompensation ergibt sich im Falle von Leckage auf zwei gegenüberliegenden Sensoren. Dies deutet auf eine zu kleine oder gekrümmte Grifffläche hin. Der Roboter kann nun weiter auf das Objekt in Z-Richtung auffahren und versuchen mehr Kontaktfläche an den Rändern zu schaffen, z.B. bei runden Objekten. Generell ist diese Funktion am hilfreichsten bei ebenen Flächen ohne Löchern, z.B. bei einer Box, welche bei einem Griffversuch nur am Rand getroffen wurde. Bei runden Geometrien weist dieser Algorithmus Schwächen auf.

3.5.3 Rotation zur Leckagekompensation

Ziel der Rotation zur Leckagekompensation ist, den Greifer durch eine Kippbewegung in Leckagerichtung so auszurichten, dass er beim erneuten Anfahren das Objekt optimal umschließt und greift. Die Grundlage dieser Funktion ist die Berechnung eines Leckagevektors. Die Abweichungen der gemessenen Drücke der vier Sensoren werden gewichtet und ein Rotationsmittelpunkt innerhalb der Greiffläche berechnet. Anschließend wird eine Rotationsachse R bestimmt, welche senkrecht zur Leckagerichtung steht. Diese ergibt sich durch das Kreuzprodukt des Leckagevektors L mit der Z-Achse Z .

$$\vec{R} = \vec{L} * \vec{Z} \quad (3.5)$$

R : Rotationsachse; L : Leckagevektor; Z : Z-Achse

Die berechnete Achse R liegt ebenfalls in der XY-Ebene und ist orthogonal zur Leckagerichtung.

Der Greifer rotiert als Erstes um die Rotationsachse um 0,6 rad (34,38°) in Leckagerichtung. Danach fährt er in Leckagerichtung vom Objekt weg, um im Anschluss auf das Objekt

aufzufahren. Damit soll eine verbesserte Abdichtung erreicht werden (Abbildung 3-11).

Der Winkel, um den rotiert wird, wurde für diese Versuchsreihe auf 0,6 rad festgelegt. Es wird erwartet, dass er sich am besten für eine Kante eignet. Er kann jedoch auch variabel während des Rotierens verändert werden, z.B. aufgrund des gemessenen Drucks während der Rotation oder durch einen festen Winkel für bekannte Objekte, um eine optimale Abdichtung zu erzielen.

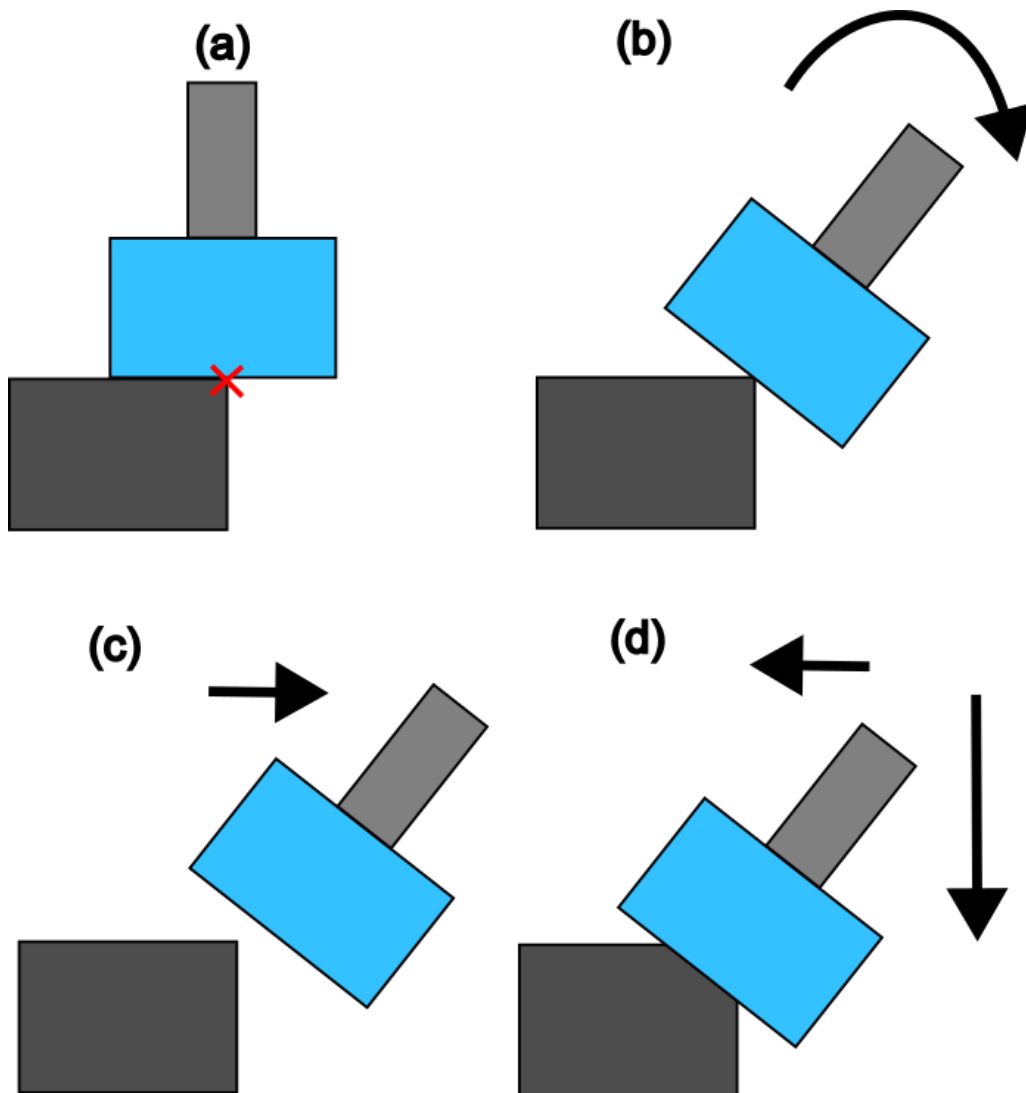


Abbildung 3-12: Grundfunktion Rotation zur Leckagekompensation

✗: Rotationspunkt, (a): Leckageerkennung und Berechnung der Rotationsachse und des Rotationspunkts, (b): Rotationsbewegung um Rotationsachse, (c): Fahren in Leckagerichtung, (d): Auffahren auf Objekt

4 Messergebnisse

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden zwei verschiedene Messreihen durchgeführt. Zunächst erfolgten grundlegende Messungen an den in dieser Arbeit gefertigten Handhabungsobjekten. Die dabei erfassten Druckverläufe und Messwerte dienten als Grundlage für die Parametrisierung und Kalibrierung des neu entwickelten Algorithmus.

Der Algorithmus wurde während der Entwicklung ebenfalls mit diesen Objekten validiert. Damit wurden Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit der Druckwerte untersucht.

Anschließend erfolgte eine zweite Testreihe des Algorithmus unter realitätsnahen Bedingungen mit unterschiedlich geformten Testobjekten (Abbildung 3-9). Dabei wurde die Leistungsfähigkeit des Algorithmus im Hinblick auf die erzielten Unterdruckwerte sowie die Leistungsaufnahme des Saugmoduls untersucht. Zusätzlich wurde die benötigte Zeit für einen kompensierten Griffvorgang gemessen.

4.1 Leckagemessungen

Die Leckagemessungen wurden für alle gefertigten Handhabungsobjekte durchgeführt, wobei jeweils drei unterschiedliche Zusatzmassen (50 g, 114,16 g, 384,75 g) getestet wurden. Eine Ausnahme bilden die Platten mit 50 % Leckageanteil. Aufgrund des hohen Leckageanteils und der daraus resultierenden geringen Haltekraft konnte bei diesen Objekten nur die 50-g-Variante erfolgreich angehoben werden. Bei höheren Massen war die Saugleistung nicht ausreichend, um einen hinreichend starken Unterdruck zum Anheben zu erzeugen.

Die Messungen wurden durchgeführt, indem zunächst mithilfe einer Positionierungsvorrichtung ein sicherer und reproduzierbare Griff hergestellt wurde. Anschließend wurde die Ansaugspannung iterativ in Schritten um 0,2 V reduziert. Nach jeder Reduktion erfolgte eine Pause von 2 s, damit sich der Unterdruck stabilisiert und dann die Druckwerte aller vier Sensoren erfasst. Jede Messung wurde fünfmal durchgeführt. Die Messungen wurden anschließend auf Abweichungen überprüft. Die Druckwerte wurden in Tabellen aufgenommen und in den Abbildungen 4-1 bis 4-7 dargestellt.

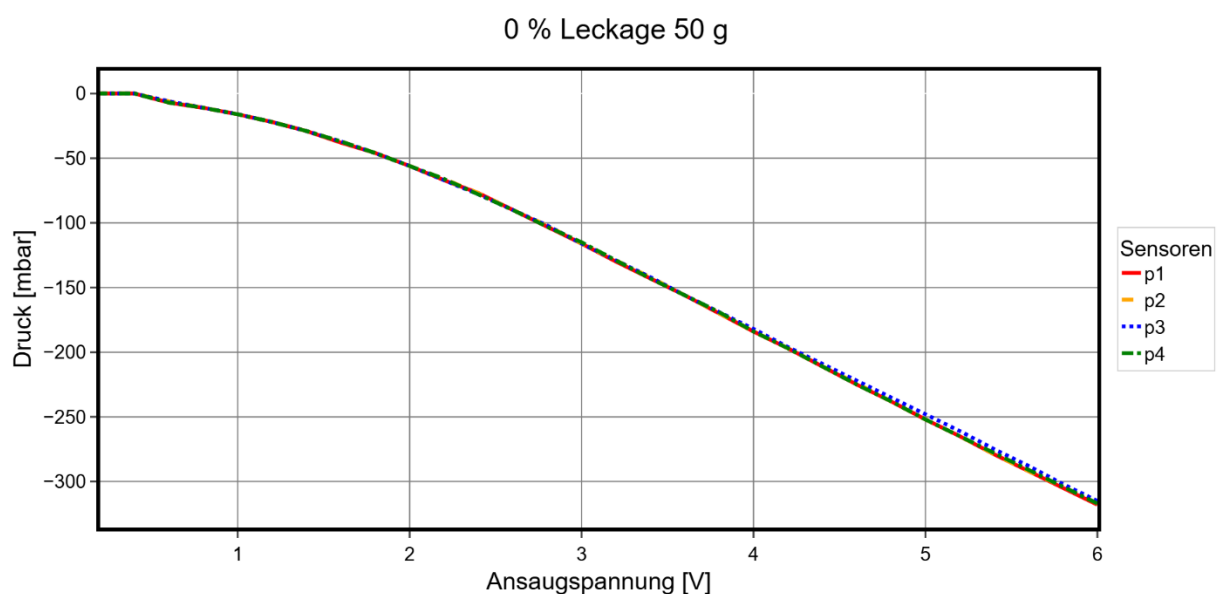


Abbildung 4-1: 0 % Leckage Druckwerte

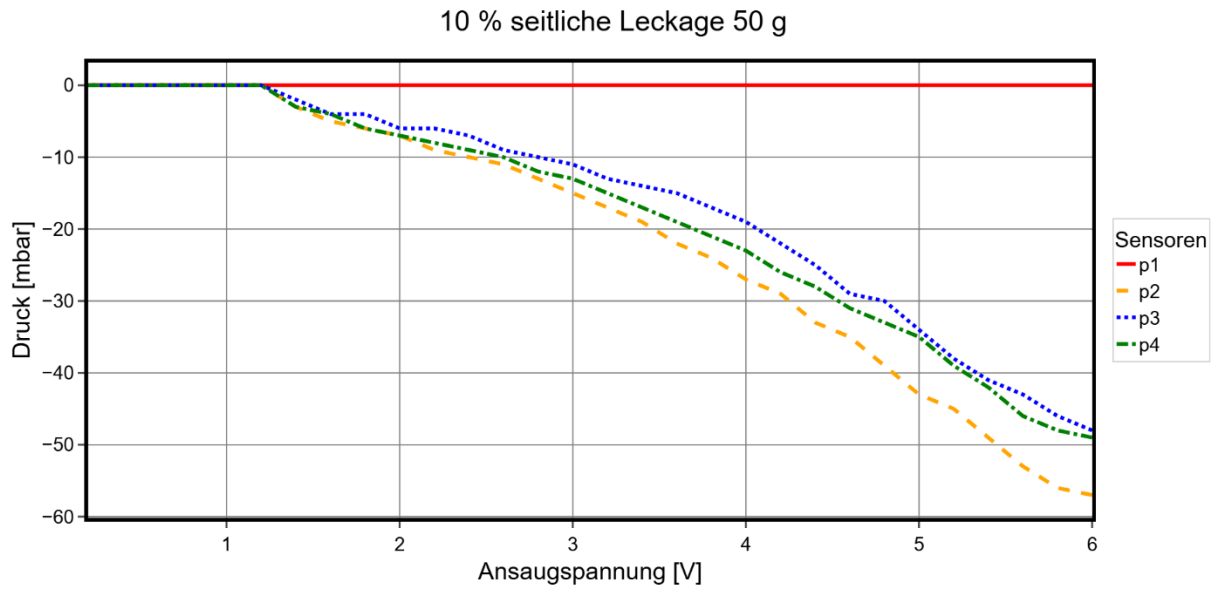


Abbildung 4-2: 10 % seitliche Leckage Druckwerte

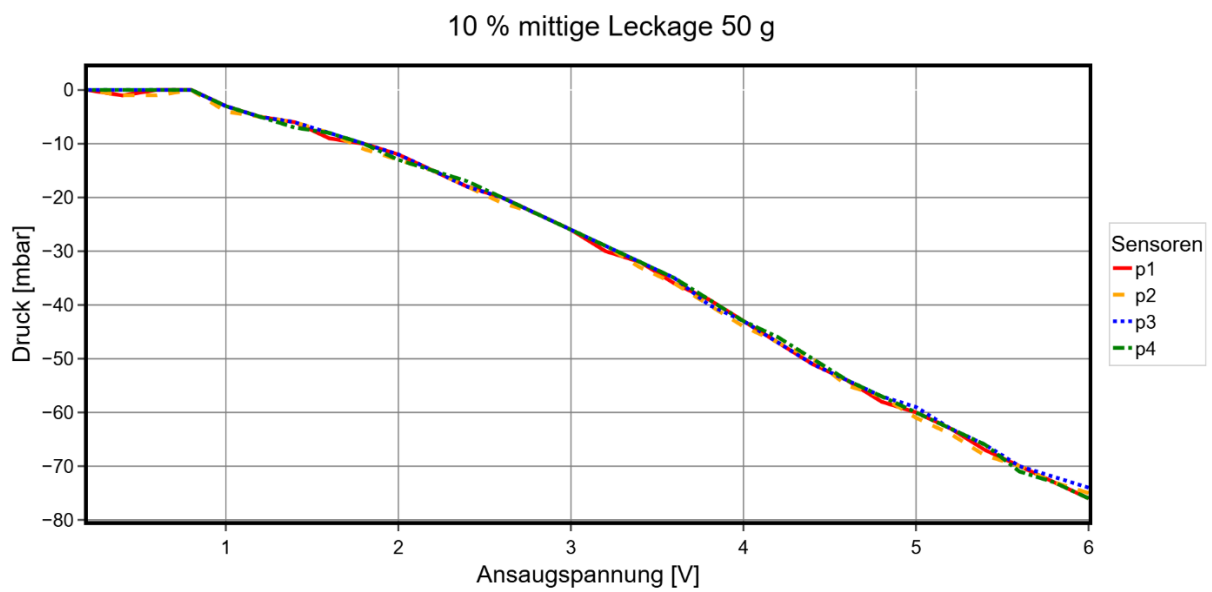


Abbildung 4-3: 10 % mittige Leckage Druckwerte

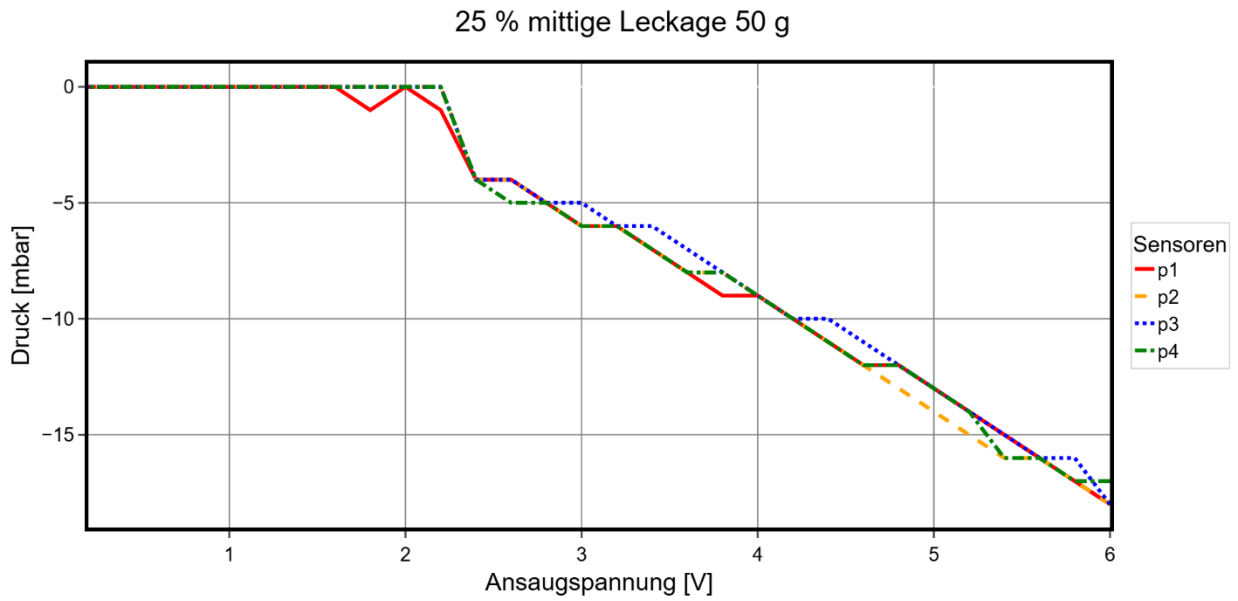


Abbildung 4-4: 25 % mittige Leakage Druckwerte

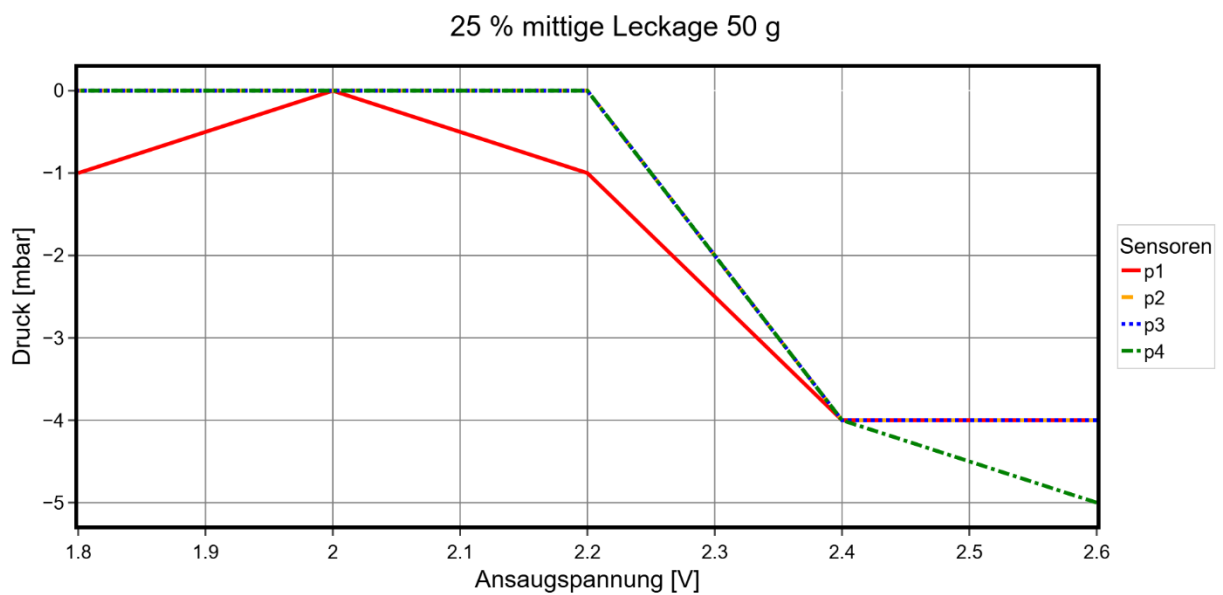


Abbildung 4-5: 25 % mittige Leakage Druckwerte Ausschnitt 50 g

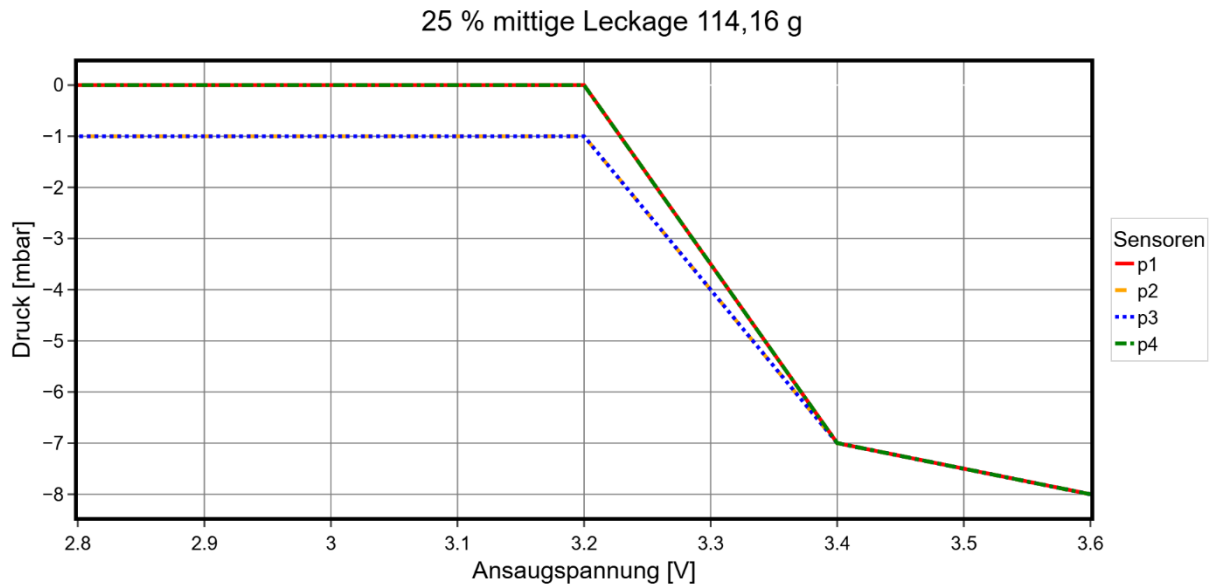


Abbildung 4-6: 25 % mittige Leakage Druckwerte Ausschnitt 114,16 g

Anhand der Abbildung 4-5 ist zu erkennen, dass das Handhabungsobjekt mit Masse von 50 g und 25 % mittiger Leakage bei einer Ansaugspannung von 2,2 V vom Greifer nicht mehr gehalten werden konnte und abfiel. In Abbildung 4-6 ist erkennbar, dass beim gleichen Handhabungsobjekt mit 114,16 g Masse und 25 % mittiger Leakage dies schon bei 3,2 V erfolgte.

Abbildung 4-7 zeigt alle Werte, bei denen das Handhabungsobjekt nicht mehr gehalten werden konnte. Fehlende Werte bei 50 % Leakage entstehen dadurch, dass der Roboter nicht in der Lage war, das Objekt zu heben.

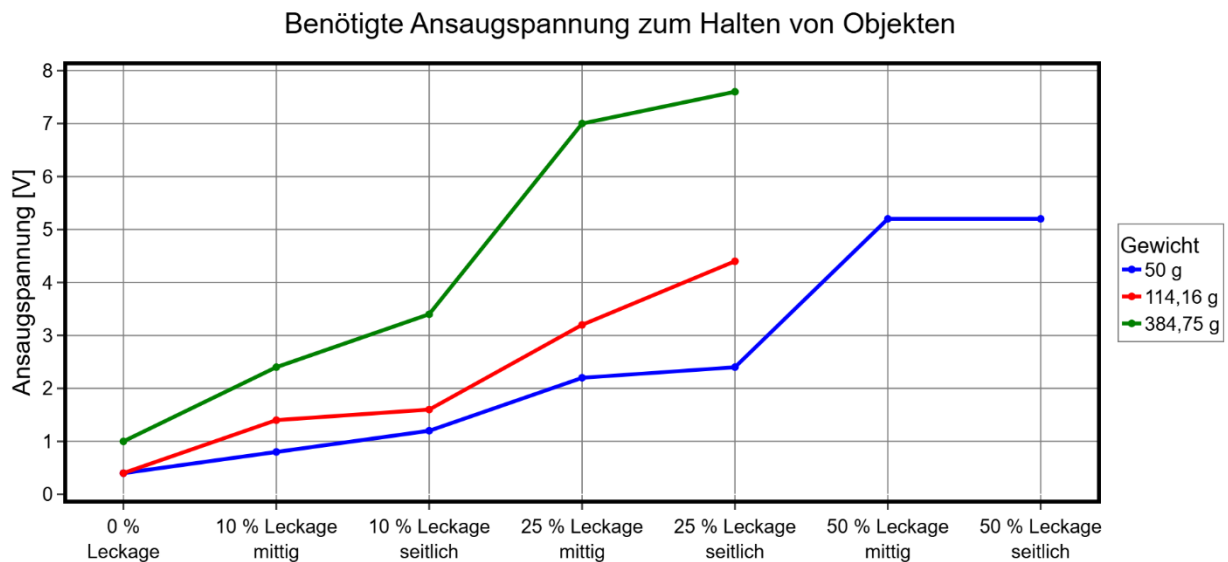


Abbildung 4-7: benötigte Ansaugspannung zum Halten von Objekten

4.2 Algorithmusmessungen

Um die zwei Kompensationsstrategien in der Praxis zu validieren und ihre Leistungsfähigkeit zu untersuchen, wurden Bin-Picking-Szenarien simuliert. Ziel dieser Versuche war es, das System unter praxisnahen Greifbedingungen zu bewerten und die Wirksamkeit zu quantifizieren. Die simulierten Bin-Picking-Szenarien bestehen aus automatisierten Greifversuchen auf die drei Testobjekte Box, Kartoffelmodell und Konservendose ([Abbildung 3-9](#)) aus einer Kiste. Hierbei fährt der Greifer von oben auf die Testobjekte auf und versucht diese zu greifen. Während des Griffes werden in Echtzeit die Druckwerte gemessen und durch den Algorithmus ausgewertet.

Sobald der Algorithmus anhand der gemessenen Druckverteilung eine Leckage identifiziert, wird eine der beiden Kompensationsstrategien angewendet. Im Anschluss an jede Kompensationsbewegung erfolgt erneut eine Messung der Druckwerte und eine Erfassung der benötigten Zeit für die Kompensation.

Mit diesem Versuchsaufbau lassen sich die Effektivität der Leckageerkennung, sowie die Effektivität und Effizienz der Kompensationsstrategien im Vergleich zu einem Griff ohne Kompensation mit Messungen direkt beurteilen.

4.2.1 Verschiebung zur Leckagekompensation

Diese Versuchsreihe der Verschiebung zur Leckagekompensation beschränkt sich auf Handhabungsobjekte mit ebener Oberfläche. Da Vorversuche gezeigt haben, dass diese Art der Kompensation durch Verschiebung bei gekrümmten Geometrien wie z.B. des Kartoffelmodells nicht effektiv ist. Aus diesem Grund ist das Handhabungsobjekt in dieser Versuchsreihe die Box sowie die Oberseite der Konservendose. Die Parameter wurden wie folgt festgelegt:

Tabelle 4-1: Parameter der Versuchsreihe Verschiebung zur Leckagekompensation

Ansaugspannung	Geschwindigkeit	Beschleunigung	Korrekturdistanz	Korrekturhöhe
4 V	$0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	20 mm	100 mm

Die Korrekturdistanz beschreibt, um welche Distanz der Roboter versucht, die Leckage zu kompensieren. Die Korrekturhöhe beschreibt, wie weit der Roboter nach oben fährt, um hier die Korrektur auszuführen.

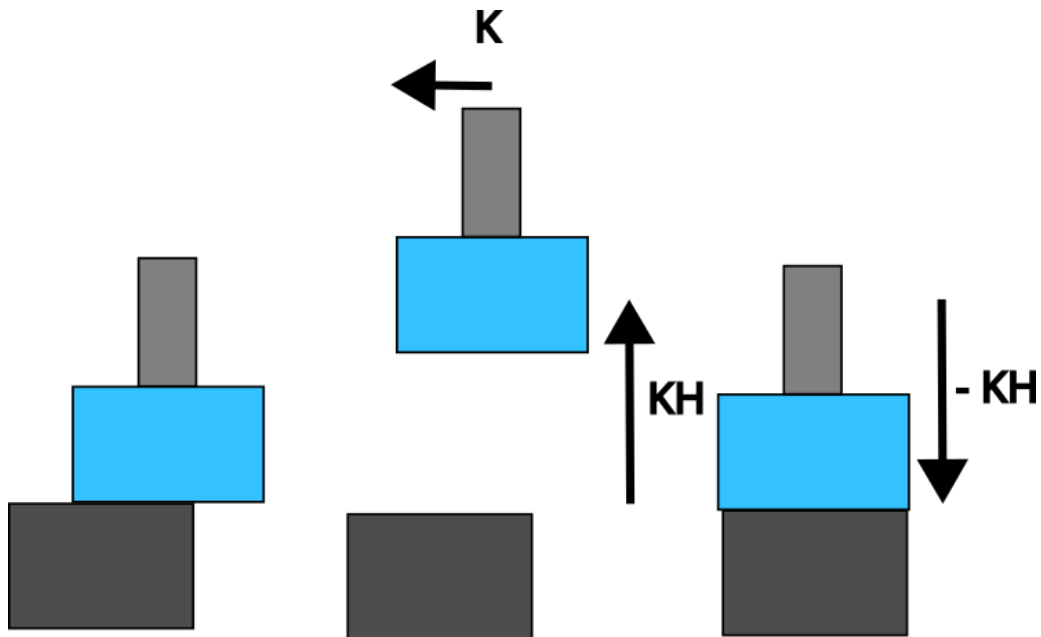


Abbildung 4-8: Parameter Verschiebung zur Leckagekompensation

KH: Korrekturhöhe; K: Korrekturdistanz

Szenario 1: Einseitige Leckage (Box)

In diesem Szenario wurde die Box so angefahren, dass eine starke Leckage auf Sensor 1 (negative Y-Richtung) entstand. Der Druck bei Sensor 1 ist gleich Umgebungsdruck (1 bar). Somit ist der gemessene Relativdruck Δp gleich 0 mbar. Auch die restlichen Sensorwerte weichen stark vom Referenzwert ab. Der Algorithmus hat diese Leckage auf Sensor 1 erkannt und den Griffversuch abgebrochen. Daraufhin hat er den Greifer um 100 mm nach oben gefahren und dann 20 mm in positive Y-Richtung. Nun wurde ein neuer Griffversuch auf die Box gefahren und erneut die Drücke gemessen. Der anschließende zweite Griffversuch resultierte in einem stabilen rund -180 mbar starken Unterdruck, welcher auch dem Referenzwert für einen optimalen Griff entspricht. Der Algorithmus hat dies auch so richtig entschieden und den Prozess beendet.

Tabelle 4-2: Druckwerte Kompensation einseitige Leckage

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	0 mbar	-11 mbar	-8 mbar	-10 mbar
39,6 s	2. Griffversuch	-181 mbar	-182 mbar	-181 mbar	-182 mbar

Szenario 2: Starke einseitige Leckage (Box)

Bei einer sehr ungünstigen Positionierung des Greifers auf der Box kann bei einer Korrekturdistanz von 20 mm es vorkommen, dass nur ein Korrekturversuch nicht ausreicht. In diesem Versuch ist der Greifer mit seinem Mittelpunkt etwa auf der Kante der Box gelandet (50 % Leckage). Das heißt rund 25 mm des Greifers erfahren nun Leckage. Die erste Korrekturbewegung verringert die Leckage zwar deutlich und verbessert den durchschnittlichen Druckwert $\bar{p}$ von -1,5 mbar auf -16,75 mbar (zweiter Griffversuch), dennoch ist noch immer Leckage von ca. 10 % vorhanden, da noch 5 mm der Greiferöffnung über der Box stehen. Der Algorithmus entschied daraufhin eine erneute Korrekturbewegung zu fahren. Dieser dritte Griffversuch führte zum optimalen Griff.

Tabelle 4-3: Druckwerte Kompensation starke einseitige Leckage

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	0 mbar	-2 mbar	-2 mbar	-2 mbar
39,6 s	2. Griffversuch	-1 mbar	-23 mbar	-22 mbar	-21 mbar
79,1 s	3. Griffversuch	-180 mbar	-182 mbar	-181 mbar	-181 mbar

Szenario 3: Leckage auf zwei Sensoren (Box)

Bei einem komplexeren Leckagefall wie hier bei Leckage auf zwei benachbarten Sensoren (Sensor 1 und Sensor 2) benötigte der Algorithmus ebenfalls zwei Griffversuche zur Kompensation. Der Algorithmus erkannte die stärkste Leckage auf Sensor 1 (negative Y-Richtung) und fuhr nun in positive Y-Richtung. Beim erneuten Druckmessung erkannte der Algorithmus zwar die Verbesserung der Druckwerte, detektierte jedoch immer noch Leckage auf Sensor 2 (negative X-Richtung). Für den dritten Griffversuch fuhr der Algorithmus nun eine zweite Korrekturbewegung, diesmal in positive X-Richtung. Im dritten Griffversuch entschied der Algorithmus aufgrund der Druckwerte um -180 mbar, dass ein erfolgreicher Griff getätigt wurde.

Tabelle 4-4: Druckwerte Kompensation Leckage zwei Sensoren

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	0 mbar	-3 mbar	-4 mbar	-5 mbar
39,6 s	2. Griffversuch	-16 mbar	-11 mbar	-15 mbar	-15 mbar
79,1 s	3. Griffversuch	-177 mbar	-182 mbar	-181 mbar	-181 mbar

Szenario 4: Kleines Testobjekt (Konservendose)

Bei Versuchen mit der Konservendose an ihrer flachen oberen Seite trat das bereits vorher vermutete Phänomen auf, dass der Algorithmus zu weit korrigiert. Der erste Griffversuch zeigt eine geringe Leckage auf Sensor 4. Die durchgeführte Korrektur um 20 mm sorgte jedoch dafür, dass der Greifer über das Objekt nun auf der anderen Seite ragt. Dies ist in den Daten des zweiten Griffversuchs erkennbar, wo nun Sensor 2 eine starke Leckage aufweist, während Sensor 4 keine Leckage mehr vorweist. Da aufgrund der geringeren Größe der Konservendose der Greifer, mit einer Korrekturdistanz von 20 mm, die Leckage nur auf die gegenüberliegende Seite verlagert, brach der Algorithmus den Vorgang ab.

Tabelle 4-5: Druckwerte Kompensation kleines Testobjekt

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	-110 mbar	-110 mbar	-108 mbar	-86 mbar
39,6 s	2. Griffversuch	-154 mbar	-14 mbar	-156 mbar	-155 mbar

4.2.2 Rotation zur Leckagekompensation

Für die Untersuchung des Algorithmus, der versucht Leckage durch Rotation zu kompensieren, wurden sowohl das quaderförmige Testobjekt Box wie auch das Kartoffelmodell mit seiner komplexen Geometrie genutzt. Die Versuchsreihe fand unter den identischen Bedingungen wie in den zuvor beschriebenen Bin-Picking-Szenarien statt.

Für diese Versuchsreihe wurden die Parameter wie folgt festgelegt. Ansaugspannung (4 V), Geschwindigkeit ($0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) und Beschleunigung ($0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) bleiben gleich.

Tabelle 4-6: Parameter Versuchsreihe Rotation zur Leckagekompensation

Rotationswinkel	Auffahrdistanz	Auffahrhöhe	Rücksetzdistanz
0,6 rad (34,38°)	60 mm	5 mm	10 mm

Der Rotationswinkel ist der Winkel, um den sich der Greifer um den ermittelten Leckagemittelpunkt dreht. Die Auffahrdistanz beschreibt die Verschiebungsbewegung hin zum Objekt in XY-Ebene, während die Auffahrhöhe die Verschiebungsbewegung in Z-Richtung ist. Beide Verschiebungen erfolgen nach der Rotation und mit einem Rücksetzer, welcher eine Verschiebung in XY-Ebene weg vom Objekt ist.

In den folgenden Tabellen 4-7 bis 4-10 sind die gemessenen Drücke des ersten Griffversuchs ohne Kompensation und des zweiten Griffversuchs nach Durchlauf des Algorithmus dargestellt.

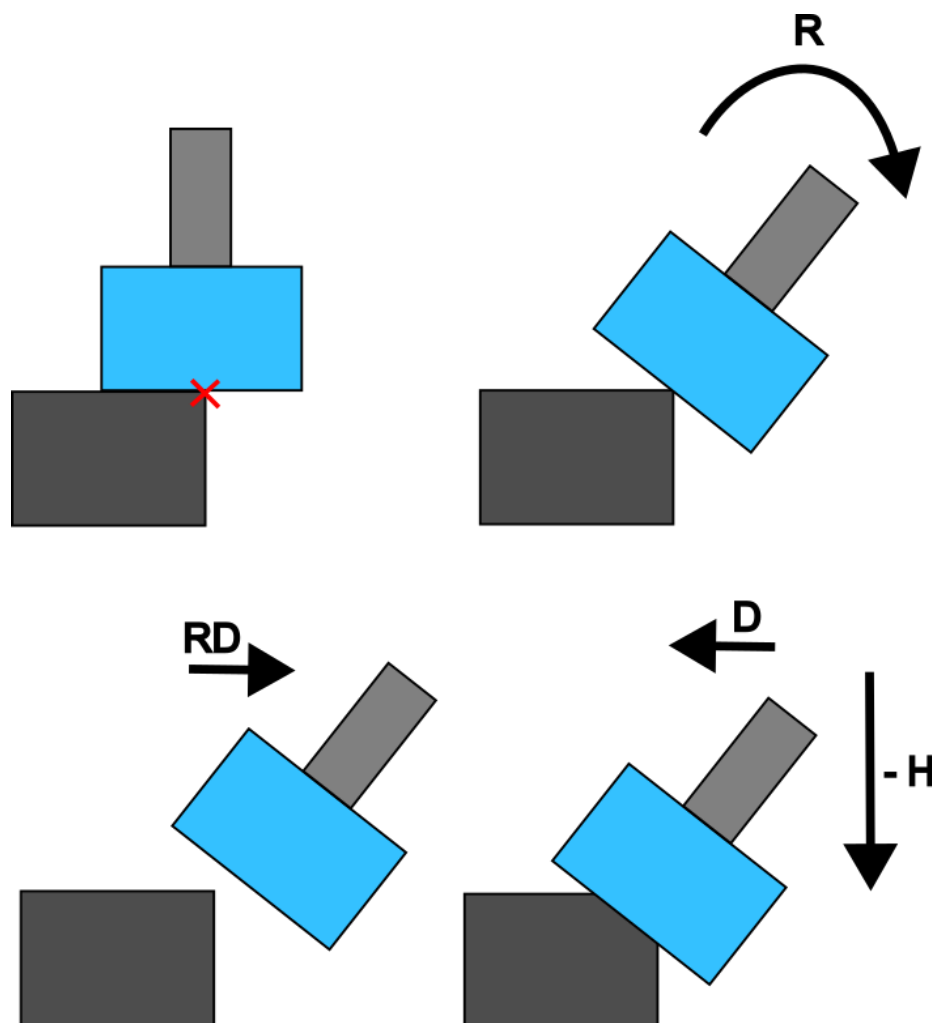


Abbildung 4-9: Parameter Rotation zur Leckagekompensation

✗: Rotationspunkt, R: Rotationswinkel, RD: Rücksetzdistanz, D: Auffahrdistanz, H: Auffahrhöhe

1. Szenario: Einseitige Leckage (Box)

In diesem Szenario wurde die Box mit moderater Leckage auf Sensor 1 angefahren. Zu erkennen ist, dass der erste Griffversuch recht gut war und der Griff stabil. Dennoch ist eine Leckage auf Sensor 1 erkannt worden und der Algorithmus versuchte die Positionierung des Greifers zu verbessern.

Tabelle 4-7: Druckwerte Kompensation Rotation einseitige Leckage

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	-38 mbar	-97 mbar	-98 mbar	-97 mbar
52,6 s	2. Griffversuch	-30 mbar	-95 mbar	-95 mbar	-93 mbar

2. Szenario: Starke einseitige Leckage (Box)

Das Objekt wurde in diesem Szenario sehr schlecht getroffen. Es besteht nahezu kein aufgebauter Unterdruck. Anhand der Daten schwer zu erahnen, aber durch visuelle Prüfung bestätigt, befindet sich in diesem Griff ausschließlich eine einseitige Leckage auf Sensor 3.

Tabelle 4-8: Druckwerte Kompensation Rotation starke einseitige Leckage

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	-13 mbar	-13 mbar	-11 mbar	-13 mbar
52,6 s	2. Griffversuch	-3 mbar	-3 mbar	-3 mbar	-3 mbar

3. Szenario: Einseitige Leckage (Kartoffelmodell)

Hier zu erkennen ist eine leichte Leckage auf Sensor 1. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Druckwerte trotzdem gut genug für einen stabilen Griff waren. Der Grund hierfür ist, dass das Testobjekt im unverfestigten Zustand des Greifers angefahren wurde und aufgrund der geringen Masse des Kartoffelmodells die Ansaugspannung von 4 V stark genug war, um das Testobjekt so an den Greifer zu ziehen, dass dieser das Kartoffelmodell gut umschlossen hat.

Tabelle 4-9: Druckwerte Kompensation Rotation einseitige Leckage Kartoffelmodell

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	-92 mbar	-163 mbar	-163 mbar	-162 mbar
52,6 s	2. Griffversuch	-50 mbar	-166 mbar	-165 mbar	-160 mbar

4. Szenario: moderate einseitige Leckage (Kartoffelmodell)

Tabelle 4-10: Druckwerte Kompensation Rotation moderate einseitige Leckage Kartoffelmodell

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	-1 mbar	-99 mbar	-99 mbar	-98 mbar
52,6 s	2. Griffversuch	-1 mbar	-84 mbar	-86 mbar	-85 mbar

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ausgangsthese dieser Arbeit konnte anhand der gewonnenen Messwerte bestätigt werden. Durch Leakage und das damit verbundene Ansaugen der Umgebungsluft an dieser Stelle verringert sich die Möglichkeit des Saugmoduls, einen Unterdruck innerhalb des Greifers aufzubauen. Außerdem verändert sich nicht nur der Gesamtdruck innerhalb des Greifers, sondern auch lokal in der Nähe der Leakage verändert sich der Unterdruck im Vergleich zu anderen Stellen innerhalb des Greifers Abbildung 4-2. Die Messwerte bestätigen außerdem, dass es möglich ist, diese geringen Druckunterschiede mit den in dieser Arbeit genutzten Sensoren zu erfassen.

Es zeigt sich außerdem, dass der Unterdruck im gesamten Greifer nicht nur an den Stellen der Leakage fällt. Wie in Abbildung 4-1 erkennbar, beträgt der Unterdruck bei 3 V etwa -116 mbar für 0 % Leakage. Bei nur 10 % seitlicher Leakage (Abbildung 4-2) wurden bei 3 V nahe der Sensoren ohne Leakage (p2, p3, p4) etwa -13 mbar gemessen. Abbildung 4-3 zeigt, dass bei 10 % mittlerer Leakage sich die Werte zwar auf rund -26 mbar verbessern, aber trotzdem nicht im Ansatz ein so hoher Unterdruck aufrecht erhalten werden kann wie bei 0 % Leakage.

Dies zeigt sich ebenfalls in Abbildung 4-7. Durch den geringeren Unterdruck bei seitlicher Leakage im Vergleich zu mittlerer wird eine höhere Saugleistung und dementsprechend höhere Ansaugspannung benötigt, um ein Objekt zu halten. Leakage wirkt sich exponentiell negativ auf den Druckaufbau aus, wie beim Vergleich der Abbildungen 4-3 und 4-4 zu erkennen ist. Schon kleinste Leakage hat eine deutliche Auswirkung auf den Aufbau des Unterdrucks. Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung und Aufmerksamkeit, die Vermeidungsstrategien von Leakage in Produktionsprozessen haben müssen. Die Masse eines Objektes wirkt sich hingegen etwa linear auf die benötigte Saugleistung aus (Abbildung 4-7).

5.1 Leakageerkennung

Die Zuverlässigkeit der Leakageerkennung erwies sich in Bezug auf die Lokalisation der Leakage als hoch. Innerhalb von zwanzig Bin-Picking-Versuchen am Handhabungsobjekt Box konnte der Algorithmus in 100 % der Fälle den Ort der Leakage identifizieren. Eine Aussage zum Ausmaß der Leakage war jedoch selbst unter optimalen Laborbedingungen schwer zu treffen, da selbst kleinste Veränderungen an der Positionierung des Handhabungsobjektes die Messwerte veränderten. Charakteristisch für einen nicht optimalen Griff ist jedoch, dass sämtliche Sensoren einen starken Abfall des Unterdrucks messen, wobei der Sensor in Leakenähe häufig einen Relativdruck nahe 0 mbar misst.

Der gemäß der Referenzwerttabelle 3-3 erwartete Wert von etwa -183 mbar bei 4 V Ansaugspannung wird trotz nur 25 % seitlicher Leakage stark verfehlt. Es ist zu erkennen, dass im Laborversuch die Leakage wirklich direkt unter Sensor 1 befindet und tatsächlich Umgebungsdruck gemessen wird.

Tabelle 5-1: Druckwerte 0 % Leakage und 25 % Leakage seitlich

Leakage	Ansaugspannung	p1	p2	p3	p4
0 %	4 V	-184 mbar	-183 mbar	-182 mbar	-184 mbar
25 % seitlich	4 V	0 mbar	-7 mbar	-7 mbar	-8 mbar

Bei Objekten, wie dem Kartoffelmodell, kann durch die unebene Oberfläche leichte Leckage entstehen, gegebenenfalls auch an mehreren Stellen. In diesen Fällen ist zwar meist ein reduzierter Unterdruck erkennbar, allerdings muss dieser nicht 0 mbar betragen, sondern kann auch deutlich höher liegen (Tabelle 4-9).

5.2 Verschiebung zur Leckagekompensation

Die Untersuchung des Algorithmus, mit dem versucht wurde, durch Verschiebung die Leckage zu kompensieren, zeigte eine hohe Zuverlässigkeit des Verfahrens. Bei den Versuchen am quaderförmigen Handhabungsobjekt Box detektierte der Algorithmus in jedem der zwanzig Bin-Picking-Versuche die korrekte Richtung und initiierte die gewollte Ausgleichsbewegung. In den meisten Fällen führte schon der erste Korrekturversuch zu einem optimalen formschlüssigen Griff. Bei starker Leckage oder Leckage auf zwei nebeneinander liegenden Sensoren führte spätestens der zweite Korrekturversuch zum Erfolg.

Die Parameter, die in dieser Versuchsreihe genutzt wurden, könnten abgewandelt werden, um geringere Korrekturschritte zu fahren. Dies hätte zwar zur Folge das mehr Griffversuche benötigt werden, aber es könnte auch verhindern, dass der Algorithmus bei kleineren Handhabungsobjekten über das Objekt hinausfährt. Dieses Phänomen tritt allerdings nur auf bei Objekten, welche eine ähnliche Größe wie der Greifer haben. In den Versuchen hat der Greifer einen Innendurchmesser von 50 mm und die Konservendose einen Durchmesser von 72 mm.

Hinsichtlich der zeitlichen Effizienz des Algorithmus wurde eine Dauer von 39,6 s pro korrigierter Positionierung gemessen. Dieser hohe Wert resultiert primär aus implementierten Pausenzeiten zur visuellen Validierung während der Testphase. Insgesamt besitzt der Code vier Pausenzeiten mit jeweils 3 s Pause. Durch die Eliminierung dieser Wartezeiten, einer Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters sowie einer Verringerung der Korrekturhöhe ließe sich die Zeit für einen Korrekturgriff auf etwa 10 s reduzieren. Dies würde einen Einsatz in industriellen Anwendungen verbessern.

Der Hauptanwendungsmöglichkeit des Algorithmus liegt in der Ermöglichung von Griffen, welche ohne Korrektur physikalisch erfolglos aufgrund eines zu geringen Unterdrucks wären. Die folgende Tabelle 5-2 zeigt einem typischen Verlauf hierfür:

Tabelle 5-2: Druckwerte Kompensation durch Verschiebung einseitige Leckage

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	0 mbar	-11 mbar	-8 mbar	-10 mbar
39,6 s	2. Griffversuch	-181 mbar	-182 mbar	-181 mbar	-182 mbar

Neben der Möglichkeit einen Griff überhaupt erst durchzuführen, kann eine Leckagekompensation die Energieeffizienz verbessern. In Szenarien, in denen ein Griff trotz Leckage zwar möglich ist, muss diese durch eine erhöhte Saugleistung kompensiert werden:

Tabelle 5-3: Druckwerte Kompensation durch Verschiebung geringe einseitige Leckage

Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	-96 mbar	-96 mbar	-95 mbar	-53 mbar
39,6 s	2. Griffversuch	-180 mbar	-182 mbar	-181 mbar	-181 mbar

Das Szenario in Tabelle 5-3 verdeutlicht das Energieeinsparpotential. Im ersten Griffversuch mit Leckage wäre eine Ansaugspannung von mindestens 2 V erforderlich, um das Handhabungsobjekt Box sicher zu halten. Dies entspricht einer Leistungsaufnahme des Saugmoduls von 243 W. Nach Verwendung des Algorithmus genügt bei gemessenen Druckwerten um -180 mbar eine Ansaugspannung von 1 V, entsprechend 147 W, um denselben Halt zu gewährleisten. Auch wenn in der Praxis aus Prozesssicherheitsgründen die Ansaugspannung über dem minimal benötigten Wert liegen würde, könnte trotzdem eine geringere Ansaugspannung genutzt werden und ein niedrigerer Stromverbrauch erzielt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass diese Kompensationsstrategie die Griffqualität in allen getesteten Szenarien erheblich verbessert. In den meisten Fällen ermöglichte der Algorithmus überhaupt erst, einen Griff erfolgreich zu erzielen. Die Zuverlässigkeit bei den Bin-Picking-Versuchen lag bei 100 %. Während die aktuelle Implementierung ausschließlich auf seitliche Positionierungsfehler bei ebenen Flächen ausgelegt ist, könnte eine Erweiterung durch eine Korrektur in Z-Richtung auch bei runden Objekten, welche Leckage auf zwei gegenüberliegenden Seiten erzeugen, helfen Leckage zu vermeiden.

5.3 Rotation zur Leckagekompensation

Im Gegensatz zur Kompensation durch Verschiebung konnte durch die Rotationsbewegung in den durchgeführten Versuchsreihen keine Verbesserung der Griffqualität erzielt werden. Die Messergebnisse zeigen konsistent, dass sich die Druckwerte nach Durchführung der Kompensationsstrategie verschlechterten. Dies gilt sowohl für Handhabungsobjekte mit ebenen Oberflächen, wie die Box, als auch für Objekte mit komplexeren Oberflächengeometrien wie das Kartoffelmodell.

Die nachfolgende Tabelle 5-4 zeigt dies exemplarisch für zwei Szenarien am Kartoffelmodell.

Tabelle 5-4: Druckwerte Kompensation durch Rotation Kartoffelmodell

Wenig Leckage					
Zeit	Zustand	p1	p2	p3	p4
0 s	1. Griffversuch	-92 mbar	-163 mbar	-163 mbar	-162 mbar
52,6 s	2. Griffversuch	-50 mbar	-166 mbar	-165 mbar	-160 mbar
Mittelstarke Leckage					
0 s	1. Griffversuch	-1 mbar	-99 mbar	-99 mbar	-98 mbar
52,6 s	2. Griffversuch	-1 mbar	-84 mbar	-86 mbar	-85 mbar

Der Hauptgrund für das Versagen dieser Strategie liegt im Aufbau des in dieser Arbeit genutzten Prototyps zur Messung. Das Funktionsprinzip des Granular Jamming Greifers basiert grundlegend auf der Flexibilität der Membran, welche sich an die Oberflächengeometrie des Handhabungsobjektes anpasst. Durch den im Inneren des Greifers verbauten starren Haltering sowie die relativ steifen Pneumatikschläuche, die diesen mit dem Roboterarm verbinden, wurde Elastizität des Greifers zu sehr eingeschränkt.

Bei der Vorwärtsbewegung (Auffahrdistanz) des Greifers nach der Rotation versucht dieser das Objekt zu umschließen. Dies gelingt jedoch nur so weit, bis das Objekt den Haltering berührt. Ab diesem Punkt findet keine weitere Formanpassung mehr statt und der Roboter schiebt stattdessen das Objekt lediglich vor sich her. Da sich der Haltering nur 10 mm im

Inneren des Greifers befindet und nur leicht nach hinten geschoben werden kann, verhindert er den notwendigen Formschluss und führt zu mehr Leckage, als wenn das Objekt einfach gerade angefahren worden wäre.

Um das theoretische Potential der Rotation trotzdem nutzbar zu machen, sind Hardwareveränderungen am Prototypen notwendig. Eine Möglichkeit wäre, die Pneumatikschläuche aus einem weicheren Material, wie z.B. Silikon, zu fertigen, damit der Ring weiter ins Innere des Greifers gedrückt werden kann. Dies könnte allerdings zur Folge haben, dass beim Verschieben des Halteringes die Messpunkte verdeckt werden. Eine weitere Optimierung könnte sein, kleine Drucksensoren direkt in den Greifer zu integrieren.

Der Greifer des Versuchsaufbaus ist durch den Haltering und die Schläuche im Inneren nicht mehr elastisch genug und kann die Testobjekte beim Nachvornefahren nicht mehr hundertprozentig umschließen. Der Roboter schiebt, sobald das Objekt den Haltering berührt, das Objekt nur noch vor sich her und erzeugt im Endzustand große Leckage an den Rändern. Eine Optimierung des Messsystems durch Pneumatikschläuche aus einem weicheren Material könnten dies verhindern. Eine weitere Möglichkeit wäre, andere Sensoren zu nutzen, welche kleiner sind und direkt in den Greifer integriert sind. Eine weitere Schwierigkeit, die der Algorithmus hervorruft, ist dass der Rotationswinkel in dieser Arbeit auf einen festen Wert gelegt wird. Zur Verbesserung kann versucht werden eine Rotation so lange durchzuführen, bis sich der Greifer an die Krümmung des Handhabungsobjektes angepasst hat. Dies könnte durch z.B. Machine Learning geschehen, wobei die Unterdruckverbesserung von bestimmten Handhabungsobjekten erlernt wird. Dies kann allerdings erst erfolgen, wenn der Versuchsaufbau angepasst wird, um die Verformung des Greifers wieder stärker zu ermöglichen.

Der Weiteren erscheint die Kombination des hier entwickelten Sensorsystems mit einem weiteren z.B. visuellen Erfassungssystem durch Kameras vielversprechend. Während Kamerasysteme die globale Objektlage und grobe Positionierung übernehmen, kann die lokale Druckmessung feine Leckagen detektieren und korrigieren, die optisch nicht erfassbar sind. Abschließend bietet die Implementierung durch Machine Learning die Möglichkeit, dynamische Parameter wie den optimalen Rotationswinkel oder die Korrekturdistanz objekt- und situationspezifisch zu erlernen oder die Handhabungsobjekte zu kartografieren.

6 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Validierung eines adaptiven Algorithmus für leckagefähige Sauggreifer basierend auf dem Granular Jamming Prinzip. Ziel war es, eine lokale Druckdifferenzmessung in den Greifer zu integrieren, um den Greifferfolg zu verifizieren und zu bewerten. Bei Leckage durch Fehlgriffe sollte der Algorithmus diese nicht nur erkennen, sondern auch selbstständig versuchen, diese durch die entwickelten Strategien zu kompensieren.

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen bestätigten die These, dass Leckagen zu signifikanten, lokal messbaren Druckdifferenzen innerhalb des Greifers führen. Es konnte gezeigt werden, dass die in dieser Arbeit implementierte Sensorik in der Lage ist, diese Druckdifferenzen zu messen und somit die Leckage zu lokalisieren. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass Leckagen einen exponentiellen Einfluss auf die benötigte Saugleistung haben. Dies verdeutlicht erneut die Relevanz und Wichtigkeit einer aktiven Erkennung und Kompensation zur Leckagevermeidung nicht nur aus Prozesssicherheitsgründen, sondern auch im Bezug auf die Energieeffizienz bei industriellen Handhabungsprozessen.

Die zwei entwickelten Kompensationsstrategien lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

Die Leckagekompensation durch Verschiebung erwies sich als robust und leistungsfähig. Mit dieser Kompensationsstrategie konnte eine Erfolgsquote von 100 % bei der Verbesserung initialer Fehlgriffe bei den im Rahmen des Bin-Picking durchgeführten Versuchen erreicht werden. Durch iterative Positionskorrekturen war das System in der Lage, Objekte, die aufgrund starker Randleckage ursprünglich nicht greifbar waren, sicher zu greifen. Neben der Prozessstabilität konnte ein Energieeinsparpotenzial nachgewiesen werden, da die aufgrund des Algorithmus verringerte Leckage eine Reduktion der Saugleistung ermöglicht.

Die rotative Kompensationsstrategie konnte mit dem in dieser Arbeit entwickelten Prototypen keine Verbesserung der Griffqualität erzielen. Dies ist auf die mangelnde Flexibilität des Greifers, die sich aufgrund des in ihm integrierten Messaufbaus ergibt, zurückzuführen. Die mechanische Steifigkeit des Halterings und der Pneumatikschläuche verhinderte die benötigte Formanpassung des Greifers an die Geometrien der Handhabungsobjekte.

Aus diesen Erkenntnissen können folgende Vorschläge für zukünftige Untersuchungen formuliert werden. Um das theoretische Potential der Rotationskompensation nutzbar zu machen, ist eine Veränderung der Hardware zur Messung innerhalb des Greifers erforderlich. Eine Möglichkeit hierfür wäre der Einsatz von flexibleren Pneumatikschläuchen, z.B. aus Silikon, oder die Integration der Sensoren direkt im Inneren des Greifers. Dies könnte die notwendige Verformbarkeit des Greifers gewährleisten.

Die Kombination des hier entwickelten Sensorsystems mit einem weiteren z.B. visuellen Erfassungssystem durch Kameras erscheint ebenfalls vielversprechend. Während Kamerasysteme die globale Objektlage und grobe Positionierung übernehmen, könnte die lokale Druckmessung feine Leckagen, die optisch nicht erfassbar sind, erkennen. Abschließend bietet die Implementierung durch „Machine Learning“ die Möglichkeit, dynamische Parameter wie den optimalen Rotationswinkel oder die Korrekturdistanz objekt- und situationsspezifisch zu erlernen oder die Handhabungsobjekte zu kartografieren.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., & Schunk, H. (2006). Robot Grippers. Berlin: Wiley-VCH.
- [2] Tai, K., El-Sayed, A. R., Shahriari, M., Biglarbegian, M., & Mahmud, S. (2016). State of the art robotic grippers and applications. *Robotics*, 5(2), 11.
- [3] Tarhan, B., Asif, S., Webb, P., & Chacin, M. (2025). A review of flexible robotic gripping systems. *Frontiers in Manufacturing Technology*, 5, 1517727.
- [4] Amend, J. R., Brown, E., Rodenberg, N., Jaeger, H. M., & Lipson, H. (2012). A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. *IEEE transactions on robotics*, 28(2), 341-350.
- [5] Rossiter, J. M., & Hauser, H. (2016). Soft robotics-The next industrial revolution?. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 23(3), 17-20.
- [6] Straub, D. (2020). Behaviour and impact of leakage in vacuum gripping systems.
- [7] Amend, J., Cheng, N., Fakhouri, S., & Culley, B. (2016). Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product. *Soft robotics*, 3(4), 213–222.
- [8] Santarossa, A., & Pöschel, T. (2024). Enhanced interlocking in granular jamming grippers through hard and soft particle mixtures. *Granular Matter* 26, 105.
- [9] Holz, D., Topalidou-Kyniazopoulou, A., Stückler, J., & Behnke, S. (2015). Real-time object detection, localization and verification for fast robotic depalletizing. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1459-1466.
- [10] Yazid, Y., Guerrero-González, A., El Oualkadi, A., & Arioua, M. (2023). Deep Learning-Empowered Robot Vision for Efficient Robotic Grasp Detection and Defect Elimination in Industry 4.0. *Engineering Proceedings*, 58(1), 63.
- [11] Homberg, B. S., Katzschmann, R. K., Dogar, M. R., & Rus, D. (2019). Robust proprioceptive grasping with a soft robot hand. *Autonomous robots*, 43, 681-696.
- [12] Li, T., Yan, Y., Yu, C., An, J., Wang, Y., & Chen, G. (2024). A comprehensive review of robot intelligent grasping based on tactile perception. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 90, 102792.

- [13] Hasegawa, H., Mizoguchi, Y., Tadakuma, K., Ming, A., Ishikawa, M., & Shimojo, M. (2010). Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 777-784.
- [14] James, J. W., & Lepora, N. F. (2020). Slip detection for grasp stabilization with a multifingered tactile robot hand. IEEE Transactions on Robotics, 37(2), 506-519.
- [15] Li, J., Dong, S., & Adelson, E. (2018). Slip detection with combined tactile and visual information. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 7772-7777.
- [16] Fraden, J. (2016). Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th Edition. Springer.
- [17] Pallas-Areny, R., & Webster, J. (2001). Sensors and Signal Conditioning. 2nd Edition. Wiley-Interscience.
- [18] Wang, W., Liu, X., Bai, L., Yang, X., & Chen, X. (2025). Visual sensing approach for high-precision pressure estimation in robotic manipulation. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 158, 111296.