

Entwicklung eines Pick-and-Place-Systems für den Bau des P2-Spurdetektors



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

David C. Anthofer

Bachelorarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 08. Februar 2022

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Niklaus Berger
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Frank Maas

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'D' followed by a series of connected loops and a final horizontal stroke.

Mainz, den 08.02.2022

David Anthofer
Institut für Kernphysik
Staudingerweg 9
Johannes Gutenberg-Universität D-55099 Mainz
danthofe@students.uni-mainz.de

Zusammenfassung

Beim P2-Experiment handelt es sich um einen Präzisionstest, welcher einen fundamentalen Parameter des Standardmodells, den elektroschwachen Mischungswinkel, untersucht. Das Experiment basiert auf der Streuung von polarisierten Elektronen an unpolarisierten Protonen bei niedrigem Impulsübertrag.

Um den Impulsübertrag während dieses Streuprozesses messen zu können, wird ein Spurdetektor eingesetzt. Für die dafür benötigten Detektormodule müssen viele kleine High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors (HV-MAPS) mit hoher Präzision auf Polyimid-Streifen aufgeklebt werden. Zur Automatisierung dieses Verfahrens wurde ein Kleberoboter entwickelt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde erfolgreich ein Unterdruck-Ansaugsystem an der Struktur des Kleberoboters angebracht, womit dieser genutzt werden kann, um Objekte ansaugen und wieder ablegen zu können. Die Ansteuerung dieses Systems ist kompatibel mit der Python- und C++-Bibliothek zur Kontrolle der Roboterachsen, wodurch eine Steuerung aller am Roboter angebauten Geräte (Roboterachsen, Laserdistanzsensor, Jet-Dispenser-Steuergerät und Unterdruck-Ansaugsystem) durch ein Python- bzw. C++-Programm ermöglicht wird.

Im weiteren wurde die Platzierungsgenauigkeit des Roboters untersucht, wozu zwei Testreihen durchgeführt wurden, wobei das Ansaugsystem verwendet wurde, um Glasplättchen, die hier als Ersatz für die HV-MAPS eingesetzt wurden, auf Polyimid-Streifen zu kleben und anschließend die Genauigkeit der Platzierung zu überprüfen. Zur Auswertung der Tests wurden zwei unterschiedliche Methoden erarbeitet, wobei jeweils ein digitales Mikroskopiersystem, bzw. ein Konfokalmikroskop verwendet wurde.

Die beiden Testreihen unterscheiden sich in der Ansaugtechnik der Glasplättchen. Während der Ansaugpunkt in Testreihe 1 per Augenmaß bestimmt wurde, sodass ungefähr der Mittelpunkt getroffen wurde, wurde für Testreihe 2 der Mittelpunkt der Glasplättchen mit einem Laserdistanzsensor bestimmt, um das Glasplättchen an diesem ansaugen zu können. Die beiden Testreihen wurden anschließend mit den beiden Methoden ausgewertet, wobei sich herausstellte, dass die verwendeten Methoden keine ausreichende Genauigkeit aufweisen um die Testreihen aussagekräftig miteinander vergleichen zu können.

Zuletzt wurde mittels des Laserdistanzsensors versucht, Referenzpunkte auf den Polyimid-Streifen zu finden, um einer relativ Positionierung auf den Streifen zu ermöglichen. Aufgrund zu hoher Schwankungen in den Daten gelang dies jedoch nicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das P2-Experiment	2
2.1	Paritätsverletzende Asymmetrie	3
2.2	Elektroschwacher Mischungswinkel	5
2.3	Spurdetektor	5
3	Aufbau des Kleberoboters	7
3.1	Aufbau des Roboters	7
3.2	Steuerung der Roboterachsen	9
3.3	Ungenauigkeit des Roboters	10
3.4	Steuerung des Klebesystems	10
4	Unterdruck-Ansaugsystem	11
4.1	Aufbau des pneumatischen Systems	11
4.2	Steuerung der Ventilinsel	13
5	Platzierungspräzision des Kleberoboters	16
5.1	Messmethode	16
5.1.1	Abstandsmessung mit dem Leica-Mikroskop	16
5.1.2	Abstandsmessung mit dem Konfokalmikroskop	19
5.2	Testreihe 1: Naiver Ansatz	22
5.3	Testreihe 2: Ansaugen am Mittelpunkt	25
5.3.1	Methodik zur Bestimmung des Mittelpunkts	25
5.3.2	Auswahl der Parameter	30
5.3.3	Abstandsmessung zwischen Laser-Distanzsensor und Endeffektor	35
5.3.4	Ergebnisse von Testreihe 2	37
5.4	Referenzpunkte	40
6	Fazit & Ausblick	42
A	Anhang	47
B	Danksagung	52

1 Einleitung

Das Ziel der Physik besteht darin, Modelle zu entwickeln, die die Natur möglichst präzise beschreiben und die Vorhersagen dieser Modelle experimentell zu überprüfen. Die derzeit beste Beschreibung teilchen- und kernphysikalischer Phänomene ist durch das Standardmodell der Elementarteilchen (SM) gegeben. Viele Vorhersagen des Standardmodells konnten bisher in zahlreichen Experimenten mit hoher Präzision bestätigt werden. Es umfasst alle bekannten Elementarteilchen sowie die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung. Lediglich die vierte fundamentale Wechselwirkung, die Gravitation, wird vom SM nicht berücksichtigt.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass das SM keine vollständige Beschreibung aller beobachtbaren Phänomene darstellt. So ist es nicht in der Lage, Aufschlüsse über die Zusammensetzung dunkler Materie zu liefern oder die Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum zu erklären. Ebenso wurden einige Annahmen des SM bereits experimentell widerlegt, sodass Anpassungen am SM durchgeführt werden mussten. Beispielsweise zeigt die Beobachtung der Neutrinooszillation, dass Neutrinos eine endliche Masse aufweisen, obwohl sie im SM ursprünglich als masselos angenommen wurden.

Beobachtungen, die das SM nicht erklären kann, werden unter dem Begriff der „Neuen Physik“ zusammengefasst. Ziel vieler teilchenphysikalischer Experimente heutzutage ist die Suche nach dieser Physik jenseits des Standardmodells. Bei diesen Experimenten werden die Vorhersagen des SM überprüft und es wird nach Abweichungen gesucht, da diese Hinweise auf neue Physik darstellen.

Eines dieser Experimente ist das P2-Experiment, welches nach Fertigstellung des Mainz Energy Recovery Superconductiong Accelerator (MESA) in Mainz durchgeführt werden wird. Dabei wird ein polarisierter Elektronenstrahl auf flüssigen, unpolarisierten Wasserstoff geleitet, um die paritätsverletzende Asymmetrie von Elektron-Proton Streuung bei niedrigem Impulsübertrag mit bisher unerreichter Genauigkeit zu messen. Daraus lässt sich der elektroschwache Mischungswinkel bestimmen, ein fundamentaler Parameter des SM. Die Abhängigkeit des Mischungswinkels vom Impulsübertrag ist sensitiv auf Beiträge von Physik jenseits des Standardmodells. Daher wird der Impulsübertrag der gestreuten Elektronen beim P2-Experiment möglichst genau gemessen, wozu ein Spurdetektor, bestehend aus vielen kleinen High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors (HV-MAPS), verwendet wird. Hierbei ist eine präzise Platzierung der HV-MAPS wichtig, um eine genaue Bestimmung des Impulsübertrags zu garantieren. Die Pixelsensoren werden mittels eines Kleberoboters auf ihre Halterung geklebt. Die Realisierung eines Pick-and-Place Systems für den Kleberoboter sowie die Messung und Verbesserung der Platzierungsgenauigkeit des Systems werden in dieser Arbeit thematisiert.

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 2 zunächst der physikalische Hintergrund des P2-Experiments näher erläutert. Der Aufbau und die Steuerung des Kleberoboters werden in Kapitel 3 beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 4 die Installation eines Unterdruck-Ansaugsystems thematisiert, welches zum Ansaugen und zur Platzierung der Pixelsensoren dient. Die Platzierungsgenauigkeit des Roboters wird in Kapitel 5 untersucht. Dabei werden unterschiedliche Methoden zur Platzierung der HV-MAPS vorgestellt und die Platzierungspräzision verglichen. Am Ende der Arbeit wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben.

2 Das P2-Experiment

Das P2-Experiment ist ein Präzisionstest des Standardmodells. Ziel des Experiments ist die Bestimmung des elektroschwachen Mischungswinkel bei niedrigem Impulsübertrag mit bisher unerreichter Genauigkeit. Die Resultate bisheriger Experimente sowie die angestrebte Genauigkeit geplanter Experimente für den Mischungswinkel sind in Abbildung 1 dargestellt. Die blaue Kurve zeigt die vom SM theoretisch vorhergesagte Skalenabhängigkeit des Mischungswinkels basierend auf den Messergebnissen des Large Electron-Positron Collider (LEP) und des SLAC Linear electron positron Collider (SLC), wobei der elektroschwache Mischungswinkel über den Zerfall von Z-Bosonen gemessen wurde. Mit einem relativen Fehler von nur 0.1 % eignen sich diese beiden Messungen gut als Ausgangspunkt der blauen Kurve [1]. Weichen die Ergebnisse des P2-Experiments nun signifikant von der Kurve ab, ist dies ein Hinweis auf Physik jenseits des SM. Eine mögliche Erklärung einer solchen Abweichung wird durch die Theorie der Dunklen Photonen geliefert, die eine geringe Verschiebung des elektroschwachen Mischungswinkels bei niedrigem Impulsübertrag vorhersagt. Beim Atomic Parity Violation-Experiment (APV) wurde bereits eine Abweichung bei geringem Impulsübertrag gemessen. Die gemessene Abweichung ist mit $\sigma = 1.2$ jedoch nicht signifikant. Wie in Abbildung 1 zu erkennen, ist der geplante Fehler des P2-Experiments deutlich kleiner und lässt somit eine aussagekräftigere Bestimmung möglicher Abweichungen zu.

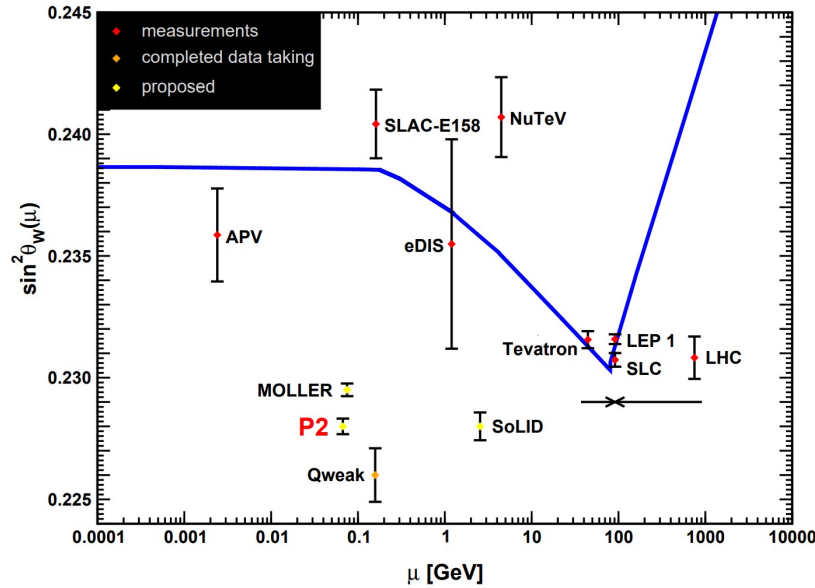


Abbildung 1: Abhängigkeit des elektroschwachen Mischungswinkels $\sin^2\theta_W^2$ vom Impulsübertrag μ . Die geplanten Experimente (gelbe Punkte) wurden dabei an eine beliebige y-Position gesetzt. Die blaue Kurve ergibt sich aus der theoretischen Vorhersage für die Abhängigkeit von $\sin^2\theta_W^2$ von der Energieskala μ [2].

Das P2-Experiment wird an dem zur Zeit im Bau befindlichem MESA-Beschleuniger durchgeführt werden. Dieser stellt dem P2-Experiment einen Elektronenstrahl mit einer Energie

von $E_{\text{Beam}} = 155 \text{ MeV}$ und einem Elektronenstrom von $I_{\text{Beam}} = 150 \mu\text{A}$ zur Verfügung. Die Strahlelektronen sind longitudinal polarisiert, wobei die Polarität mit einer Frequenz von 1 kHz geändert werden kann [2]. Die polarisierten Elektronen treffen auf ein Target aus flüssigem Wasserstoff, wie in Abbildung 2 dargestellt, und werden dort elastisch an Protonen gestreut. Die Elektronen mit einem Streuwinkel zwischen 25° und 45° werden durch das Magnetfeld eines Solenoiden auf einen Cherenkov-Detektor geleitet und dort detektiert. Aus der Anzahl der detektierten Elektronen in Abhängigkeit der Polarität des Strahls lässt sich die paritätsverletzende Asymmetrie des Streuprozesses bestimmen. Der Spurdetektor wird genutzt um den Impulsübertrag der Elektronen beim Streuprozess zu messen und somit das Ergebnis in Abbildung 1 einordnen zu können.

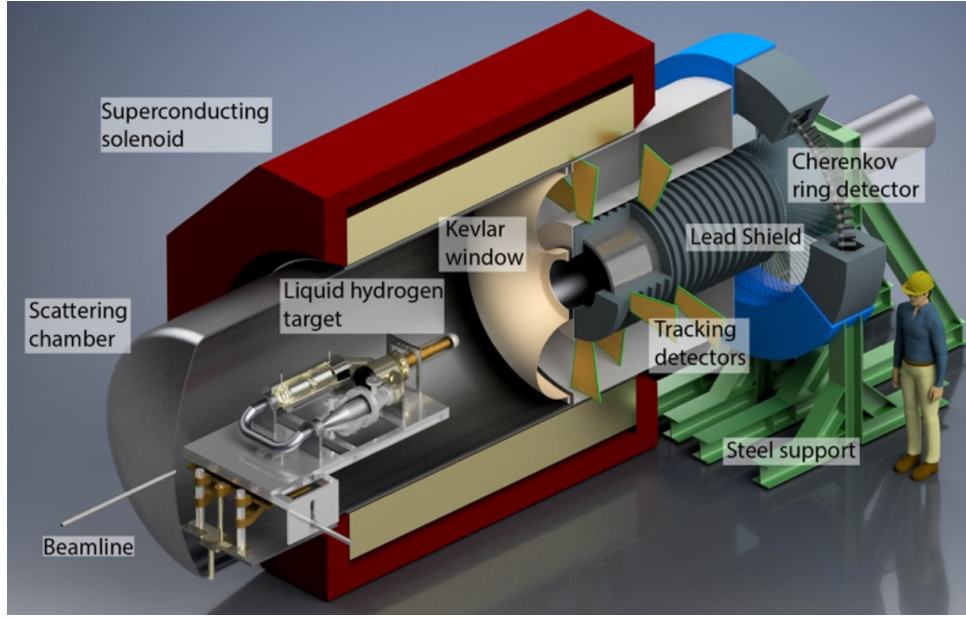


Abbildung 2: CAD-Zeichnung des Aufbaus des P2-Experiments.[2]

2.1 Paritätsverletzende Asymmetrie

Eine paritätsverletzende Asymmetrie ist auf die Teilcheneigenschaft der Helizität zurückzuführen. Die Helizität eines Teilchens stellt die Projektion seines Spins auf seinen Impuls dar. Sie kann wie folgt berechnet werden

$$h = \vec{S} \cdot \hat{p},$$

wobei $\vec{S}$ den Spinvektor und $\hat{p}$ die Impulsrichtung des Teilchens beschreibt. Teilchen mit einer positiven Helizität werden als rechtshändig und Teilchen mit negativer Helizität als linkshändig bezeichnet. Wird eine Raumspiegelung durchgeführt, also der Paritätsoperator auf die Helizität angewendet,

$$\mathcal{P}h = \mathcal{P}(\vec{S} \cdot \hat{p}) = \mathcal{P}\vec{S} \cdot \mathcal{P}\hat{p} = \vec{S} \cdot (-\hat{p}) = -h,$$

wechselt das Vorzeichen der Helizität. Nach der Paritätserhaltung, die in der klassischen Physik sowie der starken und elektromagnetischen Wechselwirkung gilt, sind die Wirkungsquerschnitte von Streuprozessen unabhängig von der Helizität der beteiligten Teilchen. Die Austauschbosonen der schwachen Wechselwirkung hingegen koppeln unterschiedlich an rechts- und linkshändige Teilchen, was eine Paritätsverletzung zur Folge hat.

Beim P2-Experiment werden Elektronen elastisch an Protonen gestreut. Dieser Prozess kann sowohl unter der schwachen, als auch unter elektromagnetischer Wechselwirkung stattfinden. Die Feynman-Diagramme der beiden Streuprozesse sind in Abbildung 3 dargestellt. Dabei wird ein Photon (elektromagnetische Wechselwirkung) oder ein Z^0 -Boson (schwache Wechselwirkung) zwischen Elektron und Proton ausgetauscht.

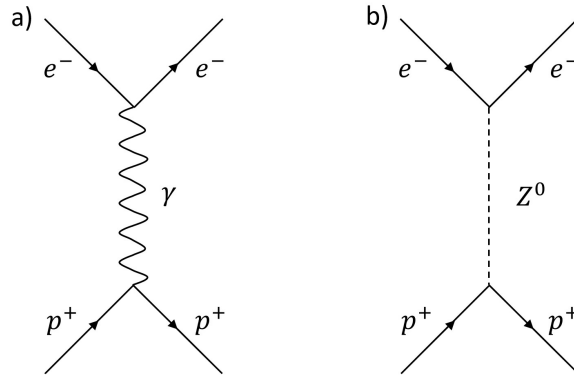


Abbildung 3: Feynman-Diagramm der elastischen Elektron-Proton Streuung unter Austausch eines a) Photons bzw. eines b) Z^0 -Bosons.

Der Hauptteil der Streuung findet unter elektromagnetischer Wechselwirkung statt. Ein geringer Anteil der Streuung findet jedoch auch unter Austausch eines virtuellen Z^0 -Bosons statt. Die Polarität der Strahlelektronen wird während dem zeitlichen Verlauf des Experiments geändert. Die Änderung der Polarität ist gleichbedeutend mit dem Wechseln des Elektronspins zwischen den beiden möglichen Zuständen $s = \pm \frac{1}{2}$. Da sich der Impuls der Elektronen nicht ändert, besteht der Strahl somit abwechselnd aus rechts- und linkshändigen Elektronen. Da das Z^0 -Boson präferiert an linkshändige Elektronen koppelt, werden mehr Elektronen detektiert, wenn die Strahlelektronen eine negative Helizität haben. Dadurch entsteht eine experimentell beobachtbare Asymmetrie, die wie folgt definiert ist

$$A^{PV} = \frac{d\sigma^+ - d\sigma^-}{d\sigma^+ + d\sigma^-}, \quad (1)$$

wobei $d\sigma^\pm$ für den differentiellen Wirkungsquerschnitt der im Cherenkov-Detektor gemessenen rechts- bzw. linkshändigen Elektronen steht. Obwohl der Streuprozess hauptsächlich unter elektromagnetischer Wechselwirkung stattfindet und somit die Asymmetrie sehr gering ist, wird eine Asymmetrie von $\langle A^{PV} \rangle = (39.94 \pm 0.56)$ ppb mit einem geringen relativen Fehler

von 1.4 % erwartet. Dieser geringe Fehler wird erreicht, indem eine Messdauer von 10000 h und eine hohen Luminosität von $\mathcal{L} = 2.38 \cdot 10^{39} \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$ für das Experiment gewählt wird [2].

2.2 Elektroschwacher Mischungswinkel

Aus der detektierten Asymmetrie wird der elektroschwache Mischungswinkel bestimmt. Dieser ist eine Größe der elektroschwachen Wechselwirkung, welche die vereinheitlichte Theorie der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung beschreibt. Dabei treten vier Eichbosonen auf, die für die Vermittlung der Wechselwirkung verantwortlich sind. Ein B^0 -Boson und drei W-Bosonen W^1, W^2, W^3 . Die experimentell nachgewiesenen Bosonen $W^\pm, Z^0$ sowie das Photon lassen sich in dieser Theorie durch Mischzustände der vier Eichbosonen darstellen. Das Photon und das Z^0 -Boson ergeben sich aus der Mischung des B^0 - und des W^3 -Bosons, was wie folgt geschrieben werden kann

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ Z^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & \sin \theta_W \\ -\sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^0 \\ W^3 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Die Transformationsmatrix zwischen den beiden Zuständen hat die Form einer Rotationsmatrix, mit einer Drehung um den elektroschwachen Mischungswinkel θ_W . [3]

Beim P2-Experiment wird der Mischungswinkel mittels der schwachen Ladung des Protons berechnet. Dafür wird die Relation

$$Q_W(p) = 1 - 4 \sin^2 \theta_W, \quad (3)$$

verwendet. Die Unterdrückung der schwachen Ladung des Protons im SM führt zu einer sensiblen Bestimmung des Mischungswinkels. Eine Bestimmung der schwachen Ladung führt zu einer circa zehnmal genaueren Bestimmung des Mischungswinkels, weshalb sich diese Methode gut für eine präzise Bestimmung des Mischungswinkels eignet. Um aus der vom Cherenkov-Detektor gemessenen paritätsverletzenden Asymmetrie die schwache Ladung und somit über Gleichung 3 den Mischungswinkel zu bestimmen, wird folgende Relation verwendet

$$A^{PV} = -\frac{G_F Q^2}{4\sqrt{2}\pi\alpha} [Q_W(p) - F(Q^2)] [2], \quad (4)$$

wobei G_F die Fermi-Konstante und $F(Q^2)$ der Formfaktor des Protons ist. Dieser wird für kleine Impulsüberträge Q^2 ebenfalls sehr klein, weshalb beim P2 Experiment ein sehr geringer Impulsübertrag gewählt wurde.

2.3 Spurdetektor

Um die schwache Ladung bzw. den Mischungswinkel über Gleichung 4 zu bestimmen, muss der Impulsübertrag Q^2 der detektierten Elektronen bekannt sein. Dieser wird mit einem Spurrekonstruktionsdetektor gemessen. Die Messung des mittleren Impulsübertrags $\langle Q^2 \rangle$ ermöglicht

zudem eine Positionierung des Messergebnisses auf der x-Achse in Abbildung 1. Die Geometrie des Detektors ist in Abbildung 2 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass der Detektor aus acht Modulen besteht, die jeweils zwei Detektorlagen besitzen und eine azimutale Abdeckung von 15° aufweisen. Dabei sind zwei Module jeweils hintereinander oben, unten und an den beiden Seiten des Blei-Schildes angebracht. Dies gewährleistet eine Überprüfung auf mögliche Asymmetrien zwischen Teilchen die nach oben oder unten bzw. links oder rechts gestreut werden. Die gestreuten Teilchen durchqueren somit vier Detektorlagen, an denen jeweils der genaue Ort und die Zeit des Durchquerens gemessen wird. Daraus wird die Krümmung der rekonstruierten Flugbahn innerhalb des Magnetfeldes des Solenoiden bestimmt, woraus sich wiederum der Impuls nach der Streuung sowie der Streuwinkel ermitteln lässt.

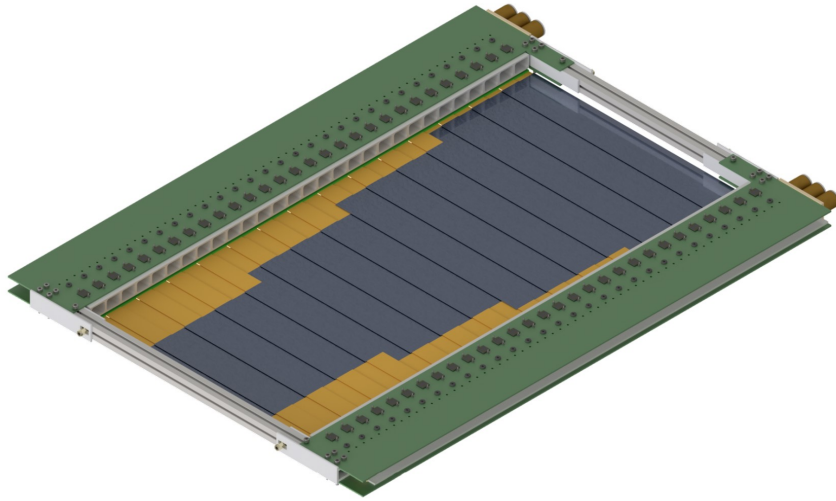


Abbildung 4: CAD-Zeichnung eines Detektormoduls, wobei nur die untere Detektorlage des Moduls abgebildet ist. Die dunkelgraue Fläche stellt die HV-MAPS dar, die auf die orangefarbenen Polyimid-Streifen geklebt werden, welche wiederum an dem hier in grün dargestelltem PCB-Rahmen befestigt sind [4].

Der Aufbau eines Detektormoduls ist in Abbildung 4 dargestellt. Es ist insbesondere dazu konzipiert das Materialbudget möglichst gering zu halten und ungewollte Streuprozesse auf der Flugbahn der Elektronen zu vermeiden. Als Detektoren werden HV-MAPS verwendet, wobei es sich um Siliziumdetektoren handelt, die mittels eines Übergangs zwischen einer p- und einer n-dotierten Schicht Elektronen detektieren können. Die Dicke der HV-MAPS kann bis auf $50\text{ }\mu\text{m}$ reduziert werden, womit sie sich hervorragend für das P2 Experiment eignen, da somit unerwünschte Mehrfachstreuung minimiert wird. Sie werden auf ebenfalls sehr dünne Polyimid-Streifen geklebt und an einem PCB-Rahmen befestigt. Die Streifen dienen dabei gleichzeitig auch zur Strom- und Signalübertragung. Dazu werden die HV-MAPS über single-point Tape Automated Bonding (spTAB) mit den Polyimid-Streifen verbunden. Eine Lage besteht aus 26 Streifen mit insgesamt 270 HV-MAPS. Für die acht Module müssen somit insgesamt 4320 HV-MAPS auf 416 Streifen verklebt werden. [2, 5]

3 Aufbau des Kleberoboters

Um eine präzise Anbringung der HV-MAPS auf den Polyimid-Streifen mit hoher Wiederholungsgenauigkeit zu erreichen, wurde ein Kleberoboter entworfen, der diese Arbeit übernehmen wird. Der Aufbau und die Steuerung des Roboters sowie die Steuerung des Klebesystems werden im nachfolgenden Kapitel behandelt.

3.1 Aufbau des Roboters

Der Aufbau des Kleberoboters, dargestellt in Abbildung 5, besteht aus einer Stützstruktur aus Aluminiumprofilen, an deren unteren Enden jeweils feststellbare Räder befestigt sind, wodurch sich der gesamte Aufbau bewegen lässt. Am oberen Ende der Profile ist die Arbeitsplatte des Roboters montiert, welche eine 5 cm dicke und 40 cm breite (jeweils in x- und y-Richtung) Granitplatte ist und eine zertifizierte Unebenheit von weniger als 2 μm aufweist [6]. In die Platte eingelassen sind neun M8 Gewindemuffen zur Anbringung von Messinstrumenten oder für Messungen benötigte Halterungen. Die Löcher sind auf einem Raster mit 15 cm Abstand zu den nächsten Nachbarn und 5 cm Abstand zum Rand der Platte angeordnet.

Der Roboter selbst besteht aus vier beweglichen Achsen, die von der Firma Jenny Science AG hergestellt wurden. Eine Nahaufnahme des Arbeitsbereichs ist in Abbildung 6 abgebildet. Die dort gekennzeichnete x-, y- bzw. z-Achse besteht jeweils aus einer LINAX[®] Linearachse. An der z-Achse ist eine Aluminiumplatte befestigt, an der wiederum die r-Achse montiert ist, die aus einer ROTAX[®] Rotationsachse besteht. Die Rotationsachse besitzt ein M5 Innengewinde, woran ein Vakuumgreifer angebracht ist. Die wichtigsten Parameter der Achsen sowie die Produktbezeichnungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Parameter der LINAX[®] [7] und ROTAX[®] [8] Achsen von Jenny Science AG. Die angegebene maximale Kraft der r-Achse bezieht sich dabei auf die Axialkraft. Für die LINAX[®] Achsen entspricht ein Inkrement (Ink) jeweils einem Mikrometer. Für die ROTAX[®] Achse entspricht eine vollständige Drehung 64000 Inc, somit entspricht ein Inkrement 0,005625 °.

Achse	x	y	z	r
Produktbezeichnung	Lxs 400F60	Lxu 320F60	Lxc 85F10	Rxvp
Reichweite [Ink]	400000	320000	85000	-
max. Geschwindigkeit [Ink s^{-1}]	4000000	3800000	2500000	1500
max. Kraft [N]	60	60	10	180
max. Drehmoment [N]	-	-	-	110
Präzision [Ink]	± 10	± 12	± 7	± 1
Wiederholgenauigkeit [Ink]	± 1.5	± 1.5	± 1.5	± 10

Wie in Abbildung 6 zu erkennen, sind an der z-Achse, neben der r-Achse, noch zwei weitere Geräte befestigt. Der Kleberdispenser, der in Kapitel 3.4 näher erklärt wird, sowie ein Laserdistanzsensor der Marke Baumer (Produktbezeichnung OM70-L0070.HH0048.EK) mit einem Messbereich zwischen 30 mm und 70 mm [9].

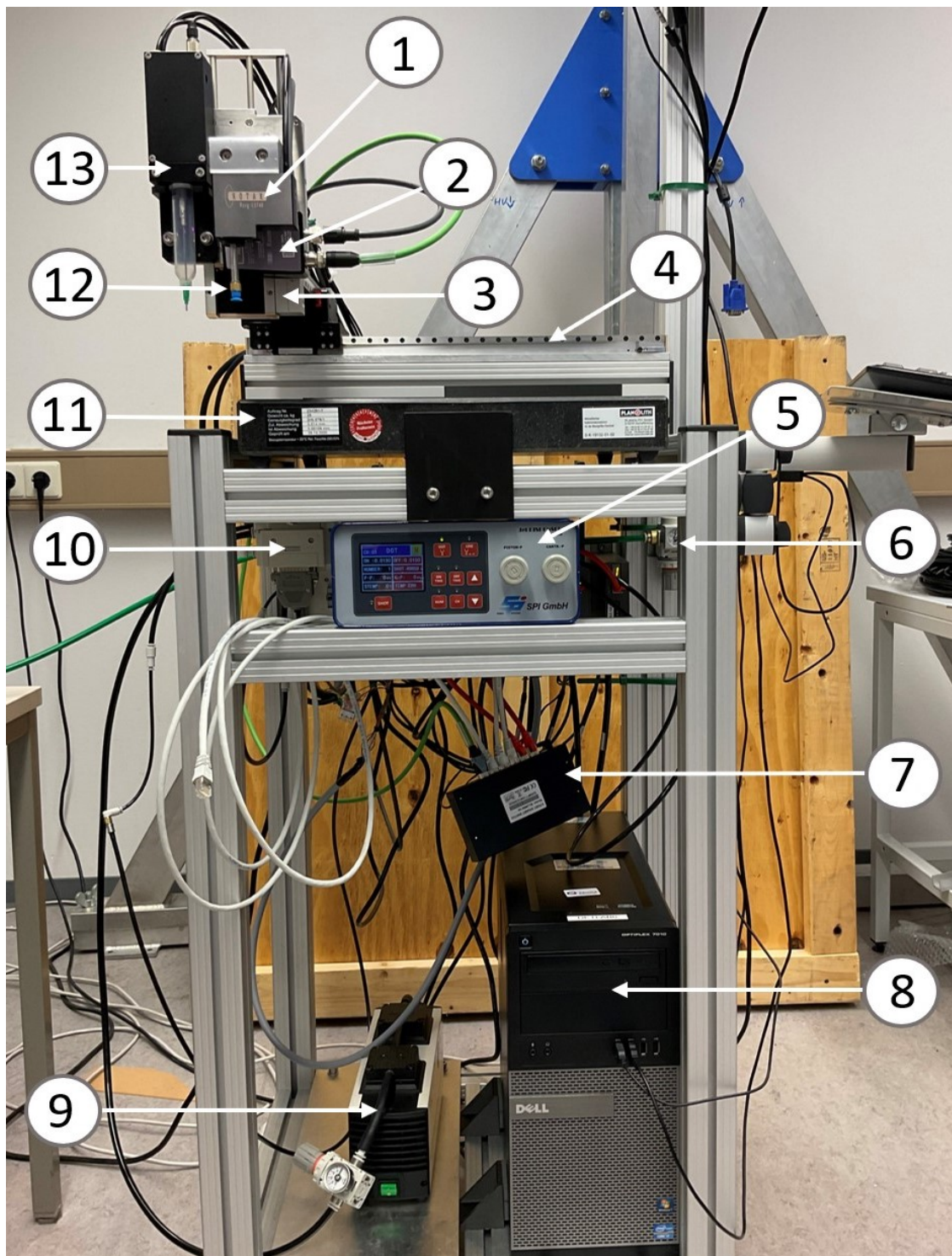


Abbildung 5: Frontansicht des Kleberoboters mit der r-Achse (1), dem Laserdistanzsensor (2), der z-Achse (3), der x-Achse (4), dem Jet-Dispenser-Steuerg r t (5), dem Druckminderer zur Einstellung der Druckkompensation (6), dem Netzwerkswitch (7), dem Laborcomputer (8), der Vakuumpumpe (9), der Ventilinsel (10), der Granitplatte (11), dem Vakuumgreifer (12) und dem Kleberdispenser (13).

Aufgrund des dadurch zusätzlich entstehenden Gewichts an der z-Achse ist diese mit einem integriertem statischen Gewichtskompensator *Geko Lxc 85F10* mit einer maximalen Belastung von 3 kg ausgestattet. Dieser wird mittels Druckluft betrieben, dessen Druck über einen Druckminderer eingestellt werden kann. Eine Kalibrierung wurde durchgeführt, um den optimalen Druck für die Gewichtskompensation zu finden. Ein Druck von etwa 3.6 bar [10] hat sich als geeignet erwiesen und sollte immer vor Benutzung des Roboters eingestellt werden.

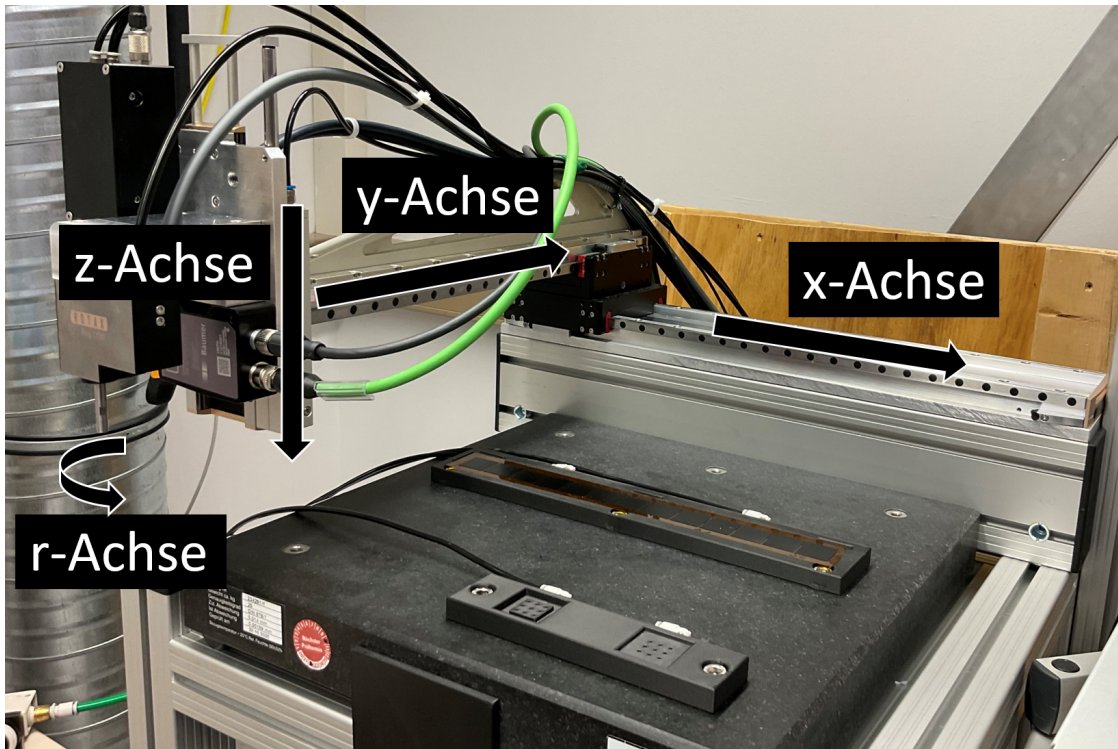


Abbildung 6: Nahaufnahme des Arbeitsbereichs mit den Roboterachsen, die sich jeweils in ihrer Nullposition befinden und dem Kleberdispenser. Die Pfeile zeigen dabei in positive Achsenrichtung. Die beiden auf die Granitplatte geschraubten Halterungen werden für die in Kapitel 5 beschriebenen Tests verwendet.

3.2 Steuerung der Roboterachsen

Die vier Roboterachsen werden jeweils über einen XENAX[®] Ethernet Servocontroller [11] angesteuert, welcher an ein Netzteil mit einer nominellen Spannung von $U = 24\text{ V}$ und einem maximalen Strom von $I = 20\text{ A}$ angeschlossen ist. Die Servocontroller besitzen eine Ethernet TCP/IP-Schnittstelle, wodurch sie sich über das von Jenny Science zur Verfügung gestellte Web-Interface WebMotion[®] mit einem Computer steuern lassen. Dazu wird der Computer über ein Ethernetkabel mit dem Netzwerk-Switch verbunden, an der ebenfalls die vier Servocontroller angeschlossen sind. Das Web-Interface kann genutzt werden, um dem Roboter simple Bewegungsanweisungen zu erteilen, oder kleinere Programme auszuführen. Der Laserdistanzsensor ist ebenfalls über ein Ethernetkabel mit der Netzwerk-Switch verbunden und kann auch über ein Web-Interface gesteuert werden.

Um alle Achsen des Roboters durch ein Programm automatisiert steuern zu können, eignet sich das Web-Interface nicht, da diesem nur Befehle zur Steuerung einer einzelnen Achse übergeben werden können. Hierfür wurde eine eigene Python- sowie C++-Bibliothek geschrieben (siehe [12]), die jeweils mit einem Windows-Computer über Windows Subsystem for Linux (WSL) gesteuert werden. Dadurch wird zudem eine Auslese der Daten des Lasersensors in Abhängigkeit der Position der Linearachsen möglich, was für in Kapitel 5 beschriebenen Tests benötigt wird.

3.3 Ungenauigkeit des Roboters

Aufgrund des Aufbaus der Linearachsen treten einige Faktoren auf, die die Genauigkeit des Roboters beeinflussen und somit auch die Platzierungspräzision beeinträchtigen. Der wichtigste Faktor, der bereits in der Bachelorarbeit von Patrick Riederer [10] thematisiert wurde, wird im Nachfolgenden nochmals kurz erläutert.

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, wurde die y-Achse auf die x-Achse montiert. Es handelt sich somit nicht um einen Gantry-Antrieb, bei dem die x-Achse aus zwei separaten Linearachsen bestehen würde, die die y-Achse synchron bewegen. Somit muss die y-Achse das Gewicht der z-Achse sowie aller daran befestigten Geräte tragen wodurch ein Drehmoment entsteht, welches auf die y-Achse wirkt. Je weiter die y-Achse ausgefahren ist, also in negative y-Richtung bewegt wird, desto größer ist das resultierende Drehmoment und die Achse biegt sich stärker nach unten. Um diesem Effekt entgegenzuwirken wurde an die y-Achse eine Verstärkung des Typs *Auslegearmierung Lxu 320F60* angebracht, welche die Starrheit der Achse erhöht. Das Durchbiegen der y-Achse wird dadurch jedoch nicht komplett verhindert, was in einer y-Abhängigkeit der z-Werte resultiert, welche die Genauigkeit des Roboters vermindert.

3.4 Steuerung des Klebesystems

Wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt, ist an der z-Achse ein Kleberdispenser angebracht. Mit diesem können Klebetropfen gesetzt werden, um später die HV-MAPS auf die Polyimid-Streifen zu kleben. Der Dispenser ist in Abbildung 6 eingezeichnet. Der Kleber wird in die daran befestigte Kartusche gefüllt. An deren Spitze wird eine Keramikdüse mittels des Luer-Systems geschraubt. Dabei handelt es sich um ein genormtes Verbindungssystem für Flüssigkeitsanschlüsse von Laborinstrumenten oder medizinischen Geräten wie Kanülen oder Spritzen. Der Kleberdispenser wird über das Jet-Dispenser-Steuergerät vom Typ Jet DISPENSER JDC-200H, welches in Abbildung 5 abgebildet ist, kontrolliert. Klebetropfen werden gesetzt, indem der Knopf "Shot" betätigt wird. Es können entweder einzelne Tropfen gesetzt werden, dazu wird der Modus "Dot" am Steuergerät ausgewählt, oder es können dauerhaft Tropfen gesetzt werden, wozu der Modus "Line" ausgewählt wird. An dem Steuergerät werden außerdem die Klebeparameter ON-Time, OFF-Time, Nummer sowie Kartuschen- und Kolben-Druck eingestellt. Dazu ist das Steuergerät mit einem Überdruckventil an der Wand verbunden (siehe Kapitel 4). Für eine detaillierte Beschreibung des Dispensers sowie der hier aufgeführten Parametern siehe [10] und [13].

4 Unterdruck-Ansaugsystem

Damit der Roboter die HV-MAPS aufheben kann, um sie auf den Polyimid-Streifen zu platzieren, wurde an der Rotationsachse ein Vakuumgreifer montiert und an diesen ein Unterdrucksystem angeschlossen. Der Aufbau und die Steuerung dieses Systems sowie das gesamte pneumatische System werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

4.1 Aufbau des pneumatischen Systems

Eine Skizze des pneumatischen Systems ist in Abbildung 8 zu sehen. Darauf sind sämtliche Komponenten des Roboters abgebildet, die Unter- bzw. Überdruck benötigen. Der Überdruck wird durch ein Druckluftventil an der Wand geliefert. An diesem ist ein Druckminderer befestigt, wodurch der Druck zwischen 0 bar und 6 bar variiert werden kann. Aus Sicherheitsgründen ist nach dem Druckminderer ein Schalter verbaut, der umgelegt werden muss, damit die Druckkompensation und das Jet-Dispenser Steuergerät (Abb. 8 grüner Kasten) mit Druckluft versorgt werden. Zwischen dem Schalter und der Druckkompensation ist ein zusätzlicher Druckminderer verbaut, um den Druck für die Gewichtskompensation einzustellen. Wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt, ist dieser Druck stets auf circa 3.6 bar einzustellen.

Im Rahmen dieser Arbeit (in Zusammenarbeit mit Jana Weyrich [13]) wurde eine Ventilinsel der Firma SMC an der Stützstruktur des Roboters angebracht. Diese setzt sich aus einer Versorgungs-/Entlüftungsplatte des Modells SY30M-1-1AR-C8 (Abb. 8 blauer Kasten) mit seinen vier Anschlüssen 1, 3/5, X und PE sowie drei druckgesteuerten Magnetventilmodulen des Modells SY3B00R-5U1 (Abb. 8 roter Kasten) zusammen, wobei jedes Modul aus zwei Magnetventilen besteht. Die Zahl dieser Module kann bei Bedarf erhöht werden. Bei den hierbei verwendeten Magnetventilen handelt es sich um 3/2 Wegeventil. Das bedeutet, dass die Magnetventile durch drei Anschlüsse und zwei Schlatstellungen gekennzeichnet sind. Zwei der Anschlüsse dienen dabei als Eingänge und sind jeweils mit Anschluss 1 bzw. 3/5 der Versorgungs-/Entlüftungsplatte verbunden. Die beiden möglichen Schaltstellungen sind in Abbildung 7 veranschaulicht.

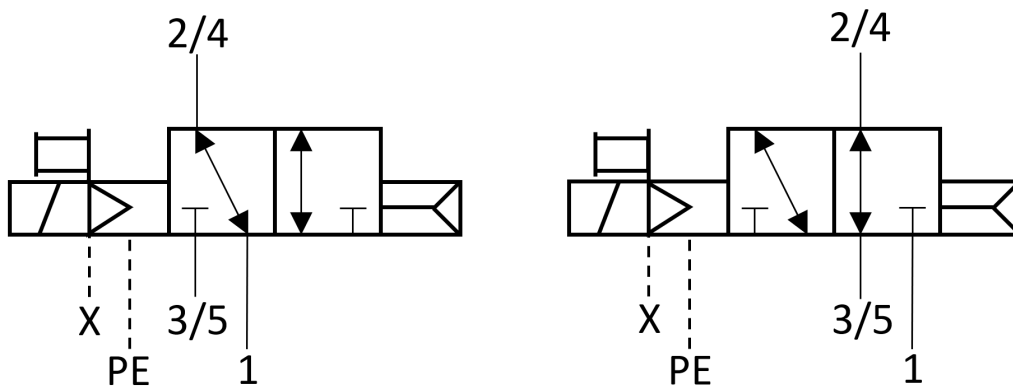


Abbildung 7: Darstellung der beiden Schaltstellungen der Magnetventile. Die linke Skizze zeigt dabei den Ausgangszustand, in dem Eingang 1 mit dem Ausgang des Magnetventils verbunden ist. Durch Anlegen einer Spannung an das Magnetventil kann in den zweiten Zustand (rechts) geschaltet werden. Dabei ist der Ausgang mit Eingang 3/5 verbunden.

In der Ausgangsposition (Abbildung 7 links) ist Eingang 1 mit dem Ausgang, der im weiteren als Anschluss 2 bezeichnet wird, wenn es sich um das erste Magnetventil eines Moduls handelt und als Anschluss 4, wenn es sich um das zweite Ventil des Moduls handelt, verbunden. Um in den anderen Zustand zu wechseln (Abbildung 7 rechts) muss eine Spannung von 24 V an den im Magnetventil verbauten Solenoiden angelegt werden. Da es sich um ein druckgesteuertes Magnetventil handelt, schaltet dieser ein zusätzlich verbautes Pilotventil, welches den Ausgang mit Eingang 3/5 verbindet.

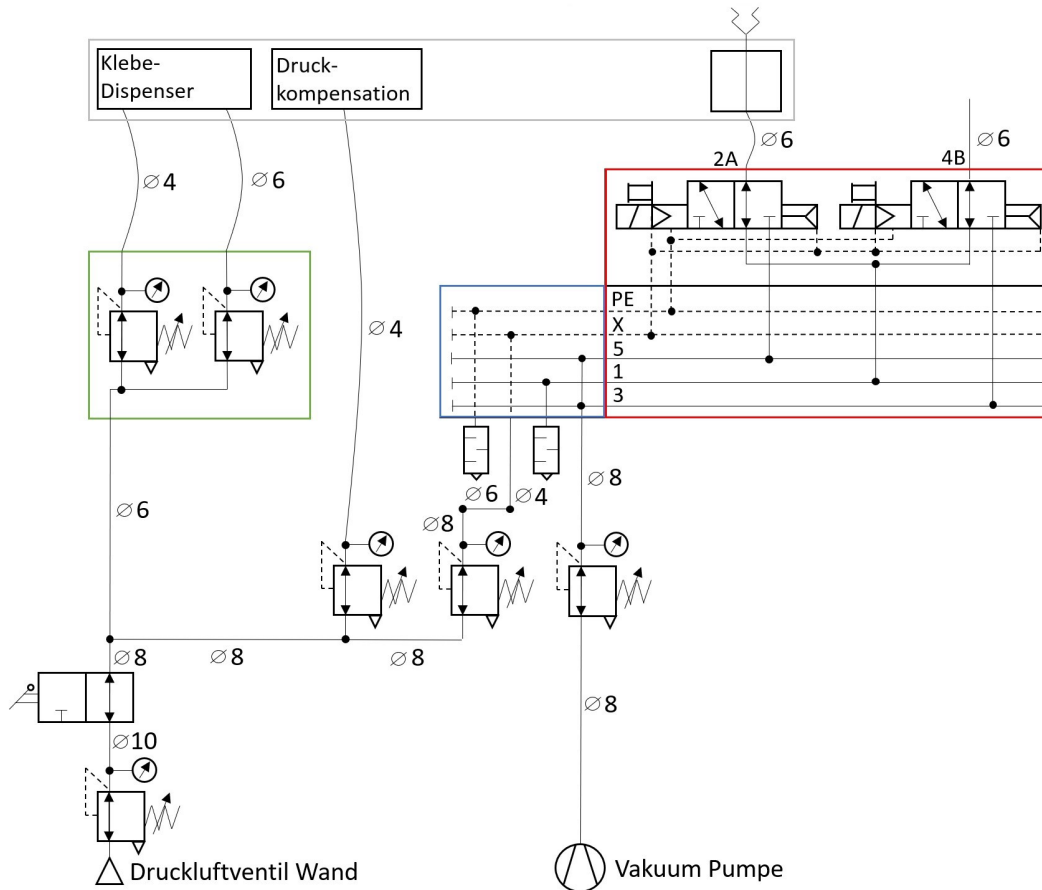


Abbildung 8: Skizze des pneumatischen Systems des Kleberoboters. Die vom grauen Kasten eingeschlossenen Bauteile sind an der Aluminiumplatte an der z-Achse montiert. Der interne Aufbau der Kontrolleinheit des Jet-Dispenser-Steuergeräts (grüner Kasten) ist nicht bekannt und wurde hierbei vereinfacht durch zwei Druckminderer dargestellt, womit der Kartuschen-Druck sowie der Kolben-Druck eingestellt werden kann. Die Ventilinsel setzt sich aus der Versorgungs-/Entlüftungsplatte (blauer Kasten) und mehreren druckgesteuerten Magnetventilen (roter Kasten) zusammen. Um die Skizze übersichtlicher zu gestalten wurde hier lediglich ein Magnetventilmodul mit zwei Magnetventilen eingezeichnet. Aktuell sind jedoch drei solcher Ventile an die Versorgungs-/Entlüftungsplatte angeschlossen mit der Möglichkeit bei Bedarf noch weitere Ventile hinzuzufügen. Die Durchmesser der Verbindungsschläuche sind in mm angegeben.

Das Pilotventil muss an Druckluft angeschlossen sein, damit das Ventil geschaltet werden kann. Dafür besitzt das Magnetventil zwei zusätzliche Anschlüsse die mit dem Anschluss X bzw. PE der Versorgungs-/Entlüftungsplatte verbunden sind. Anschluss X wurde, wie auch die Druckkompensation, über einen zwischengelagerten Druckminderer mit dem Druckluftventil an der Wand verbunden. Die Magnetventile benötigen mindestens 2.5 bar und mindestens 1 bar über Arbeitsdruck. Da sich der Arbeitsdruck für die in dieser Arbeit behandelten Versuchsreihen unter dem Außendruck befindet, wurde der Druckminderer auf 2.5 bar eingestellt. Der Anschluss PE dient zur Entlüftung der Pilotventile. Um diesen Vorgang akustisch zu dämpfen, wurde ein Schalldämpfer an den Anschluss angebracht. An Anschluss 1 der Versorgungs-/Entlüftungsplatte ist ebenfalls ein Schalldämpfer angebracht, womit an diesem Anschluss Außendruck anliegt. Anschluss 3/5 wurde an eine Vakuum-Pumpe angeschlossen, um einen Unterdruck erzeugen zu können. Dazwischen wurde ein für Unterdruck geeigneter Druckminderer eingebaut, der für die in Kapitel 5 durchgeführten Tests auf die maximale Einstellung aufgedreht wurde, um eine maximal Ansaugkraft zu erzielen. Die Vakuum-Pumpe ist, wie in Abbildung 5 eingezeichnet, auf einer Aluminiumplatte im unteren Bereich des Aufbaus angebracht.

Durch Schalten der Magnetventile kann der an den Ausgängen der Magnetventile (2 und 4) anliegende Druck somit zwischen einem einstellbaren Unterdruck und Außendruck geschaltet werden. Standardmäßig ist Anschluss 1 mit den Ausgängen der Magnetventile verbunden. Ohne Ansteuerung der Magnetventile liegt somit Außendruck an den Magnetventilen an.

Das erste Magnetventil (Ausgang 2) des ersten Magnetventilmoduls wurde mit dem an der r-Achse befestigten Vakuumgreifer verbunden, wodurch mit diesem Objekte angesaugt und wieder abgelegt werden können. Die übrigen Ausgänge der Magnetventile können genutzt werden, um Objekte während Messungen mittels Ansaugen zu fixieren. Dies wird auch für die in Kapitel 5 beschriebenen Tests durchgeführt.

4.2 Steuerung der Ventilinsel

Um die Ventilinsel ansteuern zu können, also den Druck an den Ausgängen der Magnetventile zwischen Außendruck und Unterdruck zu schalten, werden General Purpose Input/Output (GPIO) Pins verwendet. Die Xenax Servocontroller besitzen einen solchen Anschluss, wobei acht Ausgänge der Signalausgabe und zwei Ausgänge dem Ground zugewiesen sind [11]. An der Ventilinsel wurde ein Steuermodul des Typs SY30M-1-11A1-C8 eingebaut, welches über einen DSUB-25-Anschluss mit 25 Pins verfügt, wovon einer als Ground (Nr. 13) verwendet wird [14]. Die übrigen 24 Pins steuern jeweils ein Magnetventil, wodurch bis zu zwölf Magnetventilmodule von einem Steuermodul kontrolliert werden können. Das Jet-Dispenser-Steuergerät verfügt ebenfalls über vier GPIO Pins, wodurch das Setzen von Klebetropfen kontrolliert werden kann. Die Einstellung der Klebeparameter muss weiterhin am Gerät selbst durchgeführt werden.

Um die Geräte zu verbinden, wurde ein Kabel gebaut, dessen Plan in Abbildung 30 im Anhang dargestellt ist. Dazu wurde ein 26 poliges PLC-Kabel von Jenny Science als Basis verwendet [15]. Es wird nur der Xenax Servocontroller der z-Achse verwendet, da seine acht Ausgabepins ausreichen, um die sechs Magnetventile, sowie das Jet-Dispenser-Steuergerät zu steuern. Sollten weitere GPIO-Pins zur Steuerung zusätzlicher Ventile benötigt werden, können die GPIO-Steckverbindungen der übrigen Xenax Controller genutzt werden. Wie auf dem Kabelplan zu sehen, ist das Jet-Dispenser-Steuergerät mit dem ersten Ausgabepin des Xenax

Servocontrollers verbunden. Die übrigen sieben Ausgabepins sind mit dem Steuermodul der Ventilinsel verbunden, wobei der zweite Ausgabepin an das erste Magnetventil des ersten Moduls angeschlossen ist, welches zur Ansteuerung des Vakuumgreifers an der Rotationsachse des Roboters verwendet wird. Ausgang drei bis acht sind an die Magnetventilmodule zwei, drei und vier angeschlossen. Pin sieben und acht können somit noch nicht verwendet werden, da noch kein viertes Magnetventilmodul an der Ventilinsel angeschlossen wurde. Das zweite Magnetventil des ersten Moduls wurde nicht angeschlossen, da es nicht benötigt wird. Der Servocontroller sowie das Steuergerät sind noch an die Masse (GND) des Xenax Servocontrollers angeschlossen um die Stromkreise zu schließen.

Die Ausgabepins der Magnetventile müssen auf SINK/SOURCE eingestellt werden. Dadurch können entweder 24 V (Aktivität High) oder 0 V (Aktivität Low) an den Ausgabepins angelegt werden. Aufgrund der internen Verschaltung des Jet-Dispenser Steuergeräts muss Ausgabepin-1 eine Stromsenke darstellen. Das bedeutet, dass der Ausgabepin Strom aufnimmt, wenn die Aktivität auf Low eingestellt wird, wodurch das Steuergerät aktiviert wird.

Die Einstellungen der Ausgabepins wurde im Web-Interface unter *application* im Unterpunkt *command line* eingestellt. Dazu wurde in die Kommandozeile der Befehl SOT (Set Output Type) eingegeben, welchem eine Bit-Maske mit 16 Bits übergeben wird. Jedem Output werden dabei zwei Bit-Werte zugeordnet. Wird der erste auf 0 und der zweite auf 1 gesetzt, handelt es sich um die SOURCE/SINK Einstellung. Diese Einstellung wird für die Magnetventile gewählt. Werden beide Bit-Werte auf 0 gesetzt, wird der Output zur Stromsenke (SINK), was beim Output für das Jet-Dispenser Steuergerät der Fall ist. Somit wird dem SOT Befehl die Dezimalzahl 43688 übergeben. Die Berechnung der Zahl ist in Tabelle 2 veranschaulicht.

Tabelle 2: Berechnung der Dezimalzahl, die dem SOT Befehl übergeben wird, sodass Output 1 eine Stromsenke und die übrigen Outputs Stromquellen darstellen. Diese Dezimalzahl erhält man durch das Aufsummieren aller Dezimalzahlen in der untersten Spalte der Tabelle.

Output	8		7		6		5		4		3		2		1	
SOT Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Bit-Wert	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
Dezimal	32768		8192		2048		512		128		32		8		0	

Die Aktivität der Ausgabepins wird über das Web-Interface WebMotion[®] gesteuert, wozu im Menü unter *application* der Unterpunkt *i/o* ausgewählt werden muss. Durch Auswählen der Boxen kann die Aktivität des entsprechenden Pins auf High (24 V), bzw durch Abwählen auf Low (0 V) gesetzt werden. Wenn die Aktivität eines Pins auf High eingestellt ist, liefert der Ausgabepin einen Strom, der das angeschlossene Magnetventil schaltet, sodass der Ausgang mit der Vakuum-Pumpe verbunden ist und Unterdruck anliegt. Ist die Aktivität hingegen Low, ist das Magnetventil mit Außendruck verbunden. Da der erste Ausgabepin im SINK Modus betrieben wird, bewirkt das Anwählen der Box von Output 1 das Setzen der Aktivität auf Low. In diesem Zustand wird das Steuergerät aktiviert und es wird im Dot-Modus ein Klebetropfen, bzw. es werden im Line-Modus dauerhaft Klebetropfen gesetzt. Wird die Box abgewählt, ist die Aktivität auf High und das Steuergerät ist deaktiviert. Ein Screenshot des Menüs ist in Abbildung 9 abgebildet. Dabei sind Output 1 und 2 aktiviert und die restlichen Outputs deaktiviert.



Abbildung 9: Screenshot des Menüs zur Steuerung der Output Pins des Xenax Servocontrollers im Web-Interface. Die Aktivität der Outputs 1 und 2 ist dabei auf High eingestellt.

Die Ausgabepins können alternativ auch über die Kommandozeile des Web-Interfaces gesteuert werden. Dazu werden die Befehle SO (Set Output) und CO (Clear Output) verwendet. Diesen Befehlen wird jeweils die Nummer des Outputs übergeben, der angesteuert wird. SO setzt dabei die Aktivität des Ausgabepins auf High, bzw für Output 1 auf Low und CO setzt die Aktivität auf Low (bzw High). Um die Aktivität aller Ausgabepins mit einem Befehl zu steuern, wird der SOA-Befehl (Set Output Activity) verwendet. Diesem wird eine Bit-Maske mit 8 Bits übergeben, wobei jedem Output ein Bit zugewiesen ist. Der Bit-Wert 1 setzt dabei die Aktivität des jeweiligen Ausgabepins auf High, bzw wenn es sich bei dem Ausgabepin um eine Stromsenke handelt, auf Low und der Bit-Wert 0 auf Low (bzw. High). Um die in Abbildung 9 dargestellte Konfiguration zu erzielen, wird dem Befehl SOA die Dezimalzahl 3 übergeben. Dieser setzt somit die Aktivität des zweiten Ausgabepins auf High und der restlichen auf Low. Es wird damit ein Klebetropfen gesetzt und Unterdruck am Vakuumgreifer angelegt.

Um die Ausgabepins mit Python- oder C++-Programmen zu steuern, wurde der SOA-Befehl in der Python- bzw. C++-Bibliothek implementiert.

5 Platzierungspräzision des Kleberoboters

Mittels des im vorherigen Kapitels vorgestellten Systems kann der Roboter verwendet werden, um automatisiert HV-MAPS anzusaugen und wieder abzusetzen sowie Klebetropfen zu setzen. Da die HV-MAPS für den Spurdetektor des P2-Experiments mit einer hohen Genauigkeit auf die Polyimid-Streifen geklebt werden müssen, ist die Platzierungspräzision des Kleberoboters von großer Relevanz und wird in diesem Kapitel untersucht. Dazu werden Glasplättchen vom Roboter auf Polyimid-Streifen geklebt und die Genauigkeit der Platzierung gemessen. Zunächst werden die Messmethoden erläutert, die verwendet werden, um die durchgeführten Tests auszuwerten. Anschließend werden verschiedene Messreihen durchgeführt, bei denen die Vorgehensweise, wie das Glasplättchen mit dem Vakuumgreifer angesaugt wird, variiert. Bei diesen Messreihen dienen Glasplättchen als Ersatz für die HV-MAPS, da letztere zu empfindlich und kostspielig sind, um sie in großen Mengen für diese Tests einzusetzen. Die Glasplättchen sind quadratisch und haben eine Seitenlänge von 22 mm und eine Höhe von 80 μm , womit sie nur minimal größer als die HV-MAPS sind. Da sie ebenfalls sehr empfindlich sind und bereits bei geringer Krafteinwirkung brechen, stellen sie einen geeigneten Ersatz für die HV-MAPS dar.

5.1 Messmethode

Um die Genauigkeit des Roboters evaluieren zu können, werden die Abstände der Mittelpunkte der auf die Polyimid-Streifen geklebten Glasplättchen bestimmt, um sie mit dem Abstand vergleichen zu können, der dem Roboter übergeben wurde. Sowohl aus der Abweichung der beiden Abstände als auch aus der Varianz der gemessenen Abstände lässt sich ein Maß für die Platzierungspräzision des Roboters ableiten. Um die Abstände der Mittelpunkte der Plättchen zu messen, werden zwei Methoden verwendet, die im nachfolgenden vorgestellt werden.

5.1.1 Abstandsmessung mit dem Leica-Mikroskop

Bei dieser Methode wird das Leica DMS1000 [16] verwendet. Dabei handelt es sich um ein digitales Mikroskopiersystem mit variierbarem optischem Zoom, mit dem hochauflösende Bilder (1024 x 768 Pixel) aufgenommen werden können. Die Leica Application Suite (LAS) Software kann anschließend verwendet werden, um Distanzen in den aufgenommenen Bildern zu messen.

Um den Abstand der Mittelpunkte zweier Glasplättchen zu messen, wird ein Bild aufgenommen, auf dem alle Kanten der beiden Glasplättchen klar zu erkennen sind. Um einen ausreichend großen Bildausschnitt zu erhalten, muss die kleinstmögliche Vergrößerungseinstellung des optische Zooms eingestellt werden ($\times 0.75$).

Der Mittelpunkt eines Glasplättchen wird in der LAS Software händisch bestimmt, indem zwei Geraden zwischen den jeweils gegenüberliegenden Eckpunkten des Glasplättchens gezogen werden. Der Schnittpunkt der beiden Diagonalen stellt den Mittelpunkt dar. Anschließend kann der Abstand der beiden Schnittpunkte gemessen werden. Eine solche Messung ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Abbildung zeigt dabei den Abstand zweier schwarz lackierter Glasplättchen, die für die Tests in Kapitel 5.3 verwendet werden.

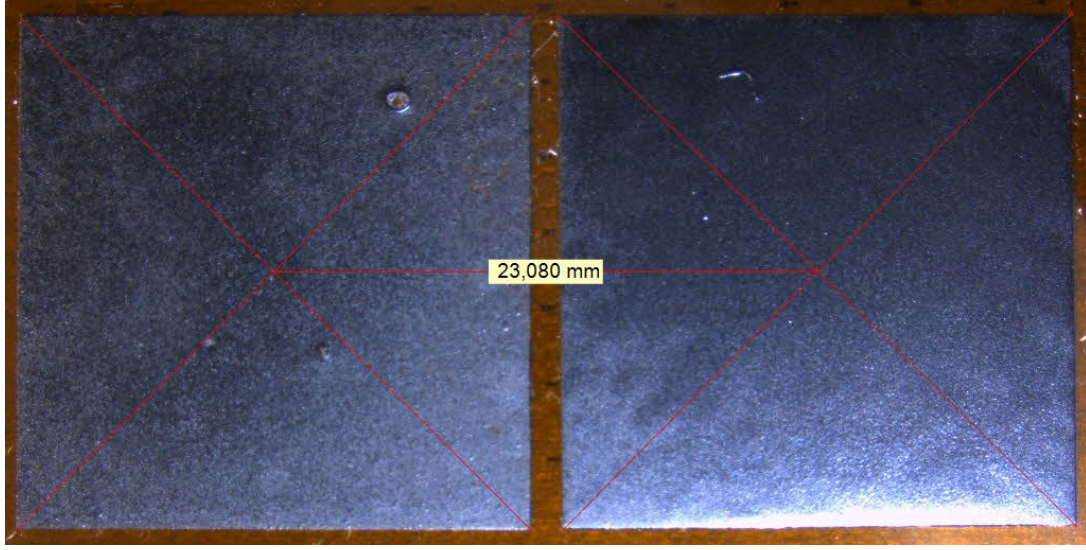


Abbildung 10: Messung des Abstandes der Mittelpunkte zweier schwarz lackierter Glasplättchen mit dem Leica DMS1000.

Damit die korrekten Längen gemessen werden, muss zunächst eine Kalibrierung der ausgewählten Zoomeinstellung durchgeführt werden. Diese wurde mittels der in der LAS Software implementierten Kalibrierungsfunktion durchgeführt. Dazu wurde ein auf (40.00 ± 0.03) mm eingestellter Messschieber aufgenommen und der Abstand der beiden Kanten des Messschiebers in der Software auf 40.00 mm kalibriert. Die Länge von 40.00 mm wurde gewählt, um einen Großteil der Breite des Bildes auszunutzen und somit eine möglichst präzise Kalibrierung zu erhalten. Das entsprechende Bild ist im Anhang in Abbildung 31 zu finden. Der Abstand der beiden Kanten entspricht darin 892 Pixel, womit die Länge, die bei dieser Zoomeinstellung einem Pixel in den aufgenommenen Bildern entspricht, mit der Formel

$$l_{\text{Pixel}} = \frac{l_{\text{Messsch.}}}{n_{\text{Pixel}}} = \frac{40.00 \text{ mm}}{892} = 44.84 \mu\text{m}. \quad (5)$$

berechnet werden kann. Die Kanten des Messschiebers konnten dabei auf eine Genauigkeit von drei Pixeln gefunden werden, womit $\Delta n_{\text{Pixel}} = 6$ folgt. Der Fehler der Länge eines Pixels wird mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung über die Formel

$$\Delta l_{\text{Pixel}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l_{\text{Messsch.}}}{n_{\text{Pixel}}}\right)^2 + \left(\frac{l_{\text{Messsch.}}}{n_{\text{Pixel}}^2} \Delta n_{\text{Pixel}}\right)^2} = 0.31 \mu\text{m} \quad (6)$$

berechnet. In den in diesem Kapitel durchgeführten Tests wird dem Kleberoboter ein Abstand von $23000 \mu\text{m}$ für das Platzieren der Glasplättchen übergeben. Mit der zuvor durchgeführten Kalibrierung, wird der Fehler auf diese Länge mit der Formel

$$\Delta a_{\text{erw}} = \frac{a_{\text{erw}}}{l_{\text{Pixel}}} \cdot \Delta l_{\text{Pixel}} = \frac{23000 \mu\text{m}}{44.84 \mu\text{m}} \cdot 0.31 \mu\text{m} \approx 160 \mu\text{m} \quad (7)$$

berechnet. Die Präzision des Roboters kann dadurch überprüft werden, indem über die Abstände der Mittelpunkte für eine Messreihe gemittelt wird. Liegt dieser Wert innerhalb des Fehlerbereichs des zu erwartenden Wertes von $(23000 \pm 160) \mu\text{m}$ deutet dies auf eine gute Präzision hin.

Der Fehler des Mittelwerts der Abstände setzt sich aus den statistischen Abweichungen der Messwerte, also der Standardabweichung und der Ungenauigkeit der Messmethode, zusammen. Die Standardabweichung stellt ein weiteres Qualitätskriterium der Platzierungspräzision des Roboters dar, weshalb die ermittelten Standardabweichung der Messreihen miteinander verglichen werden. Die Standardabweichung der Abstände kann jedoch nur aussagekräftig miteinander verglichen werden, wenn diese größer ist, als der aus der Messmethode resultierende Fehler. Der Fehler dieser Methode resultiert aus der Genauigkeit, mit der die Geraden eingezeichnet werden können. Die Bestimmung des Fehlers ist in Abbildung 11 visualisiert.

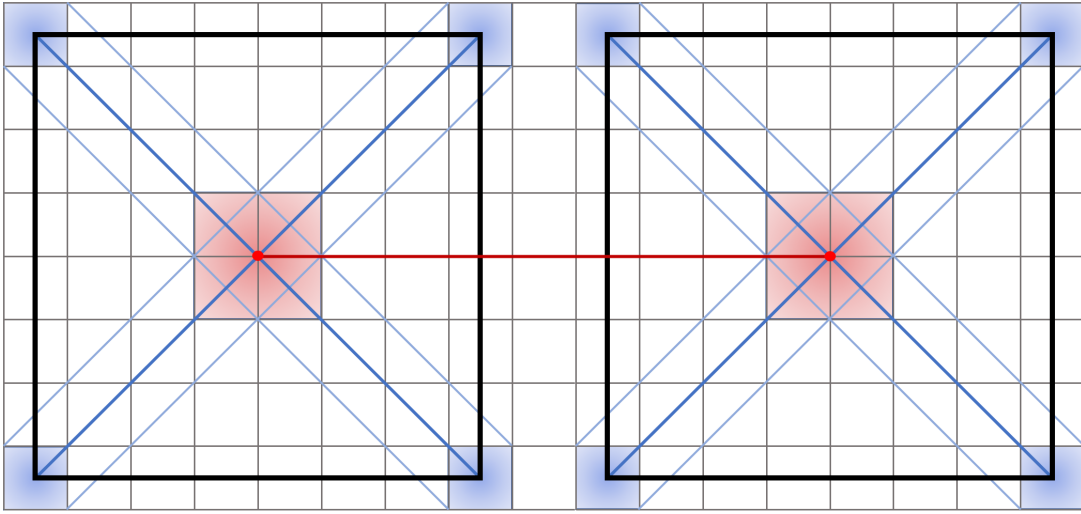


Abbildung 11: Darstellung der Fehler der Abstandsmessung mit dem Leica DMS1000. Die Abbildung zeigt das in Pixel (graue Quadrate) eingeteilte Bild von zwei Glasplättchen (schwarze Linien). Die blau eingefärbten Pixel geben den Fehlerbereich der Eckpunkte der Glasplättchen an. Der Schnittpunkt der dunkelblauen Linien markiert die Position des Mittelpunkts des Glasplättchens. Die Schnittpunkte der hellblauen Linien begrenzen den Fehlerbereich des Mittelpunkts welcher durch die roten Quadrate angezeigt wird. Somit kann der Abstand der beiden Mittelpunkte (rote Linie) in dieser Veranschaulichung mit einer Genauigkeit von vier Pixeln bestimmt werden. Die Anzahl der eingezeichneten Pixel wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit im Vergleich zu einem mit dem Leica DMS1000 aufgenommenen Bild stark reduziert.

Der Abstand zwischen zwei Mittelpunkten zweier Glasplättchen kann demnach auf eine Genauigkeit von vier Pixeln bestimmt werden. Der Fehler dieser Messmethode ergibt sich mit der Rechnung

$$\Delta a_{\text{mess}} = n_{\text{Pixel}} \cdot l_{\text{Pixel}} = 4 \cdot 44.84 \mu\text{m} \approx 180 \mu\text{m}. \quad (8)$$

Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Kanten der Plättchen parallel zur Kantenorientierung ausgerichtet sind. Die Glasplättchen wurden während der Auswertung deshalb möglichst parallel zur Ausrichtung der Pixel unter das Leica DMS1000 gelegt, um diesem Fall möglichst nahe zu kommen. Eine perfekt Ausrichtung war dabei nicht möglich, weshalb die Ecken der Glasplättchen nicht auf einer vertikalen bzw. horizontalen Linie liegen. Dies führt jedoch zu sehr kleinen Veränderungen im Fehler, weshalb im weiteren $\Delta a_{\text{mess}} = 180 \mu\text{m}$ als Fehler für die Messmethode verwendet wird.

5.1.2 Abstandsmessung mit dem Konfokalmikroskop

Bei dieser Methode wird ein Konfokalmikroskop der Firma NanoFocus [17] verwendet, welches an einem dreiaxsigem Roboter montiert ist, wodurch das Mikroskop in x-, y- und z-Richtung bewegt werden kann. Mit diesem kann ein Höhenprofil des Messbereiches erstellt werden. Da der Messbereich des Konfokalmikroskops für eine Aufnahme auf 1.617 mm mal 1.615 mm beschränkt ist, kann kein ganzes Glasplättchen aufgenommen werden. Deshalb werden jeweils Bilder von den Ecken der Glasplättchen aufgenommen, woraus die Position der Eckpunkte bestimmt wird. Zwei gegenüberliegende Ecken können dabei mit einer Messung erfasst werden. Für jedes aufgenommene Bild wird die Position der Roboterachsen notiert, um die relative Position der Eckpunkte zueinander zu erhalten. Aus den vier Eckpunkten der Glasplättchen werden anschließend deren Mittelpunkte berechnet und daraus die Abstände der Mittelpunkte. In Abbildung 12 ist ein gemessenes Höhenprofil für zwei gegenüberliegende Ecken dargestellt.

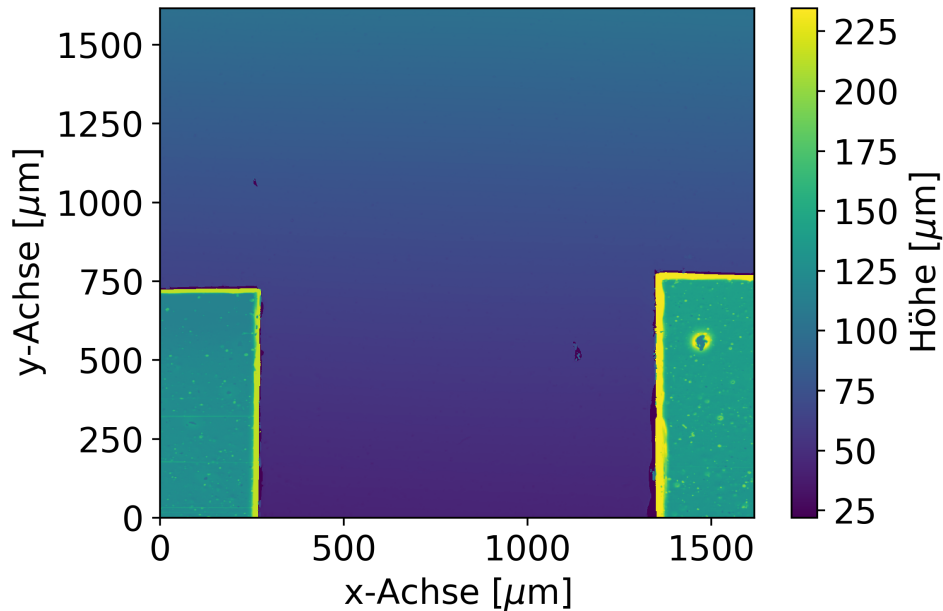


Abbildung 12: Mit dem Konfokalmikroskop aufgenommenes Höhenprofil von zwei Eckpunkten von zwei nebeneinander geklebten Glasplättchen.

Um die Eckpunkte automatisiert aus den aufgenommenen Daten zu bestimmen, werden Punkte an den Kanten der Glasplättchen bestimmt. Die Bestimmung der Kanten erfolgt dabei über

die Betrachtung von Querschnitten des aufgenommenen Höhenprofils für feste x-Koordinaten zur Bestimmung von Punkten an den horizontalen Kanten und feste y-Koordinaten zur Bestimmung von Punkten an vertikalen Kanten. Aus dem Höhenprofil wird die Steigung über die Differenz der Höhen von benachbarten Werten berechnet. Ein solcher Querschnitt für konstante y-Koordinate mit dem daraus berechneten Steigungsprofil ist in Abbildung 13 dargestellt.

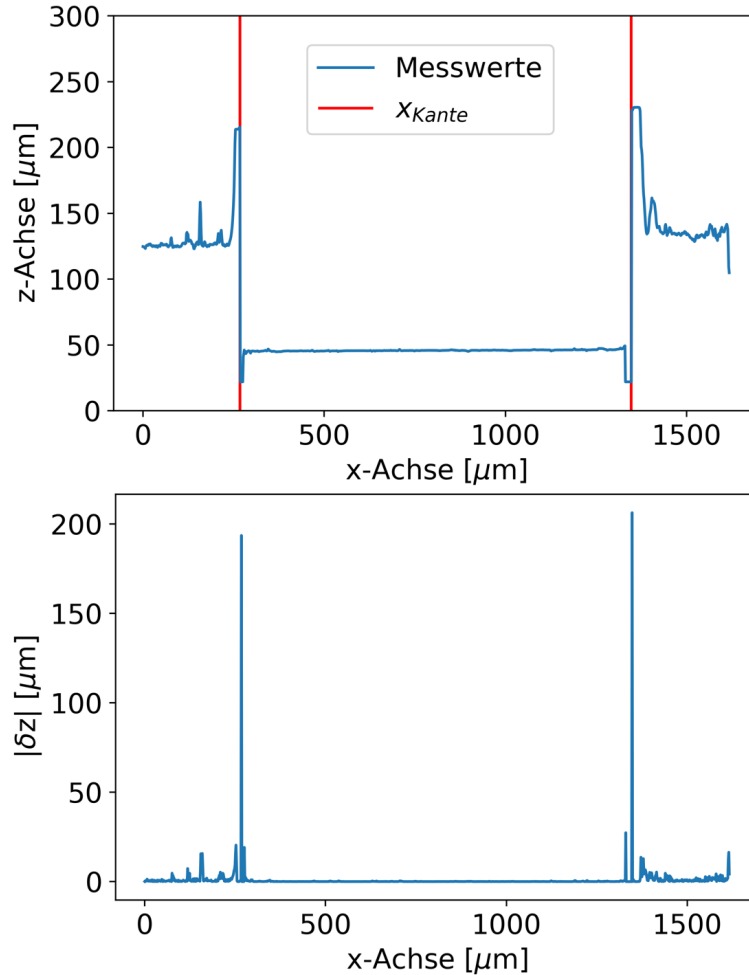


Abbildung 13: Oben: Höhenprofil eines Schnitts für feste y-Koordinate. Die über die Steigung bestimmte Position der Kante ist dabei in rot eingezeichnet. Unten: Differenz der z-Werte für jeweils zwei benachbarte Punkte. Die Fehler der Kantenposition wurde nicht eingezeichnet, da diese zu klein sind, um sie von der Position der Kante unterscheiden zu können

Als Kantenpunkt wird der Punkt mit der betragsmäßig größten Steigung ausgewählt, welche in Abbildung 13 (unten) deutlich zu erkennen sind. Der Fehler des Punktes wird über die Breite des Peaks in der Steigung bestimmt. An die Punkte werden Geraden gefittet, wobei die zuvor bestimmten Fehler der Punkte berücksichtigt werden.

Der Schnittpunkt der beiden Geraden, die an die horizontale und vertikale Kante eines Plättchens gefittet wurden, bildet den Eckpunkt des Glasplättchens. Abbildung 14 zeigt das

bereits in Abbildung 12 dargestellte Höhenprofil mit den an die Kanten gefitteten Geraden und den daraus bestimmten Eckpunkten. Die Fehler der Position der Eckpunkte ergibt sich über die Standardabweichung aus dem Abstand zwischen den Kantenpunkten und den an die jeweiligen Punkte gefitteten Geraden.

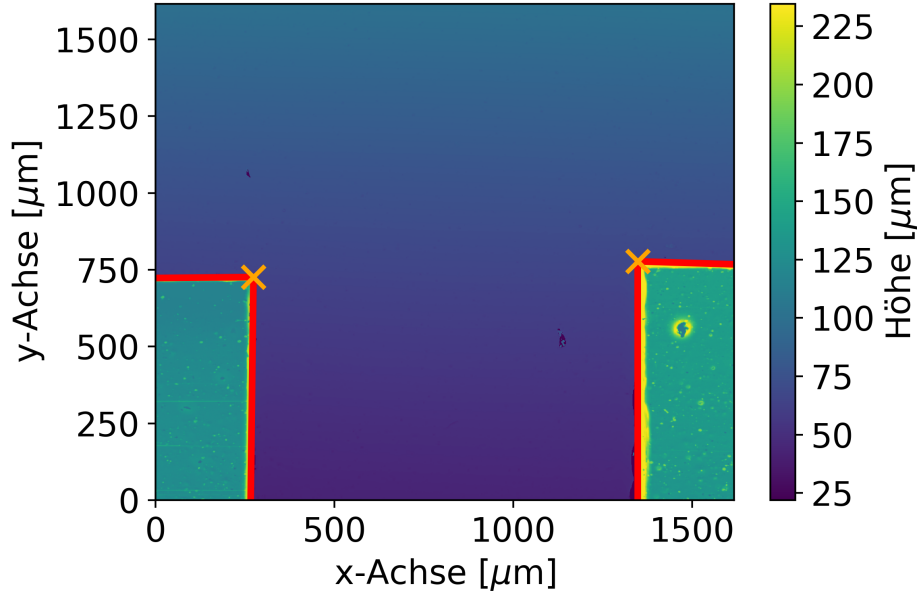


Abbildung 14: Mit dem Konfokalmikroskop aufgenommenes Höhenprofil von zwei Eckpunkten von zwei nebeneinander geklebten Glasplättchen. Die roten Linien stellen die an die Kanten gefitteten Geraden dar. Der Schnittpunkt der beiden Geraden markiert die Position des Eckpunktes.

In manchen Fällen konnte mit diesem Verfahren kein Eckpunkt gefunden werden, weshalb der Eckpunkt anhand des Höhenprofils manuell bestimmt wurde und eine großzügige Abschätzung des Fehler durchgeführt wurde.

Die Koordinaten der Eckpunkte werden mit den Koordinaten der Achsenposition des Roboters addiert, um eine relative Anordnung der Eckpunkte zueinander zu erhalten. Der Fehler des Eckpunktes in den Koordinaten des Roboter wird über die Formel

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{Eckpunkt}}^2 + \sigma_{\text{Achse}}^2} \quad (9)$$

berechnet, wobei σ_{Eckpunkt} der zuvor berechnete Fehler des Eckpunktes in den Koordinaten des Konfokalmikroskops beschreibt und $\sigma_{\text{Achse}} = 10 \mu\text{m}$ die Genauigkeit der Roboterachsen ist, an dem das Konfokalmikroskop befestigt ist.

Aus den vier Eckpunkten eines Glasplättchens wird der Mittelpunkt bestimmt, indem Geraden durch die zwei gegenüberliegenden Punkte gezogen werden und deren Schnittpunkt bestimmt wird. Der Fehler des Eckpunktes kann ähnlich wie in Abbildung 11 bestimmt werden, wobei die Fehler der Eckpunkte hierbei nicht jeweils einem Pixel entsprechen, sondern durch Gleichung 10 ausgerechnet werden. Anschließend werden die Abstände zwischen den Mittelpunkten ausgerechnet, um diese vergleichen zu können.

Mit dieser Methode kann außerdem die Größe der Glasplättchen überprüft werden. Dazu werden die Abstände zwischen den benachbarten Eckpunkten der Glasplättchen bestimmt und über diese gemittelt, um die mittlere Seitenlänge der Kante zu erhalten. Der Fehler der Seitenlänge wird über Fehlerfortpflanzung aus den Fehlern der Eckpunkte berechnet.

Um die Rotation der Glasplättchen zu untersuchen, wird der Winkel zwischen den Kanten der Glasplättchen und der x- bzw. y-Achse ausgerechnet. Auch hier wird der Fehler über Fehlerfortpflanzung aus den Fehlern der Eckpunkte bestimmt.

5.2 Testreihe 1: Naiver Ansatz

Um die Platzierungspräzision des Kleberoboters zu messen, wurden kleine Glasplättchen mit einem konstanten Abstand nebeneinander auf einen langen Polyimid-Streifen geklebt und anschließend die tatsächlichen Abstände der Plättchen gemessen. Bei den in diesem Abschnitt durchgeführten Tests wurden die Glasplättchen auf eine Halterung gelegt, auf der sie an zwei Seiten durch einen Anschlag begrenzt sind. Der Punkt an dem die Plättchen angesaugt wurden, wurde dabei zu Beginn der Messung per Augenmaß bestimmt, sodass dieser ungefähr dem Mittelpunkt entspricht, und dann nicht mehr verändert.

Der Polyimid-Streifen befand sich dabei auf einer 3D-gedruckten Halterung, die in Abbildung 32 im Anhang abgebildet ist. In die zwei Löcher an der Seite wurden M5 Flush Gewinde eingelassen, welche über Schläuche mit den Ausgängen der Magnetventile der Ventilinsel verbunden wurden. Dadurch kann Unterdruck an die runden Öffnungen an der Oberseite der Halterung angelegt werden, worauf der Polyimid-Streifen gelegt wurde. Dieser wurde dadurch angesaugt, um eine Verschiebung des Streifens und damit eine Verfälschung der Messwerte zu verhindern. Die Halterung wurde dabei parallel zur x-Achse auf der Arbeitsfläche befestigt, um die Glasplättchen bei konstanter y-Position setzen zu können und somit den in Kapitel 3.3 erläuterten Effekt zu minimieren.

In Abbildung 6 ist die Halterung mit einem darauf liegendem Polyimid-Streifen, auf den Glasplättchen geklebt wurden, zu erkennen. Auf einen Polyimid-Streifen wurden jeweils 13 Glasplättchen mit einem Abstand von 23 mm geklebt. Insgesamt wurden acht Messreihen durchgeführt, wobei nach jeweils zwei Messreihen die Höhe geändert wurde, bei der der Endeffektor die Glasplättchen absetzt.

Um die Glasplättchen auf das Polyimid zu kleben, wurde der Kleber Araldite® 2011 [18] verwendet. Die Kleberparameter, die am Jet-Dispenser-Steuergerät eingestellt wurden, um den Araldite® 2011 dispensen zu können, wurden in Zusammenarbeit mit Jana Weyrich gesucht und werden in [13] näher erläutert. Für die nachfolgenden Tests wurde das initiale Parameterset verwendet

$$p_P = 513 \text{ kPa} \quad p_C = 517 \text{ kPa} \quad t_{\text{On}} = 0.0130 \text{ s},$$

wobei p_P den Kolbendruck und p_C den Kartuschendruck bezeichnet.

Für jedes Plättchen wurden vier Klebetropfen gesetzt (Nummer = 4), um ausreichend Kleber für eine starke Verbindung zwischen Glasplättchen und Polyimid-Streifen zu erhalten. Der Kleber benötigt etwa 2 Stunden um auszuhärten, weshalb darauf geachtet wurde, die Streifen in diesen 2 Stunden nicht zu bewegen, um die Plättchen nicht zu verschieben, solange der Kleber noch nicht ausgehärtet ist.

Die acht durchgeführten Testreihen wurden mit den beiden im vorherigen Abschnitt erklärten Methoden ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 sowie den Tabellen 3 und 4 dargestellt. Die Höhen $z = 68700$ Ink und $z = 69200$ Ink wurden gewählt, sodass der Endeffektor über dem Polyimid-Streifen stoppt und das Glasplättchen auf den Klebetropfen fallen gelassen wird. Für die Höhen $z = 69700$ Ink und $z = 70200$ Ink drückt der Endeffektor das Glasplättchen auf den Streifen und setzt es dann ab.

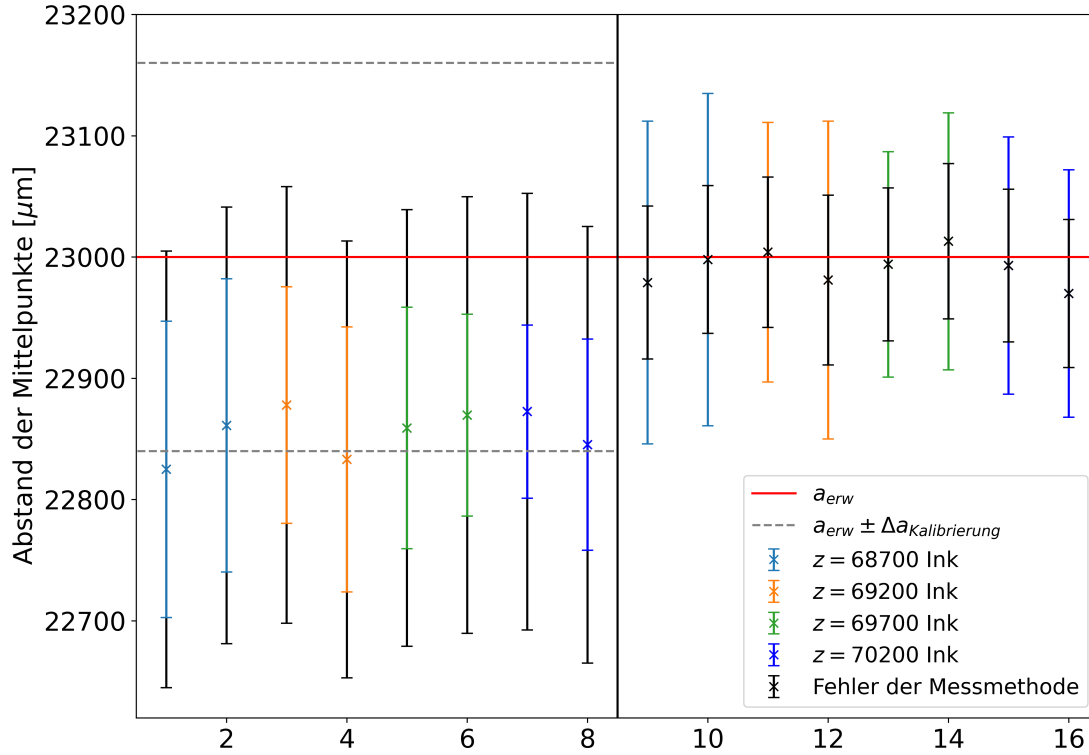


Abbildung 15: Ergebnisse der Abstandsmessung mit dem Leica DMS1000 (links, erste acht Punkte) und mit dem Konfokalmikroskop (rechts, letzte acht Punkte). Die rote Linie gibt den Abstand zwischen den Glasplättchen an, der dem Roboter übergeben wurde. Die graue Linie stellt den aus der Kalibrierung des Leica DMS1000 resultierenden Fehler auf den Abstand, der dem Roboter übergeben wurde, dar. Für die Messung mit dem Konfokalmikroskop wurde keine Genauigkeit der Kalibrierung angegeben, da diese im Bereich weniger Mikrometer liegt und somit gegenüber der deutlich größeren statistischen Fehler vernachlässigt werden kann. Die farbigen Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung der Abstände an und die schwarzen Fehlerbalken markieren die Ungenauigkeit der verwendeten Messmethode. Der Ansaugpunkt der Glasplättchen wurde dabei per Augenmaß bestimmt.

Um die Präzision der platzierten Plättchen der Messreihen miteinander zu vergleichen, werden die Standardabweichungen der Abstände zwischen den Mittelpunkten betrachtet. Die mit dem Leica DMS1000 gemessenen Standardabweichungen (siehe Tabelle 3) sind alle geringer als der Fehler der Messmethode. Der Fehler der Messmethode dominiert in diesem Fall, weshalb die absoluten Werte der Standardabweichungen nicht aussagekräftig sind und diese somit nicht miteinander verglichen werden können. Dies könnte darauf hindeuten, dass der

gewählte Fehler für die Messmethode überschätzt wurde. Die Standardabweichungen der mit dem Konfokalmikroskop bestimmten Abstände (siehe Tabelle 4) sind größer als der Fehler der Messmethode. Die Standardabweichungen für die Messungen, für die die Glasplättchen auf den Polyimid-Streifen gedrückt wurden ($z = 69700$ Ink und $z = 70200$ Ink), sind niedriger als für die Messungen, für die die Glasplättchen auf den Streifen fallen gelassen wird ($z = 68700$ Ink und $z = 69200$ Ink). Die Abweichungen sind jedoch nicht signifikant und aufgrund der langen Aushärtezeit des Klebers, sowie der aufwändigen Auswertungsmethode mit dem Konfokalmikroskop konnte nur eine begrenzte Anzahl an Messungen durchgeführt werden, weshalb keine ausreichende Statistik vorliegt, um eine qualitative Aussage über die Standardabweichung in Abhängigkeit der Höhe des Endeffektors treffen zu können.

Neben der Standardabweichung wird auch die Abweichung des mittleren gemessenen Abstands vom erwarteten Abstands verglichen. Dazu wird aus der Standardabweichung und dem Fehler der Messmethode der Fehler des Mittelpunkts mit der Formel

$$\Delta a_{\text{ges}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right)^2 + (\Delta a_{\text{mes}})^2} \quad (10)$$

berechnet. Für die Messung mit dem Leica DMS1000 dominiert der Fehler der Messmethode. Die Messung mit dem Konfokalmikroskop erreicht eine bessere Genauigkeit. Die Abweichungen vom erwarteten Abstand liegen für die acht durchgeführten Messungen im Bereich von $30 \mu\text{m}$ mit einer statistischen Abweichung von etwa $70 \mu\text{m}$.

Der zu erwartende Abstand zwischen den Mittelpunkten von $a_{\text{erw}} = 23000 \mu\text{m}$ liegt für die Messung mit dem Konfokalmikroskop im Fehlerbereich aller durchgeführten Messungen. Für die mit dem Leica DMS1000 gemessenen Abstände ist eine Systematik zu erkennen. Die Mittelwerte sind alle niedriger als der zu erwartende Abstand. Unter Berücksichtigung der Fehler der Mittelwerte liegen die Werte jedoch im Bereich des Kalibrierungsfehlers des Leica DMS1000. Es ist somit nicht eindeutiger erkennbar, ob der Roboter die Glasplättchen wahrscheinlicher mit einem größeren oder kleineren Abstand platziert.

Tabelle 3: Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Leica DMS1000. Der Abstand a_L stellt dabei den Mittelwert der Abstände zwischen den 13 Glasplättchen dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet. Δa_{mess} stellt den Fehler der Messmethode und Δa_{ges} den Fehler auf den Mittelwert, der mit Gleichung 10 ausgerechnet wurde, dar.

Messung	z-Position [Ink]	a_L [μm]	σ [μm]	Δa_{mess} [μm]	Δa_{ges} [μm]
1	68700	22845	122	180	184
2	68700	22881	121	180	184
3	69200	22878	98	180	182
4	69200	22833	109	180	183
5	69700	22859	100	180	182
6	69700	22870	83	180	182
7	70200	22873	71	180	182
8	70200	22845	87	180	182

Tabelle 4: Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Konfokalmikroskop. Der Abstand a_K stellt dabei den Mittelwert der Abstände zwischen den 13 Glasplättchen dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet. Δa_{mess} stellt den Fehler der Messmethode und Δa_{ges} den Fehler auf den Mittelwert, der mit Gleichung 10 ausgerechnet wurde, dar.

Messung	z-Position [Ink]	a_K [μm]	σ [μm]	Δa_{mess} [μm]	Δa_{ges} [μm]
1	68700	22979	123	63	72
2	68700	22998	117	61	70
3	69200	23004	107	62	70
4	69200	22981	131	70	80
5	69700	22994	93	63	69
6	69700	23013	106	64	71
7	70200	22993	105	63	70
8	70200	22970	102	61	68

Mit dem Konfokalmikroskop können zudem die Winkel zwischen den Glasplättchen und der x- bzw. y-Achse sowie die Kantenlänge der Glasplättchen bestimmt werden. Die Werte sind in den Tabellen 7 und 8 im Anhang zu finden.

Die gemessenen Winkel können ebenfalls genutzt werden, um eine Aussage über die Platzierungspräzision des Roboters treffen zu können, da somit nicht nur der Abstand zwischen den Plättchen, sondern auch ihre Rotation zueinander untersucht werden kann. Der absolute Wert hat dabei keine Aussage, da die Ausrichtung der Polyimid-Streifen unter dem Konfokalmikroskop nicht bekannt ist. Deshalb werden wieder die Standardabweichungen miteinander verglichen, jedoch ist der Fehler der Messmethode in der gleichen Größenordnung wie die Standardabweichungen. Ein aussagekräftiger Vergleich ist somit wieder nicht möglich.

Die Seitenlänge der Glasplättchen wurde untersucht, um zu überprüfen, wie genau diese gefertigt sind. Es zeigt sich, dass die Mittelwerte der Seitenlänge für die acht Messreihen im Bereich von circa 130 μm um die angegebene Seitenlänge von 22 mm schwanken.

5.3 Testreihe 2: Ansaugen am Mittelpunkt

Im nächsten Abschnitt werden die in Kapitel 5.2 durchgeführten Messreihen wiederholt, wobei der Punkt der Glasplättchen, an dem sie angesaugt werden, nicht per Augenmaß bestimmt wird, sondern mittels des Laserdistanzsensors. Diese Methode sollte vor allem den Fehler verringern, der aus den Varianzen in der Größe der Glasplättchen resultiert, um somit eine verbesserte Platzierungspräzision zu erreichen.

5.3.1 Methodik zur Bestimmung des Mittelpunkts

Der Mittelpunkt der Glasplättchen wird bestimmt, indem die z-Achse des Kleberoboters mit dem Laserdistanzsensor, in x- und in y-Richtung über das Plättchen gefahren und die Distanz zwischen dem Lasersensor und der Oberfläche unter dem Sensor in Abhängigkeit der x- und y-Position des Roboters gemessen wird. Daraus kann die Position der Kanten des Glasplättchens und daraus dessen Mittelpunkt bestimmt werden. Abbildung 16 zeigt die gemessenen Distanzen für zwei Messungen in x- und in y-Richtung.

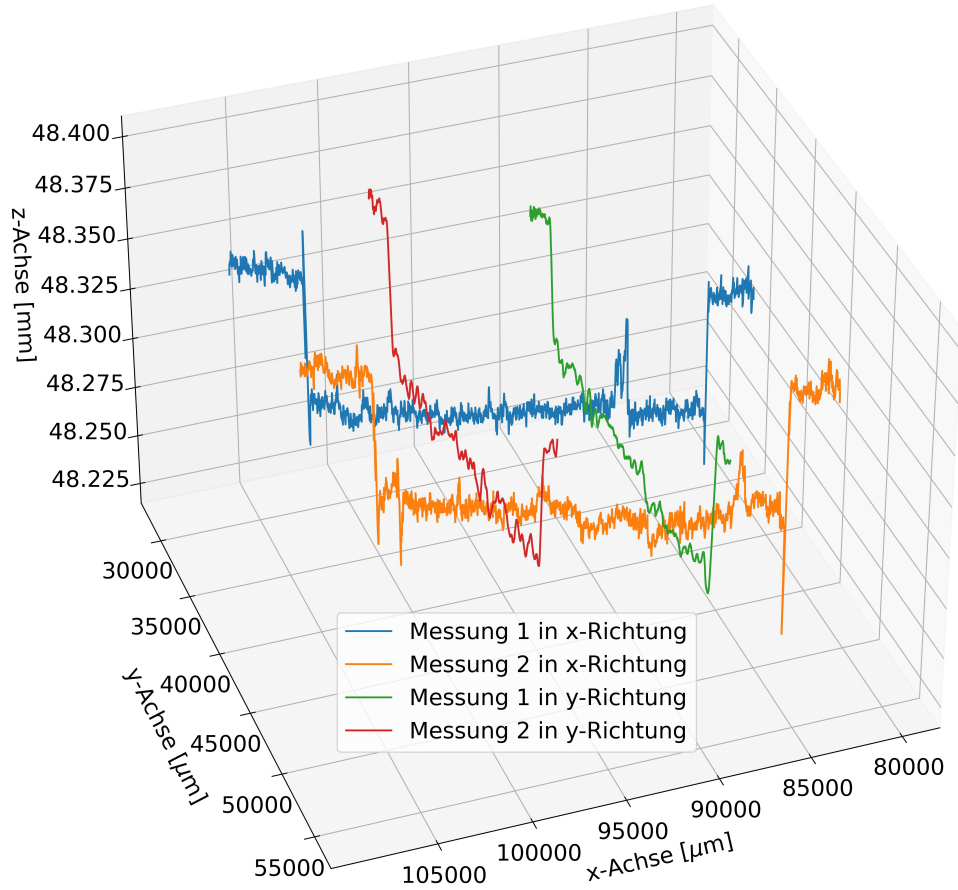


Abbildung 16: Darstellung der Distanz zwischen Lasersensor und Granitplatte bzw. Glasplättchen für zwei Messungen in x- und zwei Messungen in y-Richtung. Der Übergang zwischen Granitplatte und Glasplättchen ist dabei deutlich in dem Sprung der z-Koordinate zu beobachten.

Um aus den in Abbildung 16 dargestellten Messungen die Positionen der Kanten, also den Übergang zwischen dem Glasplättchen und der Oberfläche auf der diese liegt, zu bestimmen, werden an die jeweiligen Messungen mithilfe von der in Python integrierten Funktion *scipy.curve_fit* zwei gegenläufige Tangens hyperbolicus Funktionen der folgenden Form gefittet

$$f(x) = mx + b + A_1 \tanh\left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1}\right) + A_2 \tanh\left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right). \quad (11)$$

Um einen besseren Fit zu erhalten, wurde *curve_fit* neben den x- bzw. y- und z- Werten auch die Fehler der gemessenen Distanz übergeben, welche $\Delta z = 4 \mu\text{m}$ [9] betragen. Wie in Abbildung 17a zu erkennen, weisen die Messwerte teilweise eine Steigung auf, was auf eine schiefe Arbeitsfläche hindeutet. Um dies zu korrigieren, wurde die Fitfunktion um einen lineare Anteil $mx + b$ erweitert. Die Positionen der Kanten werden durch die Fitparameter μ_1 und

μ_2 mit dem jeweiligen Fehler σ_1 und σ_2 angegeben. Um den tatsächlichen Fehler der Kantenposition zu erhalten, muss die absolute Genauigkeit der Roboterachsen berücksichtigt werden. Diese sind für die jeweiligen Achsen in Tabelle 1 eingetragen. Der Fehler der Kantenposition ergibt sich somit wie folgt

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{fit}}^2 + \sigma_{\text{Achse}}^2}. \quad (12)$$

Abbildung 17 zeigt exemplarisch die an die Messwerte gefittete Funktion für eine Messung in x-Richtung (oben) und in y-Richtung (unten). Die Übergänge zwischen Glasplättchen und Unterlage werden dabei gut von der Fitfunktion getroffen.

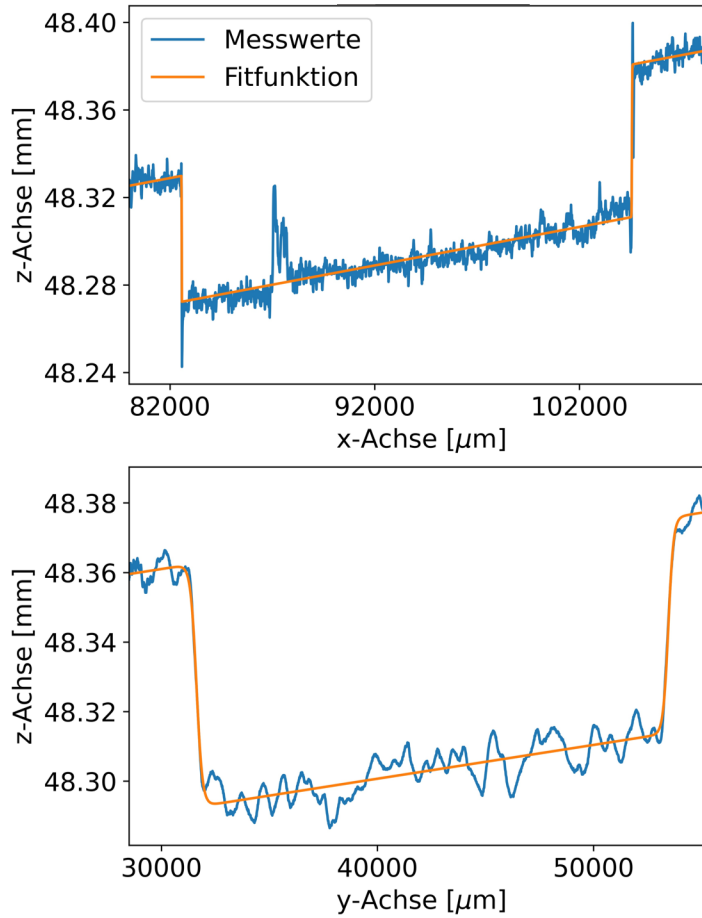


Abbildung 17: Darstellung einer Distanzmessung in x-Richtung (oben) und in y-Richtung (unten) und der an die Werte gefitteten Fitfunktion (Gleichung 11).

Hierbei ist klar zu erkennen, dass das Rauschen der z-Werte für die Messung in y-Richtung eine niedrigere Frequenz aufweist als für die Messung in x-Richtung. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass auf der y-Achse ein größeres Drehmoment wirkt als auf die x-Achse, weshalb die y-Achse, bei Bewegung, stärkeren mechanischen Schwingungen ausgesetzt ist. Der Peak

innerhalb der Messung in x-Richtung bei etwa $x = 90000 \mu\text{m}$ resultiert vermutlich aus Produktionsfehler der Glasplättchen.

Aus den vier Messreihen lassen sich somit acht Kantenpunkte bestimmen, aus denen wiederum der Mittelpunkt bestimmt werden kann. Die hier vorgestellte Methode basiert auf der Annahme, dass das Glasplättchen orthogonal zueinander stehende Kanten mit gleicher Länge besitzt. Diese werden durch die folgenden Gleichungen parametrisiert

$$k_{1,3} = \underbrace{\begin{pmatrix} x_m \\ y_m + \frac{L}{2} \end{pmatrix}}_{\vec{q}_{1,3}} \pm \underbrace{\begin{pmatrix} t \cdot \frac{L}{2} \sin \theta \\ t \cdot \frac{L}{2} \cos \theta \end{pmatrix}}_{\vec{u}_{1,3}} \text{ für } t \in [-1, 1], \quad (13)$$

$$k_{2,4} = \underbrace{\begin{pmatrix} x_m + \frac{L}{2} \\ y_m \end{pmatrix}}_{\vec{q}_{2,4}} \pm \underbrace{\begin{pmatrix} t \cdot \frac{L}{2} \cos \theta \\ t \cdot \frac{L}{2} \sin \theta \end{pmatrix}}_{\vec{u}_{1,3}} \text{ für } t \in [-1, 1], \quad (14)$$

wobei x_m und y_m die Position des Mittelpunkts, θ den Winkel zwischen den Kanten und der x- bzw. y-Achse und L die Kantenlänge des Plättchens darstellt. Um das Plättchen bestmöglich an die Kantenpunkte zu fitten, wird mit der Methode der kleinsten Quadrate der Abstand zwischen den Kantenpunkten und der dazugehörigen Kante minimiert. Welche Kantenpunkte dabei welcher Geraden zugeordnet werden, ist in Abbildung 18 (rechts) zu erkennen. Hierbei ist zu erwähnen, dass der Winkel θ klein sein muss, da sonst die Kantenpunkte den falschen Geraden zugeordnet werden. Die zu minimierende Funktion hat dabei die folgende Form:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{|\vec{p}_i - \vec{p}_{\text{Kante},j}|^2}{\sigma_i^2} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}. \quad (15)$$

Dabei ist n die Anzahl der Kantenpunkte (hier 8), $\vec{p}_i$ der aus der Fitfunktion bestimmte Kantenpunkt und σ_i ist der mittels Gleichung 12 bestimmte zugehörige Fehler der Kantenpunkte. Der Punkt $\vec{p}_{\text{Kante},j}$ bezeichnet dabei den Schnittpunkt zwischen der Gerade k_j und dem zugehörigen Lot durch den Punkt $\vec{p}_i$. Die Differenz $d_i = |\vec{p}_i - \vec{p}_{\text{Kante},j}|$ bezeichnet somit den kleinstmöglichen Abstand zwischen dem Kantenpunkt und der Geraden. Dieser kann mittels der in Gleichung 13 und 14 gekennzeichneten Stützvektoren $\vec{q}_j$ und Richtungsvektoren $\vec{u}_j$, sowie der Position der Kantenpunkte $\vec{p}_i$ mit der Formel

$$d_i = \frac{|(\vec{p}_i - \vec{q}_j) \times \vec{u}_j|}{|\vec{u}_j|} \quad (16)$$

berechnet werden. Die Minimierung von Gleichung 15 führt auf die optimalen Parameter für x_m , y_m , θ und $L/2$. Die Länge des Plättchens wird dabei auch als Parameter übergeben und nicht auf die vom Hersteller angegebene Länge gesetzt, da sich in Kapitel 5.2 gezeigt hat, dass die Kantenlängen im Bereich von circa $130 \mu\text{m}$ variieren. Das daraus resultierende Plättchen ist in Abbildung 18 dargestellt.

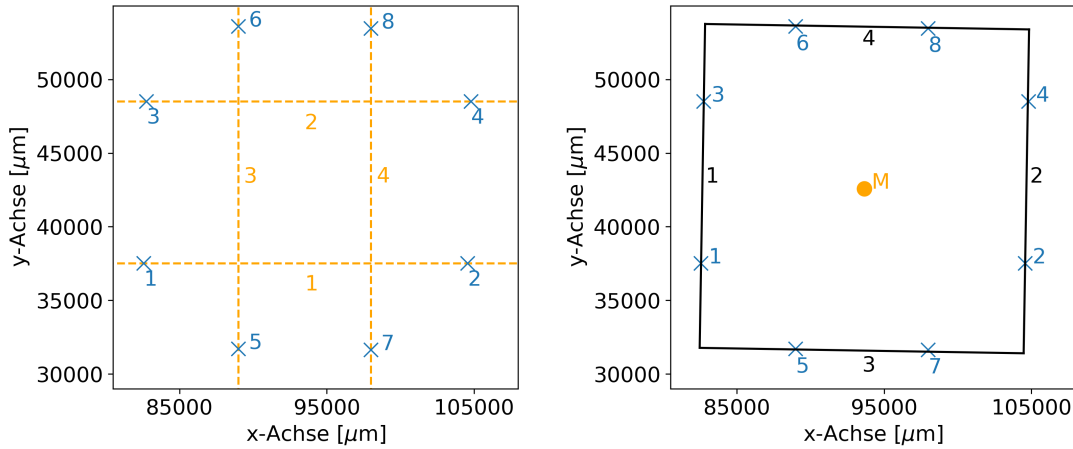


Abbildung 18: Der linke Graph zeigt die zwei in x- und y-Richtung durchgeführten Messungen (orange) und die daraus bestimmten Kantenpunkte (blau). In der rechten Abbildung sind die an die Kantenpunkte gefitteten Kanten des Plättchens (schwarz) sowie der Mittelpunkt (orange) abgebildet.

Die Berechnung der Fehler der Parameter x_m , y_m , θ und $L/2$ ist in Abbildung 19 visualisiert.

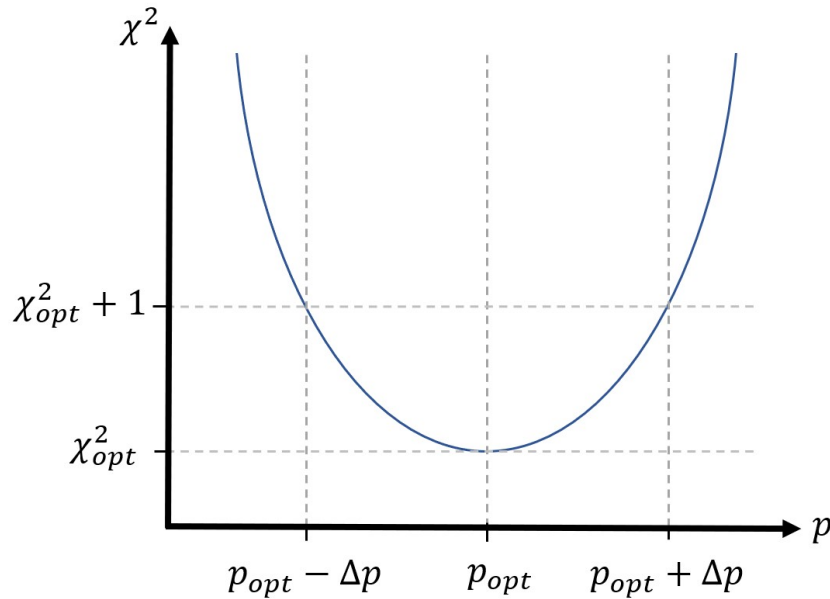


Abbildung 19: Bestimmung der Fehler der Parameter über die Methode der kleinsten Quadrate. Dabei ist χ^2 gegen einen beliebigen zu minimierenden Parameter p aufgetragen. Der optimale Wert des Parameters p_{opt} befindet sich im Minimum. Der Fehler des Parameters ist mit Δp angegeben.

5.3.2 Auswahl der Parameter

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 5.3.1 erläuterten Methoden auf Wiederholbarkeit und die Größe der Fehler untersucht. Dabei wird die Geschwindigkeit, mit der der Laserdistanzsensor über das Glasplättchen gefahren wird, und die Häufigkeit, wie oft Messungen in x- und y-Richtung durchgeführt werden, variiert. Zunächst wurde ein Glasplättchen auf die Arbeitsplatte gelegt und Messungen für unterschiedliche Geschwindigkeiten durchgeführt. In Abbildung 20 sind die Fehler auf die x- und y-Position des mit dem Laserdistanzensors bestimmten Mittelpunkts für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten abgebildet.

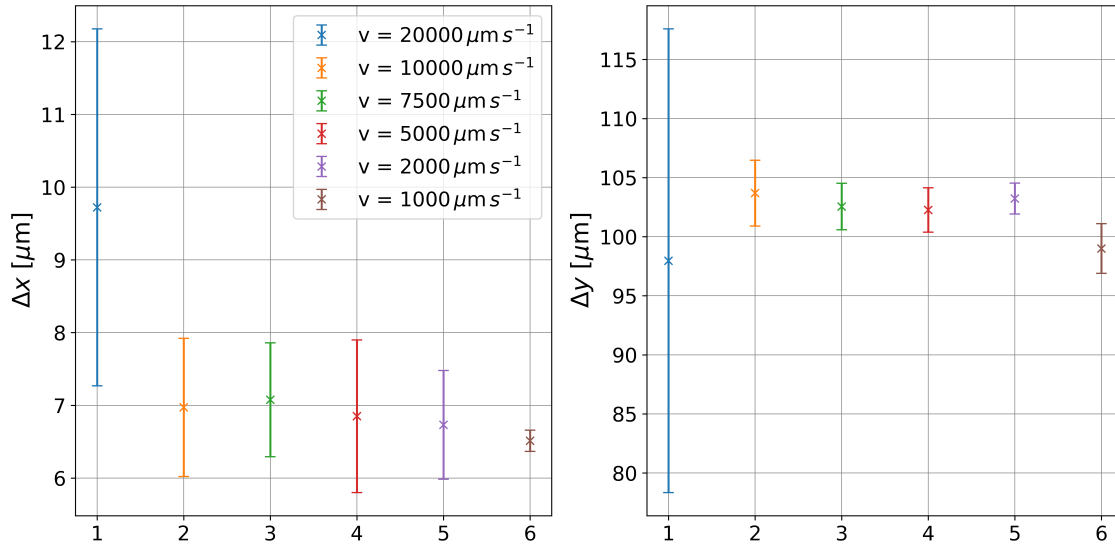


Abbildung 20: Fehler der x- und y-Koordinate des Mittelpunkts eines Glasplättchen für unterschiedliche Geschwindigkeiten. Dabei entspricht jeder Punkt dem Mittel aus 25 Messungen und der eingezeichnete Fehler stellt die Standardabweichung der berechneten Fehler dar.

Mit abnehmender Geschwindigkeit nimmt die Größe der Fehler ab. Dies ist auf die steigende Anzahl der Messwerte zurückzuführen, die eine genauere Bestimmung der Kantenpunkte ermöglicht. Die Fehler der y-Koordinate sind jedoch um eine Größenordnung größer, als die der x-Koordinate. Das liegt vermutlich an dem Aufbau des Roboters und dem daraus resultierendem Drehmoment auf die y-Achse (siehe Kapitel 3.3). Dadurch kommt es zu Oszillationen der y-Achse, welche zu stärkeren Schwankungen der Distanzmessung führen. In Abbildung 17 ist gut zu erkennen, dass die Schwankungen für die Messungen parallel zur y-Achse eine niedrigere Frequenz aufweisen, als für die Messung parallel zur x-Achse. Damit ist auch die Breite der Kante im Vergleich zu der Messung in x-Richtung größer. Um die Kantenpunkte in y-Richtung genauer bestimmen zu können und somit den Fehler der y-Position zu verkleinern, wurde die Höhendifferenz an der Kante erhöht. Dazu wurde eine 3D-gedruckte Halterung hergestellt, welche über ein Plateau verfügt, das kleiner ist als das Glasplättchen. Die entsprechende CAD-Zeichnung ist im Anhang in Abbildung 33 zu finden. Ein Querschnitt dieser Halterung ist in Abbildung 21 skizziert. Wird das Glasplättchen auf dieses Plateau gelegt, so stehen die Kanten leicht über. Da die Plättchen transparent sind, ist eine Distanzbestimmung

mit dem Laserdistanzsensord für den Teil der Plättchen, der nicht auf dem Plateau liegt, nicht möglich. Daher wurden die Glasplättchen mit einem schwarzen Mattlack besprüht. Sie eignen sich immer noch als guter Ersatz für die HV-MAPS, da diese ebenfalls nicht transparent sind. Wird das Glasplättchen auf das Plateau gelegt, können nur noch die Kantenpunkte an drei der vier Kanten bestimmt werden. Dies hängt mit dem Messprinzip des Laserdistanzsensors zusammen, welches in Abbildung 21 veranschaulicht ist.

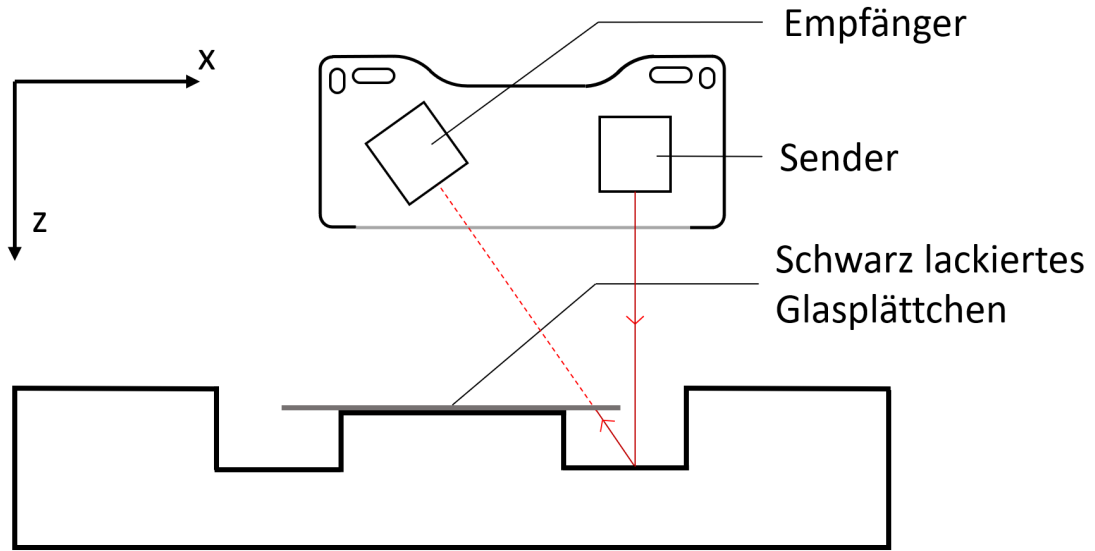


Abbildung 21: Querschnitt der verwendeten Halterung mit dem auf dem Plateau abgelegten Glasplättchen sowie Veranschaulichung des Messprinzips des Laserdistanzsensors. Dabei wird das Triangulationsprinzip ausgenutzt. Der Reflexionswinkel des Laserstrahls, der vom Empfänger gemessen wird, hängt von der Distanz zwischen Sender und der Oberfläche, an der der Strahl reflektiert wird, ab. Aus dem Verhältnis von Sende- und Empfangswinkel kann anschließend die Distanz des Messobjekts bestimmt werden. Dazu muss der reflektierte Strahl jedoch den Empfänger erreichen. In der eingezeichneten Position gibt der Laserdistanzsensor somit einen ungültigen Wert aus (siehe [9] S.10).

Somit fehlen die Punkte an der hinteren Kante in positive x-Richtung, da der reflektierte Laserstrahl von dem Glasplättchen blockiert wird und den Empfänger des Laserdistanzsensors nicht erreichen kann. An die aufgenommenen Werte in x-Richtung wird somit nicht Gleichung 11 gefittet, sondern nur ein einfacher Tangens Hyperbolicus der Form

$$f(x) = mx + b + A \tanh\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right). \quad (17)$$

Auf dem Plateau kann das Glasplättchen zusätzlich angesaugt werden, um eine Verschiebung während der Datenaufnahme zu verhindern. Dazu wird in die Halterung ein M5 Flush Innengewinde eingelassen und dieses mit einem Magnetventil der Ventilinsel verbunden. In Abbildung 22 sind die Fehler der Mittelpunktkoordinaten für Messungen mit und ohne Ansaugung

der Glasplättchen abgebildet. Diese Messungen wurden für zwei, drei und vier Messreihen in x- und y-Richtung durchgeführt. Die Geschwindigkeit wurde auf $1000 \mu\text{m s}^{-1}$ eingestellt, da diese die kleinsten Fehler mit der geringsten Schwankung lieferte. Eine weitere Senkung der Geschwindigkeit, würde die Genauigkeit zwar weiter verbessern, jedoch ist der Fehler der x-Position in Abbildung 20 bereits kleiner als die absolute Genauigkeit der Roboterachsen, weshalb dieser Fehler dominiert und eine weitere Senkung der Geschwindigkeit nur zu einer erhöhten Messdauer führt.

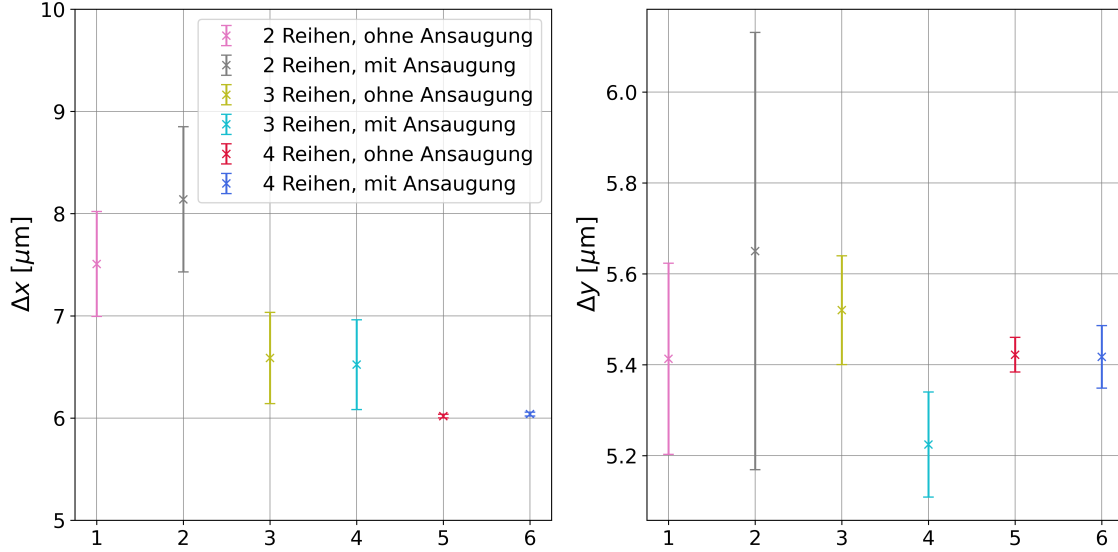


Abbildung 22: Fehler der x- und y-Koordinate des Mittelpunkts eines Glasplättchens auf einem Plateau. Variiert wird die Anzahl der Messreihen und ob das Plättchen angesaugt wird. Jeder Punkt entspricht dabei dem Mittel aus 25 Messungen und der eingezeichnete Fehler stellt die Standardabweichung der berechneten Fehler dar.

Die Fehler der x-Position für 2-Reihen sind im Vergleich zu den Werten in Abbildung 20 für die Geschwindigkeit von $v = 1000 \mu\text{m s}^{-1}$ gestiegen, obwohl die Höhendifferenz vergrößert wurde und somit eine genauere Bestimmung der Kantenpunkte möglich sein sollte. Das ist dadurch zu erklären, dass die Kantenpunkte für die hintere Gerade in x-Richtung fehlen und somit nur zwei Punkte anstatt vier Punkte zur Eingrenzung des Mittelwerts in x-Richtung vorliegen. Für drei und vier Messreihen liegt der Fehler wieder im Bereich der bereits in Abbildung 20 erreichten Größenordnung. Der Fehler der y-Position konnte mit dieser Methode deutlich reduziert werden und befindet sich jetzt auch in der gleichen Größenordnung wie der Fehler der x-Position. Abbildung 22 zeigt zudem, dass eine Erhöhung der Messreihen in x- und y-Richtung den Fehler des Mittelpunkts in x-Richtung sowie dessen Varianz reduziert, da mehr Kantenpunkte bekannt sind, um den Mittelpunkt zu bestimmen. Der Fehler der y-Koordinate zeigt keinen erkennbaren Trend. Die Werte liegen alle dicht beieinander. Mit einer Erhöhung der Messreihen kann jedoch die Varianz der Fehler verringert werden. Die Anzahl der Messreihen kann beliebig erhöht werden, jedoch liegen hier die Fehler wieder unter der absoluten Genauigkeit der Roboterachsen und somit dominiert der Fehler der Roboterachsen,

wodurch eine Erhöhung der Messreihen den Fehler nur noch minimal verkleinern würde, die Messdauer jedoch stark erhöhen würde, weshalb darauf verzichtet wurde. Eine Ansaugung der Plättchen während der Datenaufnahme führte zu keiner signifikanten Veränderungen der Fehler der x- und y-Positionen.

Für die bisher verglichenen Parameter wurden ebenfalls die Fehler des Winkels θ betrachtet. Diese sind in Abbildung 23 zu sehen. Hierbei fällt auf, dass die Fehler für die ersten sechs Messungen deutlich niedriger sind als für die Messungen, bei denen das Glasplättchen auf dem Plateau lag. Das liegt vermutlich ebenfalls daran, dass nur Punkte an drei der vier Kanten bestimmt werden konnten und somit eine Kante nicht gefittet werden kann und der Winkel nicht so genau eingegrenzt wird. Eine Erhöhung der Messreihen oder Senkung der Geschwindigkeit führt zu keiner signifikanten Veränderung im Fehler des Winkels und zu einer leichten Abnahme der Varianz.

Da der Fehler der y-Koordinate durch das Platzieren der Glasplättchen auf dem Plateau drastisch reduziert werden kann und der Fehler im Winkel immer noch sehr gering ist, ist die Plateau-Methode zu bevorzugen.

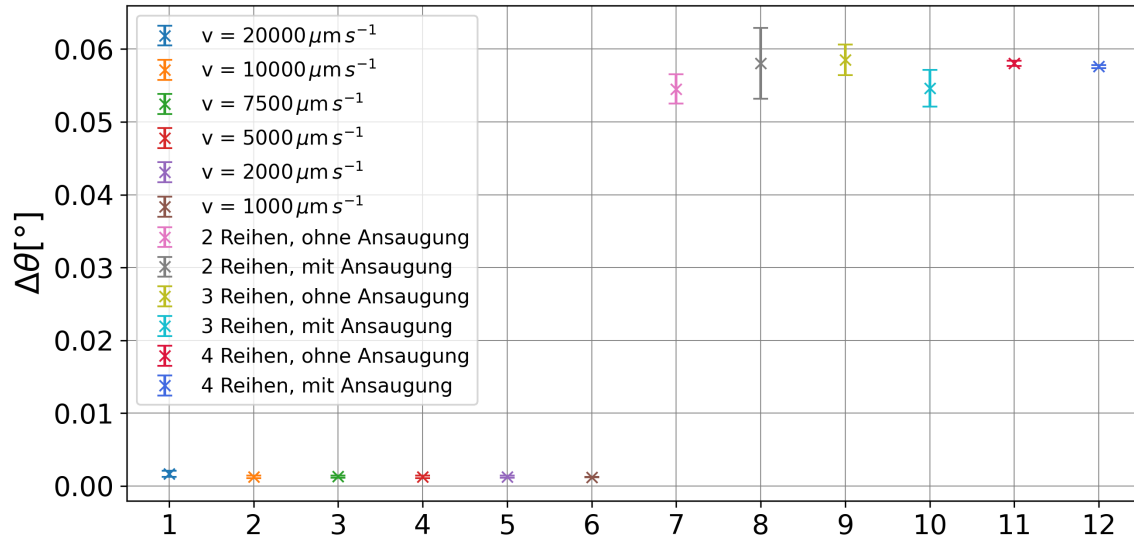


Abbildung 23: Fehler des Winkels θ zwischen Kanten des Plättchens und x- bzw. y-Achse. Jeder Punkt entspricht dabei dem Mittel aus 25 Messungen und der eingezeichnete Fehler stellt die Standardabweichung der berechneten Fehler dar.

Da der Mittelpunkt über die Minimierung eines χ^2 bestimmt wurde, bietet sich eine Betrachtung des reduzierten χ^2 an, um die Güte der Fits zu überprüfen und eine begründete Auswahl für ein Parameterset treffen zu können. Die χ^2 sind in Abbildung 24 dargestellt.

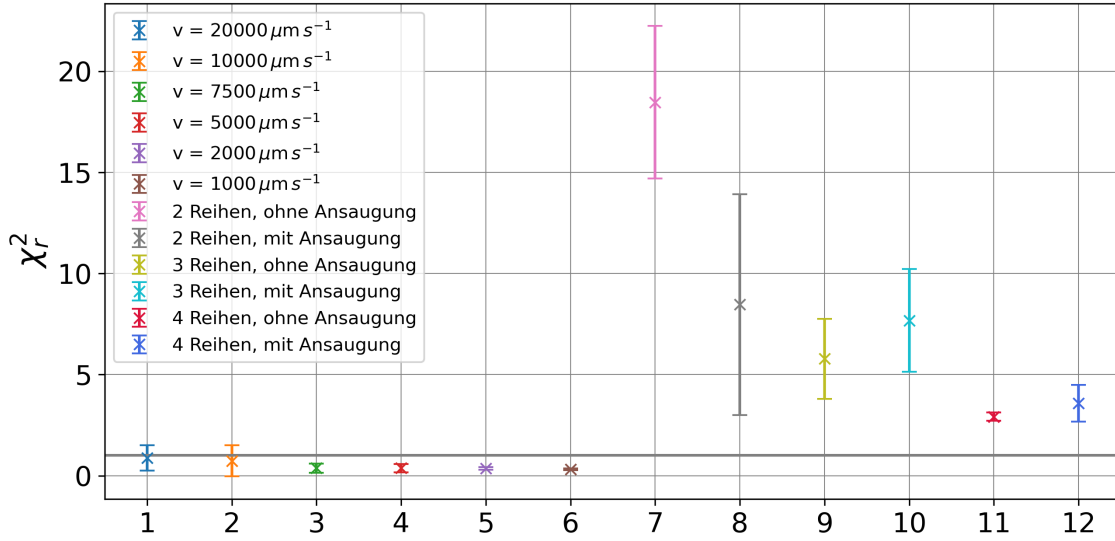


Abbildung 24: Darstellung der reduzierten Chi-Quadrate. Jeder Punkt entspricht dabei dem Mittel aus 25 Messungen und der eingezeichnete Fehler stellt die Standardabweichung der berechneten Fehler dar.

Das reduzierte χ^2_r wird aus dem Quotienten von χ^2 und der Anzahl der Freiheitsgrade d berechnet. Die Freiheitsgrade stellen dabei die Differenz aus der Anzahl der Kantenpunkte und der Anzahl der zu minimierenden Parametern dar. Die sechs Messungen für die Variation der Geschwindigkeiten haben demnach einen Freiheitsgrad von $d = 4$. Die Messungen auf dem Plateau mit zwei Reihen besitzen einen Freiheitsgrad von $d = 2$, für drei Reihen von $d = 5$ und für vier Reihen von $d = 8$.

Die Messungen für die Variation der Geschwindigkeit, für die das Glasplättchen auf die Granitplatte gelegt wurde, haben alle ein reduziertes χ^2_r , das geringer ist als eins, was darauf hindeutet, dass die Fehler der einzelnen Kantenpunkte überschätzt wurden. Die reduzierten χ^2_r der Plateaumessungen sind alle größer als eins, was bedeutet, dass die Fehler zu gering eingeschätzt wurden, oder durch das gewählte Modell, also ein Quadrat, die Messwerte nicht genau abbildet. Das liegt vermutlich daran, dass die Kanten der Plättchen durch das Besprühen mit Lack unebener wurden und somit keine perfekte Gerade darstellten. Für die vier Messreihen mit und ohne Ansaugen der Plättchen wird trotzdem ein reduziertes χ^2_r im Bereich von drei berechnet, was in einer annehmbaren Größenordnung liegt.

Aufgrund der niedrigeren Fehler auf die Position des Mittelpunkts stellen die beiden Messungen mit vier Messreihen die besten Parametersets dar. Zwischen den beiden Messungen konnte kein signifikanter Unterschied beobachtet werden. Es wird vermutet, dass das Plättchen verschoben werden kann, wenn der Endeffektor auf das Plättchen gefahren wird, um es anzusaugen. Um das zu vermeiden, wird für die nachfolgende Testreihe das Parameterset mit 4 Messreihen und Ansaugung des Plättchens gewählt. Das Plättchen wird solange an der Halterung angesaugt, bis der Vakuumgreifer auf das Plättchen gefahren wurde und an diesem Unterdruck angelegt wurde.

5.3.3 Abstandsmessung zwischen Laser-Distanzsensor und Endeffektor

In Kapitel 5.3.1 wurde eine Methode vorgestellt, um den Mittelpunkt der Glasplättchen mithilfe des Laserdistanzsensors zu bestimmen. Die daraus resultierende x- und y-Position des Mittelpunkts ist relativ zur Position des Laserdistanzsensors. Um die Glasplättchen mit dem Vakuumgreifer an ihrem Mittelpunkt anzusaugen, muss der relative Abstand in x- und y-Richtung zwischen Laserdistanzsensor und Vakuumgreifer bestimmt werden.

Dazu wurde, wie in Abbildung 25 dargestellt, ein Messschieber in einer dafür 3D-gedruckten Halterung eingespannt. Ein Winkel wurde verwendet, um die Halterung parallel zur x-Achse auszurichten. Anschließend wurde die r-Achse in positive x-Richtung gegen die Kante des Messschiebers an eine bestimmte Position gefahren und diese notiert. Das Feststellrad des Messschiebers wurde so eingestellt, dass dieser sich nur schwer verschieben lässt, sodass der Messschieber seine Einstellung beibehält, nachdem er vom Roboter verschoben wurde.

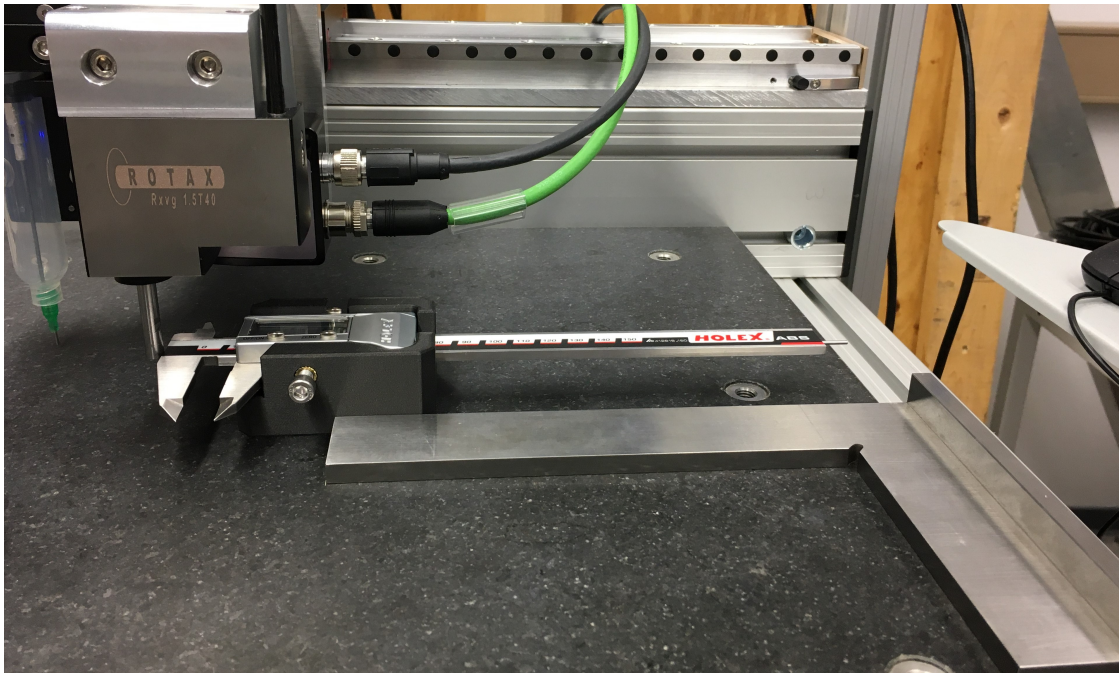


Abbildung 25: Aufbau zur Messung des Abstands zwischen Laserdistanzsensor und r-Achse in x-Richtung.

Um den Abstand zwischen r-Achse und Laserdistanzsensor in x-Richtung zu bestimmen, wurde nun der Laserdistanzsensor über die Kante des Messschiebers gefahren und die Distanz in Abhängigkeit der Position der Roboterachsen gemessen. Der Laserdistanzsensor wurde dabei über verschiedene Stellen der Kante gefahren (Variation der y-Position), da die Stelle, an der die r-Achse den Messschieber traf, nicht genau bekannt ist und somit mögliche Unebenheiten der Kante oder eine nicht exakt parallele Ausrichtung der Halterung berücksichtigt werden konnten. Wie bei der Bestimmung der Kantenpunkte wurde ein Tangens hyperbolicus wie in Gleichung 17 an die Messwerte gefittet, wobei μ die Position

der Kante und σ deren Fehler darstellt. Die Daten einer solchen Messung mit der daran gefitteten Funktion sind in Abbildung 26 dargestellt. Aufgrund der Höhendifferenz zwischen Granitplatte und Messschieber sind die Schwankungen in den Distanzen deutlich kleiner als in Abbildung 17, wodurch die Position der Kante deutlich genauer bestimmt werden kann und auch hier wieder die absolute Genauigkeit des Roboters die dominierende Fehlerquelle darstellt.

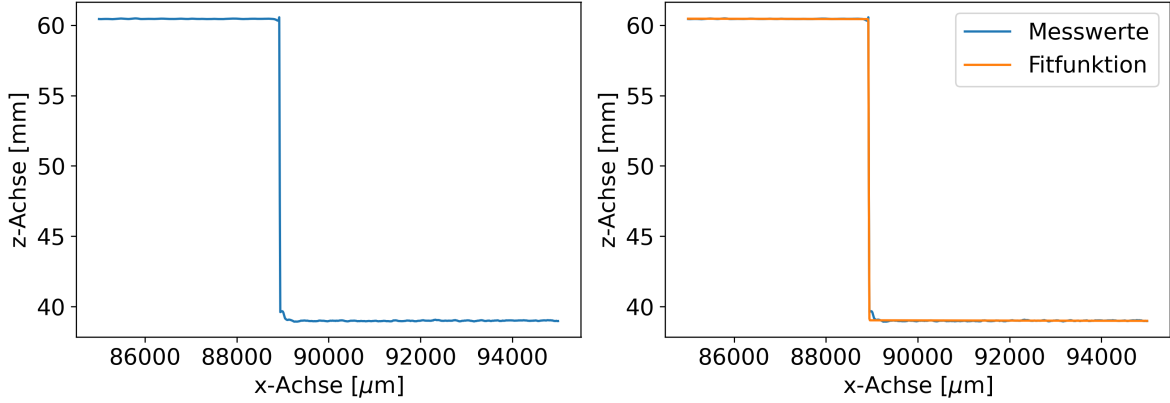


Abbildung 26: Gemessene Distanz, wenn der Laserdistanzsensor in positive x-Richtung über die Kante des Messschiebers gefahren wird.

Die Messung wurde 100 mal durchgeführt, wobei die r-Achse bei jeder Messung um 10 µm in y-Richtung verschoben wurde, um den ganzen Bereich abzudecken, in dem die r-Achse den Messschieber berührt haben könnte. Um die Position der Kante in Abhängigkeit vom Laserdistanzsensor zu erhalten, wurde über die 100 Messungen gemittelt. Der Fehler wurde über Gleichung 12 berechnet, wobei σ_{fit} dem berechneten Mittelwert der 100 Messungen und σ_{Achse} der absoluten Genauigkeit der Achsen entspricht. Die Kante liegt demnach bei der Position $x_{\text{Laser}} = (88468 \pm 11) \mu\text{m}$.

Der Abstand zwischen der r-Achse und dem Laserdistanzsensor in x-Richtung ergibt sich aus der Differenz der vom Laserdistanzsensor bestimmten Position der Kante x_{Laser} und aus der zuvor notierten Position, die durch die Kollision von r-Achse und der Kante des Messschiebers bestimmt wurde. Diese Position liegt bei $x_{\text{r-Achse}} = (120000 \pm 10) \mu\text{m}$, wobei als Fehler die absolute Genauigkeit der x-Achse verwendet wurde. Um den Abstand vom Laserdistanzsensor zum Mittelpunkt der r-Achse zu erhalten, muss der Radius der r-Achse ebenfalls berücksichtigt werden. Dieser beträgt $r = 3000 \pm 4 \mu\text{m}$ [8]. Der Abstand in x-Richtung ergibt sich somit wie folgt

$$\delta x = x_{\text{r-Achse}} - x_{\text{Laser}} + r = 34532 \mu\text{m},$$

$$\Delta(\delta x) = \sqrt{\Delta x_{\text{r-Achse}}^2 + \Delta x_{\text{Laser}}^2 + \Delta r^2} = 16 \mu\text{m}.$$

Der Fehler wurde dabei über Gaußsche Fehlerfortpflanzung bestimmt. Das gleiche Verfahren wird für die y-Richtung durchgeführt, wobei der Messschieber um 90 ° im Uhrzeigersinn relativ

zur in Abbildung 25 gezeigten Position gedreht wird und die r-Achse in negative y-Richtung gegen die Kante des Messschiebers gefahren wird. Der Abstand in y-Richtung berechnet sich somit wie folgt

$$\delta y = y_{\text{r-Achse}} - y_{\text{Laser}} - r = (63249 \pm 16) \mu\text{m}.$$

Die in diesem Abschnitt berechneten Abstände in x- und y-Richtung werden mit den mittels des Laserdistanzsensors bestimmten Koordinaten für den Mittelpunkt eines Glasplättchens addiert, um die Position des Mittelpunkts in Abhängigkeit des Endeffektors zu erhalten und das Glasplättchen am Mittelpunkt ansaugen zu können. Hierbei ist anzumerken, dass diese Messung nach jedem Ausbau des Laserdistanzsensors neu durchgeführt werden muss, da eine Positionierung an der exakt gleichen Stelle nicht gewährleistet werden kann.

5.3.4 Ergebnisse von Testreihe 2

Mit der in Abschnitt 5.3.2 ausgewählten Methode zum Bestimmen des Mittelpunkts und mit dem bekannten Abstand zwischen Laserdistanzsensor und Endeffektor werden die in Kapitel 5.2 durchgeführten Tests mit den gleichen Parametern wiederholt, wobei die Glasplättchen am vom Laserdistanzsensor bestimmten Mittelpunkt angesaugt werden. Die Ergebnisse der acht Messreihen ausgewertet mit dem Leica DMS1000 und dem Konfokalmikroskop sind in Abbildung 27 sowie den Tabellen 5 und 6 gezeigt.

Die Messungen durchgeführt mit dem Leica DMS1000 führen auf Standardabweichungen für den Abstand zwischen den Mittelpunkten, die geringer sind, als der Fehler, der aus der Messmethode resultiert, weswegen hier kein Vergleich der Standardabweichungen durchgeführt werden kann und somit auch keine Verbesserung oder Verschlechterung der Werte im Vergleich zu Testreihe 1 festgestellt werden kann.

Bei der Messung mit dem Konfokalmikroskop fällt auf, dass der Fehler der Messmethode im Vergleich zu Testreihe 1 deutlich gestiegen ist (siehe Tabelle 4). Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die Glasplättchen für diese Testreihe mit schwarzem Lack besprüht wurden, um eine bessere Erkennung mit dem Laserdistanzsensor zu ermöglichen. Das hat dazu geführt, dass die Kanten der Plättchen deutlich unebener wurden und der Fehler für den Geradenfit an die Kanten angestiegen ist und sich der Fehler auf den Abstand dementsprechend ebenfalls vergrößert hat. Die Standardabweichungen sind, mit Ausnahme der Höhe $z = 68700$ Ink, somit wieder niedriger als der Fehler der Messmethode und somit nicht miteinander vergleichbar. Für die zwei Messreihen mit $z = 68700$ Ink wurde eine größere Standardabweichung gemessen. Diese Höhe verursacht somit eine geringere Platzierungspräzision des Roboters, was dadurch begründet werden kann, dass das Plättchen auf den Klebetropfen fallen gelassen wird und es dadurch zu Verschiebungen während des Fallens kommen kann. Dieses Verhalten konnte in Testreihe 1 noch nicht beobachtet werden, da hier vermutlich der durch die unterschiedlichen Größen der Glasplättchen bei einem konstanten Ansaugpunkt resultierende Fehler dominierte. Für die Höhe $z = 69200$ Ink kann eine schlechtere Platzierungspräzision im Vergleich zu den Höhen $z = 69700$ Ink und $z = 70200$ Ink nicht beobachtet werden, obwohl das Plättchen hierbei ebenfalls fallen gelassen wurde. Das liegt vermutlich daran, dass die Höhendifferenz zwischen Position des Endeffektors und des Polyimid-Streifens in diesem Fall nicht so groß ist und das Plättchen somit kürzer fällt und es zu einer geringeren Verschiebung kommt, die mit

der vorhandenen Präzision der Messgeräte nicht erfasst werden kann.

Die Fehler auf die Mittelwerte sind auch für Testreihe 2 für die Messungen mit dem Konfokalmikroskop niedriger als für die Messung mit dem Leica DMS1000. Mit dem Konfokalmikroskop wurden wie auch schon in Testreihe 1 Abweichungen im Bereich von $30\text{ }\mu\text{m}$ gemessen, jedoch mit größeren statistischen Abweichungen im Bereich von $120\text{ }\mu\text{m}$, was daran liegt, dass der Fehler der Messmethode dominierte und dieser im Vergleich zu Testreihe 1 angestiegen ist. Der zu erwartende Abstand zwischen den Glasplättchen ist wie auch schon in Testreihe 1 im Fehlerbereich der mit dem Konfokalmikroskop ermittelten Mittelwerte für die acht Messreihen. Das bedeutet, dass für diese Messreihen kein systematischer Fehler entdeckt werden kann, der dafür sorgt, dass die Plättchen wahrscheinlicher mit einem geringeren oder höherem Abstand platziert werden. Die Messungen mit dem Leica DMS1000 liegen wie schon zuvor wieder unter dem erwarteten Abstand, was auch hier durch die fehlerbehaftete Kalibrierung erklärt werden kann.

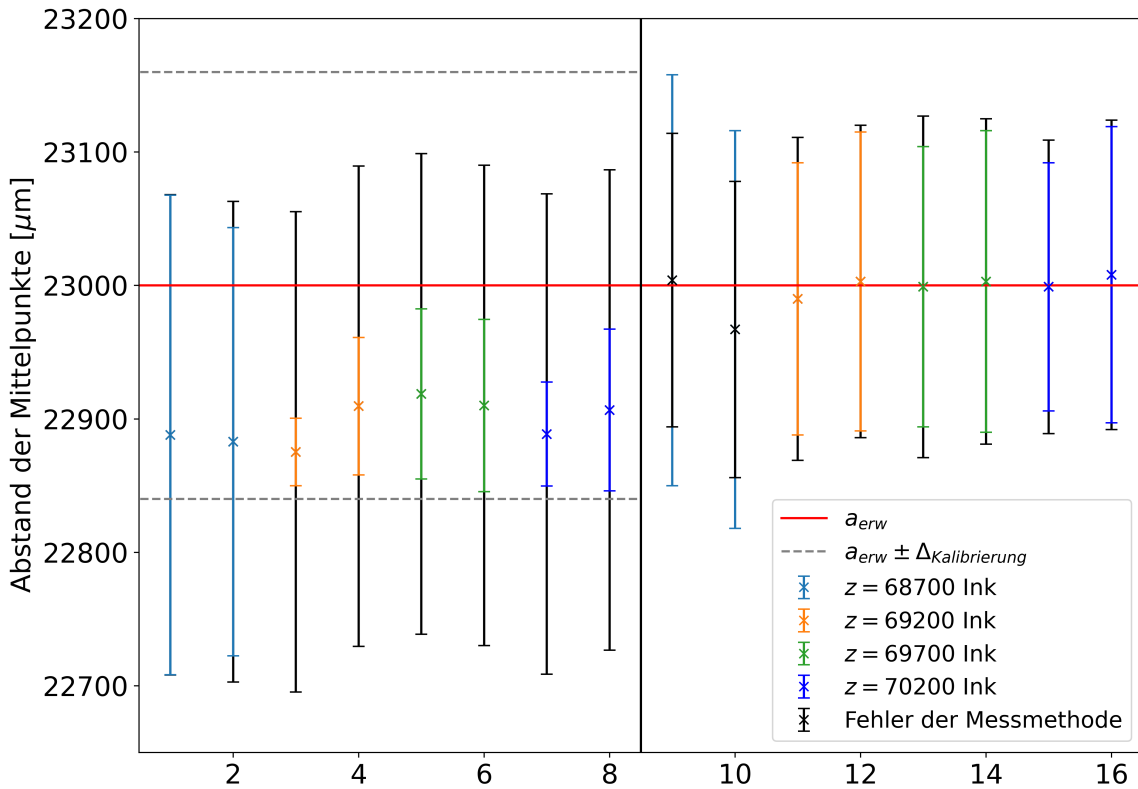


Abbildung 27: Ergebnisse der Abstandsmessung mit dem Leica DMS1000 (links, erste acht Punkte) und mit dem Konfokalmikroskop (rechts, letzte acht Punkte). Die rote Linie gibt den Abstand zwischen den Glasplättchen an, der dem Roboter übergeben wurde. Die graue Linie stellt den aus der Kalibrierung des Leica DMS1000 resultierenden Fehler auf den Abstand, der dem Roboter übergeben wurde, dar. Die farbigen Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung der Abstände an und die schwarzen Fehlerbalken markieren die Ungenauigkeit der verwendeten Messmethode. Der Ansaugpunkt der Glasplättchen wurde dabei mit dem Laserdistanzsensor bestimmt.

Tabelle 5: Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Leica DMS1000. Der Abstand a_L stellt dabei den Mittelwert der Abstände zwischen den 13 Glasplättchen dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet.

Messung	z-Position [Ink]	a_L [μm]	σ [μm]	Δa_{mes} [μm]	Δa_{ges} [μm]
1	68700	22888	179	180	187
2	68700	22883	160	180	186
3	69200	22875	25	180	181
4	69200	22910	52	180	181
5	69700	22919	64	180	181
6	69700	22910	65	180	181
7	70200	22889	39	180	181
8	70200	22907	61	180	181

Tabelle 6: Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Konfokalmikroskop. Der Abstand a_K stellt dabei den Mittelwert der Abstände zwischen den 13 Glasplättchen dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet.

Messung	z-Position [Ink]	a_K [μm]	σ [μm]	Δa_{mes} [μm]	Δa_{ges} [μm]
1	68700	23004	154	110	119
2	68700	22967	149	111	119
3	69200	22990	102	121	125
4	69200	23003	112	117	122
5	69700	22999	105	128	132
6	69700	23003	113	122	126
7	70200	22999	93	110	114
8	70200	23008	111	116	119

Die mit dem Konfokalmikroskop gemessenen Winkel sind im Anhang in Tabelle 9 zu finden. Die gemessenen Standardabweichungen sind wieder niedriger als der Fehler der Messmethode, mit Ausnahme der ersten Messung bei einer Höhe von $z = 68700$ Ink. In diesem Fall wurde eine Standardabweichung gemessen, die um einen Faktor 2 bis 3 mal so groß ist, wie für die übrigen Messungen. Dies kann durch den bereits erwähnten Effekt erklärt werden, dass das Plättchen sich beim herunterfallen verdrehen kann. Das bestätigt die durch die Abstände bereits entdeckte Vermutung, dass eine größere Distanz zwischen Endeffektor und Polyimid-Streifen, zu einer verschlechterten Präzision beim Platzieren der Glasplättchen führt. Die im Anhang in Tabelle 10 aufgelisteten Werte für die Seitenlänge der Glasplättchen weisen wie auch schon in Testreihe 1 Abweichungen von mehr als $100\mu\text{m}$ auf, was nochmal bestätigt, dass die Seitenlänge als freier Parameter in den Fit zur Bestimmung des Mittelpunkts übergeben werden sollte.

5.4 Referenzpunkte

In den bisher durchgeführten Tests wurde die Position der Polyimid-Streifen manuell bestimmt, um die Glasplättchen darauf aufzukleben. Dabei wurde lediglich darauf geachtet, die Glasplättchen nebeneinander mit einem bestimmten Abstand auf dem Streifen zu platzieren. Für den Bau des Spurdetektors müssen die HV-MAPS jedoch an vorgegeben Positionen auf den Polyimid-Streifen geklebt werden, wobei diese nicht mit einer ausreichenden Präzision per Augenmaß bestimmt werden können. In diesem Kapitel wird untersucht, ob der Laserdistanzsensor genutzt werden kann, um Referenzpunkte auf den Polyimid-Streifen zu erkennen, wodurch eine automatisierte Positionierung relativ zu der Position des Polyimid-Streifens ermöglicht wird. Der Laserdistanzsensor wird dabei, ähnlich wie bei der Mittelpunktbestimmung der Glasplättchen, über die Referenzmarke auf dem Polyimid-Streifen bewegt und die Distanz gemessen.

Dazu werden Polyimid-Streifen mit integrierten Referenzpunkten eingesetzt. Ein Ausschnitt eines solchen Streifens ist in Abbildung 28 skizziert. Es wurde ein dreieckiger Referenzpunkt mit einer Seitenlänge von 1 mm sowie ein runder Referenzpunkt mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet, die auch in industriellen Fertigungsmaschinen zum Einsatz kommen. Diese nutzen jedoch optische Erkennungssysteme, weshalb die Referenzpunkte einen hohen optischen Kontrast aufweisen.

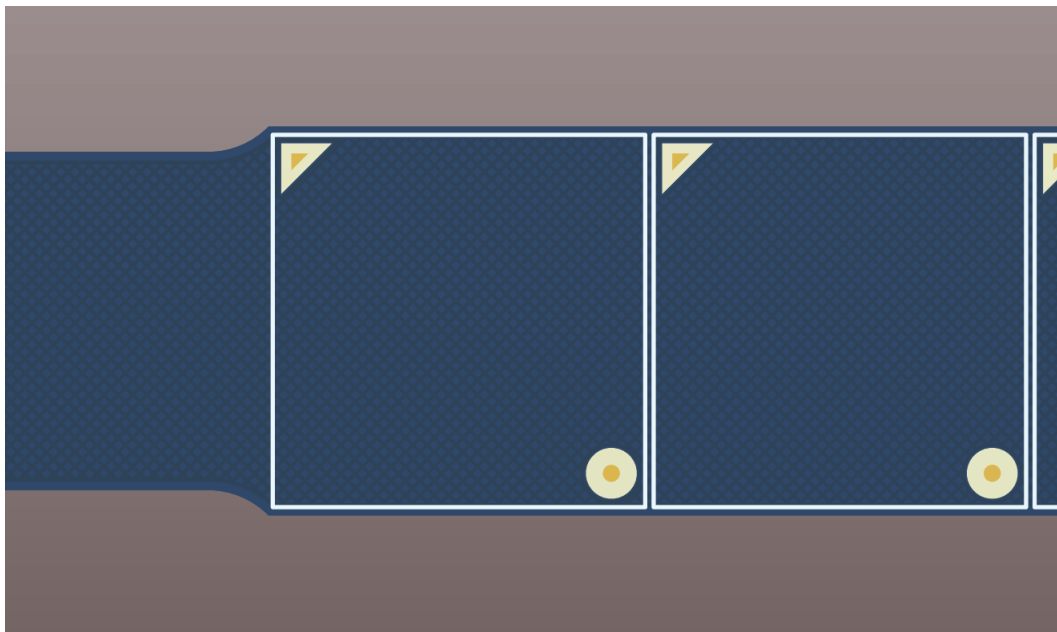


Abbildung 28: Zeichnung eines Ausschnitts der Polyimid-Streifen mit integrierten Referenzpunkten. Dabei wurden ein Dreieck und ein Kreis als Form der Referenzpunkte verwendet. Die weißen Quadrate entsprechen dabei der Größe der verwendeten Glasplättchen

Um das Materialbudget niedrig zu halten, wurden die Höhe der Referenzmarken auf 20 μm begrenzt. Da der Laserdistanzsensor eine Auflösung von 4 μm [9] besitzt, sollte er in der Lage sein, die Formen auf den Polyimid-Streifen zu erkennen. In Kapitel 5.3.1 wurde jedoch gezeigt, dass die Schwankungen der Distanzmessung in der Größenordnung von etwa 10 μm

liegen (siehe Abbildung 17). Es wird vermutet, dass die Schwankungen aus der Schwingung des Roboters während der Bewegung resultiert. Um diesen Effekt zu korrigieren wurde der Laserdistanzsensor nicht kontinuierlich, sondern jeweils nur in Schritten von $2\text{ }\mu\text{m}$ bewegt. Dabei wurde nach jeder Bewegung 3 s gewartet, damit die Oszillationen des Roboters abklingt. Danach wurden etwa 300 Distanzmessungen für die Position durchgeführt über die anschließend gemittelt wurde.

In Abbildung 29 ist eine Messung der Distanzen dargestellt, wobei der Laserdistanzsensor über den kreisförmigen Referenzpunkt gefahren wurde. Der Bereich in dem der Referenzpunkt zu finden sein sollte, wurde durch die orangenen Linien markiert. Ein deutlicher Übergang, wie er zuvor bei den Glasplättchen beobachtet werden konnte, zwischen dem Referenzpunkt und der Oberfläche um den Referenzpunkt lässt sich in diesem Fall nicht erkennen. Die zuvor erläuterte Methode scheint die Schwankungen in der Distanzmessung demnach nicht stark genug zu reduzieren, um ein Objekt in dieser Größenordnung mit dem Laserdistanzsensor auflösen zu können.

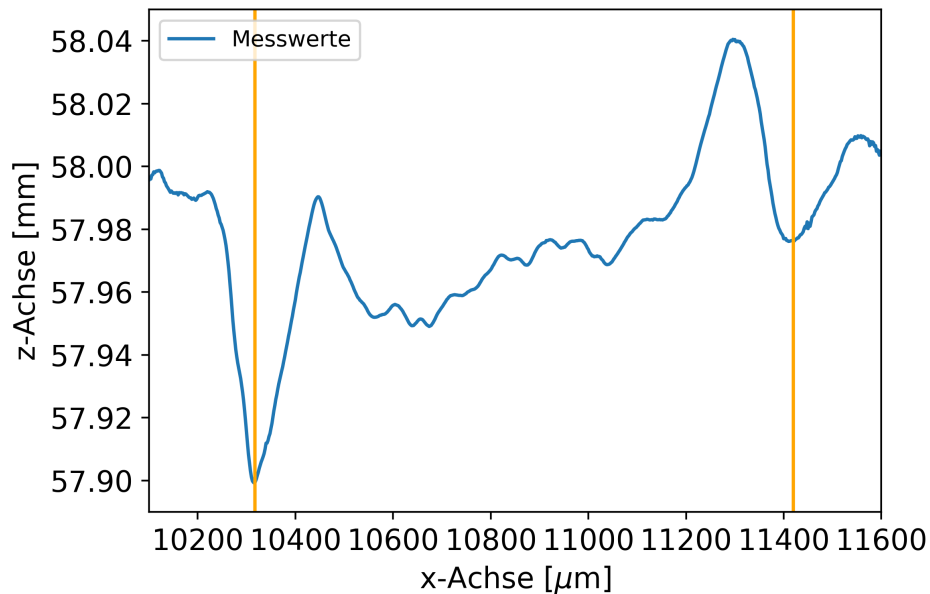


Abbildung 29: Gemessene Distanz, wenn der Laserdistanzsensor in x-Richtung über den kreisförmigen Referenzpunkt gefahren wird. Die orangenen Linien geben dabei den Bereich an, in dem der Referenzpunkt sich befinden sollte.

Da die Oberfläche der Referenzpunkte glänzend ist, wurde vermutet, dass die Distanzmessung durch die Reflektionseigenschaften der Oberfläche des Referenzpunktes beeinträchtigt wird. Um dies überprüfen zu können, wurde der Referenzpunkt mit einem schwarzen Stift angemalt, um eine nicht glänzende Oberfläche zu erhalten. Das führte jedoch nicht zu einem besseren Ergebnis, da die Farbe des Stiftes zu einem ungleichmäßigem Höhenprofil führt und zudem nicht sichergestellt werden konnte, dass nur der Referenzpunkt und nicht die Fläche um diesen, angemalt wurden.

Die Höhe der Referenzpunkte müsste somit erhöht werden, um sie mit dem Laserdistanzsensor klar auflösen zu können. Das würde jedoch das Materialbudget erhöhen, was wiederum zu ungewollter Mehrfachstreuung während des P2-Experiments führt.

6 Fazit & Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde erfolgreich ein Unterdruck-Ansaugsystem an der Struktur des Kleberoboters angebracht, womit dieser genutzt werden kann, um Objekte anzusaugen und wieder abzulegen. Die Ansteuerung dieses Systems ist kompatibel mit der Python- und C++-Bibliothek zur Kontrolle der Roboterachsen, wodurch eine Steuerung aller am Roboter angebauten Geräte (Roboterachsen, Laserdistanzsensor, Jet-Dispenser-Steuergerät und Unterdruck-Ansaugsystem) durch ein Python- bzw. C++-Programm ermöglicht wird.

Zur Untersuchung der Platzierungspräzision des Kleberoboters wurde zwei Testreihen durchgeführt, die jeweils mit einem digitalem Mikroskopiersystem und einem Konfokalmikroskop ausgewertet wurden. Die erste Testreihe, bei der der Ansaugpunkt per Augenmaß ausgewählt wurde, zeigt, dass die Genauigkeit des Mikroskopiersystems nicht ausreicht, um die Präzision des Roboters aussagekräftig messen zu können, da sämtliche gemessenen Standardabweichungen geringer waren als der Fehler der Messmethode. Die Auswertung der acht Messungen der ersten Testreihe mit dem Konfokalmikroskop ergab, dass die Plättchen mit einem mittleren Abstand im Bereich von etwa $30\text{ }\mu\text{m}$ um den Abstand $23000\text{ }\mu\text{m}$, der dem Roboter zum Platzieren der Glasplättchen übergeben wurde, platziert wurden. Mit einem Fehler im Bereich von $70\text{ }\mu\text{m}$ liegen somit alle Messungen im Bereich des erwarteten Abstands. Die Standardabweichungen der mit dem Konfokalmikroskop gemessenen Abstände für die acht Messungen lagen alle im Bereich von etwa $110\text{ }\mu\text{m}$, weshalb keine signifikante Abweichung für eine bestimmte Höhe beobachtet werden konnte. Dies lässt darauf schließen, dass der dominierende Fehler hierbei nicht durch die Höhe des Endeffektors gegeben ist, sondern durch die Varianz der Größe der Glasplättchen, oder einen bisher noch nicht bekannten Faktor. Um hierbei eine genauere Untersuchung der Abweichungen der Standardabweichungen für unterschiedliche Höhen des Endeffektors durchzuführen, reichen die vorhandenen Messmethoden nicht aus.

Um eine bessere Präzision zu erzielen, wurde in Testreihe 2 der Mittelpunkt der Glasplättchen mit dem Laserdistanzsensor ermittelt, um die Plättchen an diesem anzusaugen. Mit dem digitalen Mikroskopiersystem konnte keine Verbesserung oder Verschlechterung der Präzision im Vergleich zu Testreihe 1 festgestellt werden, da wieder der Fehler der Messmethode dominierte und größer war als die gemessenen Standardabweichungen. Die Abstandsbestimmung mit dem Konfokalmikroskop ergab für Testreihe 2 ähnliche Werte für den Abstand im Bereich von $30\text{ }\mu\text{m}$ um den erwarteten Wert. Da die Glasplättchen für diese Testreihe jedoch schwarz lackiert wurden, um den Mittelpunkt präziser bestimmen zu können, stieg der aus der Messmethode resultierende Fehler an, weshalb die Fehler der Mittelpunkte im Bereich von $120\text{ }\mu\text{m}$ lagen. Lediglich die Standardabweichungen für die Messungen der Höhe $z = 68700\text{ Ink}$ lagen über dem Fehler der Messmethode. Daraus kann geschlossen werden, dass eine größere Höhendifferenz zwischen Endeffektor und Polyimid-Streifen die Platzierungspräzision verschlechtert, da das Plättchen länger fällt und somit länger durch die Umgebungsluft beeinflusst und verschoben wird. Die Messungen für die übrigen drei Höhen können nicht aussagekräftig miteinander und mit den Ergebnissen von Testreihe 1 verglichen werden. Somit ist eine Überprüfung der verwendeten Methode der Mittelpunktsbestimmung ebenfalls nicht möglich. Abschließend kann hierbei das Fazit gezogen werden, dass eine alternative Messmethode notwendig ist, um die Testreihen aussagekräftig miteinander vergleichen zu können und die Präzision mit einer Genauigkeit untersuchen zu können, die für das P2-Experiment gefordert wird. Dafür könnte der am Kleberoboter montierte Laserdistanzsensor verwendet werden und, ähnlich wie bei der Mittelpunktbestimmung, die Position der Plättchen zueinan-

der bestimmt werden. Diese Methode wurde zunächst ausgeschlossen, da eine Messmethode bevorzugt wird, die unabhängig vom Kleberoboter ist. Da sich diese Methoden jedoch als ungeeignet erwiesen haben, bietet sich eine Messreihe mit dem Lasersensor an.

In weiteren Analysen des Araldite[®] 2011 hatte sich bereits gezeigt, dass die gewählten Kleberparameter für die beiden Testreihen nicht das optimale Parameterset darstellen. Die durchgeführten Tests sollten somit für die optimalen Parameter wiederholt werden, um zu überprüfen, ob mit diesen eine bessere Platzierungspräzision erreicht werden kann. Neben dem Araldite[®] 2011 wird auch der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 als Kleber für den Bau des P2-Spurdetektors in Erwägung gezogen. Dieser kann durch Bestrahlung mit UV-Licht innerhalb weniger Minuten ausgehärtet werden, wodurch der Vorteil entsteht, dass der Roboter nach dem Bekleben eines Streifens direkt wieder benutzt werden kann und keine 2 Stunden gewartet werden muss, bis der Kleber aushärtet. Die Untersuchung der Platzierungspräzision unter Verwendung des DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 bietet sich somit ebenfalls an.

Um die Glasplättchen und später die HV-MAPS an einer bestimmten Position auf dem Polyimid-Streifen platzieren zu können und somit nicht von den absoluten Koordinaten des Roboters abzuhängen, wurde der Laserdistanzsensor verwendet, um Referenzpunkte auf dem Streifen zu erkennen. Da das Materialbudget innerhalb des P2-Experiments niedrig gehalten werden muss, ist die Höhe dieser Referenzpunkte begrenzt. Die in dieser Arbeit verwendeten Referenzpunkte mit einer Höhe von 20 µm konnten, aufgrund von zu starken Schwankungen der Messwerte, nicht eindeutig anhand des vom Laserdistanzsensors ermittelten Höhenprofils lokalisiert werden. Da die Referenzpunkte über einen hohen optischen Kontrast verfügen, ist vermutlich ein optisches System geeigneter, um die Position der Referenzpunkte zu bestimmen. Die Anbringung einer Kamera am Roboter würde zudem die Möglichkeit eröffnen, eine zusätzliche Methode zur Bestimmung des Mittelpunktes der Glasplättchen bzw. der HV-MAPS zu entwickeln.

Literatur

- [1] Paul Langacker. *The Standard Model and Beyond*. CRC Press, Juni 2017. DOI: [10.1201/b22175](https://doi.org/10.1201/b22175).
- [2] Dominik Becker u. a. “The P2 experiment”. In: *The European Physical Journal A* 54.11 (Nov. 2018). DOI: [10.1140/epja/i2018-12611-6](https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12611-6).
- [3] Jörn Bleck-Neuhaus. *Elementare Teilchen*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. DOI: [10.1007/978-3-540-85300-8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85300-8).
- [4] Marco Zimmermann. “Particle Rate Studies and Technical Design Development for the P2 Silicon Pixel Tracking Detector”. Ph.D. Thesis, Universität Mainz, 2019. DOI: [10.25358/OPENSOURCE-2344](https://doi.org/10.25358/OPENSOURCE-2344).
- [5] Niklaus Berger u. a. “A tracker for the Mu3e experiment based on high-voltage monolithic active pixel sensors”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 732 (Dez. 2013), S. 61–65. DOI: [10.1016/j.nima.2013.05.035](https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.05.035).
- [6] M. Fleischer. *Qualitätsprüfzertifikat*. Techn. Ber. PLANOLITH, 2020.
- [7] Jenny Science AG. *Datenblatt LINAX®*. 2021.
- [8] Jenny Science AG. *Datenblatt ROTAX® Rxxp (vakuum pressure)*. 2020.
- [9] Baumer. *Betriebsanleitung OM70 - High Performance Distanzsensoren mit Ethernet-Schnittstelle*. 2021.
- [10] Patrick Riederer. *Calibration of a glueing robot for assembly of the P2 tracking detector*. Bachelorarbeit, Universität Mainz, 2021.
- [11] Jenny Science AG. *Anleitung XENAX® Xvi 75V8*. 2021.
- [12] Lars Steffen Weinstock. *Git-Repository labdev*. Website. zuletzt abgerufen am 07. Februar 2022. URL: <https://gitlab.rlp.net/lweinsto/labdev/-/tree/master>.
- [13] Jana Weyrich. “Entwicklung einer Klebestrategie für den Bau des P2-Spurdetektors”. Bachelorarbeit, Universität Mainz, 2022.
- [14] SMC. *Series Catalog*. 2012.
- [15] Jenny Science AG. *PLC Kabel geschirmt 26 Pol.*
- [16] Leica Camera AG. *Leica DMS1000 Benutzerhandbuch*.
- [17] NanoFocus AG. *Technische Dokumentation μ surf sensor E 350 HDR*.
- [18] Huntsman. *Araldite®2011 Technical data sheet*. 2021.

Abbildungsverzeichnis

1	Abhängigkeit des elektroschwachen Mischungswinkels $\sin \theta_W^2$ von μ	2
2	CAD-Zeichnung des Aufbaus des P2-Experiments.[2]	3
3	Feynman-Diagramm der elastischen Elektron-Proton Streuung unter Austausch eines a) Photons bzw. eines b) Z^0 -Bosons.	4
4	CAD-Zeichnung eines Detektormoduls.	6
5	Frontansicht des Kleberoboters.	8
6	Nahaufnahme des Arbeitsbereichs	9
7	Darstellung der beiden Schaltstellungen der Magnetventile.	11
8	Skizze des pneumatischen Systems des Kleberoboters.	12
9	Screenshot des Menüs zur Steuerung der Output Pins des Xenax Servocontrollers im Web-Interface.	15
10	Messung des Abstandes der Mittelpunkte zweier schwarz lackierter Glasplättchen mit dem Leica DMS1000.	17
11	Darstellung der Fehler der Abstandsmessung mit dem Leica DMS1000.	18
12	Mit dem Konfokalmikroskop aufgenommenes Höhenprofil von zwei Eckpunkten von zwei nebeneinander geklebten Glasplättchen.	19
13	Oben: Höhenprofil eines Schnitts für feste y-Koordinate. Die über die Steigung bestimmte Position der Kante ist dabei in rot eingezeichnet. Unten: Differenz der z-Werte für jeweils zwei benachbarte Punkte. Die Fehler der Kantenposition wurde nicht eingezeichnet, da diese zu klein sind, um sie von der Position der Kante unterscheiden zu können	20
14	Mit dem Konfokalmikroskop aufgenommenes Höhenprofil von zwei Eckpunkten von zwei nebeneinander geklebten Glasplättchen. Die roten Linien stellen die an die Kanten gefitteten Geraden dar. Der Schnittpunkt der beiden Geraden markiert die Position des Eckpunktes.	21
15	Ergebnisse der Abstandsmessung mit dem Leica DMS1000 (links, erste acht Punkte) und mit dem Konfokalmikroskop (rechts, letzte acht Punkte).	23
16	Darstellung der Distanz zwischen Lasersensor und Granitplatte/Glasplättchen.	26
17	Darstellung einer Distanzmessung in x-Richtung (oben) und in y-Richtung (unten) und der an die Werte gefitteten Fitfunktion (Gleichung 11).	27
18	Darstellung des an die Kantenpunkte gefitteten Glasplättchens	29
19	Bestimmung der Fehler der Parameter über die Methode der kleinsten Quadrate.	29
20	Fehler der x- und y-Koordinate des Mittelpunkts eines Glasplättchen für unterschiedliche Geschwindigkeiten.	30
21	Querschnitt der verwendeten Halterung mit dem auf dem Plateau abgelegten Glasplättchen sowie Veranschaulichung des Messprinzips des Laserdistanzsensors.	31
22	Fehler der x- und y-Koordinate des Mittelpunkts eines Glasplättchen auf einem Plateau.	32
23	Fehler des Winkels θ zwischen Kanten des Plättchens und x- bzw. y-Achse.	33
24	Darstellung der reduzierten Chi-Quadrate.	34
25	Aufbau zur Messung des Abstands zwischen Laserdistanzsensor und r-Achse in x-Richtung.	35
26	Gemessene Distanz, wenn der Laserdistanzsensor in positive x-Richtung über die Kante des Messschiebers gefahren wird.	36

27	Ergebnisse der Abstandsmessung mit dem Leica DMS1000 (links, erste acht Punkte) und mit dem Konfokalmikroskop (rechts, letzte acht Punkte).	38
28	Zeichnung eines Ausschnitts der Polyimid-Streifen mit integrierten Referenzpunkten.	40
29	Gemessene Distanz, wenn der Laserdistanzsensor in x-Richtung über den kreisförmigen Referenzpunkt gefahren wird.	41
30	Kabelplan für das Verbindungskabel zwischen Xenax Servocontroller (W1B), Steuermodul der Ventilinsel (P2B) und Jet-Dispenser Steuergerät (P1B). . . .	47
31	Kalibrierung des Leica DMS100 mit einem Messschieber der auf 40.00 mm eingestellt wurde.	48
32	CAD-Zeichnung der Halterung der Polyimid-Streifen.	49
33	CAD-Zeichnung der Halterung der Glasplättchen.	49

Tabellenverzeichnis

1	Parameter der LINAX [®] [7] und ROTAX [®] [8] Achsen von Jenny Science AG. .	7
2	Berechnung der Dezimalzahl, die dem SOT-Befehl übergeben wird, sodass Output 1 eine Stromsenke und die übrigen Outputs Stromquellen darstellen. . . .	14
3	Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Leica DMS1000.	24
4	Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Konfokalmikroskop.	25
5	Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Leica DMS1000.	39
6	Gemessene Abstände der Mittelpunkte mit dem Konfokalmikroskop.	39
7	Gemessene Winkel zwischen den Kanten der Glasplättchen und der x- bzw. y-Achse mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt manuell bestimmt wurde.	50
8	Gemessene Kantenlänge der Glasplättchen mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt manuell bestimmt wurde.	50
9	Gemessene Winkel zwischen den Kanten der Glasplättchen und der x- bzw. y-Achse mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt mit dem Laserdistanzsensor bestimmt wurde.	51
10	Gemessene Kantenlänge der Glasplättchen mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt mit dem Laserdistanzsensor bestimmt wurde.	51

A Anhang

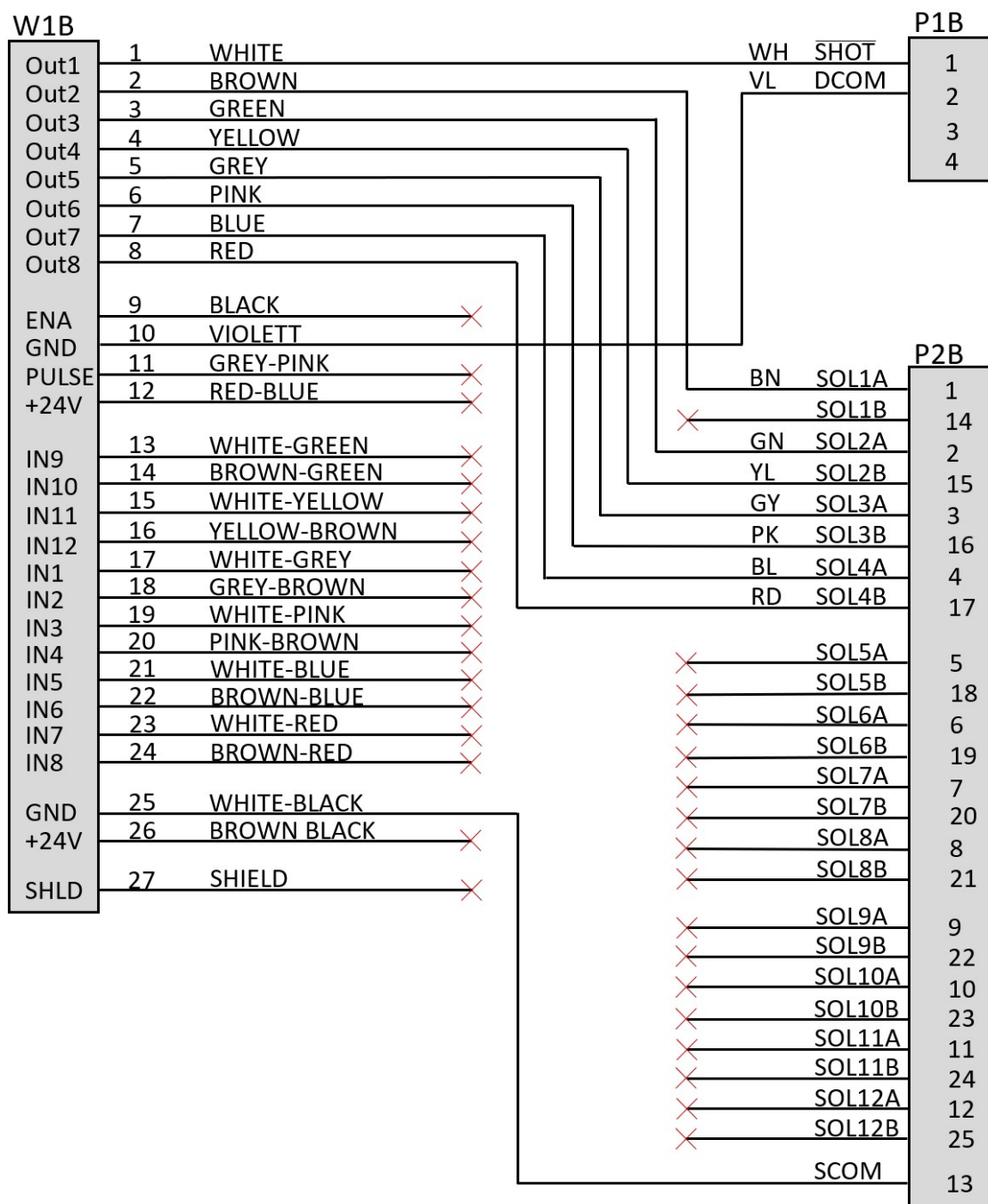


Abbildung 30: Kabelplan für das Verbindungskabel zwischen Xenax Servocontroller (W1B), Steuermodul der Ventilinsel (P2B) und Jet-Dispenser Steuergerät (P1B). Die Bezeichnung SOL steht dabei für Solenoid, die dahinter stehenden Zahl für die Nummer des Magnetventilmoduls und der Buchstabe für das entsprechende Magnetventil (siehe Abbildung 8).

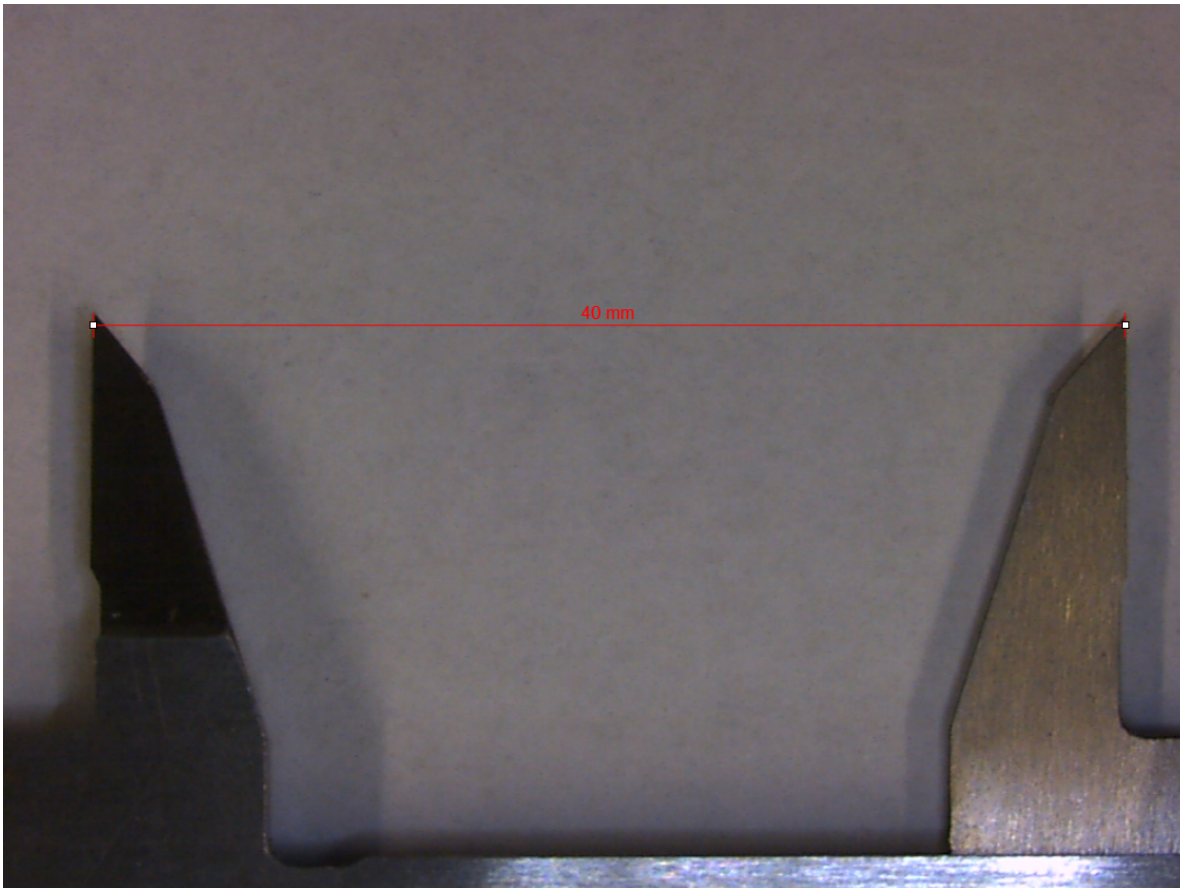


Abbildung 31: Kalibrierung des Leica DMS100 mit einem Messschieber der auf 40.00 mm eingestellt wurde.

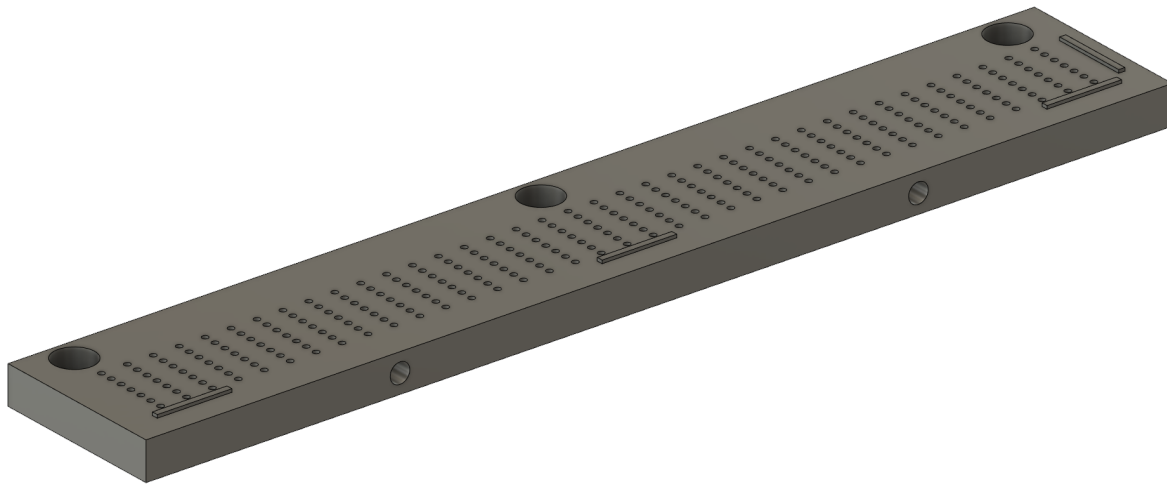


Abbildung 32: CAD-Zeichnung der Halterung der Polyimid-Streifen. In die Löcher an der Seite werden M5 Flush Einlassgewinde eingesetzt, die über einen Schlauch mit der Ventilinsel verbunden werden. Somit kann der Druck der an den Löchern an der Oberseite zwischen Außendruck und Unterdruck variiert werden.

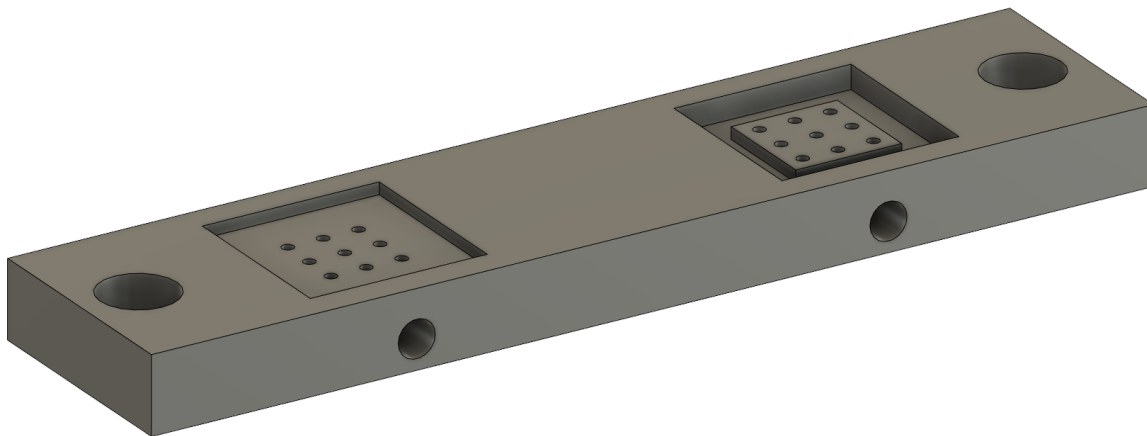


Abbildung 33: CAD-Zeichnung der Halterung der Glasplättchen für die Mittelpunktansaugung. Dabei wurde. In die Löcher an der Seite werden M5 Flush Einlassgewinde eingesetzt, die über einen Schlauch mit der Ventilinsel verbunden werden. Somit kann der Druck der an den Löchern an der Oberseite zwischen Außendruck und Unterdruck variiert werden.

Tabelle 7: Gemessene Winkel zwischen den Kanten der Glasplättchen und der x- bzw. y-Achse mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt manuell bestimmt wurde. θ_{Konfokal} stellt dabei den Mittelwert der Winkel dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet. $\Delta\theta_{\text{mess}}$ stellt den Fehler der Messmethode und $\Delta\theta_{\text{ges}}$ den Fehler auf den Mittelwert, der mit Gleichung 10 ausgerechnet wurde, dar.

Messung	z-Position [Ink]	θ_K [°]	σ [°]	$\Delta\theta_{\text{mess}}$ [°]	$\Delta\theta_{\text{ges}}$ [°]
1	68700	-0.01	0.05	0.11	0.12
2	68700	0.02	0.12	0.11	0.11
3	69200	-0.01	0.13	0.11	0.12
4	69200	-0.01	0.13	0.13	0.14
5	69700	0.06	0.10	0.11	0.11
6	69700	0.03	0.07	0.12	0.12
7	70200	0.09	0.12	0.10	0.11
8	70200	-0.07	0.19	0.11	0.13

Tabelle 8: Gemessene Kantenlänge der Glasplättchen mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt manuell bestimmt wurde. Die Länge l_K stellt dabei den Mittelwert der Seitenlänge der 13 Glasplättchen dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet. Δl_{mess} stellt den Fehler der Messmethode und Δl_{ges} den Fehler auf den Mittelwert, der mit Gleichung 10 ausgerechnet wurde, dar.

Messung	z-Position [Ink]	l_K [μm]	σ [μm]	Δl_{mess} [μm]	Δl_{ges} [μm]
1	68700	21888	93	33	42
2	68700	21908	122	32	47
3	69200	21945	177	32	60
4	69200	21946	223	37	74
5	69700	22037	153	32	55
6	69700	22068	96	33	43
7	70200	21892	184	32	62
8	70200	21959	148	32	53

Tabelle 9: Gemessene Winkel zwischen den Kanten der Glasplättchen und der x- bzw. y-Achse mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt mit dem Laserdistanzsensor bestimmt wurde. θ_K stellt dabei den Mittelwert der Winkel dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet. $\Delta\theta_{\text{mess}}$ stellt den Fehler der Messmethode und $\Delta\theta_{\text{ges}}$ den Fehler auf den Mittelwert, der mit Gleichung 10 ausgerechnet wurde, dar.

Messung	z-Position [Ink]	θ_K [°]	σ [°]	$\Delta\theta_{\text{mess}}$ [°]	$\Delta\theta_{\text{ges}}$ [°]
1	68700	-0.25	0.52	0.19	0.25
2	68700	0.09	0.13	0.20	0.20
3	69200	-0.03	0.19	0.20	0.21
4	69200	0.13	0.20	0.21	0.22
5	69700	0.07	0.15	0.22	0.22
6	69700	-0.03	0.19	0.20	0.21
7	70200	0.17	0.18	0.19	0.20
8	70200	0.05	0.08	0.19	0.19

Tabelle 10: Gemessene Kantenlänge der Glasplättchen mit dem Konfokalmikroskop, wobei der Ansaugpunkt mit dem Laserdistanzsensor bestimmt wurde. Die Länge l_K stellt dabei den Mittelwert der Seitenlänge der 13 Glasplättchen dar. Die statistischen Fehler wurden dabei über die Standardabweichung der Abstände ausgerechnet. Δl_{mess} stellt den Fehler der Messmethode und Δl_{ges} den Fehler auf den Mittelwert, der mit Gleichung 10 ausgerechnet wurde, dar.

Messung	z-Position [Ink]	l_K [μm]	σ [μm]	Δl_{mess} [μm]	Δl_{ges} [μm]
1	68700	22193	530	56	163
2	68700	21907	133	57	68
3	69200	21939	271	59	98
4	69200	22001	137	60	72
5	69700	21982	136	65	76
6	69700	21989	309	61	108
7	70200	21913	138	57	69
8	70200	21949	75	58	62

B Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich noch bei allen Bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein erster Dank gilt hierbei Prof. Dr. Niklaus Berger, der mir die Möglichkeit eröffnete meine Bachelorarbeit in seiner Arbeitsgruppe zu schreiben und sich währenddessen stets Zeit genommen hat, um mir bei Unklarheiten zu helfen.

Ebenfalls möchte ich mich meinem Betreuer Lars Weinstock danken, der immer bereit war, mir bei Problemen zu helfen und meine Fragen zu beantworten.

Den Mitarbeitern des Prisma-Detektorlabors möchte ich an dieser Stelle auch dafür danken, dass sie immer bereit waren zu helfen, falls mal wieder die Software einiger Geräte nicht funktioniert hat. Hierbei möchte ich vor allem Peter Bernhard erwähnen, der stets bereit war zu helfen, falls Probleme am Roboter auftraten.

Außerdem möchte ich bei Tobias Sparmann und Lisa Anthofer für das Korrekturlesen meiner Arbeit bedanken, sowie bei Simon Fröhlich für die Beantwortung einiger Fragen rund ums Thema Programmieren.

Einen großen Dank möchte ich auch an Jana Weyrich aussprechen, mit der die Zeit im Labor immer sehr unterhaltsam war und einem so nie langweilig geworden ist.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen Freunden, die die letzten Semester trotz stressiger Phasen zu einer unvergesslichen und schönen Zeit gemacht haben.

Zu guter Letzt danke ich meinen Eltern sowie Großeltern, die mir überhaupt erst ermöglicht haben, dieses Studium absolvieren zu können.