

Entwicklung einer Schrittmotoransteuerung für den Fluoreszenzdetektor am SIS100

Development of a stepper motor control for the fluorescence detector at SIS100

BACHELORARBEIT im Fachbereich Physik der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

> vorgelegt von NIKLAS NEFIGMANN

Institut für Kernphysik Westfälische Wilhelms-Universität Münster August 2022

Erstgutachter: Dr. Volker Hannen

Zweitgutachter: Prof. Dr. Christian Weinheimer

Plagiatserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über das Thema

Entwicklung einer Schrittmotoransteuerung für den Fluoreszenzdetektor am SIS100

selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in einer Datenbank einverstanden.

(Datum, Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

1	Einf	Einführung						
2	The 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6	Theoretische Grundlagen 2.1 Das Beschleunigerzentrum FAIR 2.2 Strahlkühlung 2.2.1 Elektronenkühlen und Stochastisches Kühlen 2.2.2 Laserkühlen 2.3 Röntgenstrahlung 2.4 Multi-Channel-Plate Detektoren 2.5 Beugungsgitter 2.6 Sabrittmataran						
3	Gep	lantes Detekt	Design des SIS100 Fluoreszenzdetektors	17 17 17				
	3.2	Komp	onenten	17				
		3.2.1	Hintergrundschild	17				
		3.2.2	Ortsaufgelöster Multi-Channel-Plate Detektor	18				
		3.2.3	Beugungsgitter	19				
	22	3.2.4 Botrio	bemodi	1:				
	3.0	Schrit	tmotoren und Elektronik	$\frac{2}{2}$				
	0.1	3.4.1	Bewegungsoperationen der Schrittmotoren	$\frac{1}{2}$				
		3.4.2	Kommunikation mit den Controllern über das Modbus Protokoll	24				
4	Gra	phische	e Oberfläche zur Steuerung des Detektors	27				
•	4.1	Backer	nd	2				
		4.1.1	Vereinfachung der Kommunikation durch MinimalModbus	2'				
		4.1.2	Steuerung der Bremsen für die Schrittmotoren	28				
		4.1.3	Threading	28				
		4.1.4	PyQt Slots & Signals	2				
	4.0	4.1.5	Standardwerte und Logging	29				
	4.2	Fronte	Md	ა ე				
		4.2.1	Main Window	ט כי				
		т.2.2		0				
5	Mes	sunger	ı am Testaufbau	3				
	5.1	Genau	ugkeit der Home-Position	38				
	5.2	5.2 Unsicherheiten der Linearpotentiometer						
		5.2.1	Messungen mit zwei Potentiometern bei verschiedenen Auslen-					
		r 0.0	kungen	4				
		5.2.2 5.2.2	Messungen mit den Multimetern	4				
		0.2.3		4				

	5.3	Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Positionierung	47				
		5.3.1 Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors	47				
		5.3.2 Auslenkung der Messuhr gegen die Potentiometer	49				
		5.3.3 Potentiometer gegen die Schrittzahl des Motors	51				
		5.3.4 Messung mit der genaueren Messuhr	51				
		5.3.5 Messung ohne Messuhr	53				
		5.3.6 Diskussion \ldots	54				
	5.4	Sprünge der Auslenkung beim Ein- bzw. Ausschalten der Bremse	55				
	5.5	Synchrone Bewegung zweier Lineardurchführungen	57				
6	Zusa	ammenfassung und Ausblick	59				
	6.1	Zusammenfassung	59				
	6.2	Ausblick	60				
Α	Anhang						
	A.1	Technische Zeichnungen	63				
	A.2	Datenblätter	65				
		A.2.1 RoentDek DLD40 Microchannel Plate Detector with delay-line					
		anode	65				
		A.2.2 Shimadzu Laminar Gratings for Soft X-ray Region	67				
	A.3	Modbus RTU: Communication mode and communication timing	69				
	A.4	Messungen	70				
Lit	erati	ırverzeichnis	77				

1 Einführung

Die Faszination an der Natur hat den Menschen schon immer dazu getrieben, diese besser verstehen zu wollen, ob auf großen Skalen oder auf kleinen. Ziel der *Gesellschaft für Schwerionenforschung* (GSI) ist es, ein genaueres Verständnis des Aufbaus und der Eigenschaften von Materie zu gewinnen. Dazu werden die bestehenden Gebäude an der GSI um die *Facility for Antiproton and Ion Research* (FAIR) erweitert. Dort können dann extreme Bedingungen, wie sie sonst nur beim Urknall oder in riesigen Sternen existieren, simuliert werden und Teilchen in Speicherringen gefangen werden, um verschiedenste Messungen an diesen durchzuführen. Die am FAIR gesammelten Erkenntnisse können unter anderem dabei helfen, Rückschlüsse auf die Entstehung und Entwicklung des Universums zu ziehen, mehr über dessen Bausteine zu erfahren, sowie Verfahren in der Medizin und Technik zu entwickeln.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Schrittmotoransteuerung für den Fluoreszenzdetektor, der beim Laserkühlen am SIS100 Beschleuniger verwendet wird. Für die Diagnose des Laserkühlen wird ein Detektor benötigt, der die dabei entstehenden Fluoreszenzphotonen energieaufgelöst nachweist. Die Schrittmotoransteuerung dient dazu, um auch während des Betriebs des Teilchenbeschleunigers die Komponenten des Detektors für optimale Auflösung und Effizienz positionieren zu können. Ziel ist es dabei, die Komponenten bis auf 10 μ m genau einstellen zu können, weshalb nach der Erklärung der Funktionsweise des Detektors und der Steuersoftware einige Messungen an einem Testaufbau präsentiert werden. Die Arbeit schließt mit einem kurzen Ausblick über die Weiterentwicklung des Detektors, sowie der Steuersoftware ab.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt soll kurz das GSI Beschleunigerzentrum und die Forschungsvorhaben am FAIR vorgestellt werden. Zudem werden das Kühlen von Ionenstrahlen, sowie weitere theoretische Grundlagen, die zum Verständnis des Fluoreszenzdetektors nötig sind, erläutert.

2.1 Das Beschleunigerzentrum FAIR

In Darmstadt entsteht seit Sommer 2017 eine der größten und komplexesten Teilchenbeschleuniger-Anlagen der Welt. Das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR wird als Erweiterung der bereits bestehenden Beschleunigeranlage des *GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung* gebaut und soll 2025 für die ersten Experimente in Betrieb genommen werden, bevor die Bau- und Errichtungsmaßnahmen 2027 fertiggestellt werden.

Herzstück der FAIR-Anlage ist der unterirdische Ringbeschleuniger SIS100 mit einem Umfang von 1100 Metern, der Ionen aller natürlichen Elemente des Periodensystems, sowie Antiprotonen bis auf 99 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann. Dabei dienen die bereits existierenden Beschleuniger am GSI als erste Beschleunigungsstufe. Der 120 Meter lange UNILAC (*Universal Linear Accelerator*) beschleunigt die Ionen zunächst auf bis zu 20 % der Lichtgeschwindigkeit. Anschließend erreichen die Ionen den Ringbeschleuniger SIS18 mit einem Umfang von 216 Metern, der diese bis auf 90 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, bevor die Ionen letztendlich in den Ringbeschleuniger SIS100 geschossen werden.

Neben dem SIS100 werden weitere Experimentier- und Speicherringe, sowie Experimentierstationen errichtet. Ein wesentliches Ziel der FAIR-Anlage ist die Produktion exotischer Teilchen. Diese entstehen beim Aufprall der beschleunigten Ionen auf eines von zwei sogenannten Produktionstargets, wobei zum Beispiel auch Antiprotonen erzeugt werden. Die entstandenen Teilchen werden anschließend mit dem *Super-Fragmentseparator* (Super-FRS) sortiert und für weitere Experimente genutzt. In den Speicherringen können zudem die neu erzeugten Teilchen eingefangen werden, sodass diese nicht verloren gehen und bei jedem Umlauf neu mit ihnen experimentiert werden kann. Durch diese "Mehrfachnutzung" können Teilchenstrahlen mit zuvor unerreichter Intensität erzeugt werden [1]. Ein Grundriss des Bauvorhabens ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

Extreme Bedingungen, wie sie sonst nur im Universum vorkommen, können an der FAIR-Anlage im Labor erzeugt werden und neue Einblicke in den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums liefern. Die Forschung am FAIR ist dabei in vier große Forschungssäulen aufgeteilt:

NUSTAR - Nuclear Structure Astrophysics and Reactions: Das Ziel der NUSTAR-Kollaboration ist es, Eigenschaften exotischer Kerne, wie Lebensdauer, Form



Abbildung 2.1: Grundriss der bereits existierende GSI-Anlage, sowie der sich im Bau befindlichen FAIR-Anlage. Bild entnommen aus [1].

und innere Struktur zu bestimmen, um so die Elemententstehung in Sternen zu verstehen und uns grundlegend neue Einblicke in den Aufbau und das Verhalten von Materie zu geben.

CBM - Compressed Baryonic Matter: Stoßen schwere Atomkerne mit hoher Energie aufeinander, können kurzzeitig Bedingungen wie beim Urknall oder in Neutronensternen simuliert werden. Im CBM-Experiment wird untersucht, wie sich Materie bei solchen Bedingungen verändert und ob es zum Beispiel zu einem sogenannten Quark-Gluonen-Plasma kommt.

PANDA - Antiproton Annihilation at Darmstadt: Durch die Annihilation von Protonen mit Antiprotonen sollen im PANDA-Experiment Teilchen, die aus unterschiedlichen Kombinationen von Quarks und Gluonen bestehen, aber noch nie beobachtet wurden, erzeugt werden. Dadurch soll herausgefunden werden, welche theoretisch vorausgesagten Teilchen tatsächlich existieren und welche Eigenschaften sie haben, um so das Verständnis der starken Wechselwirkung voranzutreiben.

APPA - Atomic, Plasma Physics and Applications: APPA vereint mehrere FAIR-Kollaborationen, welche sich Anlagenteile für ihre Forschung teilen. Deshalb reicht das Forschungsspektrum von APPA von der Untersuchung fundamentaler Prozesse in Atomen, über makroskopische Effekte in Materialien und Gewebe, bis hin zu Anwendungen in Medizin und Technik.

Zum Beispiel wird ein Verfahren entwickelt, bei dem Tumore durch Protonen mit ei-

ner Geschwindigkeit von 98 % der Lichtgeschwindigkeit behandelt werden. Zudem kann am FAIR Teilchenstrahlung, wie sie im Weltall auftritt, erzeugt werden, um ihre Wirkung auf Zellen zu untersuchen und Materialien, die den Bedingungen im Weltall standhalten können, zu finden. Auch können Plasmen mit besonders hoher Dichte erzeugt werden, wie sie im Innern von Planeten und Sternen auftreten. Durch die Erkenntnisse bei der Plasmaforschung können dann zum Beispiel Verfahren für die Veredelung von Materialien, der Oberflächenreinigung und der Herstellung mikroskopisch kleiner elektronischer Bauteile verbessert werden.

Zuletzt werden auch Experimente in der Atomphysik durchgeführt. Ein Ziel ist dabei Anti-Wasserstoff und Anti-Helium zu erzeugen, um Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie zu untersuchen. Insbesondere die *Stored Particle Atomic Physics Research Collaboration* (SPARC) beschäftigt sich zum einen mit Kollisionsexperimenten von relativistischen schweren Ionen in Speicherringen und zum anderen mit der Untersuchung von hochgeladenen Ionen. Dabei wird die Quantenelektrodynamik bei extrem starken elektrischen und magnetischen Felder präzise überprüft und elektronische Übergänge bei relativistischen Geschwindigkeiten untersucht. Für letzteres ist der relativistische Dopplereffekt von Bedeutung, der Laserphotonen aus dem optischen oder dem extremen ultravioletten Bereich in den Röntgenbereich verschiebt und somit Übergänge, die mit existierenden Lasersystemen unzugänglich sind, erreichbar macht [1, 2].

Diese Lasertechniken werden auch dazu genutzt, relativistische, schwere, hoch geladene Ionenstrahlen am SIS100 laserzukühlen. Für die Diagnose des Laserkühlen wird dabei ein Detektor benötigt, der die Fluoreszenzphotonen im extremen ultravioletten Bereich und weichen Röntgenbereich detektieren kann [3].

2.2 Strahlkühlung

Die Qualität eines Strahls aus geladenen Teilchen ist, neben dem Radius und der Divergenz, auch von der Impulsverteilung des Strahls abhängig. Aufgrund der Wechselwirkung der geladenen Teilchen untereinander, sowie Ungenauigkeiten im Beschleunigeraufbau und weiterer Faktoren, kann sich die Impulsverteilung der Ionen verbreitern. Um hochpräzise Messungen durchzuführen, muss die Impulsverteilung allerdings möglichst schmal sein.

Der Radius, die Divergenz und die Impulsverteilung eines Teilchenstrahls sind direkt mit der transversalen und longitudinalen Temperatur, im mit dem Teilchenstrahl mitbewegten Koordinatensystem, verbunden¹. Daher führt eine Verschmälerung der Impulsverteilung zur Reduktion der Temperatur, weshalb auch vom Strahlkühlen gesprochen wird.

Es gibt drei gängige Verfahren für das Strahlkühlen. Das Elektronenkühlen, das stochastische Kühlen und das Laserkühlen.

2.2.1 Elektronenkühlen und Stochastisches Kühlen

Beim Elektronenkühlen wird der Teilchenstrahl über eine bestimmte Distanz mit einem monochromatischen Elektronenstrahl überlagert. Die Elektronen werden dabei konti-

¹Die Temperatur wird in eine transversale und longitudinale Komponente aufgeteilt, da sich die Impulsverteilungen für die unterschiedlichen Raumrichtungen bei beschleunigten Strahlen im Allgemeinen unterscheiden.

nuierlich in einer Elektronenkanone auf die mittlere Ionengeschwindigkeit beschleunigt, in den Ionenstrahl gelenkt und nach einer gewissen Distanz wieder vom Ionenstrahl getrennt. Im mit den Elektronen mitbewegten System sieht es demnach so aus, dass die Elektronen still stehen, während die Ionen sich in unterschiedliche Richtungen durch das Elektronengas bewegen und durch Rutherford-Streuung Energie verlieren. Einfach ausgedrückt werden also die "zu langsamen" Ionen von den Elektronen angestoßen und werden schneller, während die "zu schnellen" Ionen die Elektronen anstoßen und an Geschwindigkeit verlieren. Insgesamt wird dementsprechend die Impulsverteilung verschmälert. Eine ausführliche Beschreibung zum Elektronenkühlen kann in [4] gefunden werden.

Die grundlegende Idee beim stochastischen Kühlen ist es, die Abweichung von der gewünschten Umlaufbahn eines Teilchens mit einer Pickup-Elektrode zu messen und die Bewegung anschließend mit einer Kicker-Elektrode zu korrigieren. Grundlagen zum stochastischen Kühlen sind in [5] gegeben.

Aufgrund der hohen Teilchenenergien und hohen Intensität, die am neuen SIS100 Beschleuniger erreicht werden sollen, sind diese beiden Methoden allerdings nicht geeignet. Die Effizienz des Elektronenkühlens nimmt bei relativistischen Geschwindigkeiten stark ab, da extreme Beschleunigungsspannungen benötigt werden und die Kühlzeit stark zunimmt [4]. Beim stochastischen Kühlen nimmt die Kühlzeit für hohen Intensitäten extrem zu [5], daher bleibt nur das Laserkühlen als praktikable Option.

2.2.2 Laserkühlen

Das Laserkühlen von schnellen Ionen funktioniert, indem Photonen gebundene Elektronen in einen angeregten, instabilen Zustand anregen. Bei der Absorption der Photonen wird ein gerichteter Impuls auf die Ionen übertragen, während die Emission von Photonen bei der Abregung isotrop verläuft. Als Nettoeffekt bleibt daher eine Impulsänderung in Bewegungsrichtung der Photonen, da durch die Emissionen im Mittel keine Änderung des Impulses bewirkt wird.

Damit die Anregung überhaupt stattfinden kann, muss die Frequenz des Lasers, der als Photonenquelle genutzt wird, dabei so gewählt werden, dass die Energie der Photonen der Energielücke des Elektronenübergangs ($E_0 = \hbar \omega_0$) im Bezugssystem des Ionenstrahls entspricht. Aufgrund des Dopplereffekts ist die Frequenz ω' eines entgegen der Bewegungsrichtung der Ionen gerichteten Lasers im Ruhesystem des Ions zu höheren Frequenzen verschoben (Blauverschiebung), während ein in Bewegungsrichtung der Ionen zeigender Laser zu niedrigeren Frequenzen verschoben wird (Rotverschiebung). Es muss daher die Bedingung

$$\omega' = \gamma (1 \pm \beta) \omega_0 \tag{2.1}$$

erfüllt sein, wobei das Pluszeichen für den Fall eines in Richtung des Ionenstrahls zeigenden Laserstrahls gilt und das Minuszeichen für den Fall eines entgegen des Ionenstrahls zeigenden Lasers.

Für das Kühlen werden demnach zwei Laser benötigt. Ein entgegen der Strahlrichtung zeigender Laser, der die zu schnellen Ionen anregt und damit abbremst und ein in Strahlrichtung zeigender Laser, der die zu langsamen Ionen beschleunigt. Das Resultat ist dann eine schmalere Impulsverteilung. Der ganze Prozess ist nochmals in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt.



Abbildung 2.2: Veranschaulichung des Laserkühlen mit zwei Laser, die in (Laser 1) und entgegen (Laser 2) der Bewegungsrichtung der Ionen zeigen. Weicht die Geschwindigkeit v eines Ions von der mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$ des Ionenstrahls ab, so wird es durch Laser 1 beschleunigt bzw. durch Laser 2 abgebremst.

Ein Problem ist allerdings, dass bei den sehr hohen Ionengeschwindigkeiten am SIS100 die Dopplerverschiebung für den in Ionenstrahlrichtung zeigenden Laser so groß ist, dass noch keine Lasersysteme mit ausreichend hoher Frequenz existieren. Eine Möglichkeit das Problem zu umgehen ist es, die in Bewegungsrichtung des Ionenstrahls zeigende Kraft durch Bunching des Ionenstrahls zu erreichen.

In Teilchenbeschleunigern werden radio frequency (rf) cavities genutzt, um sinusoidale longitudinale elektrische Felder zu erzeugen, die die Ionen beschleunigen und gleichzeitig in kurze räumliche Pulse bündeln. Ionen in einem Bündel, die sich nicht synchron mit dem elektrischen Feld bewegen, fangen an harmonische Oszillationen² in Energie und räumlicher Position, relativ zu einem sich ideal bewegenden Ion, durchzuführen. Währenddessen übt der Laser eine der Bewegungsrichtung des Ionenstrahls entgegengesetzte Kraft aus und dämpft damit die Oszillation im harmonischen Potential. Es stellt sich also ein Gleichgewicht zwischen der rücktreibenden Kraft durch das harmonische Potential und der Kraft des Lasers ein [5, 6].

2.3 Röntgenstrahlung

Da die beim Laserkühlen entstehenden Fluoreszenzphotonen aufgrund der Dopplerverschiebung im (weichen) Röntgenbereich liegen, sollen hier kurz die wichtigsten Eigenschaften von Röntgenstrahlung erwähnt werden.

Röntgenstrahlung ist elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge im Bereich zwischen einigen Nanometern und wenigen Pikometern, was Photonenenergien im keV-Bereich entspricht. Sie entsteht entweder durch den Übergang von angeregten Elektronen in tiefere Energieniveaus (charakteristische Röntgenstrahlung) oder durch starke Abbremsung bzw. Beschleunigung von geladenen Teilchen (Bremsstrahlung) [7]. Mit Materie wechselwirkt Röntgenstrahlung vor allem über den photoelektrischen Effekt.

 $^{^2\}mathrm{F\ddot{u}r}$ genügend kleine Amplituden sind die Oszillationen harmonisch.

Im Gegensatz zu sichtbaren Licht, bei dem der Brechungsindex n in Materie immer größer als eins ist, liegt der Brechungsindex für Röntgenstrahlung leicht unterhalb von eins. Der Brechungsindex kann als

$$n = 1 - \delta \tag{2.2}$$

dargestellt werden, wobei δ in der Größenordnung 10⁻³ bis 10⁻⁶ liegt, was bedeutet, dass Materie für Röntgenstrahlen optisch dünner ist, als das Vakuum bzw. die Luft. Folge ist, dass Röntgenstrahlen nur sehr leicht gebrochen werden und, dass bei sehr flachen Einfallswinkeln Totalreflexion auftreten kann. Für nichtstreifenden Einfall haben die meisten Materialien nur eine sehr geringe Reflektivität im Röntgenbereich [8].

2.4 Multi-Channel-Plate Detektoren

Multi-Channel-Plates (oder auch Micro-Channel-Plates, kurz MCPs) werden genutzt, um unterschiedlichste Strahlung in Elektronenlawinen, die als elektrische Signale weiterverarbeitet werden können, umzuwandeln. Sogar einzelne Photonen können eine Elektronenlawine auslösen und dadurch nachgewiesen werden.

Eine Multi-Channel-Plate selbst besteht aus vielen kleinen Glasröhrchen (üblich 10^5 bis 10^7), die in hexagonal dichtester Packung miteinander verschmolzen sind (siehe Abbildung 2.3 links). Die Glasröhrchen haben dabei typischerweise Durchmesser im 10-100 µm-Bereich und Längen-zu-Durchmesser-Verhältnisse zwischen 40 und 100. Ihre Innenseite ist gewöhnlich mit Bleioxid beschichtet. Diese Widerstandsschicht dient zum einen als kontinuierlicher Spannungsteiler und zum anderen als Sekundärelektronenemitter. Durch metallische Beschichtungen auf der Vorder- und Rückseite der Platte werden alle Kanäle parallel geschaltet. Wird eine Hochspannung zwischen den beiden Seiten der Platte angelegt, so dient jeder Kanal als eigenständiger Sekundärelektronenvervielfacher.

Die Elektronenvervielfachung in den Kanälen läuft wie rechts in Abbildung 2.3 skizziert ab. Trifft Strahlung mit genügend hoher Energie an der Kathodenseite auf die Innenseite eines Kanals, so werden Sekundärelektronen emittiert. Diese werden aufgrund der angelegten Hochspannung in Richtung höheren Potentials beschleunigt und treffen erneut auf die Kanalwand. Dabei werden weitere Elektronen ausgelöst, die wieder auf die Kanalwand beschleunigt werden. Das Ganze setzt sich weiter fort, bis an der Anodenseite eine Elektronenlawine austritt.

Die Elektronenlawine und damit die einfallende Strahlung kann anschließend ortsaufgelöst detektiert werden. Eine Möglichkeit dies zu tun ist es eine ortsauflösenden Delay-Line Anode (DLA) hinter der MCP zu platzieren. Eine typische Delay-Line Anode besteht aus zwei langen Drähten, die "wie in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt, gewickelt sind. Trifft ein Ladungspuls auf einen bestimmten Punkt der Anode, so wird dieser in vier Teile aufgespalten, die sich zu den vier Enden der Drähte ausbreiten. Aus den Zeitdifferenzen $\Delta t_{x,y}$ zwischen den Ankunftszeiten an den jeweiligen Enden eines Drahtes kann anschließend die Position der eintreffenden Elektronenlawine berechnet werden [10, 11].

Abhängig von der Art der Strahlung, die mit einem MCP Detektor gemessen werden soll, gibt es noch einige Faktoren, die zu berücksichtigen sind. Zum Beispiel stehen die Kanäle in einer MCP meist nicht senkrecht zur Oberfläche der Platte, sondern unter



Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer Multi-Channel-Plate (links) und der Elektronenvervielfachung innerhalb eines Kanals (rechts). Abbildung entnommen aus [9].



Abbildung 2.4: Schematische Darstellung einer Delay-Line Anode. Der graue Bereich soll den Auftreffpunkt einer Elektronenlawine darstellen, die zu zeitlich verzögerten Signalen führt. Anhand der Zeitdifferenzen $\Delta t_{x,y}$ kann anschließend der Auftreffpunkt berechnet werden.

einem sogenannten bias angle. Dies soll verhindern, dass Strahlung gerade durch die Platte gelangen kann, ohne eine Kanalwand zu treffen.

Die Kanalinnenwände können auch nicht getroffen werden, wenn die Frontseite der Kanäle getroffen wird. Die Open Area Ratio (OAR) gibt an, welcher Anteil der MCP-Fläche aus Kanalöffnung besteht. Typischerweise liegt der Wert bei etwa 50 %. Das heißt, etwa die Hälfte der Strahlung erreicht gar nicht erst die Kanäle. Die Detektionseffizienz ist zudem stark von der Art und der Energie der Strahlung abhängig. Vor allem für Photonen im extremen UV-Bereich und weichen Röntgenbereich ist sie sehr

klein. Durch Beschichtung der Eingangsseite der MCP mit Photokathoden-Materialien, wie z.B. Au, LiF oder CsI, lässt sie sich allerdings deutlich erhöhen [12].

Außerdem gilt zu beachten, dass MCPs bei sehr niedrigen Drücken betrieben werden müssen (z.B. $< 2 \cdot 10^{-6}$ mbar [11]). Ansonsten können die Elektronen in den Kanälen Restgasmoleküle ionisieren, die sich entgegen den Elektronen in Richtung Kathode bewegen und beim Aufprall auf die Kanalwand weitere falsche Signale erzeugen. Diese Ionenrückkopplung kann auch dadurch reduziert werden, dass gekrümmte Kanäle verwendet werden. Diese sorgen dafür, dass die entstandenen Ionen, bevor sie genügend Energie haben, um Sekundärelektronen und damit ein falsches Signal auszulösen, auf die Kanalwand treffen [13].

Für höhere Signalverstärkungen (Größenordnung $10^6 - 10^7$) werden zudem häufig zwei oder drei MCPs hintereinander geschaltet. Durch geschickte Orientierung der bias angle der Platten kann auch hierdurch die Ionenrückkopplung reduziert werden [12]. In Abbildung 2.5 sind vier Konfigurationen dargestellt.



Abbildung 2.5: Verschiedene MCP Konfigurationen mit geraden und gekrümmten Kanälen.

2.5 Beugungsgitter

Mithilfe eines Beugungsgitters lässt sich polychromatisches Licht der Wellenlänge nach in seine einzelnen Komponenten aufteilen. Ein Beugungsgitter selbst besteht meist aus einer großen Anzahl von parallelen Schlitzen mit gleichmäßigen Abständen.

Die Funktionsweise lässt sich wie folgt erklären: Paralleles Licht, welches auf das Gitter trifft, wird an jedem Schlitz gebeugt, also an jedem Schlitz entstehen neue Elementarwellen. Diese Elementarwellen interferieren je nach Beugungswinkel konstruktiv oder destruktiv, sodass Licht einer bestimmten Wellenlänge nur in gewisse Richtungen gebeugt wird. Zu konstruktiver Interferenz kommt es, wenn der Weglängenunterschied zwischen zwei parallelen Strahlen, die an benachbarten Schlitzen gebeugt werden, ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist. Ist dies nicht der Fall, so interferieren die Strahlen destruktiv.

Es lässt sich zwischen Transmissionsund Reflexionsbeugungsgittern unterscheiden. Bei einem Transmissionsgitter liegen die einfallenden und gebeugten Strahlen auf unterschiedlichen Seiten des Gitters und bei einem Reflexionsgitter auf derselben Seite. In Abbildung 2.6 ist der Strahlenverlauf für ein Reflexionsgitter schematisch dargestellt. Ist α der Einfallswinkel und β der Beugungswinkel der paral-



Abbildung 2.6: Darstellung Funktizur Reflexionsweise eines onsbeugungsgitters. Der Weglängenunterschied $\overline{AC} + \overline{AD}$ zweier benach-Strahlen barter beträgt $d \cdot \sin \alpha + d \cdot \sin \beta$. Abbildung entnommen aus [14].

lelen Strahlen relativ zur Gitternormalen, so ist der Weglängenunterschied zweier benachbarter Strahlen $d \cdot \sin \alpha + d \cdot \sin \beta$. Zu konstruktiver Interferenz kommt es also, wenn die Bedingung

$$d \cdot (\sin \alpha + \sin \beta) = m \cdot \lambda \quad , m \in \mathbb{Z}$$
(2.3)

erfüllt ist³. Dabei ist d der Abstand zwischen den Schlitzen (sog. Gitterkonstante), m die Beugungsordnung und λ die Wellenlänge des Lichts. Häufig wird anstelle von d auch die Schlitzdichte N = 1/d verwendet.

Aus Gleichung 2.3 ist sofort ersichtlich, dass für den Fall m = 0 das Licht unter demselben Winkel gebeugt wird, unter dem es auf das Gitter trifft ($\alpha = -\beta$). Mit der nullte Ordnung lässt sich Licht also nicht nach Wellenlängen aufteilen. Für $m \neq 0$ ist der

 $^{^{3}\}mathrm{Im}$ Falle eines Transmissionsgitters steht ein Minuszeichen zwischen den Sinussen.

Beugungswinkel β allerdings von der Wellenlänge λ abhängig, wodurch die Separation des einfallenden Lichts in einzelne Wellenlängen möglich wird. Da der Beugungswinkel β auch vom Einfallswinkel α und der Gitterkonstante d abhängig ist, gilt zu beachten, dass $|m \cdot \lambda/d| < 2$ ist, damit Gleichung 2.3 reelle Lösungen besitzt. Für spektroskopische Messungen gilt zudem zu beachten, dass sich die unterschiedlichen Beugungsordnungen überlappen können [14].

2.6 Schrittmotoren

Ein Schrittmotor ist eine Sonderbauform des Synchronmotors, bei dem der Rotor, also der drehbare Teil des Motors mit der Motorwelle, durch geschicktes Ansteuern der Statorspulen (nicht drehbarer Teil des Motors) gezielt um bestimmte Winkel gedreht werden kann. Innerhalb seiner Leistungsgrenzen lässt sich ein Schrittmotor daher genau positionieren, ohne die Rotorlage anderweitig zu bestimmen. Es gibt drei Grundtypen von Schrittmotoren: Reluktanz-Schrittmotoren, Permanenterregte Schrittmotoren und Hybridschrittmotoren.

Bei einem Reluktanz-Schrittmotor besteht der Rotor aus einem weichmagnetischen Zahnrad und der Stator aus mehreren Spulenpaaren. Die Kerne der Statorspulen besitzen ebenfalls Zähne, deren Zahnteilung allerdings, gegenüber der des Stators, leicht verschieden ist (siehe Abbildung 2.7). Wird ein Spulenpaar bestromt, so nimmt der Rotor die Stellung ein, in welcher der Abstand zwischen den Zähnen der Spule und des Rotors verringert und damit auch der magnetische Widerstand (Reluktanz) minimiert wird. Der Rotor dreht sich um einen weiteren Schritt, wenn das nächste Spulenpaar angeschaltet wird. Im einfachsten Fall wird so der Motor Schritt für Schritt gedreht und eine volle Umdrehung setzt sich aus einer baulich definierten Anzahl an Einzelschritte zusammen. Vorteil eines



Abbildung 2.7: Stark vereinfachte Darstellung eines Reluktanz-Schrittmotors. In diesem Beispiel besitzen die Kerne der Statorspule keine Zähne. Abbildung aus [15].

Reluktanz-Schrittmotors ist der kleine Schrittwinkel, Nachteil allerdings das geringe Drehmoment und das nicht vorhandene Selbsthaltemoment im stromlosen Zustand.

Im Gegensatz zum Reluktanz-Schrittmotor besitzt ein permanenterregter Schrittmotor einen Permanentmagneten als Rotor. Dieser ist zylindrisch geformt und ist entlang seines Umfangs mehrpolig magnetisiert. Der Stator besteht aus mehreren einzeln ansteuerbaren Spulen (siehe Abbildung 2.8). Dadurch lässt sich der Rotor, dem Stator-Magnetfeld entsprechend ausrichten. Da der Rotor aus einem Permanentmagneten besteht, besitzen permanenterregte Schrittmotoren auch im stromlosen Zustand ein Selbsthaltemoment, mit dem der Motor statisch belastet werden kann, ohne eine kontinuierliche Drehung hervorzurufen.



Abbildung 2.8: Stark vereinfachte Darstellung eines permanenterregten Schrittmotors aus [15].

Hybridschrittmotoren kombinieren die guten Eigenschaften von Reluktanz-Schrittmotoren (kleine Schrittwinkel) und Permanenterregten Schrittmotoren (hohes Drehmoment, Selbsthaltemoment), weshalb heutzutage fast ausschließlich Hybridschrittmotoren gebaut werden. In Abbildung 2.9 sind zwei Querschnitte eines 5-Phasen Hybridschrittmotoren zu sehen.



Abbildung 2.9: Querschnitte einer schematischen Darstellung eines 5-Phasen Hybridschrittmotors aus [16].

Der Rotor eines Hybridschrittmotors (siehe Abbildung 2.9 links) besteht meist aus zwei weichmagnetischen Zahnscheiben (Rotor 1 und Rotor 2), die um einen halben Zahn zueinander versetzt sind. Zwischen den Zahnscheiben befindet sich ein Permanentmagnet, der dazu dient, die Zahnscheiben in axialer Richtung zu magnetisieren, sodass ein Rotor den Nord- und der andere den Südpol darstellt. In diesem Beispiel besitzen die Zahnscheiben 50 Zähne und Rotor 1 ist Nord-gepolt und Rotor 2 Süd. Der Stator (Abbildung 2.9 rechts) besteht, wie beim Reluktanz-Schrittmotor aus mehreren Spulenpaaren, deren Kerne über kleine Zähne verfügen. Da der gezeigte Motor ein 5-Phasen Schrittmotor ist, besitzt er fünf Spulenpaare, also zehn Spulen. Die Spulen eines Paars sind jeweils auf gegenüberliegenden Seiten und so gewickelt, dass die zugewandten Pole den gleichen Magnetpol darstellen, wenn Strom durch sie fließt (siehe auch Abbildung 2.10).

Wird Phase A bestromt (siehe Abbildung 2.10), so sind die Magnetpole Süd polarisiert und ziehen die Zähne von Rotor 1, welcher Nord-polarisiert ist an. Die Zähne von Rotor 2, der Süd-polarisiert ist, werden währenddessen von den Magnetpolen der Phase A abstoßen, sodass der gesamte Rotor in einer Gleichgewichtslage stehen bleibt. In dieser Lage sind die Zähne der unbestromten Phase B Pole gegenüber denen des Südpolarisierten Rotor 2 in diesem Beispiel um 0,72° versetzt.

Wird nun anstelle von Phase A Phase B von Strom durchflossen (siehe Abbil-



Abbildung 2.10: Schematische Darstellung eines Hybridschrittmotors mit bestromter Phase A aus [16].

dung 2.11), sodass die Phase B Pole Nord-polarisiert sind, dann ziehen diese Rotor 2 an und stoßen Rotor 1 ab. Der gesamte Rotor dreht sich also um 0,72°. Werden demnach Phase A, B, C, D, E und dann wieder Phase A nacheinander geschaltet, so dreht sich der Schrittmotor in 0,72°-Schritten. Um die Rotationsrichtung umzukehren, müssen die Phasen einfach in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen werden.

Die einzelnen Phasen in einem Schrittmotor werden durch einen sogenannten Driver bestromt. Dieser bekommt wiederum Pulssignale von einem Controller, der je nach gewünschten Drehwinkel und gewünschter Rotationsgeschwindigkeit, sowie weiteren Einstellungen andere Pulsmuster ausgibt.

In dem einfachen Beispiel wurde immer nur eine Phase gleichzeitig angeregt. Um höhere Drehmomente und noch kleinere Schrittwinkel zu erreichen, werden in der Regel vier bis fünf Phasen gleichzeitig von Strom durchflossen. Der Schrittwinkel lässt sich zum Beispiel dadurch halbieren, dass immer abwechselnd zwei benachbarte Phasen und dann nur eine Phase geschaltet wird. Sind zwei benachbarte Phasen aktiviert, so richtet sich der Rotor mittig zwischen den Ruhelagen aus, die vorliegen würden, wenn eine Phase erregt ist. Wird anschließend nur eine der beiden Phase bestromt, so springt der Rotor einen halben Schritt weiter.



Abbildung 2.11: Schematische Darstellung eines Hybridschrittmotors mit bestromter Phase B aus [16]. Die Schritte eines Schrittmotors lassen sich noch weiter verfeinern, indem die Phasen mit (diskretisierten) Sinus-/Cosinus-förmigen Strömen versorgt werden. Dieses Vorgehen wird als Microstepping bezeichnet. Im Falle der für den Fluoreszenzdetektor verwendeten Schrittmotoren lässt sich so ein Vollschritt in 250 Microsteps aufteilen.

Wie zu Beginn des Abschnitts erwähnt, lässt sich durch Zählen der Schritte die Rotorlage eines Schrittmotors ohne äußere Positionsgeber exakt bestimmen. Ist die Last an einem Schrittmotor allerdings zu groß, kann es dazu kommen, dass der Rotor dem Magnetfeld des Stators nicht mehr korrekt folgt und Schritte übersprungen werden. Der Rotor springt dann in benachbarte Ruhelagen und die Information über die Position des Rotors kann bei hohen Schrittverlusten verloren gehen [16, 15].

3 Geplantes Design des SIS100 Fluoreszenzdetektors

Wie bereits erwähnt, liegen die Fluoreszenzphotonen, die nach der Anregung des Kühlübergangs durch das Lasersystem, emittiert werden, aufgrund der Dopplerverschiebung im extremen ultravioletten Bereich bis zum weichen Röntgenbereich. Da die Fluoreszenzphotonen Informationen über den Kühlvorgang und die Elektronenübergänge besitzen, sollen diese energieaufgelöst und mit genügend hoher Zeitauflösung und Effizienz detektiert werden. Der dazu verwendete Detektoraufbau und seine Komponenten werden in diesem Abschnitt näher erläutert.

3.1 Detektorkammer

Das Detektionsprinzip des Fluoreszenzdetektors basiert darauf, dass die einfallenden Fluoreszenzphotonen durch ein Beugungsgitter nach ihrer Energie räumlich aufgespalten werden. Anschließend treffen die Photonen auf einen Multi-Channel-Plate (MCP) Detektor, der diese ortsaufgelöst und damit auch energieaufgelöst, detektiert.

In Abbildung 3.1 ist ein Querschnitt der geplanten Detektorkammer skizziert. Die Kammer selbst besteht aus Edelstahl und wurde so gefertigt, dass sie später in den SIS100 Beschleuniger eingebaut werden kann. Die Komponenten des Detektors sind alle an ultrahochvakuumfähigen Lineardurchführungen von VAb Vacuum montiert, um diese innerhalb der Detektorkammer bewegen zu können. Von links nach rechts sind ein optischer Schlitz mit variabler Schlitzbreite, ein erstes Baffle, das Beugungsgitter, ein zweites Baffle und der MCP Detektor zu sehen. Die Baffles, das Beugungsgitter und der MCP Detektor befinden sich dabei in einem Hintergrundschild [17].

3.2 Komponenten

In diesem Abschnitt sollen die einzelnen Komponenten und ihre Funktion genauer beschrieben werden.

3.2.1 Hintergrundschild

Das Hintergrundschild dient dazu, Hintergrundphotonen und niederenergetische geladene Teilchen, die durch Wechselwirkung des Ionenstrahls mit Restgas im Speicherring entstehen, abzublocken. Es soll aus Edelstahl gebaut werden und einen Stützrahmen, der ebenfalls aus Edelstahl besteht, enthalten. Am Stützrahmen wird dann der MCP Detektor und das Beugungsgitter mit fester Ausrichtung montiert. Das Schild wird stellenweise oben geöffnet sein, um die Bewegung der Baffles zu ermöglichen und zudem eine Öffnung an der Vorderseite haben, damit Fluoreszenzphotonen in das Schild





eintreten können. Um das Schild vertikal bewegen zu können, wird es an zwei $LD\ 40\mathchar`-75$ S2Lineardurchführungen befestigt.

3.2.2 Ortsaufgelöster Multi-Channel-Plate Detektor

Im SIS100 Fluoreszenzdetektor wird ein MCP Detektor vom Modell DLD40 der Firma RoentDek verwendet (siehe Abbildung 3.2). Dieser besteht aus zwei Multi-Channel-Plates in der Chevron-Konfiguration und einer Delay-Line Anode für eine zwei-dimensionale Positionsauslese. Der Detektor hat eine aktive Detektorfläche mit einem Durchmesser von mindestens 40 mm, einer OAR über 50% und einer Ortsauflösung von etwa 0,1 mm. Weitere Informationen können dem Datenblatt in Anhang A.2.1 bzw. der Bedienungsanleitung [11] entnommen werden.



Abbildung 3.2: Foto des MCP Detektors vom Modell *DLD40* der Firma *RoentDek*.

3.2.3 Beugungsgitter

Als Beugungsgitter wird ein 30-003 Laminar-type Replica Diffraction Grating für den weichen Röntgenbereich von Shimadzu verwendet. Das Gitter hat Rillen mit rechteckigen Profil und ist für den Wellenlängenbereich von 1 nm bis 7 nm geeignet. Es ist mit Gold beschichtet, um höhere Reflektivität im Röntgenbereich zu erlangen und ist besonders gut für Anwendungen, bei denen das Licht unter einem flachen Winkel auf das Gitter trifft, geeignet. Das Gitter ist den Parametern des Herstellers entsprechend fest am Stüzrahmen des Hintergrundschilds montiert. Eine Skizze und die Parameter zum Einbau, sowie weitere Informationen zum Gitter sind im Datenblatt in Anhang A.2.2 zu finden.

3.2.4 Optischer Schlitz und Baffles

Damit nur Photonen, die das Beugungsgitter unter dem richtigen Winkel (ca. 1,4° relativ zur Gitteroberfläche) treffen, in das Hintergrundschild gelangen, kann ein Schlitz mit variabler Schlitzbreite vor den Eingang des Hintergrundschildes platziert werden.

Der Schlitz mit variabler Breite besteht dabei aus einem Blech mit einem Schlitz fester Breite und einem zweiten Blech, was vor den Schlitz fester Breite gefahren werden kann, um so die Schlitzbreite zu verringern. Die Bewegung des Schlitzes erfolgt durch eine Kombination aus zwei Lineardurchführungen. Die erste Lineardurchführung (LD 40-75 S2) bewegt beide Bleche, sodass sich einfach die Position des Schlitzes ändert. Die zweite Lineardurchführung (MLS 40-50 S2) bewegt nur das zweite Blech und ermöglicht es so, die Schlitzbreite zu variieren.

Außerdem können zwei Baffles aus Edelstahl in den Strahlengang gefahren werden. Das erste Baffle dient dazu, die direkte Sichtlinie zum MCP Detektor zu blockieren, wenn energieaufgelöst gemessen werden soll, während das zweite Baffle die nullte Ordnung des am Beugungsgitter reflektierten Lichts absorbiert. Beide Baffles sind an MLS 40-50 S2 Lineardurchführungen befestigt.

3.3 Betriebsmodi

Der Fluoreszenzdetektor soll später in drei Betriebsmodi arbeiten können:

Fluoreszenzdetektionsmodus: Im Fluoreszenzdetektionsmodus wird das Hintergrundschild mit dem MCP Detektor bis zu einer Minimaldistanz von 30 mm an den Ionenstrahl herangefahren. Der Schlitz und die Baffles bleiben in ihrer Parkstellung, damit die Fluoreszenzphotonen aus dem Ionenstrahl direkt auf den MCP Detektor treffen und gezählt werden können.

Spektroskopiemodus: Im Spektroskopiemodus werden neben dem Hintergrundschild mit dem MCP Detektor und dem Beugungsgitter auch der Schlitz und die Baffles in ihre Position gefahren. Dadurch können nur die Photonen in das Schild eindringen, die das Gitter unter dem korrekten Winkel treffen. Die Fluoreszenzphotonen werden energieaufgelöst detektiert.

Leerlauf: Wenn der Fluoreszenzdetektor nicht im Betrieb ist, werden alle Komponenten aus der Strahlröhre herausgefahren, sodass keine Komponenten in der Nähe des Ionenstrahls stehen.

3.4 Schrittmotoren und Elektronik

Um die Lineardurchführungen, die die Komponenten bewegen, anzutreiben, werden PK569AWM 5-Phasen Schrittmotoren von Orientalmotor verwendet. Die möglichen Bewegungsoperationen der Schrittmotoren werden im Folgenden noch genauer erläutert. Die Schrittmotoren werden von CRD514-KD Microstep Driver with Built-in Controller ebenfalls von Orientalmotor bestromt, welche wiederum über das Modbus RTU Protokoll mithilfe eines Raspberry Pi 4B gesteuert werden. Um die asynchrone serielle Datenübertragung zwischen dem Raspberry Pi und den Controllern/Drivern zu ermöglichen, wird die RS485 Schnittstelle eines RS422/RS485 Shields for Raspberry Pi von zihatec verwendet. Die Controller sind dabei alle in eine Kette geschaltet (Daisy Chain). Die Kommunikation mit den Controllern über das Modbus Protokoll wird auch im Folgenden noch genauer erläutert.

Die Schrittmotoren verfügen zudem über elektromagnetische Bremsen, die durch das Anlegen einer Spannung gelöst werden. Die Schaltung der Bremsen erfolgt über ein 5V 8 Channel Relay Shield Module for Raspberry Pi/Arduino von SunFounder, welches über die General Purpose Input/Output Pins (GPIO-Pins) des Raspberry Pi's gesteuert wird.

Zur Positionsbestimmung der Komponenten wird neben der Berechnung durch die Schrittzahl des jeweiligen Motors die Position mittels Linearpotentiometern bestimmt. Diese sind fest an den Lineardurchführungen montiert und werden mit 5 V betrieben. Die Spannung fällt dabei linear über dem Schleifwiderstand im Potentiometer ab. Durch Abgreifen der Spannung mittels eines Schleifkontakts, der sich mit der Lineardurchführung mitbewegt, kann somit die Position der Komponente bestimmt werden. Die Spannung am Schleifkontakt, sowie die an den Potentiometern anliegende Spannung wird mit einem Raspberry Pi High-Precision AD/DA Expansion Board von Waveshare gemessen und digitalisiert.

Die Verbindung des Raspberry Pi's mit den anderen elektronischen Komponenten ist nochmals in Abbildung 3.3 schematisch für einen Controller dargestellt. Dabei ist auch die Verbindung der Endschalter der Lineardurchführung mit dem Controller angedeutet.



Abbildung 3.3: Dargestellt ist die Verbindung des Raspberry Pi's mit den restlichen elektronischen Komponenten für einen Controller. Die Bremsen und die Controller werden zukünftig mit separaten 24 V-Netzteilen versorgt.

3.4.1 Bewegungsoperationen der Schrittmotoren

Die verwendeten Schrittmotoren unterstützen drei verschiedene Arten von Bewegungsoperationen. Die kontinuierliche Operation, Positionierungsoperationen und die Returnto-Home Operation.

Bei der kontinuierlichen Operation führt der Motor eine kontinuierliche Drehung in Vorwärts- bzw. Rückwärtsrichtung durch, solange der Vorwärts (FWD)- bzw. Rückwärts (RVS)- Input aktiviert ist. Der Vorgang ist in Abbildung 3.4 in einem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm dargestellt. Wie zu erkennen, startet der Motor beim Aktivieren des FWD-Input's mit einer zuvor definierten Startgeschwindigkeit (Starting speed) und beschleunigt dann mit vorgegebener Beschleunigung auf die angegebene Operationsgeschwindigkeit (Operating speed). Wird der FWD-Input wieder deaktiviert, verzögert der Motor auf die Startgeschwindigkeit und stoppt. Analog gilt dies für den RVS-Input.





Mit der kontinuierlichen Drehung des Motors ist keine exakte Positionierung des Motors möglich, weshalb es neben den kontinuierlichen Operationen auch die Positionierungsoperationen gibt. Positionierungsoperationen können in zwei Modi durchgeführt werden. Den inkrementellen Modus, bei dem eine Schrittzahl angegeben wird, um die sich der Motor von der aktuellen Position aus bewegen soll und den Absolutmodus, bei dem eine Position in Schritten relativ zur Home-Position angegeben wird, zu der der Motor sich drehen soll. Der Geschwindigkeitsverlauf sieht dann analog zu dem der kontinuierlichen Drehung aus, bis auf, dass der Motor an der angegebenen Position hält. Zudem lassen sich mehrere Positionierungsoperationen (mit verschiedenen Geschwindigkeiten etc.) zu einer verknüpfen.

Die Home-Position kann entweder mit einem Befehl als die aktuelle Position des Motors festgelegt werden oder durch die Return-to-Home Operation mittels externer Sensoren bestimmt werden. Da die Home-Position mit der Zeit aufgrund von Schrittverlusten ungenauer wird und die Information über die Home-Position beim Abschalten der Controller verloren geht, wird sie in der Regel über die Return-to-Home Operation mittels externer Sensoren festgelegt. Dabei können entweder zwei Sensoren, ein positiver Endschalter (positve limit sensor, +LS) und ein negativer Endschalter (negative limit sensor, -LS), oder drei Sensoren, zwei Endschalter und ein zusätzlicher Home-Schalter (home sensor, HOMES), verwendet werden. Die Return-to-Home Operation mit drei Sensoren ist in Abbildung 3.5 einmal auf der Zeit- und einmal auf der Positionsachse dargestellt. Der Motor beschleunigt zunächst auf die Home-Seeking-Geschwindigkeit und fährt über den Home-Schalter. Anschließend fährt er langsam erneut über den Schalter, um ihn so immer von der gleichen Seite anzufahren und die Genauigkeit der Home-Position zu erhöhen. Gegebenenfalls kann noch ein Offset eingestellt werden. Der Motor fährt dann zusätzlich zu dieser Offset-Position und legt dort die Home-Position fest.



Operating sequence in seeing a time axis



Abbildung 3.5: Return-to-Home Operation im 3-Sensor-Modus in einem Geschwindigkeits-Zeit- und einem Geschwindigkeits-Positions-Diagramm. Entnommen aus [18].

In Abbildung 3.6 ist die Return-to-Home Operation im 2-Sensor-Modus für verschiedene Startpositionen des Motors auf der Positionsachse zu sehen. Dabei fährt der Motor in einen der beiden Endschalter und fährt langsam wieder heraus, bis der Schalter nicht mehr betätigt wird. Anschließend fährt er eine definierte Schrittzahl vom Endschalter zurück und setzt dort die Home-Position. Gegebenenfalls kann auch hier ein Offset eingestellt werden [18].

Starting position of return-to-home operation	Starting directio operati	n of return-to-home on: + (FWD)	Starting direction of return-to-home operation: – (RVS)	
-LS	-LS + side - side	+LS 	-LS + side	+LS
+LS	-LS + side - side	+LS - VR - VS - VS	-LS + side	+LS
Between –LS and +LS	-LS + side - side	+LS - VR - VS - VS - VS	-LS + side	+LS

--- indicates when home offset has been set.

VS: Starting speed of home-seeking VR: Operating speed of home-seeking

* After pulling off of the limit sensor, the equipment will move by the value set in the "Backward steps in 2-sensor mode home-seeking" parameter (initial value: 200 steps).

Abbildung 3.6: Return-to-Home Operation im 2-Sensor-Modus in Geschwindigkeits-Positions-Diagrammen für verschiedene Startpositionen aus [18].

3.4.2 Kommunikation mit den Controllern über das Modbus Protokoll

Das Modbus Protokoll¹ ist ein simples Protokoll mit offenen Spezifikationen. Es basiert auf dem Single-Master/Multiple-Slave Prinzip. Bei diesem gibt es ein Master-Gerät (in unserem Fall den Raspberry Pi), das Befehle (Queries) an mehrere Slave-Geräte (die Controller der Schrittmotoren) senden kann. Die Slaves führen dann diese Befehle aus und senden eine Antwort (Response). Die Slaves selber können keine Befehle senden. Die Datenübertragung kann dabei über drei verschiedene Modi laufen. Den ASCII-, TCP- und RTU-Modus. Die Kommunikation mit den Controllern läuft über den RTU-Modus.

Beim Remote Terminal Unit (RTU) Modus werden im Gegensatz zum ASCII-Modus binäre Codes versendet. Um die Daten verständlich zu machen, müssen diese erst in ein leserliches Format umgewandelt werden. Der Vorteil des RTU-Modus liegt in seinem guten Datendurchsatz. Das Nachrichtenformat ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

¹Das Modbus Protokoll wurde im Jahre 1979 von der Firma *Gould-Modicon* entwickelt und ist seitdem in industriellen Anwendungen weit verbreitet.



Abbildung 3.7: Nachrichtenformat im Modbus RTU Protokoll. Abbildung entnommen aus [18].

Eine Query bzw. Response besteht aus vier Teilen:

Slave address: Jeder Slave erhält eine eindeutige 8-Bit Adresse, mit der er identifiziert und Antworten zugeordnet werden können. Die Slave-Adresse 0 stellt dabei eine Sonderrolle dar. Im Normalfall sendet der Master eine Query zu nur einem Slave. Der Slave führt dann den gewünschten Befehl aus und gibt eine Antwort zurück (Unicast Mode). Wird allerdings die Slave-Adresse 0 verwendet, wird die Query an alle Slaves gesendet. Diese führen dann den Befehl aus, senden aber keine Antwort (Broadcast Mode).

Function code: Der Funktionscode ist eine weitere 8-Bit Zahl, die angibt, welche Operation durchgeführt werden soll. Die verwendeten Controller unterstützen zum Beispiel das Lesen von Halteregistern² (Function code $03h^3$), das Beschreiben eines bzw. mehrerer Halteregister (Function code 06h bzw. 10h) und das Durchführen einer Diagnose (Function code 08h). Weitere Public Function Code Definitionen sind in [19] zu finden.

Data: Die Länge und der Inhalt des Datenfelds ist vom Funktionscode abhängig. Es enthält zum Beispiel die Adresse des Registers, welches vom Slave ausgelesen bzw. mit den darauf folgenden Daten beschrieben werden soll. Die Länge ist jedoch immer ein ganzzahliges Vielfaches von 8 Bit.

Error check: Die Länge der Prüfsumme beträgt immer 16 Bit. Sie wird über das CRC-16 Verfahren berechnet und dient dazu, Fehler in der Datenübertragung zu erkennen. Tritt zum Beispiel eine Sendeunterbrechung zwischen Master und Slave auf, so kann der Slave durch eigene Berechnung der Prüfsumme und Vergleichen mit der vom Master gesendeten Prüfsumme entscheiden, ob die Nachricht richtig übertragen wurde. Die Berechnung der CRC-16 Prüfsumme ist kurz in [18] beschrieben.

Die Antworten eines Slaves lassen sich in drei Kategorien aufteilen.

Normal response: Nach Erhalt der Query vom Master führt der Slave den Befehl aus und sendet eine Antwort. Im Falle des Beschreibens eines Registers antwortet er zum

²Alle Parameter für die Rotation des Schrittmotors (Geschwindigkeit, Beschleunigung, etc.) sind in Halteregistern des Controllers gespeichert. Auch die Rotationsbefehle selbst werden durch das Beschreiben von Halteregistern an den Controller übertragen.

³Slave-Adressen, Funktionscodes usw. werden als Hexadezimalzahlen dargestellt. Um eine Hexadezimalzahl zu kennzeichnen, wird deshalb ein "h" an die Zahl angehängt. Üblich ist es auch Hexadezimalzahlen durch das Präfix "0x" zu kennzeichnen.

Beispiel mit der empfangenen Query selbst. Beim Auslesen eines Registers antwortet er mit den ausgelesenen Daten im Datenfeld der Response.

No response: Der Slave antwortet nicht auf eine Query, wenn die Query zum Beispiel im Broadcast Mode versendet wurde, oder ein Übertragungsfehler aufgetreten ist.

Exception response: Eine Exception response wird zurückgegeben, wenn der Slave den gewünschten Befehl des Masters nicht ausführen kann. Die Antwort des Slaves sieht dann wie eine normale Antwort aus bis auf, dass zum Funktionscode der Wert 80h addiert wird und im Datenfeld ein 8-Bit Exception code, der den aufgetretenen Fehler indiziert, steht.

Ein Beispiel für die erfolgreiche Kommunikation zwischen Master und Slave ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Ziel der Kommunikation ist es den Wert 80 (50h) in das Halteregister mit der Adresse 021Eh des Slaves mit der Slave-Adresse 02h zu schreiben. Wie zuvor erklärt, setzt sich die Query aus der Slave-Adresse 02h und dem Funktionscode 06h zusammen. Danach folgt die Adresse des zu beschreibenden Register 021Eh und der Wert, der in das Register geschrieben werden soll 0050h⁴. Zuletzt wird noch die CRC-16 Prüfsumme angehängt. Da in diesem Beispiel ein Register beschrieben wird, sendet der Slave einfach die Query selbst als Antwort zurück [18, 20].



Abbildung 3.8: Beispiel für die erfolgreiche Kommunikation zwischen Master und Slave aus [18].

Eine Funktion, die die Controller der Schrittmotoren bereitstellen und im späteren noch wichtig ist, ist die *Group send*-Funktion. Eine Gruppe besteht aus einem Parent slave und einem oder mehreren Child slaves. Ein Parent slave und ein Child slave sind normale Slaves. Beim Child slave wird lediglich die Gruppenadresse auf die Slave-Adresse des Parent slaves gesetzt. Wird nun eine Query (mit dem Funktionscode 10h) an den Parent slave gesendet, so erhalten auch die Child slaves den Befehl und führen diesen aus. Eine Antwort auf die Query sendet allerdings nur der Parent slave.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der bei der Kommunikation zu beachten ist, ist das Timing beim Senden von Querys und Empfangen von Antworten. In Anhang A.3 ist das korrekte Timing kurz beschrieben.

⁴In diesem Beispiel handelt es sich um ein 16-Bit Register, weshalb der Wert 0050h und nicht nur 50h geschrieben werden muss.

4 Graphische Oberfläche zur Steuerung des Detektors

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit dem Hauptteil der Arbeit: der Programmierung einer graphischen Oberfläche zur Steuerung des Detektors. Als Programmiersprache für die Steuersoftware wird *Python* verwendet.

4.1 Backend

Zunächst wird der für den Benutzer der Steuersoftware nicht sichtbare Teil, das Backend, genauer aufgeführt.

4.1.1 Vereinfachung der Kommunikation durch MinimalModbus

Um die Kommunikation mit den Controllern der Schrittmotoren zu vereinfachen, wird das Python-Modul *MinimalModbus* (Dokumentation siehe [21]) verwendet. Dieses sorgt für das korrekte Timing bei der Kommunikation, erstellt Queries gemäß dem korrekten Aufbau und extrahiert ausgelesene Daten aus Antworten. Um beispielsweise einen Wert in ein Halteregister eines Controllers zu schreiben, muss ein Objekt der Klasse *Instrument* erstellt werden. Dieses Objekt speichert neben der Slave-Adresse des dementsprechenden Controllers den Port, über den die Kommunikation läuft, sowie weitere für die Kommunikation wichtige Parameter. Anschließend muss zum Schreiben lediglich eine Funktion mit der Halteregister-Adresse und dem zu schreibenden Wert aufgerufen werden. Analog funktioniert das Lesen aus einem Halteregister. Die aufgerufene Funktion gibt dabei direkt den im auszulesenden Register stehenden Wert zurück.

Damit nicht die Register-Adressen für die verschiedenen Einstellungen, die an den Controllern vorgenommen werden können, nachgeschlagen werden müssen, wurde eine Klasse erstellt, die diese Aufgabe simplifiziert. Die Klasse enthält Funktionen, um die einzelnen Einstellungen der Controller zu lesen bzw. zu ändern, sowie Funktionen, um Alarme oder Warnungen der Controller zurückzusetzen. Außerdem enthält sie Funktionen, um Einstellungen aus dem nicht-flüchtigen Speicher der Controller zu lesen, bzw. in diesem zu speichern und, um die verschiedenen Bewegungsoperationen der Schrittmotoren auszuführen.

In der Steuersoftware wird für jeden Schrittmotor bzw. Controller ein Objekt dieser Klasse erstellt, um mit dem entsprechenden Controller kommunizieren zu können. Soll beispielsweise die maximale Rotationsgeschwindigkeit eines Schrittmotors eingestellt werden, muss lediglich die Funktion *write_speed* des dementsprechenden Objekts mit dem gewünschten Wert für die Geschwindigkeit aufgerufen werden. Die Funktion überprüft dann, ob der Wert im erlaubten Bereich liegt und schreibt den Wert in das korrekte Halteregister.

4.1.2 Steuerung der Bremsen für die Schrittmotoren

Wie bereits erwähnt, verfügt jeder Schrittmotor über eine elektromagnetische Bremse, die durch Anlegen einer Spannung gelöst werden kann. Zudem besitzt der Raspberry Pi einige nicht verwendete *General Purpose Input/Output Pins*, kurz GPIO-Pins, die durch das Aufrufen einer Funktion aus dem Python-Modul *RPi.GPIO* auf eine Spannung von 3,3 V gesetzt werden können. Da zum Lösen der Bremsen 24 V nötig sind, werden mithilfe der GPIO-Pins Relais geschaltet, durch die dann die benötigten 24 V an die Bremsen angelegt werden.

4.1.3 Threading

Im Allgemeinen kann in einem Programm immer nur eine Aufgabe gleichzeitig durchgeführt werden. Mittels *Threading* können allerdings mehrere Aufgaben in unterschiedlichen Threads parallel durchgeführt werden. Wirklich gleichzeitig werden die Aufgaben dabei nicht ausgeführt, da in der Standard-Implementation von Python (CPython) aufgrund des Global Interpreter Lock's (GIL) immer nur ein Thread simultan ausgeführt werden kann [22]. Von *Threading* können allerdings Programme, bei denen häufig auf externe Events gewartet werden muss (I/O-bound tasks), profitieren, da in der Wartezeit eines Threads einfach ein anderer Thread abgearbeitet wird. Um mehrere Threads wirklich gleichzeitig auszuführen, kann zum Beispiel *multiprocessing* verwendet werden. Dabei wird ein Programm mehrfach gestartet und jeder Prozess hat einen eigenen Python Interpreter und eigenen Speicherplatz, um so das GIL zu umgehen [23].

In der Steuersoftware wird die graphische Oberfläche im Main-Thread ausgeführt. Würde im Main-Thread ebenfalls die Bewegung der Motoren abgearbeitet werden, so würde die Benutzeroberfläche für die Zeit der Bewegung einfrieren. Da die Bewegung der Motoren keine CPU-lastige Aufgabe, sondern eine I/O-bound task ist, lässt sich das Problem durch Threading beheben. Für jede Bewegung der Motoren wird daher ein Thread gestartet, der diese abarbeitet. Da der Raspberry Pi bzw. das RS485 Shield nur einen Port besitzt, um mit den Controllern zu kommunizieren, gilt dabei zu beachten, dass immer nur ein Thread gleichzeitig auf den Port zugreifen darf, damit keine Fehler bei der Kommunikation auftreten. Um das zu erreichen, werden in der Steuersoftware $Locks^1$ eingesetzt. Bevor ein Thread den Port verwenden darf, muss er ein Lock akquirieren. Wird das Lock bereits von einem anderen Thread gehalten, so muss der Thread, der es erlangen will warten, bis der Besitzer es abgibt. Da also immer nur ein Thread gleichzeitig verwendet werden.

Neben dem Main-Thread und den Threads, die für die Bewegung der Motoren genutzt werden, laufen bei der Steuersoftware durchgehend zwei weitere Threads im Hintergrund.

Der erste dieser beiden Threads dient dazu, jede halbe Sekunde die Spannungen am ADC Board auszulesen und diese in die Positionen der Komponenten im Detektor umzurechnen. Zudem wird der Status der für die Bremsen benötigten GPIO-Pins geprüft. Nach jedem Auslesevorgang wird ein Signal emittiert, welches für die Aktualisierung der graphischen Oberfläche sorgt.

Der zweite Thread liest jede halbe Sekunde die Motor Positionen in Schritten, sowie

¹Manchmal auch *Mutex (Mutual Exclusion)* genannt.

Alarme, Warnungen und Sensor-Inputs der Motoren aus. Danach werden die Motor Positionen in vertikale Positionen der Komponenten umgerechnet und auch hier ein Signal zum Aktualisieren der Benutzeroberfläche emittiert.

4.1.4 PyQt Slots & Signals

Zur Programmierung der graphischen Oberfläche wird PyQt verwendet. PyQt ist eine Python-Version des in C++ programmierten Anwendungsframework Qt. Ein wichtiges Feature von Qt, welches im Backend verwendet wird, sind *Slots* und *Signals*. Slots und Signals erlauben die Kommunikation zwischen verschiedenen Objekten innerhalb der Software. Ein Slot ist eine normale Funktion, die zusätzlich aufgerufen wird, wenn ein mit dem Slot verbundenes Signal emittiert wird. Signale werden bei unterschiedlichsten Events emittiert, wie zum Beispiel bei User-Eingaben, wie Mausklicks oder Tastatureingaben, aber auch bei Änderungen an Widgets in der graphischen Oberfläche. Zudem können eigene Signale erstellt werden, die an beliebigen Stellen des Programms emittiert werden können [24].

In der Steuersoftware werden Slots und Signals neben der Erkennung von Knopfdrücken hauptsächlich deshalb genutzt, da das Ändern von Texten und anderen Widgets auf der graphischen Oberfläche außerhalb des Main-Threads zu Fehlern führen kann. Das Problem kann umgangen werden, indem Nicht-Main-Threads Signale emittieren, welche Slots auslösen, die im Main-Thread ausgeführt werden und dort die Oberfläche ändern.

4.1.5 Standardwerte und Logging

Für die Umrechnung der Motor Positionen bzw. der Potentiometer-Spannungen in vertikale Positionen der Komponenten sind einige Kalibrationsparameter notwendig. Um diese einfach ändern zu können, ohne im Code zu suchen, wurden diese in einem *json-File (JavaScript Object Notation* [25]) ausgelagert. Neben den Kalibrationsparametern werden zudem weitere Standardwerte in der json-Datei gespeichert, wie zum Beispiel welche Abstände zwischen dem Hintergrundschild und den anderen Komponenten eingehalten werden müssen und in welchen Bereich sich jede Komponente bewegen darf. Mit dem Modul *json* können json-Dateien einfach in Python eingelesen bzw. geschrieben werden.

Um Fehler im Code einfacher finden zu können und um nachzuvollziehen, welche Einstellungen an den Controllern der Schrittmotoren geändert wurden, werden zudem alle Aktionen in einem *log-File* dokumentiert. Dazu wird das Modul *logging* verwendet, was alle Einträge automatisch mit Datum und Uhrzeit versieht. Neben Einstellungen, die geändert wurden, werden auch die Positionen der Komponenten weggeschrieben, falls diese sich geändert haben. Außerdem werden Alarme und Warnungen der Motoren, sowie Fehler beim Ausführen von Funktionen in der log-Datei notiert ².

²Treten Fehler auf, werden diese zudem versucht abzufangen und der Benutzer durch Popups davon kenntlich gemacht.

4.2 Frontend

Ein PyQt-Programm besteht aus einem Hauptfenster (Main Window), in dem verschiedene graphische Elemente, die sogenannten Widgets, platziert werden können. Zu den Widgets zählen zum Beispiel Knöpfe, Textfelder oder Checkboxen, aber auch Slider, Progressbars und viele weitere graphische Elemente [26]. Vom Main Window aus können zudem weitere Fenster geöffnet werden. Um das Hauptfenster der Steuersoftware übersichtlicher zu machen, lässt sich für jeden Motor³ ein eigenes Fenster öffnen, in dem Einstellungen wie Geschwindigkeit und Beschleunigung vorgenommen werden können (Motor Settings Window). In diesem Abschnitt werden zunächst die Widgets im Main Window und anschließend die in den Motor Settings Windows erläutert.

4.2.1 Main Window

In Abbildung 4.1 ist ein Screenshot des Hauptfensters der Steuersofware zu sehen. Wie zu erkennen, ist das Hauptfenster in mehrere Gruppen aufgeteilt. Für jede bewegliche Komponente im Detektor gibt es eine eigene Gruppe mit Steuerungen. Dazu kommt auf der rechten Seite eine schematische Darstellung des Fluoreszenzdetektors, die die aktuellen Positionen der Komponenten visualisiert, sowie einige generelle Steuerungsknöpfe.

Die Gruppen für die Steuerung der Komponenten sind alle sehr ähnlich aufgebaut. Kleine Abweichungen gibt es nur für das Hintergrundschild und den Schlitz. Im Falle des Hintergrundschildes gibt es mehr Anzeigefelder, da zwei Motoren zur Bewegung benötigt werden. Beim Hintergrundschild gilt zudem zu beachten, dass die beiden Motoren, die das Hintergrundschild bewegen, perfekt synchron fahren müssen, damit das Schild keine Beschädigungen erleidet. Dazu wird die in Unterabschnitt 3.4.2 bereits angesprochene *Group send*-Funktion verwendet. Für den Schlitz ist die Gruppe in zwei Hälften aufgeteilt. Die obere Hälfte der Gruppe dient zur vertikalen Positionierung des Schlitzes und ist genauso wie die anderen Gruppen aufgebaut. Die untere Hälfte wird zur Einstellung der Schlitzbreite verwendet.

³Für die Motoren des Hintergrundschilds gibt es nur ein Motor Settings Window, da diese sowieso die gleichen Einstellungen besitzen müssen.


Abbildung 4.1: Hauptfensters der Steuersoftware. Bei der Aufnahme des Screenshots waren nur die beiden Motoren, die später das Hintergrundschild bewegen, verbunden.

Baffle 1		
No Connection		
Set position:	23.0 mm	
Move to position	Return to home	
STOP		
Potentiometer position: 3	37.88 mm	
Motor position : 0.00	mm	
WARNING		
ALARM		
No limit sensor triggered		
Motor settings		

Abbildung 4.2: Vergrößerte Darstellung der Baffle 1 Gruppe.

Anhand der Gruppe für die Steuerung von Baffle 1 in Abbildung 4.2 sollen die Anzeigefelder, sowie Funktionen der Knöpfe kurz erklärt werden. Als erstes Widget enthält die Gruppe ein Textfeld, welches anzeigt, ob eine Verbindung zum Motor besteht, bzw. ob der Motor gerade beschäftigt oder bereit ist. Darunter folgt der *Set positi*on-Knopf, der bei Betätigung ein Signal emittiert, welches ein Eingabefeld öffnet. In dieses kann die Position eingetragen werden, zu der Baffle 1 fahren soll, wenn der *Move* to position-Knopf gedrückt wird. Diese Position wird auch nochmals neben dem *Set* position-Knopf angezeigt. Wird der *Move to position*-Knopf gedrückt, wird zunächst geprüft, ob Baffle 1, wenn es zur gewünschten Position fahren würde, mit dem Hintergrundschild kollidiert. Anschließend wird aus der Distanz Δz zwischen aktueller und gewünschter Position⁴ eine Schrittzahl N berechnet, um die sich der Motor drehen muss, bevor der Motor durch eine Positionierungsoperation in die gewünschte Position fährt. Die Schrittzahl N berechnet sich durch

$$N = \Delta z \cdot \frac{500 \cdot d}{p}, \qquad (4.1)$$

wobei $500 \cdot d$ die Anzahl an Schritten pro Umdrehung ist⁵ und p die Spindelsteigung der Lineardurchführung, d.h. die zurückgelegte Distanz pro Umdrehung. Da die Schrittzahl immer eine ganze Zahl sein muss, wird das Ergebnis anschließend gerundet.

Neben dem *Move to position*-Knopf befindet sich der *Return to home*-Knopf. Dieser dient dazu, das Baffle in seine Parkposition zurückzufahren. Dabei fährt der Motor zunächst durch eine Positionierungsoperation zur Home-Position und anschließend wird die zwei Sensor Return-to-Home Operation durchgeführt. Dadurch wird die Home-Position neu gesetzt und mögliche Schrittverluste beseitigt. Im Falle von Baffle 1 muss nicht zuvor auf mögliche Kollisionen geprüft werden, da das Hintergrundschild oben Öffnungen für die Baffles enthält. Wird allerdings das Hintergrundschild zurück in die Parkposition gefahren, muss vorerst geprüft, dass dieses nicht von unten gegen die Baffles fährt.

 $^{^4\}mathrm{Als}$ aktuelle Position wird zurzeit die mithilfe der Linear potentiometer berechnete Position verwendet.

⁵Standardmäßig ist 500 die Anzahl an Schritten pro Umdrehung (Vollschrittwinkel von $0,72^{\circ}$). Der Faktor d gibt an, in wie viele Teile ein Vollschritt aufgeteilt wird.

Unter dem Move to position- und Return to home-Knopf befindet sich ein Stop-Knopf, welcher den Motor, der Baffle 1 bewegt, stoppt. Darunter sind zwei Textfelder zu sehen, die zum einen die durch die Potentiometer bestimmte Position z_{Poti} und zum anderen die aus der Schrittzahl berechnete Position z_{Steps} anzeigen. Die Potentiometer-Position z_{Poti} berechnet sich durch

$$z_{\text{Poti}} = a \cdot \frac{U_{\text{Poti}}}{U_{\text{Ref.}}} + b \,, \tag{4.2}$$

wobei a und b Kalibrationsparameter sind, sowie U_{Poti} die am Schleifkontakt des Potentiometers abgegriffene Spannung und $U_{\text{Ref.}}$ die an dem Potentiometer anliegende Referenzspannung. Aus der Schrittzahl n lässt sich die Position durch

$$z_{\text{Steps}} = n \cdot \frac{p}{500 \cdot d} + O_z \tag{4.3}$$

berechnen. Dabei ist $500 \cdot d$ erneut die Anzahl an Schritten pro Umdrehung und p die Spindelsteigung. O_z stellt einen beliebigen Offset dar.

Unter den Textfeldern für die Positionen folgen Anzeigen für die aktuelle Warnung und den aktuellen Alarm des Motors, sowie eine Anzeige für den Endschalter-Status. Als Letztes folgt ein Knopf, um das Motor Settings Window des Motors zu öffnen.

Auf der rechten Hälfte des Hauptfensters ist die schematische Darstellung des Detektors gezeigt. Sobald sich die Position einer Komponente ändert, bewegt sich diese auch in der Darstellung.

Unterhalb der Darstellung befinden sich weitere Knöpfe. Dazu zählt ein *Stop All*-Knopf, der alle Motoren stoppt. Daneben ist der *Work File*-Knopf zu sehen. Dieser dient dazu Messungen durchzuführen, bei denen nacheinander, die in einer Datei stehenden Positionen, abgefahren werden. Wird der Knopf gedrückt, so wird der Benutzer nach einem Input- und Output-File gefragt. Anschließend fahren alle Komponenten in ihre Home-Position und die im Input-File angegebenen Positionen werden nacheinander abgefahren. An jeder der Positionen bleiben die Komponenten für eine angegebene Zeit stehen. Dabei werden die an den Linearpotentiometern anliegenden Spannungen, sowie alle Motor Schrittzahlen im Output-File weggeschrieben.

Ebenfalls weggeschrieben werden die Potentiometerspannungen und Motor Positionen, wenn der *Start Record Positions*-Knopf gedrückt wird. Der Benutzer wird nach einem Namen für das Output-File gefragt und in definierten Zeitabständen werden die Daten gespeichert.

Unterhalb des *Start Record Positions*-Knopfs sind zwei Knöpfe platziert, die dazu dienen, die in Unterabschnitt 4.1.3 erwähnten Threads neu zu starten. Im Normalfall sollten die Threads automatisch neu starten, falls diese durch einen Fehler gestoppt sind. Da die Steuerung ohne diese im Hintergrund laufenden Threads allerdings nicht korrekt funktioniert, gibt es zusätzlich Knöpfe, um diese neu zu starten.

Als Letztes folgt der Exit-Knopf, der das Programm schließt.

Nicht alle der beschriebenen Knöpfe sollen zukünftig für jeden Benutzer verwendbar sein. Durch das Setzen eines Boolean in der *json*-Datei für die Standardwerte, können Funktionen, die für normale Benutzer nicht benötigt werden, deaktiviert werden. Dazu zählen zum Beispiel die Motor Settings Windows.

4.2.2 Motor Settings Windows

Die Motor Settings Windows sind für alle Motoren gleich aufgebaut. In Abbildung 4.3 ist beispielhaft das Fenster für die Hintergrundschildmotoren dargestellt, welches in mehrere Bereiche aufgeteilt ist.

	Background shiel	ld - Motor settings	~ ^ X
Background shield motors		Testina	Position
Switch rotation direction Set step angle Switch positioning mode Set starting speed Set acceleration Set maximum speed Set deceleration	Current value: +direction = CW 0.18° Absolute 400 Hz 20000 µs/kHz 4000 Hz 20000 µs/kHz	Turn forwardTurn reverseTurn stepsReturn to homeEscape LSToggle brakeBrake engagedStop	Potentiometer 1: 4.9615 V Motor position 1: 0 steps Potentiometer 2: 4.9601 V Motor position 2: 0 steps Reference: 4.9848 V
Home-seeking settings		Status	
Switch mode Switch starting direction Set position offset Set backward steps	Current value: 2 sensors Negative 0 steps 200 steps	Print status Print warnings Print alarms Print com-errors	
Set starting speed	400 Hz	Reset warnings	Refresh
Set acceleration	20000 µs/kHz	Reset alarms	Reset to default
Set maximum speed	4000 Hz	Reset com-errors	Make settings default

Abbildung 4.3: Screenshot des Motor Settings Windows für die Hintergrundschildmotoren.

In der oberen linken Ecke lassen sich allgemeine Einstellungen, sowie die Einstellungen für die kontinuierlichen und Positionierungsoperationen ändern. Mit dem *Switch* rotation direction-Knopf kann die Rotationsrichtung, die als positiv definiert wird, geändert werden und mit dem *Set step angle*-Knopf lässt sich der Schrittwinkel auf einen von 16 Werten setzen⁶. Der *Switch positioning mode*-Knopf wechselt zwischen inkrementellen und absoluten Positionierungsmodus und die weiteren Buttons dienen zur Einstellung von Startgeschwindigkeit, Beschleunigung, Maximalgeschwindigkeit und Verzögerung.

Unter den *Operation settings* sind die Einstellmöglichkeiten für die Return-to-Home Operation. Der *Switch mode*-Knopf wechselt zwischen 2-Sensor und 3-Sensor-Modus, der *Switch starting direction*-Knopf ändert die Richtung, in die die Motoren sich beim

 $^{^{6}\}mathrm{Eine}$ Tabelle mit den möglichen Schrittwinkeln ist in der Bedienungsanleitung der Controller [18] zu finden.

Start der Return-to-Home Operation drehen sollen und der *Set position offset*-Knopf setzt das in Unterabschnitt 3.4.1 erwähnte Offset bei der Return-to-Home Operation. Zudem lässt sich die Schrittzahl, die die Motoren im 2-Sensor-Home-Seeking-Modus vom Endschalter wegfahren, mithilfe des *Set backward steps*-Knopfs definieren. Die nachfolgenden Knöpfe dienen der Einstellung von Startgeschwindigkeit, Beschleunigung/Verzögerung und Maximalgeschwindigkeit bei der Return-to-Home Operation.

In der Mitte des Fensters oben sind einige Knöpfe zum Testen der Bewegung der Motoren zu finden. Die Funktionen, die durch diese Knöpfe gestartet werden, prüfen anders als die im Hauptfenster nicht, ob es zu Kollisionen kommen kann. Mit den *Turn forward-* und *Turn reverse-*Knöpfen lassen sich die Motoren für eine vom Benutzer eingegebene Zeit in Vorwärts- bzw. Rückwärtsrichtung bewegen. Wird der *Turn steps-*Knopf gedrückt, so kann der Benutzer je nach Positionierungsmodus eine Schrittzahl eingeben, um die die Motoren sich drehen sollen, bzw. zu der sie fahren sollen. Der *Return to home-*Knopf führt die Return-to-Home Operation aus, ohne dabei zunächst zur Home-Position zu fahren. Als Nächstes folgt die *Escape LS-*Funktion, die dazu dient aus den Endschaltern herauszufahren. Sie nutzt dabei die kontinuierliche Bewegung der Motoren, da es nicht möglich ist, durch Positionierungsoperationen aus den Endschaltern herauszufahren. Die Return-to-Home Operation ist auch eine Möglichkeit aus den Endschaltern herauszufahren, dabei fahren die Motoren allerdings wieder in die Home-Position. Als Letztes folgt ein Knopf, um die Bremsen manuell zu schalten und ein Anzeigefeld für den Status der Bremsen, sowie ein *Stop-*Knopf.

Unter dem *Testing*-Bereich sind vier Knöpfe für das Anzeigen des Status, sowie von Warnungen, Alarmen und Kommunikationsfehlern der Motoren platziert. Im Status wird zum Beispiel angezeigt, ob die Motoren sich gerade bewegen, oder ob ein Endschalter betätigt wird. Zu Warnungen zählen beispielsweise Überhitzung oder Überspannung der Motoren. Überschreiten diese einen kritischen Wert, so werden sie auch als Alarm angezeigt und die Motoren lassen sich nicht mehr bewegen. Weitere Alarme treten zum Beispiel auf, wenn ein Endschalter erreicht wird, oder die Endschalter verkehrt herum angeschlossen sind. Kommunikationsfehler werden angezeigt, wenn Fehler bei der Übertragung von Daten zwischen Raspberry Pi und Controller aufgetreten sind, ein nicht definierter Befehl an die Controller gesendet wird oder ein Wert außerhalb des erlaubten Wertebereichs liegt. Um die Warnungen, Alarme und Kommunikationsfehler zurückzusetzen, können die darauf folgenden Knöpfe verwendet werden.

Oben rechts im Fenster lässt sich die Spannung an den Linearpotentiometern, sowie die Position der Motoren in Schritten ablesen. Im Falle der Hintergrundschildmotoren werden für beide Motoren die Spannung, sowie die Motor Position angezeigt. Zudem wird die an den Potentiometern anliegende Referenzspannung angegeben.

In der unteren rechten Ecke des Fensters ist ein Knopf, um die Einstellungen der Motoren neu auszulesen und in den Anzeigefeldern darzustellen (*Refresh*). Außerdem sind dort zwei Buttons platziert, um die aktuellen Einstellungen der Motoren im nichtflüchtigen Speicher der Controller abzusichern (*Make settings default*) bzw. die Einstellungen aus diesen zu laden (*Reset to default*).

5 Messungen am Testaufbau

Zum Testen der Steuersoftware, sowie zum Ermitteln der Positionierungsgenauigkeit der Lineardurchführungen wurde ein Testaufbau (siehe Abbildung 5.1) errichtet. Er besteht aus einem Gestell aus Aluminiumprofilen, auf das eine Kunststoffplatte mit fünf Flanschen zur Montage der Lineardurchführungen befestigt ist. Die Flansche haben dieselben Abstände, wie auch später in der Detektorkammer. Damit die Vakuum-Komponenten der Lineardurchführungen vor Staub und Schmutz geschützt sind, wurden in die Aluminiumprofile Plexiglasscheiben eingeschoben.

Die Schrittmotoren, Linearpotentiometer und Controller wurden gemäß Abbildung 3.3 mit dem Raspberry Pi verbunden. Zum Betreiben der Linearpotentiometer wird ein Labornetzteil vom Typ NGT 20 der Firma Rohde & Schwarz verwendet und für die Controller und Bremsen das Netzteil ALE2405 von elc.



Abbildung 5.1: Foto des verwendeten Testaufbaus.

Mithilfe des Testaufbaus wurde die Genauigkeit der Home-Position, Unsicherheiten der Potentiometer, sowie die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von Positionierungen ermittelt. Zudem wurden die Sprünge der Auslenkung der Lineardurchführungen beim Ein- bzw. Ausschalten der an den Motoren befestigten Bremsen und die synchrone Bewegung zweier Lineardurchführungen untersucht. Für Messungen, bei denen die Auslenkung einer Lineardurchführung bestimmt werden musste, wurde eine Messuhr unter der Lineardurchführung platziert (siehe Abbildung 5.2). Anhand der Messuhr kann dann die relative Auslenkung der Lineardurchführung abgelesen werden.



Abbildung 5.2: Foto des Aufbaus zur Messung der Auslenkung der Lineardurchführung. Im Bild eine Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 μm zu sehen.

5.1 Genauigkeit der Home-Position

Um die Genauigkeit der Home-Position zu bestimmen, wurde wiederholt die Return-to-Home Operation (2-Sensor-Modus) durchgeführt und anschließend die Auslenkung der Lineardurchführung gemessen. Dabei wurde zunächst eine Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 μ m verwendet. Diese zeigte nach der Return-to-Home Operation immer denselben Wert, weshalb die Messung mit einer genaueren Messuhr (Ableseungenauigkeit 2 μ m) wiederholt wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.3 zu sehen.

Es ergibt sich eine Standardabweichung von $1,07 \,\mu\text{m}$ und der größte Ausreißer ist $(2,4\pm0,5) \,\mu\text{m}$ vom Mittelwert entfernt. Anhand der Abbildung lässt sich zudem ein leichter Trend nach unten erkennen. Die Ursache dafür ist vermutlich, dass der ausrichtbare Hebelarm der Messuhr durch die aufeinanderfolgenden Messungen leicht nach

unten verstellt wurde.



Abbildung 5.3: Aufgetragen ist die Auslenkung der Lineardurchführung nach der Return-to-Home Operation für die 28 nacheinander ausgeführten Messungen zusammen mit dem Mittelwert und der Standardabweichung.

5.2 Unsicherheiten der Linearpotentiometer

Zur Ermittlung der Unsicherheiten der Potentiometer wurden für zwei der an die MLS 40-50 S2 Lineardurchführungen montierten Linearpotentiometer Messungen durchgeführt. Bei einer Messung wurden für eine Stunde alle zwei Sekunden die an den Potentiometern anliegende Referenzspannung $U_{\text{Ref.}}$, sowie die über den Schleifkontakt abgegriffene Spannung U_{Poti} mithilfe des ADC Boards gemessen. Die Messung wurde für drei Auslenkungen der Lineardurchführungen wiederholt (ungefähre Auslenkung relativ zum oberen Endschalter: Oben $\hat{=} 2.5 \,\mathrm{mm}$, Mitte $\hat{=} 20 \,\mathrm{mm}$, Unten $\hat{=} 45 \,\mathrm{mm}$). Des Weiteren wurden Messungen mit zwei 34465A 6.5 Digit Multimetern von Keysight an einem der Potentiometer durchgeführt. Zunächst wurde etwa eine Stunde parallel mit dem ADC Board und den Multimetern bei einer Auslenkung von 20 mm gemessen. Anschließend wurde zweimal circa eineinhalb Stunden nur mit den Multimetern gemessen. Die Auslenkung der Lineardurchführung relativ zum oberen Endschalter betrug dabei etwa 20 mm bzw. bei der zweiten Messung 10 mm. Die an den Schrittmotoren montierten Bremsen waren während all dieser Messungen gelöst und die Schrittmotoren selbst unbestromt¹. Zuletzt wurden zwei weitere Messungen, einmal mit eingeschalteter Bremse und einmal mit bestromten Motor, durchgeführt. Das heißt, während beider dieser Messungen ließ sich der Motor nicht drehen. Bei den Messungen wurde erneut bei einer Auslenkung von etwa 20 mm nur mit den Multimetern etwa eineinhalb Stunden gemessen.

¹Wie zuvor erwähnt, sind die Bremsen gelöst, falls eine Spannung an diese angelegt wird. Zudem gilt anzumerken, dass die Motoren im unbestromten Zustand nur ein niedriges Selbsthaltemoment aufweisen.

5.2.1 Messungen mit zwei Potentiometern bei verschiedenen Auslenkungen

Für die Berechnung der Position einer Komponente mittels der Linearpotentiometer wird der Quotient aus Potentiometer- und Referenzspannung $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ benötigt (vgl. Gleichung 4.2). Deshalb wurde für jeden Messpunkt der Quotient berechnet und anschließend die Standardabweichung $\sigma(U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}})$ ermittelt. In Abbildung 5.4 sind die Standardabweichungen der beiden Potentiometer, bei Messung mit dem ADC Board, gegen die Auslenkung der Lineardurchführungen aufgetragen. Um abschätzen zu können, wie groß die Schwankungen der durch die Potentiometer bestimmten Position ist, ist in der Abbildung zudem die Standardabweichung der Potentiometer-Position angegeben. Diese ergibt sich durch Multiplikation von $\sigma(U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}})$ mit der Länge der Potentiometer $(l = 50 \text{ mm})^2$. Es lässt sich erkennen, dass die Standardabweichung mit zunehmender Auslenkung abnimmt.



Abbildung 5.4: Standardabweichungen der Potentiometer bei Messung mit dem ADC Board für verschiedene Auslenkungen der Lineardurchführungen.

Um Drifts in der Referenz- bzw. Potentiometerspannung erkenntlich zu machen, sind in Abbildung 5.5 die Referenz- und Potentiometerspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ beispielhaft für Potentiometer 1 in der mittleren Position gegen die Zeit aufgetragen. Wie zu erkennen ist, bleibt die Referenzspannung im Laufe der Messung nahezu konstant, während die Potentiometerspannung und damit auch der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ zunächst stärker und dann weniger stark nach oben driftet. Auch beim zweiten Potentiometer und bei anderen Auslenkungen der Lineardurchführungen sind diese Trends zu erkennen (siehe Anhang A.4). Im Falle der unteren Position ist der Drift allerdings nach unten. Weiterhin fällt auf, dass die Potentiometerspannungen U_{Poti} der beiden Potentiometer bei gleicher Auslenkung leicht voneinander abweichen.

²Genauer genommen müsste die Standardabweichung mithilfe von Gleichung 4.2 und den Kalibrationsparametern $a \approx l$ und b berechnet werden. Hier soll allerdings nur eine ungefähre Schätzung der Genauigkeit der Potentiometer-Position angegeben werden. Für die Umrechnung von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ in eine Position wurde in den nachfolgenden Abbildungen a = -50 mm und ein Offset von b = 50 mmverwendet.



Abbildung 5.5: Referenz- und Potentiometerspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für Potentiometer 1 in der mittleren Position gegen die Zeit.

Damit die Drifts genauer quantifiziert werden können, wurde jeweils ein linearer Fit durch die Auftragung des Quotienten $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Zeit gelegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 zu sehen. Außerdem wurde nochmals die Standardabweichung von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ in einem Bereich ohne bzw. mit geringen Drift (jeweils zwischen 3000 s und 3500 s) berechnet (siehe Abbildung 5.6). Die Standardabweichung ohne Drift ist wie zu erwarten geringer als die Standardabweichung mit Drift und nimmt mit zunehmender Auslenkung der Lineardurchführungen tendenziell ab.

Tabelle 5.1: Drift des Quotienten $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ der Potentiometer für verschiedene Auslenkungen der Lineardurchführungen. Der Wert in μ m/min wurde durch Multiplikation mit der Länge der Potentiometer (50 mm) berechnet.

Degition	Drift Potentiometer 1		Drift Potentiometer 2		
POSITION	in $10^{-6} \cdot 1/\min$	in $\mu m/min$	in $10^{-6} \cdot 1/\min$	in $\mu m/min$	
Oben	$1,97\pm0,07$	$0,099 \pm 0,004$	$7,19\pm0,10$	$0,360 \pm 0,005$	
Mitte	$2,04\pm0,06$	$0,102\pm0,003$	$4,13\pm0,08$	$0,207\pm0,004$	
Unten	$-0,74 \pm 0,03$	$-0,037 \pm 0,002$	$-1,20\pm 0,04$	$-0,060 \pm 0,002$	



Abbildung 5.6: Standardabweichungen der Potentiometer bei Messung mit dem ADC Board in einem Bereich ohne bzw. mit geringen Drift (jeweils zwischen 3000 s und 3500 s) für verschiedene Auslenkungen der Lineardurchführungen.

5.2.2 Messungen mit den Multimetern

Um die Drifts der Potentiometer genauer zu untersuchen, wurden die Messungen mit den Multimetern durchgeführt. In Abbildung 5.7 sind die Referenz- und Potentiometerspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für die Messung, bei der gleichzeitig mit Multimetern und ADC Board gemessen wurde, übereinander aufgetragen. Die Standardabweichungen der drei Größen, sowie der mithilfe eines linearen Fits ermittelte mittlere Drift sind zudem in Tabelle 5.2 zu finden. Dabei fällt auf, dass die Multimeter wie zu erwarten eine höhere Genauigkeit aufweisen. Zudem zeigt sich sowohl bei den Multimetern, als auch beim ADC Board ein gleicher kleiner Drift von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ nach oben.

Tabelle 5.2: Standardabweichungen der Referenzspannung, Potentiometerspannung und des Quotienten $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$, sowie mittlerer Drift von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für die Messung mit Multimetern und ADC Board.

	Multimeter	ADC Board
Standardabweichung	$2.0 \cdot 10^{-5} \text{ V}$	$2.3 \cdot 10^{-4} \text{ V}$
Referenzspannung	2,0 10 1	2,0 10 V
Standardabweichung	$0.3 \cdot 10^{-5} V$	$2.3 \cdot 10^{-4} \text{ V}$
Potentiometerspannung	9,3.10	2,3.10 V
Standardabweichung	$1.7 \ 10^{-5}$ boy 0.0 µm	$5.0 \ 10^{-5}$ hzy $2.5 \ \mu$ m
$U_{\rm Poti}/U_{\rm Ref.}$	$1, 7 \cdot 10$ DZw. $0,9 \mu \text{m}$	5,0.10 DZw. 2,5 µm
Mittlerer Drift	$(5, 4 \pm 0, 2) \cdot 10^{-7} 1/\text{min}$	$(5, 6 \pm 0, 5) \cdot 10^{-7} 1/\text{min}$
Mittherer Difft	$(0,0269 \pm 0,0011) \mu\text{m/min}$	$(0,028 \pm 0,003) \mu m/min$



Abbildung 5.7: Referenz- und Potentiometerspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für Potentiometer 1 für die Messung mit Multimetern und ADC Board gegen die Zeit. Die Messwerte des ADCs wurden zum besseren Vergleich nach oben verschoben. Zudem wurden einige große Ausreißer vom ADC Board herausgeschnitten und der Fit für das ADC Board bei der Auftragung von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ herausgelassen, da dieser mit dem Fit für das Multimeter überlappt.

Die Ergebnisse für die erste Messung nur mit Multimetern bei einer Auslenkung von 20 mm ist in Abbildung 5.8 oben zu sehen. Wie in der Abbildung zu erkennen, gibt es erneut einen Drift von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ nach oben, der umgerechnet insgesamt etwa 5,5 µm beträgt.

Auch die zweite Messung nur mit Multimetern bei einer Auslenkung von 10 mm zeigt einen Drift nach oben (siehe Abbildung 5.8 unten). In diesem Fall ist der Drift allerdings kleiner (nur insgesamt etwa $1,5 \,\mu$ m) und flacht mit der Zeit ab.

Die Ergebnisse der Messung nur mit Multimetern und eingeschalteter Bremse sind in Abbildung 5.9 oben dargestellt. Es sind zwar Drifts nach oben und nach unten zu erkennen, jedoch sind sie deutlich kleiner als in den vorherigen Messungen (Gesamtdrift etwa $0.5 \,\mu$ m).

Die letzte Messung nur mit Multimetern und bestromten Motor (Bremse war ausgeschaltet) zeigt erneut einen deutlich stärkeren Drift von insgesamt etwa 8 μ m (siehe Abbildung 5.9 unten).



Abbildung 5.8: Referenz- und Potentiometerspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für Potentiometer 1 gegen die Zeit für die erste Messung mit den Multimetern (oben) und die zweite Messung mit den Multimetern (unten).



Abbildung 5.9: Referenz- und Potentiometerspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für Potentiometer 1 gegen die Zeit für die Messung mit den Multimetern und eingeschalteter Bremse (oben) und die Messung mit den Multimetern bei bestromten Motor (unten).

5.2.3 Diskussion

Aus den Messungen mit zwei Potentiometern bei verschiedenen Auslenkungen lässt sich schließen, dass die Genauigkeit der mithilfe der Potentiometer bestimmten Position mit zunehmender Auslenkung der Lineardurchführung steigt. Außerdem zeigen sie, dass jedes Potentiometer einzeln kalibriert werden muss, da die Potentiometerspannung von Potentiometern des gleichen Typs bei gleicher Auslenkung unterschiedlich sein kann.

Da die Messungen mit zwei Potentiometern teils große Drifts von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ und damit der Potentiometer-Position aufweisen, wurden zur Untersuchung der Drifts Messungen mit zwei sehr präzisen Multimetern durchgeführt. Die Messung, bei der gleichzeitig die Spannungen mit den Multimetern und dem ADC Board gemessen wurden, zeigt, dass sowohl mit den Multimetern, als auch dem ADC Board derselbe Drift zu erkennen ist. Der Drift bei der Messung war jedoch deutlich kleiner, als in einigen der Messungen mit zwei Potentiometern. Um zu überprüfen, ob der Drift womöglich dadurch entsteht, dass aufgrund eines geringen Eingangswiderstands des ADC Boards ein signifikanter Strom durch das Board fließt, welcher den Schleifwiderstand des Potentiometers teilweise erwärmt, wurden weitere Messungen ohne das ADC Board durchgeführt. Auch diese weisen einen Drift von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ auf.

Da die bis zu diesem Zeitpunkt vollzogenen Messungen alle ohne eingeschaltete Bremse und ohne bestromten Motor durchgeführt wurden, wurden zwei weitere Messungen, einmal mit eingeschalteter Bremse und einmal mit bestromten Motor durchgeführt, um zu überprüfen, ob der Drift möglicherweise aus eine mechanische Bewegung der Lineardurchführungen stammt. Die Messung mit eingeschalteter Bremse zeigt ebenfalls Drifts von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$, die allerdings deutlich kleiner als die zuvor gemessenen Drifts sind. Die Messung mit bestromten Motor zeigt wiederum einen deutlich stärkeren Drift, weshalb davon auszugehen ist, dass der Drift nicht durch eine ungewollte Drehung des Motors zustande kommt.

Auffällig ist, dass die meisten Messungen, die einen starken Drift aufweisen, unter möglicherweise ändernden Temperaturbedingungen verrichtet wurden. Die Messungen mit zwei Potentiometern, die hauptsächlich große Drifts aufweisen, wurden nach einem Tag mit einer Außentemperatur über 30 °C durchgeführt. An dem Tag der Messung selbst betrug die Außentemperatur nur knapp über 20°C, weshalb Änderungen der Raumtemperatur bei der Messung nicht auszuschließen sind. Die Messungen mit den Multimetern, die tendenziell geringere Drifts zeigen, wurden alle an Tagen durchgeführt, an denen die Außentemperatur nur knapp über 20 °C lag und sich kaum verändert hat. Zudem zeigt die Messung mit eingeschalteter Bremse einen besonders kleinen Drift. Um die Bremse einzuschalten, wurde bei der Messung das 24 V Netzteil, welches auch die Motoren mit Strom versorgt, ausgeschaltet. Das heißt, während der Messung wurde nur wenig Wärme in der Nähe der Potentiometer freigesetzt. Die Messung mit bestromten Motor zeigt wiederum einen deutlich stärkeren Drift. Zu beachten gilt dabei, dass sich der Motor im bestromten Zustand stark erwärmt. Aufgrund dieser Beobachtungen lässt sich daher vermuten, dass es sich bei den Drifts um temperaturabhängige Effekte handelt. Dafür spricht auch, dass bei der Messung mit bestromten Motor als Wärmequelle neben dem Potentiometer, der Drift mit der Zeit flacher wird, das System sich also einem Gleichgewichtszustand annähert. Um dies genauer zu untersuchen, könnten zukünftig Messungen, bei denen parallel die Temperatur in der Nähe des Potentiometers gemessen wird, vollzogen werden.

5.3 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Positionierung

Um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Positionierung von Detektorkomponenten anhand der Schrittzahl der Motoren zu untersuchen, wurde die Auslenkung einer der *MLS 40-50 S2* Lineardurchführungen beim Drehen des Motors um gewisse Schrittzahlen mithilfe einer Messuhr gemessen.

In der ersten Messung wurde eine Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 μ m verwendet und der Schrittwinkel des Motors so eingestellt, dass ein Schritt einer theoretischen vertikalen Bewegung von einem Mikrometer entspricht (berechnet aus der Spindelsteigung und dem Schrittwinkel). Die Lineardurchführung wurde dann zwischen einer Schrittzahl von 12290 bis 15090 in 200er-Schritten, also 200 μ m-Schritten zweimal runter- und wieder hochgefahren. Dabei wurde an jedem Messpunkt auch die Potentiometer- und Referenzspannung gemessen.

In einer zweiten Messung wurde dasselbe mit einem kleineren Schrittwinkel wiederholt $(0,016 \,\mu\text{m}$ pro Schritt; Schrittzahl von 750000 bis 925000 in 12500er-Schritten, also 200 μ m-Schritte).

Zuletzt wurde nochmals mit der Einstellung 1 μ m/Schritt, mit einer genaueren Messuhr (Ableseungenauigkeit 2 μ m, Schrittzahl von 1640 bis 1710) und ohne Messuhr (Schrittzahl von 12300 bis 14300) in 10er-Schritten, also 10 μ m-Schritten gemessen.

5.3.1 Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors

Abbildung 5.10 zeigt einige Auftragungen der Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors aus der ersten Messung. Zum Vergleich sind die gleichen Auftragungen für die zweite Messung in Abbildung 5.11 zu finden. Oben links in den Abbildungen ist zunächst das erste Herunterfahren der Lineardurchführung zu sehen. Rechts daneben ist zusätzlich das anschließende Herauffahren der Durchführung dargestellt, wobei ein Versatz zu erkennen ist. Im Falle der ersten Messung beträgt die mittlere Differenz zwischen den Messpunkten bei gleicher Schrittzahl (148 ± 3) µm. Bei der zweiten Messung beträgt sie $(151 \pm 3) \mu m$, d.h. der Versatz ist unabhängig vom Schrittwinkel. Auch beim zweiten Herunter- und Herauffahren ist der Versatz zu erkennen (siehe unten links in den Abbildungen).

In Tabelle 5.3 sind die Standardabweichungen, sowie die größten Werte der Residuen für die unterschiedlichen Herauf- und Herabbewegungen der Lineardurchführung zu sehen. Auffällig ist dabei, dass die Werte für die Herabbewegungen kleiner sind als für die Heraufbewegungen. Zudem sind die Residuen in der zweiten Messung mit kleineren Schrittwinkel tendenziell kleiner. In der Tabelle sind zudem die Steigungen der Fitgeraden gegeben. Diese stimmen alle, außer für das erste Herunterfahren bei Messung 1, mit den theoretischen Werten überein.

Weiterhin fällt auf, dass die Residuen jeweils bei beiden Herab- bzw. Heraufbewegungen einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Zum besseren Vergleich sind in Anhang A.4 in Abbildung A.9 und Abbildung A.10 oben jeweils beide Herab- bzw. Heraufbewegungen in einem gemeinsamen Plot dargestellt. Dabei lässt sich auch erkennen, dass der Verlauf der Residuen bei beiden Messungen mit unterschiedlichen Schrittwinkel gleich aussieht.

Um zu überprüfen, ob die Positionierungen reproduzierbar sind, sind in Abbildung 5.10 bzw. 5.11 unten rechts beide Herabbewegungen zusammen mit den Fit für das erste



Abbildung 5.10: Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors für die Messung mit 1 μm/Schritt und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 μm. Durch die Messwerte in eine Bewegungsrichtung wurde jeweils ein linearer Fit gelegt. Die berechnete Position (relativ zum oberen Endschalter) wurde mit Gleichung 4.3 aus der Schrittzahl ermittelt.

Tabelle 5.3: Standardabweichungen σ (in μ m) und größte Werte der Residuen R_{\max} (in μ m), sowie Steigungen m der Fitgeraden für die Auftragungen in Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11.

Bowogung		Messung 1 $(1 \mu m/Schritt)$		Messung 2 (0,016 μ m/Schritt)		
Dewegung	σ	$R_{\rm max}$	m in μ m/Schritt	σ	$R_{\rm max}$	m in nm/Schritt
Runter 1	3,5	7,3	$0,9955 \pm 0,0011$	2,1	4,0	$15,92 \pm 0,10$
Hoch 1	9,8	15,1	$0,999\pm0,003$	8,9	15,4	$16,00\pm0,05$
Runter 2	4,7	9,5	$1,000 \pm 0,002$	1,8	4,3	$16,00 \pm 0,10$
Hoch 2	8,6	10,9	$1,000 \pm 0,003$	6,7	$11,\!6$	$15,98\pm0,04$

Herunterfahren zu sehen. Für das zweite Herunterfahren relativ zum Fit Runter 1 ergibt sich für die erste Messung ein Mittelwert der Residuen von -7,6 µm mit einer Standardabweichung von 5,8 µm. Der größte Wert beträgt 19,1 µm. Für die zweite Messung ergibt sich ein Mittelwert von -4,2 µm mit einer Standardabweichung von 4,5 µm und der größte Wert beträgt 9,9 µm. Auch hier sind die Residuen für die zweite Messung kleiner als für die erste.



Abbildung 5.11: Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors für die Messung mit 0,016 μm/Schritt und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 μm.

5.3.2 Auslenkung der Messuhr gegen die Potentiometer

Die Auslenkung der Messuhr gegen den Quotienten aus der Potentiometer- und Referenzspannung $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ ist in Abbildung 5.12 für die erste Messung aufgetragen. Für die zweite Messung sind die Auftragungen in Anhang A.4 in Abbildung A.11 zu finden. Anhand des Plots mit den Messwerten aller vier Herauf- und Herabbewegungen lässt sich erkennen, dass es in diesem Fall keinen Versatz gibt. Dies wird nochmals durch die mit ihrer Unsicherheit übereinstimmenden Fitparameter aus Tabelle 5.4 bestätigt. Weiterhin fällt auf, dass die Steigungen der linearen Fits leicht von dem theoretisch erwarteten Wert von 50 mm (Länge der Potentiometer) abweichen³, wobei die Abweichung auch dadurch stammen kann, dass die Potentiometer etwas länger als 50 mm sind.

Auch bei diesen Auftragungen fällt auf, dass die Residuen jeweils bei beiden Herabbzw. Heraufbewegungen einen ähnlichen Verlauf aufweisen, der auch bei beiden Schrittwinkeln gleich aussieht.

³Das Vorzeichen der Steigung hängt von der Richtung der angelegten Spannung bzw. der positiv definierten Richtung ab.



Abbildung 5.12: Auslenkung der Messuhr gegen den Quotienten $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für die Messung mit 1 µm/Schritt und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 µm.

Tabelle 5.4: Steigungen m und Achsenabschnitte b der linearen Fits aus Abbildung 5.12 und Abbildung A.11.

Bowogung	Messung 1 $(1 \mu m/Schritt)$		Messung 2 (0,016 μ m/Schritt)	
Dewegung	m in mm	b in mm	m in mm	$b ext{ in mm}$
Runter 1	$-50, 6 \pm 0, 2$	$43,0 \pm 0,2$	$-50, 7 \pm 0, 2$	$43,09 \pm 0,14$
Hoch 1	$-51, 1 \pm 0, 2$	$43, 42 \pm 0, 12$	$-51, 1 \pm 0, 2$	$43, 33 \pm 0, 12$
Runter 2	$-51, 1 \pm 0, 2$	$43, 3 \pm 0, 2$	$-51, 1 \pm 0, 2$	$43, 4 \pm 0, 2$
Hoch 2	$-51, 1 \pm 0, 2$	$43, 44 \pm 0, 12$	$-51, 0 \pm 0, 2$	$43, 31 \pm 0, 12$
Zusammen	$-50,92 \pm 0,15$	$43, 23 \pm 0, 11$	$-50,96 \pm 0,12$	$43,26 \pm 0,09$

5.3.3 Potentiometer gegen die Schrittzahl des Motors

In Abbildung 5.13 ist der Quotient der Potentiometer- und Referenzspannung $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl des Motors für die ersten beiden Messungen aufgetragen. Genauso wie bei den Auftragungen der Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl lässt sich ein Versatz zwischen Herab- und Heraufbewegung erkennen. Im Falle der ersten Messung beträgt der Versatz zwischen ersten Herab- und Herauffahren $(3, 52 \pm 0, 10) \cdot 10^{-3}$ bzw. $(180 \pm 5) \,\mu\text{m}$ und für die zweite Messung $(3, 41 \pm 0, 10) \cdot 10^{-3}$ bzw. $(174 \pm 5) \,\mu\text{m}^4$.

Wieder lässt sich erkennen, dass die Residuen jeweils bei beiden Herab- bzw. Heraufbewegungen einen ähnlichen Verlauf aufweisen, der auch bei beiden Schrittwinkeln gleich aussieht. In Anhang A.4 in Abbildung A.9 und Abbildung A.10 sind unten jeweils beide Herab- bzw. Heraufbewegungen in einem gemeinsamen Plot dargestellt.



Abbildung 5.13: Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl des Motors für die Messung mit 1 µm/Schritt (oben) und die Messung mit 0,016 µm/Schritt (unten).

5.3.4 Messung mit der genaueren Messuhr

Abbildung 5.14 zeigt die Auslenkung der genaueren Messuhr (Ableseungenauigkeit von $2 \,\mu\text{m}$) aufgetragen gegen die Schrittzahl des Motors. Anders als in der Messung mit der 10 μ m-Messuhr ist kein Versatz zwischen Auf- und Abbewegung zu erkennen. Außerdem sind die Residuen auf der abgefahrenen Strecke von etwa 70 μ m kleiner als mit der 10 μ m-Messuhr und die Steigungen der Fitgeraden weichen leicht vom erwarteten Wert von 1 μ m/Schritt ab (siehe Tabelle 5.5). Werden die Residuen für das zweite Herunterfahren relativ zur Fitgerade Runter 1 betrachtet, ergibt sich ein Mittelwert von

⁴Die Umrechnung von $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ in eine Strecke bzw. eine Position erfolgt im Weiteren mittels Gleichung 4.2 und a = -51 mm (vgl. Tabelle 5.4). Der Kalibrationsparameter b wird willkürlich gewählt.



1,3 µm mit einer Standardabweichung von 0,7 µm und der größte Wert beträgt 1,9 µm.

Abbildung 5.14: Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors für die Messung mit 1 μm/Schritt und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 2 μm. Beim zweiten Herunterfahren wurde nur bis zu einer Schrittzahl von 1690 gefahren.

Tabelle 5.5: Standardabweichungen σ und größte Werte der Residuen R_{max} , sowie Steigungen m der Fitgeraden für die Auftragungen in Abbildung 5.14.

Bewegung	σ in μ m	$R_{\rm max}$ in $\mu { m m}$	m in μ m/Schritt
Runter 1	0,3	$0,\!4$	$-0,974 \pm 0,005$
Hoch 1	0,6	1,2	$-0,984 \pm 0,010$
Runter 2	0,6	$0,\!8$	$-0,96\pm0,02$
Hoch 2	0,3	0,4	$-0,963 \pm 0,008$

In Abbildung 5.15 ist nochmals die Auslenkung der Messuhr gegen $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ und $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl des Motors aufgetragen. Wie auch bei der 10 µm-Messuhr ist in der Auftragung $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl des Motors ein Versatz zu erkennen. Dieser beträgt $(5,01 \pm 0,07) \cdot 10^{-3}$ bzw. (26 ± 4) µm (berechnet aus den Messwerten mit einer Schrittzahl zwischen 1640 und 1680). Anders als bei den Messungen mit der 10 µm-Messuhr ist nun auch in der Auftragung der Auslenkung der Messuhr gegen $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ ein Versatz zu erkennen.



Abbildung 5.15: Auslenkung der Messuhr gegen $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ (oben), sowie $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl des Motors (unten) für die Messung mit $1 \,\mu\text{m/Schritt}$ und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von $2 \,\mu\text{m}$.

5.3.5 Messung ohne Messuhr

Für die Messung ohne Messuhr ist in Abbildung 5.16 der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl des Motors aufgetragen, wobei eine Hysterese zwischen Auf- und Abbewegung zu erkennen ist. Beim Umkehren der Bewegungsrichtung ändert sich $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ zunächst weniger stark, bis der Quotient sich wieder linear mit der Schrittzahl entwickelt. Der mittlere Versatz zwischen den Messwerten bei gleicher Schrittzahl beim ersten Hochfahren und zweiten Runterfahren beträgt $(3, 41\pm0, 03)\cdot10^{-3}$ bzw. (174 ± 2) µm (berechnet aus den Messwerten mit einer Schrittzahl zwischen 12700 und 13900) und stimmt damit ungefähr mit dem Versatz aus den ersten beiden Messungen überein.



Abbildung 5.16: $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl des Motors für die Messung mit $1 \,\mu\text{m/Schritt}$ ohne Messuhr.

5.3.6 Diskussion

Aus den Messungen mit der 10 μ m-Messuhr lässt sich schließen, dass die Lineardurchführung einen Versatz beim Herauf- und Herunterfahren aufweist, da sowohl in der Auftragung der Messuhr gegen die Schrittzahl, als auch bei den Potentiometern gegen die Schrittzahl ein Versatz zu erkennen ist und bei der Messuhr aufgetragen gegen die Potentiometer nicht. Dies lässt sich durch das Spiel der Spindel in der Lineardurchführung erklären. Außerdem scheint die Positionierung bei einem geringen Schrittwinkel (0,016 μ m/Schritt), sowie beim Herunterfahren der Lineardurchführung genauer zu sein, als bei einem größeren Schrittwinkel (1 μ m/Schritt) und beim Herauffahren. Die Messung mit geringeren Schrittwinkel zeigt zudem eine bessere Reproduzierbarkeit der Positionierung. Grund für die höhere Ungenauigkeit beim Hochfahren könnte sein, dass bei der Messung von oben auf die Messuhr gedrückt wird und die Messuhr daher beim Hochfahren gegen die Schwerkraft arbeiten muss. Außerdem ist es möglich, dass sich

das zum Positionieren der Messuhr verwendete Stativ beim Herauffahren entspannt. Weiterhin lässt sich in den gezeigten Auftragungen erkennen, dass die Residuen jeweils bei den Herauf- bzw. Herabbewegungen einen ähnlichen Verlauf aufweisen, der auch bei beiden verwendeten Schrittwinkeln identisch aussieht. Dies lässt darauf schließen, dass es sich dabei nicht um zufällige Schwankungen handelt, sondern, dass mit der verwendeten Messmethode tatsächliche Abweichungen der Lineardurchführung bzw. des Potentiometers von einem idealen linearen Verlauf beobachtet werden können.

Die Messung mit der genaueren Messuhr $(2 \ \mu m)$ widerspricht zunächst dem Ergebnis, dass die Lineardurchführung einen Versatz aufweist, da in der Auftragung der Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors kein Versatz zu erkennen ist. Da die Messung mit der genaueren Messuhr aufgrund des geringen Hubs der Uhr nur auf einer Strecke von 70 μm im Gegensatz zu 2,8 mm bei der 10 μm -Messuhr durchgeführt werden konnte, wurde zur genaueren Untersuchung die Messung ohne Messuhr durchgeführt, wobei die Schrittzahl genauso wie bei der Messung mit der genaueren Messuhr in 10er-Schritten, also 10 μm -Schritten geändert wurde. Diese erklärt das Ergebnis der Messung mit der 2 μm -Messuhr, da in der Messung ohne Uhr zu erkennen ist, dass sich die Lineardurchführung beim Umkehren der Bewegungsrichtung zunächst um eine gewisse Strecke zurück bewegt und erst dann ein Versatz zwischen Auf- und Abbewegung auftritt.

Die Messung mit der genaueren Messuhr zeigt zudem einen leichten Versatz bei der Auftragung von $U_{\rm Poti}/U_{\rm Ref.}$ gegen die Auslenkung der Messuhr, der mit der 10 µm-Messuhr nicht beobachtet werden konnte. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass das Potentiometer (z.B. wegen des Schleifkontakts) einen kleinen Versatz aufweist, der in der Messung mit der 10 µm-Messuhr aufgrund der höheren Schrittweite von 200 µm zwischen zwei Messpunkten nicht beobachtet werden konnte.

Weiterhin zeigt die Messung mit der 2μ m-Messuhr eine leichte Abweichung von der theoretisch erwarteten vertikalen Bewegung pro Schritt. Um zu untersuchen, ob es sich dabei nur eine lokale Abweichung handelt, müsste eine Messmethode gefunden werden, mit der die Auslenkung der Lineardurchführung über den gesamten Hub bis auf wenige Mikrometer genau gemessen werden kann. Anhand dieser Messung könnten dann auch noch bessere Aussagen über die Genauigkeit der Positionierung getroffen werden.

Aus den bisherigen Messergebnissen lässt sich schließen, dass aufgrund des Versatzes beim Herauf- und Herunterfahren der Lineardurchführungen die Komponenten des Detektors immer von einer Seite in die gewünschte Position gefahren werden müssen. Zudem sollte die Positionierung mit dem kleinstmöglichen Schrittwinkel und durch das Herunterfahren der Lineardurchführung erfolgen, um die höchste Genauigkeit zu erreichen. Die Messungen zeigen, dass eine Positionierung bis auf 10 μ m genau anhand der Schrittzahl des Motors möglich ist.

5.4 Sprünge der Auslenkung beim Ein- bzw. Ausschalten der Bremse

Da bei anderen Messungen am Testaufbau aufgefallen ist, dass sich die Auslenkung der Lineardurchführungen beim Ein- bzw. Ausschalten der an den Motoren befestigten Bremsen sprunghaft ändert, wurde eine Messung durchgeführt, die diese Sprünge genauer untersucht.

Bei der Messung wurde die Auslenkung einer der MLS 40-50 S2 Lineardurchführun-

gen mittels des angebauten Linearpotentiometers, sowie den bereits zuvor genutzten Multimetern von Keysight, beim Ein- und Ausschalten der Bremse des Motors ermittelt. Für verschiedene Schrittzahlen (Auslenkung zwischen 2 mm bis 46 mm vom oberen Endschalter entfernt in 2 mm-Schritten) wurde der Motor jeweils zur dementsprechenden Schrittzahl gedreht und der Quotient aus der am Schleifkontakt des Potentiometers abgegriffenen Spannung und der an dem Potentiometer anliegenden Referenzspannung $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gemessen. Anschließend wurde die Bremse eingeschaltet und erneut $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gemessen. Danach wurde die Bremse noch zweimal wieder aus- und angeschaltet und jeweils $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gemessen. Durch Multiplikation der Differenz zweier nacheinander ermittelten Quotienten $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ mit a = -51 mm (vgl. Tabelle 5.4) lässt sich dann der Sprung in einer Längeneinheit berechnen. Pro Schrittzahl lassen sich also fünf Sprünge der Auslenkung berechnen. Sprung 1 beschreibt den ersten Sprung von ausgeschalteter zu eingeschalteter Bremse, Sprung 2 den ersten Sprung von Ein zu Aus, Sprung 3 den zweiten Sprung von Aus zu Ein und Sprung 4 und 5 wieder den Sprung von Ein zu Aus bzw. Aus zu Ein.



Abbildung 5.17: Ergebnisse der Messung zu den Sprüngen der Auslenkung der Lineardurchführungen beim Ein- bzw. Ausschalten der an den Motoren befestigten Bremsen bei verschiedenen Schrittzahlen. Die Messwerte von Sprung 2 und 4 bzw. Sprung 3 und 5 liegen meist übereinander.

Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 5.17 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass bis auf einige Ausreißer Sprung 1 immer einen anderen Betrag aufweist, als die restlichen Sprünge, die betragsmäßig gleich groß sind. Außerdem zeigt sich beim Einschalten der Bremse (Sprung 1, 3, 5) immer ein Sprung weg vom oberen Endschalter, während beim Ausschalten der Bremse (Sprung 2, 4) bis auf eine Ausnahme bei einer Schrittzahl von 12000 immer ein Sprung hin zum oberen Endschalter zu beobachten ist. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Sprünge sich bei unterschiedlichen Schrittzahlen unterscheiden. Der Mittelwert der Sprünge von Aus zu An beträgt $(17,2\pm0,8)\,\mu{\rm m}$ und von An zu Aus $(-11,5\pm1,1)\,\mu{\rm m}.$

Aus der Messung lässt sich schließen, dass die Lineardurchführung nach dem ersten Einschalten der Bremse beim weiteren Aus- und Einschalten zwischen zwei Positionen hin und her springt. Zudem folgt daraus, dass Sprung 1 (erstes Einschalten der Bremse) größer ist, als Sprung 2 (erstes Ausschalten der Bremse), dass beim ersten Einschalten der Bremse vermutlich die korrekte Information über die Schrittzahl des Motors verloren geht. Dies liegt daran, dass nach dem Ausschalten der Bremse eine andere Auslenkung der Lineardurchführung vorliegt, obwohl dieselbe Schrittzahl an den Controllern ausgelesen wird. Um zu verhindern, dass die Information über die korrekte Schrittzahl verloren geht, müsste ein Encoder an dem Motor angebaut sein, der den tatsächlichen Drehwinkel des Motors misst. Da die Sprünge zudem für unterschiedliche Schrittzahlen unterschiedlich groß sind und größenordnungsmäßig nicht zu vernachlässigen sind, werden die Bremsen zukünftig vermutlich nur dafür genutzt werden können, die Komponenten des Detektors in ihrer Parkposition zu halten. Die Sprünge in der Auslenkung folgen voraussichtlich daraus, dass die Bremse den Motor baulich bedingt nur in bestimmten Positionen halten kann.

5.5 Synchrone Bewegung zweier Lineardurchführungen

Zur Überprüfung der synchronen Bewegung zweier Lineardurchführungen, wurde eine Kunststoffschiene an den Enden der Lineardurchführungen lose befestigt und die Neigung der Schiene während der Bewegung vom oberen Endschalter bis 40 mm vom Endschalter entfernt mithilfe des Neigungssensors eines Smartphones gemessen. Zudem wurde von der Bewegung ein Video aufgenommen, welches der digitalen Kopie der Arbeit beigelegt wurde. In Abbildung 5.18 sind zwei Ausschnitte aus dem Video zu sehen. Um die Neigung der Schiene direkt beobachten zu können, wurde nochmals eine 2-Achs-Wasserwaage auf die Schiene gelegt und während der Bewegung beobachtet.



Abbildung 5.18: Ausschnitte aus dem Video zur synchronen Bewegung zweier Lineardurchführungen. Auf die Kunststoffschiene wurde ein Smartphone gelegt, um die Neigung der Schiene zu messen.

Mit dem Auge ließ sich während der Bewegung der Lineardurchführungen keine Be-

wegung der Luftblase in der Wasserwaage feststellen, d.h. die Lineardurchführungen bewegen sich augenscheinlich synchron. In Abbildung 5.19 sind die Ergebnisse des Neigungssensors zu sehen. Würden sich die Lineardurchführungen nicht synchron bewegen, sollte der Neigungssensor entlang der Schiene (auf/ab) eine Änderung der Neigung messen. Anhand der Abbildung lässt keine auffällige Neigung entlang der Schiene feststellen. Quer zur Schiene (links/rechts) ist eine leichte Änderung der Neigung zu sehen. Diese stammt allerdings vermutlich dadurch, dass die Schiene nicht fest mit den Lineardurchführungen verbunden war, sondern nur auf den Schraubenköpfen aufgelegt war und daher leicht nach links/rechts wackeln konnte.



Abbildung 5.19: Ergebnisse des Neigungssensors entlang der Schiene (auf/ab) und quer zur Schiene (links/rechts). Im Bereich von 5 s bis 15 s fährt die Schiene herunter und von 20 s bis 30 s herauf. Der Fehler des Neigungssensors ist nicht bekannt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Wie bereits in der Masterarbeit von Lucas Garrido gezeigt, lässt sich durch Kombination eines Beugungsgitters mit einem ortsauflösenden MCP Detektor ein energieauflösender Fluoreszenzdetektor bauen, der die Ansprüche beim Laserkühlen am SIS100 Beschleuniger erfüllt. Damit Änderungen an den Positionen der Komponenten im Fluoreszenzdetektor auch während des Betriebs des Beschleunigers möglich sind, um so immer die optimale Auflösung und Effizienz zu erreichen, wurde eine Schrittmotoransteuerung für den Detektor entwickelt. In diesem Abschnitt soll nochmals der Inhalt dieser Arbeit zusammengefasst und ein kurzer Ausblick auf die Weiterentwicklung des Detektors, sowie der Steuersoftware gegeben werden.

6.1 Zusammenfassung

Zunächst wurde ein kurzer Überblick über die Funktionsweise und den Aufbau des SIS100 Fluoreszenzdetektors gegeben. Anschließend wurde die Steuerung des Detektors mithilfe von Schrittmotoren, sowie die Programmierung der dazu verwendete graphischen Oberfläche erläutert. Abschließend wurde die Steuersoftware an einem Testaufbau erprobt und Messungen zur Positionierungsgenauigkeit der Komponenten vorgenommen.

Messungen zur Genauigkeit der Home-Position der Lineardurchführungen zeigten im 2-Sensor-Modus eine maximale Abweichung von $(2, 4 \pm 0, 5) \mu m$ zum Mittelwert.

Bei der Bestimmung der Unsicherheiten der Linearpotentiometer konnte festgestellt werden, dass die Potentiometer teilweise einen starken Drift in der am Schleifkontakt abgegriffenen Spannung und damit in der mithilfe der Potentiometer bestimmten Position einer Komponente aufweisen. Der größte Wert, der für den mittleren Drift ermittelt wurde, liegt bei $(0, 360 \pm 0, 005) \,\mu$ m/min. Andere Messung zeigen einen kleineren Drift von unter $0,1 \,\mu$ m/min, der jedoch trotzdem nicht zu vernachlässigen ist. Die Messungen deuten darauf hin, dass es sich bei den Drifts um einen Temperatureffekt handelt. Ohne Drift sind mit dem ADC Board zum jetzigen Zeitpunkt Standardabweichungen von maximal etwa 3 μ m in der mithilfe der Potentiometer bestimmten Position zu erwarten.

Bei der Messung zur Untersuchung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Positionierung anhand der Schrittzahl des Motors zeigte sich ein Versatz der Auslenkung der Lineardurchführung beim Herauf- und Herunterfahren. Dieser kommt vermutlich durch das Spiel der Spindel in der Lineardurchführung zustande. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Positionierung anhand der Schrittzahl des Motors am genausten ist, wenn der kleinstmögliche Schrittwinkel verwendet wird und die Positionierung durch Herunterfahren der Lineardurchführung ausgeführt wird. Bei der Positionierung anhand der Schrittzahl sind maximale Abweichungen von etwa 4,3 µm zur Fitgeraden bzw. zur theoretisch berechneten (Relativ-)Position zu erwarten.

Anschließend wurden die Sprünge der Auslenkung der Lineardurchführungen beim Ein- bzw. Ausschalten der Bremsen untersucht. Beim Einschalten der Bremse beträgt der Sprung im Mittel $(17, 2 \pm 0, 8)$ µm und beim Ausschalten $(-11, 5 \pm 1, 1)$ µm. Da die Sprünge zudem bei unterschiedlichen Schrittzahlen unterschiedlich groß sind, werden die Bremsen vermutlich nur zum Halten der Komponenten des Detektors in der Parkposition genutzt werden können. Die Sprünge folgen voraussichtlich daraus, dass die Bremse den Motor baulich bedingt nur in bestimmten Positionen halten kann.

Zuletzt wurde die synchrone Bewegung zweier Lineardurchführungen beobachtet. Dabei zeigten sich keine nennenswerten Abweichungen zwischen den Bewegungen.

Aus den Messungen lässt sich letztendlich schließen, dass bei der Positionierung der Komponenten anhand der Schrittzahl des Motors maximale Abweichungen von etwa $(6,7\pm0,5)$ µm (Genauigkeit Home-Position + Abweichungen Relativposition) zur berechneten Position zu erwarten sind. Die gewünschte Genauigkeit von 10 µm sollte also auch im Detektor erreicht werden können. Um eine Positionierung der Komponenten anhand der Potentiometer durchzuführen, müsste zunächst eine Möglichkeit gefunden werden, die Drifts der Potentiometer zu verhindern. Dann könnte auch mit den Potentiometer nund dem ADC Board (Standardabweichung < 3 µm) eine Positionierung auf 10 µm genau durchgeführt werden.

6.2 Ausblick

In Zukunft werden noch einige Änderungen an der Steuersoftware vorgenommen. Basierend auf den Ergebnissen der bisherigen Messungen müssen zunächst die Bewegungsabläufe der Motoren bzw. Lineardurchführungen dahingehend geändert werden, dass die Positionierung beim Herunterfahren mit kleinstmöglichen Schrittwinkel stattfindet.

Anschließend kann die Funktion der Software beim gleichzeitigen Betrieb aller sechs Schrittmotoren getestet werden. Dazu wurden neue Netzteile und ein Schaltschrank, der die Verkabelung übersichtlicher machen soll, bestellt. Wenn alle sechs Motoren angeschlossen sind, kann zudem die Return-to-Home Operation am Start und Ende des Programms getestet werden. Damit der Detektor nach dem Schließen des Programms nicht im Strahlrohr bleibt, werden in Zukunft alle beweglichen Komponenten am Programmende in ihre Parkposition zurückgefahren. Da die Home-Positionen der Motoren beim Abschalten der Controller allerdings verloren gehen, müssen diese beim erneuten Starten des Programms neu gesetzt werden. Deshalb werden zukünftig auch zu Programmstart alle Komponenten einmal mit der Return-to-Home Operation in die Endschalter gefahren, um die Home-Positionen zu setzen.

Mit den neuen Netzteilen für die Potentiometer können zudem weitere Messungen zu den Unsicherheiten der Potentiometer durchgeführt werden. Dabei kann auch untersucht werden, ob das Rauschen des ADC Boards zum Beispiel durch abgeschirmte Kabel oder durch ein Metallgehäuse um das Board reduziert werden kann. Zusätzlich können weitere Messungen über den gesamten Hub der Lineardurchführungen, sowie mit den LD 40-75 S2 Lineardurchführungen vorgenommen werden. Vermutlich werden zukünftig auch Messungen zur Genauigkeit anderer Endschalter vorgenommen, um diese mit den jetzigen Endschaltern vergleichen zu können.

Nach den Messungen können dann die Detektorkomponenten in den Testaufbau eingebaut werden und die Steuersoftware vorerst finalisiert werden. Mithilfe des Aufbaus können alle nötigen Parameter in der Software eingestellt werden und der Knopf, der die Breite des Schlitzes verändern, umgesetzt werden. Der Knopf hat bisher noch keine Funktion, da der Schlitz noch nicht gefertigt wurde und es daher schwierig ist, die Bewegungsabläufe korrekt zu programmieren. Außerdem sollen auf der graphische Oberfläche der Software drei weitere Knöpfe hinzugefügt werden, mit denen einfach zwischen den drei in Abschnitt 3.3 beschriebenen Betriebsmodi gewechselt werden kann.

Nach hinlänglichen Tests der Software kann dann der eigentliche Aufbau des SIS100 Fluoreszenzdetektors beginnen. An diesem können dann neue Messungen zur Zeit- und Energieauflösung vollzogen werden, die in weiteren Arbeiten präsentiert werden.

A Anhang

A.1 Technische Zeichnungen



Abbildung A.1: Technische Zeichnung der Detektorkammer von Christian Huhmann.



Abbildung A.2: Technische Zeichnung der Detektorkammer von Christian Huhmann.

A.2 Datenblätter

A.2.1 RoentDek DLD40 Microchannel Plate Detector with delay-line anode

RoentDek

The Microchannel Plate Detector with delay-line anode 1

The Micro-Channel Plate (MCP) detector with delay-line anode is a device for single particle/photon counting, giving information on the position of each particle/photon and its impact time with high precision. It uses an electronic read-out scheme employing fast timing amplifiers, timing discriminators and digitizers. It operates under ultra-high vacuum and requires high voltage supplies.

This detector system is modular and com in different sizes and versions.

Typical performance:

position resolution < 0.1 mm overall linearity 0.3 mm temporal resolution < 0.2 ns1 MHz rate capability multi-hit dead time 10-20 ns

Typical characteristics of MCPs (for DLD40EP, DLD75 and HEX75 see below)

# of MCPs in stack	2
Outer Diameter:	50/86.6/127 mm
Active Diameter:	45/80/120 mm
Aspect Ratio L/D	60:1
Thickness	1.5 mm
Pore size	25 μm
Center-to-center spacing:	32 μm
Bias Angle:	$8^{\circ} \pm 1^{\circ}$
Open Area Ratio:	>50 %
for DLD40EP:	40 mm OD (> 40 mm active), L/D 80:1; 1 mm thickness, 12 μm pore size, bias angle: 20°,

OAR > 70 % for DLD75/HEX75:

87 mm OD (75 mm active), L/D 80:1; 1 mm thickness, 12 μm pore size, bias angle: 20°, OAR > 70 % Most detectors can also be supplied with triple stack (...Z).

Typical characteristics of the detector assembly

Height above a mounting Flange: about 100 mm (adjustable) Mounting Diameter: 94/144/196/246 mm -50 to 70 °C Operating Temperature Range: < 2*10⁻⁶ mbar Operating Pressure: 150 °C Maximum Baking Temperature: Electron Gain @ 2400 Volts: 107 Minimum (for 80:1 MCP @ 2500 Volts)

If you have chosen a detector set with central hole, its size in the MCP is usually 6.4 mm and the minimum active diameter 9 mm

If you have chosen a different custom detector type please refer to the separate instructions.

1.1 General Description

The RoentDek MCP detector with delay-line anode is a high-resolution 2D-imaging and timing device for charged particle or photon detection at high rates with limited multi-hit capability. The linear active diameter is at least 40 mm for the detectors with the DL40 anode (e.g. DLD40 and DLD40EP), 75 mm for the DL80 anode (e.g. DLD80 and DLD75), and about 120 mm for the **DLD120**. The **IboentDek Hexanode** has a third delay-line layer that gives redundant detection opportunities either to improve the multi-hit performance, linearity or to allow the use of a MCP setup with central hole and minimized blind detection area. In its usual version, commonly referred to as HEX80 (although the MCP choice restrict is to be a HEX75), it has about 75 mm redundant detection area. This triple area inner diameter is 100 mm for the HEX100 (sometimes referred to as HEX120 due to MCP choice and 40 mm in case of the HEX40*. For detectors with central hole (e.g. HEX80/o and HEX120/0) the descriptions in this manual are also relevant unless otherwise stated. A DLD150 version is available on demand

Page 7 of 112

^{*} In the following we will refer to those detectors using the same anode only by nominating one detector version, e.g. for DLD40 and DLD40EP as DLD40 unless otherwise noted. Additional remarks, if any, will refer to the different MCP types.

MCP Delay Line Detector Manual (11.0.2206.1)

RoentDek

with 150 mm active detection diameter. The **DL40** anode can also be equipped with smaller MCP stack, e.g. turning it into a **DLD25**.

The detector consists of a pair of selected MCPs in chevron configuration or of a triple stack (Z-stack) and a helical wire delay-line anode for two-dimensional position readout. The MCPs are supported partially metalized ceramic rings or metal rings. Ceramic rings (1.5/2 mm thick, 65/105 mm outer diameter) are typically used for **DLD40/DLD80** and **HEX80**. These ceramic rings are suitable for soldering, clamping or spot welding). The MCP stack can also be mounted between a metal front ring and a (sometimes square-shaped) rear side carrier plate. This is the standard method for the **DLD120**, **HEX100** and **DLD40SL** or custom MCP stack designs.

Operation requires two DC voltages for a (resistance matched) MCP stack on front and back contacts and three voltages for the anode's support plate ("Holder") and the anode wire array. All voltages can be supplied by separate HV-supplies or voltage dividers. The baking limit is specified as 150 °C for the detectors and for optionally provided in-vacuum cables and feedthroughs.

The wire array consists of two or three helical wire propagation double (delay) lines. For each dimension a differential wire pair is formed by a collection (*signal*) wire and a *reference* wire. A potential difference of 20 V to 50 V between *signal* and *reference* wires ensures that the electron cloud emerging from the MCPs is mostly collected on the signal wires, shared between the wire layers for different position encoding directions. The anode's Holder is in some assemblies conductively connected to an intermediate MCP stack carrier plate and must be biased with an intermediate potential with respect to the anode wires and the MCP back potential to ensure proper charge cloud propagation and spatial broadening in the drift zone between MCPs and anode wires. The optimal voltage depends on the distance between the MCP carrier plate and the anode wires. Typically, the wires should have about 250 V more positive potential than MCP back side and the carrier about +50 V with respect to the MCP back potential.

Avoid penetration of strong external electrical and magnetic fields into the electron cloud drift region (between MCPs and wire anode). Electrical fringing fields can produce image distortion, magnetic fields (> 50 Gauss) disturb the proper charge cloud broadening and will lead to malfunction of the anode.

1.1.1 Position Encoding

The position of the detected particle/photon is encoded by the signal arrival time difference at both ends of each parallel-pair delay-line, for each layer independently. While the signal speed along the delay line is close to speed of light, one can define a perpendicular signal speed v_{\perp} given by the pitch of one wire loop (typically 1 mm) and the time, which a signal needs to propagate though this loop. This defines the single pitch propagation time per 1 mm which is equal to $1/v_{\perp}$ (in units mm/ns).

The corresponding ends of the delay-lines for each dimension are located on the opposite corners of the wire array terminals on the rear side. The electrical resistance of each wire is between 5 and 100Ω end-to-end, depending on the size of the delay-line and the wire type used. Corresponding ends of wires can thus be identified. The four (or six) terminal pairs have to be connected to vacuum feedthroughs by a twisted-pair cable configuration (both cables of a pair must have equal lengths, within 5 mm). From the feedthroughs the signals must be transmitted (after DC-decoupling) to a differential amplifier or signal transformer with equally adequate transmission cables.

The difference between the signal arrival times at the adjacent ends of each delay-line is proportional to the position on the MCP in the respective dimension. The sum of these arrival times is fairly constant with few ns for each event (see below). The time sequence of the signals can be measured via time-to-amplitude converters (TAC) or an n-fold time-to-digital converter (TDC), n is at least 4 or up to 7 (**Hexanode** with separate timing channel). As reference time the signal on the MCP back or front side can be used for correlating each particle to others or to an external trigger (TOF-measurement).

For the DLD detectors, the digital encoding for obtaining a 2d digital image (X/Y) is

 $X = x1 - x2 + O_x$ and $Y = y1 - y2 + O_y$

Equation 1.1

with x1, x2, y1 and y2 denominating the time for each signal, Ox and Oy are arbitrary offsets.

The fast timing signal picked up from an MCP contact or, in the case of a pulsed particle/photon source, a "machine trigger" signal can serve as time reference. The single pitch propagation time (for 1 mm) on the delay line is about 0.75 ns for **DLD40**, 1 ns for **DLD80** and 1.24 ns for **DLD120**. Thus, the correspondence between 1 mm position distance and relative time delay in the 2d image is twice this value: about 1.5 ns, 2 ns or 2.5 ns, respectively. Note that these numbers are only accurate within 5 % and are slightly different for each dimension. In order to calculate the position in mm from the digital X and Y values you have to take into account the bin width of your TDC and the single pitch propagation time for the respective layer.

Page 8 of 112

MCP Delay Line Detector Manual (11.0.2206.1)

Abbildung A.3: Datenblatt RoentDek DLD40 Microchannel Plate Detector with delayline anode [11].
A.2.2 Shimadzu Laminar Gratings for Soft X-ray Region

Laminar Gratings for Soft X-ray Region

Using the holographic exposure method and ion-beam etching technology, Shimadzu has developed laminar gratings that can be used for spectroscopy in a range from the vacuum ultraviolet region to the soft X-ray region. These diffraction gratings have grooves with a rectangular profile, which are directly etched into blanks made of, for example, synthetic silica. Laminar



Fig. 35 Groove Profile for Laminar Gratings



Fig. 36 Measurement for Absorption Spectrum of Argon

gratings are recommended for applications involving oblique light incidence. To enquire about laminar gratings, use the request form for laminar gratings for the vacuum ultraviolet region provided at the end of this catalog.



Fig. 37 AFM Image of Laminar Gratings Groove density : 1200grooves/mm Groove depth : 15nm

Laminar type Replica Diffraction Grating for Soft X-ray Region

- Aberration-corrected Laminar-type Replica Diffraction Gratings for flat-field Polychromators in the range of Soft X-ray.
- Less High-Order Light due to Laminar type grooves configuration, Low stray light by Holographic manufacturing technology, and High-resolution from aspherical waves exposure method to correct aberration.
- Enable to easily produce spectrometers by combining with an array-type detector.
- Suitable for monitoring Soft X-ray lights as well as for Emission Spectroscopy.

Standard Specifications

Grating Type	Unequally spaced curved-groove laminar-type replica grating*1					
Blank material	BK7 or equivalent					
Dimension tolerance	±0.2(W)×±0.2(H)					
Center thickness tolerance	±0.5(T)					
Ruled area	Total area less 2mm strip around the perimeter					
Effective area	Total area less 5mm strip around the perimeter					
Groove density tolerance	±0.5%					
Scratches and digs	80-50(in accordance with MIL-O-13830A)					

 $^{\star}\mathrm{1}$: The grating grooves are formed with resin.

*Be sure to prevent condensation. Otherwise, it causes significant deterioration of optical characteristics.

Standard Items

Laminar type Rep	lica Diffraction Gratir	ngs											
Code number	Groove density (at grating center)	Wavelength range	Detector length	Mounting parameters								Dimensions	Coating
	N (grooves/mm)	$\lambda_1 \sim \lambda_2$ (nm)	L (mm)	<i>r</i> (mm)	a (deg.)	<i>r1'</i> (mm)	β1 (deg.)	<i>r₂'</i> (mm)	β ₂ (deg.)	<i>r:'</i> (mm)	β _i (deg.)	W × H × T (mm)	material
30-001	2400	1~6	23.5	237.0	88.65	235.6	85.81	238.5	80.17	235.0	90.0	50 × 30 × 10	Au
30-002	1200	5 ~ 20	25.3	237.0	87.0	236.7	83.0	241.1	77.1	235.0	90.0	50 × 30 × 10	Au
30-003	2400	1~7	26.8	236.7	88.6	235.8	85.8	239.5	79.4	235.0	90.5	50 × 30 × 10	Au
30-004	2400	0.6 ~ 4	19.4	236.8	88.65	233.9	86.64	235.8	81.94	233.5	90.0	50 × 30 × 10	Au
30-005	1200	3.5 ~ 8.5	11.1	237.0	87.07	234.8	83.98	236.2	81.30	233.5	90.0	50 × 30 × 10	Ni
30-006	300	20-80	25.3	237.0	87.00	236.7	83.04	241.1	77.07	235.0	90.0	50 × 30 × 10	Au



Fig. 38 Mounting



SHIMADZU DIFFRACTION GRATINGS 33



A.3 Modbus RTU: Communication mode and communication timing

Communication mode and communication timing

5 Communication mode and communication timing





A.4 Messungen

Messungen zur Unsicherheit zweier Linearpotentiometer



Obere Position der Lineardurchführung

Abbildung A.6: Potentiometer- und Referenzspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für Potentiometer 1 und 2 in der oberen Position gegen die Zeit.



Mittlere Position der Lineardurchführung

Abbildung A.7: Potentiometer- und Referenzspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für Potentiometer 1 und 2 in der mittleren Position gegen die Zeit.



Untere Position der Lineardurchführung

Abbildung A.8: Potentiometer- und Referenzspannung, sowie der Quotient $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ für Potentiometer 1 und 2 in der unteren Position gegen die Zeit.

Messungen mit der 10 $\mu\text{m-Messuhr}$

Vergleich der Residuen



Abbildung A.9: Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors (oben), Auslenkung der Messuhr gegen den Quotienten $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ (mittig) und $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl (unten) für die Messung mit $1\,\mu\text{m/Schritt}$ und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von $10\,\mu\text{m}$. In den Plots sind jeweils die Auf- bzw. Abbewegungen gleichzeitig eingezeichnet, um die Residuen vergleichen zu können.



Abbildung A.10: Auslenkung der Messuhr gegen die Schrittzahl des Motors (oben), Auslenkung der Messuhr gegen den Quotienten $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ (mittig) und $U_{\text{Poti}}/U_{\text{Ref.}}$ gegen die Schrittzahl (unten) für die Messung mit 0,016 µm/Schritt und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 µm. In den Plots sind jeweils die Auf- bzw. Abbewegungen gleichzeitig eingezeichnet, um die Residuen vergleichen zu können.



Messuhr gegen Potentiometer für die Messung mit 0,016 μ m/Schritt

Abbildung A.11: Auslenkung der Messuhr gegen den Quotienten $U_{\rm Poti}/U_{\rm Ref.}$ für die Messung mit 0,016 µm/Schritt und der Messuhr mit einer Ableseungenauigkeit von 10 µm.

Literaturverzeichnis

- [1] GSI FAIR Website. Zuletzt geöffnet: 07.06.2022. URL: https://www.gsi.de/f orschungbeschleuniger/fair.
- [2] GSI SPARC Website. Zuletzt geöffnet: 08.06.2022. URL: https://www.gsi.de /work/forschung/appamml/atomphysik/sparc.
- [3] D. Winters et al., Laser Cooling of Relativistic Highly Charged Ions at FAIR. International Particle Accelerator Conference 7 (Juni 2016), 3747. DOI: doi:10 .18429/JACoW-IPAC2016-THPMY040.
- [4] H. Poth, Electron cooling: Theory, experiment, application. Physics Reports 196.3 (1990), 135–297. DOI: https://doi.org/10.1016/0370-1573(90)90040-9.
- [5] M. Steck, Cooling of fast charged particle beams. J. Opt. Soc. Am. B 20.5 (Mai 2003), 1016–1027. DOI: 10.1364/JOSAB.20.001016.
- [6] J. S. Hangst et al., Laser Cooling of a Bunched Beam in a Synchrotron Storage Ring. Phys. Rev. Lett. 74 (22 Mai 1995), 4432–4435. DOI: 10.1103/PhysRevLet t.74.4432.
- [7] Hans J. Eichler, Heinz-Detler Kronfeldt und Jürgen Sahm, Das Neue Physikalische Grundpraktikum. Springer Berlin Heidelberg, 2001. ISBN: 978-3-662-21753-5.
- [8] G. Hildenbrand, *Grundlagen der Röntgenoptik und Röntgenmikroskopie*. Springer Berlin Heidelberg, 1958.
- [9] Hamamatsu Photonics K.K., *MCP Assembly*. Sep. 2006.
- M. Lampton, O. Siegmund und R. Raffanti, Delay line anodes for microchannelplate spectrometers. Review of Scientific Instruments 58.12 (1987), 2298–2305.
 DOI: 10.1063/1.1139341.
- [11] RoentDek Handels GmbH, MCP Delay Line Detector Manual. Version 11.0.2206.1. URL: https://www.roentdek.com/manuals/MCP%20Delay%20Line%20manual.p df.
- [12] Joseph L.W., Microchannel plate detectors. Nuclear Instruments and Methods 162.1 (1979), 587-601. DOI: https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90734-1.
- [13] M. Wolf, Multi-Channel-Plates*. Physik in unserer Zeit 12.3 (1981), 90–95. DOI: https://doi.org/10.1002/piuz.19810120305.
- [14] Shimadzu Corporation, *Shimadzu Diffraction Gratings*. 7th edition. 2017.
- [15] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Application Note DK9221-0210-0014. 2012. URL: https://download.beckhoff.com/download/document/Applicati on_Notes/DK9221-0210-0014.pdf.
- [16] Oriental Motor U.S.A. Corp., An Introduction to Stepping Motors. 2001. URL: https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/SteppingMotors/Section BIntro_B2-B42.pdf.

- [17] V.M. Hannen et al., SIS-100 Fluorescence detection chamber. Feb. 2021.
- [18] Oriental Motor U.S.A. Corp., CRK Series Built-in Controller Type User Manual. 2018. URL: https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/opmanuals/HM-40112-9E.pdf.
- [19] Modbus Organization, *Modbus Application Protocol Specification*. 2012. URL: ht tps://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf.
- [20] KUNBUS GmbH, Modbus Das Kommunikationsprotokoll für die Industrie. Zuletzt geöffnet: 26.06.2022. URL: https://www.kunbus.de/modbus.html.
- [21] Jonas Berg, *Documentation MinimalModbus*. Zuletzt geöffnet: 26.06.2022. URL: https://minimalmodbus.readthedocs.io/en/stable/.
- [22] Abhinav Ajitsaria, What Is the Python Global Interpreter Lock (GIL)? Zuletzt geöffnet: 04.07.2022. 2018. URL: https://realpython.com/python-gil/.
- [23] Jim Anderson, An Intro to Threading in Python. Zuletzt geöffnet: 04.07.2022. 2019. URL: https://realpython.com/intro-to-python-threading/.
- [24] The Qt Company, Signals & Slots. Zuletzt geöffnet: 04.07.2022. URL: https://d oc.qt.io/qt-6/signalsandslots.html.
- [25] Fileformat, What is a JSON file? Zuletzt geöffnet: 04.07.2022. URL: https://d ocs.fileformat.com/web/json/.
- [26] The Qt Company, *Qt Documentation*. Zuletzt geöffnet: 04.07.2022. URL: https://doc.qt.io/.