

DIPLOMARBEIT

Kollimationssystem für ein Lloyd-Materiewellen-Interferometer

Ausgeführt am Atominstitut
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
Univ.Prof. Dipl.-Phys. Dr.rer.nat. Hartmut Abele
Univ.Ass. Dipl.-Phys. Hanno Marius Filter

durch

Matthias Heumesser, BSc

Matrikelnummer 1025250
Rembrandtstraße 18/8, 1020 Wien

Wien, am 10. Mai 2016

Unterschrift Student

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird das Kollimationssystem eines Lloyd-Materiewellen-Interforemeters für sehr kalte Neutronen (VCN) vorgestellt. Das Kollimationssystem hat alle Anforderungen als Teil der Strahlpräparation erfüllt und dient neben der Kollimation des VCN-Strahls am Institut Laue-Langevin insbesondere auch der Selektion einer Strahlregion mit maximaler Zählrate bei geforderter Divergenz und Wellenlänge. Die Strahlpräparation besteht aus mehreren motorisierten neutronen-optischen Elementen, wie Superspiegeln, monochromatisierenden Superspiegeln, Borstahl-Blenden und borierten Abschirmkomponenten.

Die Arbeit enthält die elektronische Ansteuerung und die nötige Automatisierung der motorisierten Komponenten mittels *LabVIEW*. Die Ansteuerung wurde modular und fehlerresistent programmiert, sie bildet die Grundlage für die Integration weiterer Geräte.

Die Auswertung der Messungen zur Stahloptimierung der Strahlzeit 2015 werden beschrieben und ausführlich erörtert. Im Vordergrund stehen die Diskussion der Reflexionen an der Innenseite der Blendenblätter sowie die Analyse der Auswirkungen der monochromatisierenden Superspiegeln auf die Winkelverteilung des Neutronenstrahls. Dabei wird klar, dass diese Spiegel keinen messbaren Einfluss auf die Winkelverteilung des Strahls haben. Nach der vollständigen Strahlpräparation mit eingebauten monochromatisierenden Superspiegeln beträgt der gemittelte Fluss über den Winkel und die Blendenöffnung $(3,63 \pm 0,36) \cdot 10^{-3} \frac{\text{cps}}{\text{mm}^2 \cdot \text{mrad}}$ bei einem mittleren Aufweitungswinkel von $(3,30 \pm 0,08)$ mrad.

Die Analyse von Konzepten zur Entwicklung einer neuen Blende ergibt, dass eine Schrägstellung der Blendenblätter zur Vermeidung von Reflexionen sinnvoll ist. Abschließend wird eine mögliche Realisierung des Eingangspaltes des Interferometers diskutiert.

Abstract

This thesis presents the collimating system for a Lloyd-Materwave-Interferometer with very cold neutrons. The system met its demands and is part of the beam preparation setup to collimate the VCN-beam at the Institut Laue Langevin. Moreover it is especially used to select the beam position with the highest count rate for a given wavelength and divergence. The beam preparation consists of motor-driven neutron-optic elements like supermirrors, monochromating supermirrors, boron-steel slits and shielding material enriched with boron.

Furthermore, the thesis explains the electronic control and the necessary automatization of the motorized components with *LabVIEW*. The software was programmed in a modular and error suppressing way, thus serving as a basis for the integration of further devices.

Data from the measurements to optimize the position within the beam during the beamtime 2015 are described and elaborately explained. In particular, reflections on the inner side of the slits are discussed as well as the impact of the monochromating supermirrors on the angular distribution of the beam. One finds that those mirrors do not change the preparation of the angular distribution in a measurable way. After the complete beam preparation, including the monochromating mirrors, the mean flux over the angle and the area of the slit is $(3,63 \pm 0,36) \cdot 10^{-3} \frac{\text{cps}}{\text{mm}^2 \cdot \text{mrad}}$, while the beam spread angle is $(3,30 \pm 0,08)$ mrad.

Possible concepts to develop a new slit system are analyzed. It is shown that tilting the sides of a slit with respect to each other is useful to avoid reflections. The thesis concludes with the discussion of a possible realization of the entrance slit of the interferometer.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Theoretische Grundlagen	11
2.1. Neutronen des VCN Strahls am ILL	11
2.1.1. Charakterisierung sehr kalter Neutronen	11
2.1.2. Winkelverteilung des VCN-Strahls	12
2.2. Reflexion und Transmission von Neutronen an Grenzflächen	12
2.3. Transmission sehr kalter Neutronen durch Borstahl	14
2.4. Fraunhofer-Beugung für Neutronen	15
2.5. Anwendung und Eigenschaften der Poisson-Verteilung	16
3. Aufbau und Betrieb des Kollimationssystems	18
3.1. Einsatzgebiet und Aufbau	18
3.1.1. Setup zur Charakterisierung des VCN-Strahls	18
3.1.2. Weiterentwicklung zum Kollimationssystem	22
3.2. Ansteuerung der Komponenten	25
3.2.1. Wichtige Konzepte in Labview	25
3.2.2. Allgemeine Struktur der Programme des Lloyd-Projekts	26
3.2.3. Ansteuerung des PI C-884 Controllers	29
3.3. Erfahrungsgewinn durch die Strahlzeiten	31
3.3.1. Erkenntnisse für die Konstruktion	31
3.3.2. Ausfallursachen der Ansteuerungssoftware	32
3.4. Entwicklungsmöglichkeiten	32
3.5. Diskussion	33
4. Vermessung des VCN-Strahls	35
4.1. Referenzmessung ohne Blende	36
4.2. Messungen mit einer Blende	39
4.2.1. Messungen mit der Blende S1	39
4.2.2. Messungen mit der Blende S2	41
4.3. Messungen mit beiden Blenden	43
4.3.1. Ergebnisse und Vergleich mit den Messungen mit nur einem Spalt . .	43
4.3.2. Winkelverteilung des VCN-Strahls	47
4.4. Einseitige Reflexionen an der Blende	52
4.5. Diskussion	56
5. Konzeptentwicklung einer neuen Blende	58
5.1. Auswirkungen nicht-paralleler Blendenblätter	58
5.1.1. Blendendicke und Transmission	58
5.1.2. Unerwünschte Transmission durch das Blendenblatt	63

5.2. Abweichungen der Fraunhofer-Beugung	64
5.3. Genauigkeit mechanischer Führungen	65
5.4. Diskussion	66
6. Diskussion der Ergebnisse	68
7. Ausblick	69
Anhang	71
A. Ausschnitte der Labview-Programme	71
B. Ergänzungen zu Kapitel 4	77
C. Datenblätter	80
D. Konstruktionszeichnungen	94
Literaturverzeichnis	101

1. Einleitung

Die Expansion des Universums, die Zusammensetzung der dunklen Materie und Energie sowie das starke CP-Problem sind Beispiele für Phänomene, die nicht durch etablierte Modelle erklärt werden können. In Theorien, die Lösungen für diese Probleme suchen, werden dafür neue Teilchen und Wechselwirkungen vorhergesagt [1, 2, 3, 4]. Ein möglicher Zugang diese experimentell zu prüfen, ist eine Abwandlung des Lloyd-Interferometers [5, 6] zu einem Materiewellen-Interferometer für Neutronen [1].

Ein klassisches Lloyd-Interferometer für Licht, wie es in Abbildung 1.1 zu sehen ist, besteht aus einer Quelle für monochromatisches Licht, einem Eintrittsspalt, einem Spiegel und einem Detektionsschirm. Die Interferenz entsteht durch den Wegunterschied zwischen dem Teil des Lichts, das von der Quelle aus direkt zum Schirm geht und jenem Teil, der zuerst am Spiegel reflektiert wird, wobei diese Strahlen so aussehen, also ob sie aus einer virtuellen Quelle unter der Ebene des Spiegels kommen würden [7].

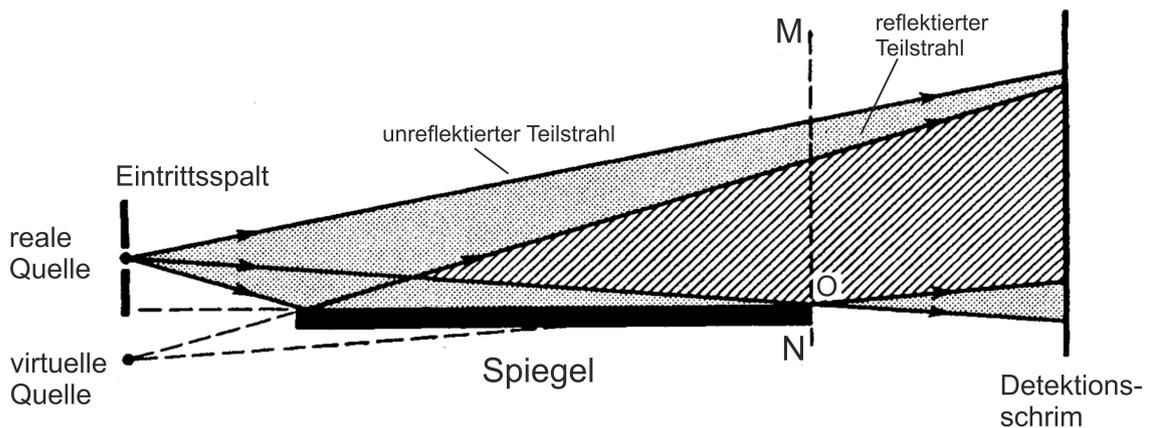


Abbildung 1.1.: Geometrie des Lloyd-Interferometers für Licht. Die Interferenz entsteht durch die beiden Teilstrahlen, wobei einer der beiden am Spiegel reflektiert wird. Im schraffierten Bereich der Abbildung treten Interferenzerscheinungen auf. Der Spiegel endet bei O und der Schirm kann dahinter variiert werden [7].

Die Geometrie des Lloyd-Interferometers eignet sich für eine Abwandlung für Neutronen [1]. Die zugrunde liegende Idee war, einen zusätzlichen Phasenverschub der Teilstrahlen im Interferometer aufgrund eines bisher unbekanntes Neutron-Spiegel-Potentials zu messen. Für die Suche mit dem Materiewellen-Interferometer wurden drei Wechselwirkungen als Kandidaten ausgewählt: ein kosmisches Skalarfeld, das die Expansion des Universums erklären kann [1, 2, 4]; Axion-artige, spinunabhängige pseudoskalare Nukleon-Nukleon oder Nukleon-Elektron Wechselwirkungen [1, 3, 8, 9] oder die Abweichungen des Gravitationsgesetzes für kurze Distanzen von der Newtonschen Beschreibung [1].

Die Realisierung mit sehr kalten Neutronen ($\lambda_{VCN} \approx 10 \text{ nm}$, [10]) bringt den Vorteil, dass die Periode des Interferenzmusters Λ_{osz} am Detektor größer und damit einfacher messbar

ist, als für thermische Neutronen ($\lambda_{\text{th}} \approx 0,2 \text{ nm}$, [11]). Mit

$$\Lambda_{\text{osz}} = \frac{\lambda L}{2a} \quad (1.1)$$

ergibt sich Λ_{osz} zu $\Lambda_{\text{osz,th}} \approx 1 \mu\text{m}$ und $\Lambda_{\text{osz,VCN}} \approx 50 \mu\text{m}$, wobei die Länge des Interferometers mit 1 m und der Abstand a des Spalts zum Spiegel mit 0,1 mm angenommen wurde [1].

Chamäleonfelder Chamäleonfelder sind kosmische Skalarfelder, mit denen versucht wird, die Expansion des Universums zu erklären [2]. Die Masse der Wechselwirkungsteilchen hängt von der der lokalen Masseverteilung in der Umgebung ab und das ist die Erklärung, warum diese Teilchen bisher noch nicht gefunden wurden, aber in der Kosmologie eine Rolle spielen könnten. Durch diesen Mechanismus würde das Äquivalenzprinzip nicht verletzt werden [1, 2].

Normalerweise schirmt eine dichte Umgebung diese Felder ab, weswegen sie schwer zu detektieren wären. Für Neutronen ist dieser Effekt jedoch vernachlässigbar im Vergleich zu massiveren Objekten [12, 13, 2]. Ein für Neutronen konzipiertes Lloyd-Materiewellen-Interferometer ist für die Suche nach diesem Effekt geeignet [1].

Das aufgrund eines Chamäleonfelds auftretende Potential, das zwischen Spiegel und Neutron wirkt, ist gegeben durch [13]:

$$V(z) = \beta \frac{m}{M_{\text{Pl}} \lambda} \left(\frac{2+n}{\sqrt{2}} \right)^{2/(2+n)} \left(\frac{z}{\lambda} \right)^{2/(2+n)} = V_0 \left(\frac{z}{\lambda} \right)^{2/(2+n)} \quad (1.2)$$

Dabei ist m die Masse des Neutrons, M_{Pl} die Planck-Masse, $\lambda = \frac{\hbar c}{\Lambda}$ die Wechselwirkungslänge, β der Parameter der Wechselwirkung und n eine positive Konstante, der Ratra-Peebles Index [14].

Mit diesem Potential, dem Wellenvektor k und $\gamma = (mV_0L)/(k\hbar^2)$ sowie $\alpha_n = (4+n)/(2+n)$ folgt der Phasenunterschied der Chamäleonfelder zu [1]:

$$\varphi_{\text{cham}} = \varphi_{\text{II, cham}} - \varphi_{\text{I, cham}} \approx \frac{\gamma}{\lambda^{\alpha_n - 1} \alpha_n} 2ab \frac{b^{\alpha_n - 1} - a^{\alpha_n - 1}}{b^2 - a^2} \quad (1.3)$$

Axion-artige Wechselwirkung Axionen sind leichte bosonische Pseudoskalare, die eine mögliche Erklärung für das starke CP-Problem bieten [3]. Darüber hinaus sind sie ein Kandidat für kalte dunkle Materie [8, 9].

Die Monopol-Dipol-Wechselwirkung zwischen Spin und Materie, die durch Axionen vermittelt wird, hat die Kopplungskonstanten g_s und g_p für die skalaren und pseudoskalaren Anteile [15]. Schranken für das Produkt $g_s g_p$ [16] könnten mit einem Lloyd-Materiewellen-Interferometer überprüft werden [1].

Die für den Fall der Axionen abgeleiteten Limits können darüber hinaus dazu beitragen, eine allgemein gültige Grenze für Bosonen mit kleiner Masse zu finden, die unabhängig vom theoretischen Modell ist [1].

Das Potential der Monopol-Dipol Wechselwirkung zwischen einer Materieschicht und einem Nukleon im Abstand x von der Oberfläche ist [15, 1]:

$$V(x) = \pm g_s g_p \frac{\hbar^2 N \lambda}{4m_N} (e^{-x/\lambda} - e^{-(x+d)/\lambda}) = \pm V_0 (e^{-x/\lambda} - e^{-(x+d)/\lambda}) \quad (1.4)$$

Dabei ist N die Dichte des Nukleons der Masse m_N , λ die Wechselwirkungslänge, d die Schichtdicke und \pm berücksichtigt die möglichen Spinrichtungen. Der Phasenunterschied folgt unter Berücksichtigung des Spins zu [1]:

$$\varphi_{\text{ax}} = (\varphi_{\text{I}}^+ - \varphi_{\text{II}}^+) - (\varphi_{\text{I}}^- - \varphi_{\text{II}}^-) = \frac{2\lambda a \gamma}{b^2 - a^2} \left[e^{(b-a)/\lambda} - e^{-a/\lambda} + e^{-b\lambda} - 1 \right] \quad (1.5)$$

Nicht-Newtonsche Gravitation Die Suche nach einer Abweichung von Newtons Gesetz der Gravitation begründet sich auf der Vorhersage von kurzreichweitigen, spinunabhängigen Kräften durch verschiedene Modelle, die über das Standardmodell hinaus gehen. Im Rahmen der Superstringtheorie¹ oder der Supergravitation werden weitere Dimensionen eingeführt, die eine Änderung des Newton'schen Gravitationsgesetzes bewirken könnten. Eine Verletzung des Äquivalenzprinzips, die es durch diese Vorhersagen geben müsste, kann man über die Messung der Gravitation prüfen[1].

Das Potential, das zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Materie und Neutron im Abstand von x verwendet wird, ist:

$$V(x) = 2\pi\alpha m_N^2 N G \lambda^2 e^{-x/\lambda} = V_0 e^{-x/\lambda} , \quad (1.6)$$

mit der Masse m_N der Nukleonen im Spiegel, der Nukleonendichte N , der Compton-Wellenlänge des neuen Teilchens λ und der relativen Stärke der neuen Kraft im Verhältnis zur Gravitation α . Der durch das Potential entstehende Phasenunterschied ist φ_{nng} und ergibt sich zu [1]:

$$\varphi_{\text{nng}} = \frac{2\lambda \gamma}{b^2 - a^2} \left[a(e^{-a/\lambda} - e^{(b-a)/\lambda}) + b(1 - e^{-a/\lambda}) \right] \quad (1.7)$$

Neben φ_{cham} , φ_{ax} und φ_{nng} gibt es noch weitere Phasenunterschiede, die für alle drei Fälle auftreten. Dazu gehört eine Verschiebung φ_{gr} aufgrund der Gravitation, sofern der Spiegel nicht exakt vertikal ist. Darüber hinaus tritt ein Unterschied durch die Reflexion des Neutrons am Spiegel φ_{refl} , einer durch die unterschiedlichen Wege φ_{geom} [1] sowie der Phasenunterschied φ_{cor} durch das Wirken der Corioliskraft[17] auf. Insgesamt ergibt sich der gesamte Phasenschub zu:

$$\varphi = \varphi_x + \varphi_{\text{geom}} + \varphi_{\text{refl}} + \varphi_{\text{cor}} + \varphi_{\text{gr}} \quad (1.8)$$

wobei φ_x für φ_{cham} , φ_{ax} oder φ_{nng} steht. Wie groß die allgemeinen Phasenunterschiede sind, kann in Abbildung 1.2 im Vergleich zu φ_{cham} gesehen werden.

Die drei beschriebenen Fälle sollen zeigen, welches Potential ein Lloyd-Interferometer bei der Suche nach neuen Kräften hat. Je nach Ausführung muss der genaue Aufbau aber angepasst werden. Im Falle der Spinabhängigkeit ist beispielsweise ein Magnetfeldgradient nötig, während die Suche nach Abweichungen des Gravitationsgesetzes mit zwei parallelen Spiegeln vorteilhaft erweitert werden kann[1].

Das ideale Interferenzmuster für ein Lloyd-Materiewellenspektrometer ist in Abbildung 1.3 gezeigt (rote Kurve). Das Muster wurde für eine Geschwindigkeit der Neutronen von

¹Die Superstringtheorie ist die supersymmetrische Variante der Stringtheorie.

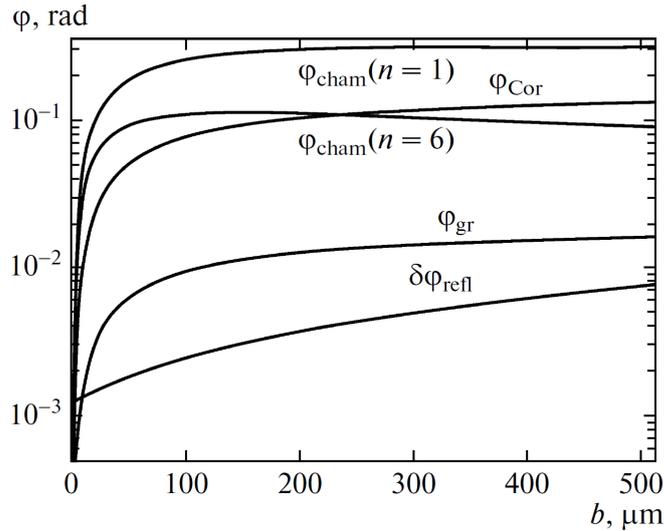


Abbildung 1.2.: Die Abbildung zeigt die Phasenunterschiede φ_{cham} , $\delta\varphi_{\text{refl}} = \pi - \varphi_{\text{refl}}$, φ_{cor} und φ_{gr} in Abhängigkeit des Normalabstands b der Detektorkoordinate von der Spiegelfläche. Die Parameter des Lloyd-Materiewellen-Interferometers sind analog zur Berechnung von $\Lambda_{\text{osz,VCN}} \approx 50 \mu\text{m}$ mittels (1.1). φ_{cham} ist für $n = 1$ und $n = 6$ mit $\beta = 10^7$ gezeigt und φ_{gr} ist für eine Auslenkung von $48,5 \mu\text{m}$ auf 1 m ($48,5 \mu\text{rad}$) angegeben [1].

$v = 63 \text{ m/s}$, eine Spiegellänge von $L = 0,34 \text{ m}$, eine Spaltbreite von $s = 8 \mu\text{m}$ und eine Entfernung zwischen Spiegel und Spalt von $d = 50 \mu\text{m}$ sowie $\Delta\lambda/\lambda = 6 \%$ berechnet.

Berücksichtigt man, dass es im realen Experiment eine Wellenlängenverteilung der Neutronen gibt und dass der Eintrittsspalt ausgedehnt ist, ergibt sich die schwarze Kurve der Abbildung. Je breiter die Wellenlängenverteilung oder die Spaltbreite ist, desto kleiner ist der Kontrast des Musters. Dementsprechend ist es nötig ein kleines Wellenlängenintervall zu selektieren und den Spalt so klein wie möglich zu machen. Die Spaltbreite beeinflusst direkt die Zählrate im Experiment und damit auch die Messzeit. Je kleiner der Spalt ist, desto geringer ist die Rate und desto länger die Messzeit. Hier muss ein vertretbarer Kompromiss zwischen Sichtbarkeit und Messzeit gefunden werden, auf den in Kapitel 5 noch eingegangen wird.

Die grüne Kurve in Abbildung 1.3 zeigt wie die Divergenz des Strahls das Interferenzmuster verändert. Mit dieser Einschränkung kann berechnet werden, wie stark und wie weit vor dem Interferometer der Neutronenstrahl kollimiert werden muss, um bei gegebener Detektorauflösung ein Muster messen zu können. In Kapitel 4 wird angegeben, wie sich die theoretische Divergenz für das Experiment berechnen lässt und was die Auswertung der experimentellen Daten ergibt.

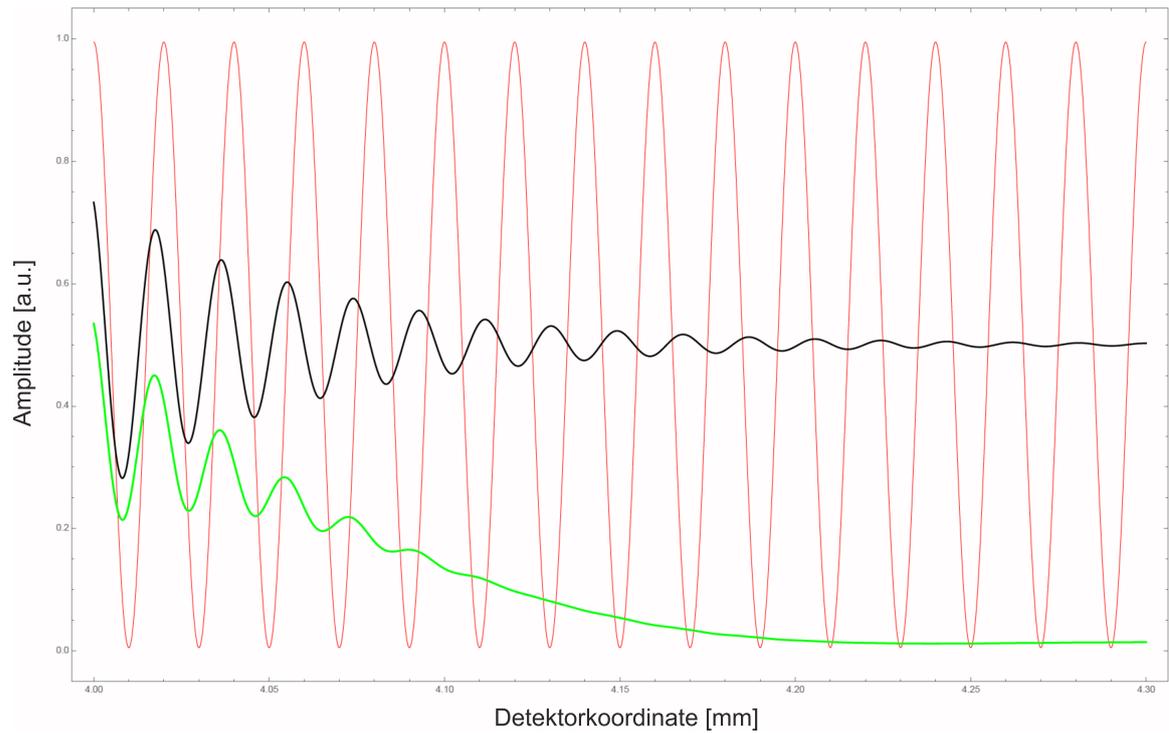


Abbildung 1.3.: Die Abbildung zeigt das ideale Interferenzmuster des Lloyd-Materiewellen-Interferometers (rote Kurve) im Vergleich zum Fall mit einer ausgedehnten, aber schmalen Spaltöffnung und einer Wellenlängenverteilung (schwarze Kurve) sowie für den Fall mit zusätzlich noch auftretender Divergenz des Neutronenstrahls (grüne Kurve) [18]. Die Parameter der Berechnung sind im Text angegeben.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Neutronen des VCN Strahls am ILL

2.1.1. Charakterisierung sehr kalter Neutronen

Die für die Durchführung des Experiments nötigen, sehr kalten Neutronen (engl. very cold neutrons, VCN), können am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble, Frankreich erzeugt werden. Sie entstammen der kalten Deuteriumquelle des Hochflussreaktors und werden anschließend vertikal gegen die Gravitation aus dem Reaktor geleitet. Die Hälfte dieser Teilchen wird weiter durch eine Turbine zu ultrakalten Neutronen (UCN) gekühlt, während die zweite Hälfte als sehr kalte Neutronen für Experimente am Instrument PF2 zur Verfügung steht. Abbildung 2.1 zeigt das Schema der VCN-Produktion am ILL.

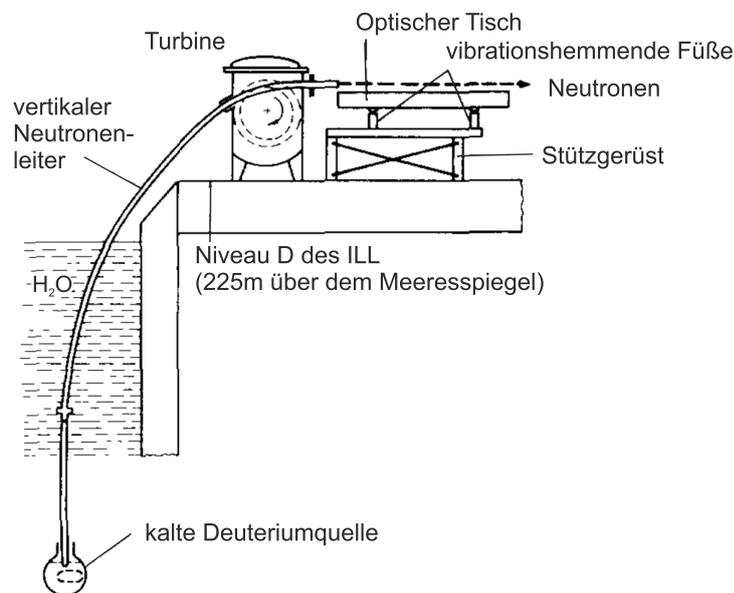


Abbildung 2.1.: Darstellung der wichtigen Komponenten zur Produktion von sehr kalten Neutronen am ILL. Darüber hinaus ist auch die Turbine zu sehen, die VCN zu UCN kühlt sowie eine schematische Darstellung des VCN-Experimentierplatzes[10].

Für Energien und Wellenlängen im Bereich von

$$1 \text{ nm} \lesssim \lambda_{\text{VCN}} \lesssim 50 \text{ nm} \quad (2.1)$$

$$10^{-6} \text{ eV} \lesssim E_{\text{VCN}} \lesssim 10^{-3} \text{ eV} \quad (2.2)$$

spricht man von sehr kalten Neutronen[10, 11].

Weitere Eigenschaften des Neutrons sind seine Masse m , die Lebensdauer τ [19], der Spin s [11], das magnetische Moment μ und seine Quarkstruktur[20]. Die Darstellung folgt

[21], jedoch wurden die Werte aktualisiert.

$$m = 1,674927471(21) * 10^{-27} \text{ kg} \quad (2.3)$$

$$s = \hbar/2 \quad (2.4)$$

$$\mu = -0,96623650(23) * 10^{-26} \text{ JT}^{-1} \quad (2.5)$$

$$\tau = 880,3 \pm 1,1 \text{ s} \quad (2.6)$$

$$\text{Quarkstruktur :} \quad \text{udd} \quad (2.7)$$

2.1.2. Winkelverteilung des VCN-Strahls

Um den Strahl nach dem Durchgang der verschiedenen Elemente des Experiments analysieren zu können, ist es wichtig seine Winkelverteilung am Eingang in die Experimentierkammer zu kennen. Modelliert man das Verhalten der Neutronen auf ihrem Weg von der kalten Quelle durch den Neutronenleiter in die Experimentierkammer in einer Simulation, so muss man die Anfangsbedingungen sowie die Wechselwirkung der Neutronen im Leiter geeignet definieren. Für zufällige Anfangsgeschwindigkeiten am Beginn des Neutronenleiters sowie einer Mischung aus diffuser und spiegelnder Reflexion an den Wänden, folgt für sehr kleine Korrelationslängen die Intensitätsverteilung zu [22]:

$$I(\theta_f) = \frac{3}{2\pi} C \cos \theta_i \cos^2 \theta_f \quad (2.8)$$

Dabei ist θ_i der Einfallswinkel vor der Reflexion gemessen zum Lot und θ_f der analog definierte Ausfallswinkel. Die Konstante C beinhaltet die Korrelationslänge, den Wellenvektor und die Oberflächenrauigkeit, während der Faktor $3/2\pi$ der Normierung dient.

Im vorliegenden Experiment kann der Einfallswinkel θ_i nicht bestimmt werden und ändert sich über die Experimentierzeit nicht. Die Intensitätsverteilung ist auf 1 normiert, da sie eine Wahrscheinlichkeit für nicht perfekt spiegelnde Reflexion angibt. Für den Vergleich des Strahls an unterschiedlichen Positionen des Experiments, ist aber nur der $\cos^2 \theta_f$ -Anteil relevant. Die anderen Faktoren sind nicht von der Ausgangszählrate unterscheidbar, mit der die Verteilung multipliziert werden muss.

2.2. Reflexion und Transmission von Neutronen an Grenzflächen

Trifft eine Neutron auf eine Grenzfläche, kann je nach Energie und Auftreffwinkel Reflexion oder Transmission auftreten. Die dabei wirkenden starken Kernkräfte können durch ein Fermi-Pseudopotential beschrieben werden. Diese Näherung einer Punktwechselwirkung ist sinnvoll, da die Wellenlängen kalter und thermischer Neutronen, λ_{VCN} und λ_{th} , größer sind, als die Reichweite der starken Wechselwirkung ($\approx 10^{-15} \text{ m}$). Die für Neutronen anwendbaren Phänomene der Optik beruhen auf der simultanen Wechselwirkung mit einer großen Anzahl an Streuzentren [23].

Betrachtet man damit eine Oberfläche näherungsweise ohne innere Struktur, so bestimmt die Energie des Neutrons normal zur Oberfläche E_{\perp} im Vergleich zum Potential V der Oberfläche, ob Reflexion oder Transmission auftritt. E_{\perp} und V sind dabei gegeben durch [21, 23]:

$$V = \frac{2\pi\hbar^2}{m}b\rho \quad (2.9)$$

$$E_{\perp} = \left(\frac{(\hbar k_i \sin \theta_i)^2}{2m} \right) \quad (2.10)$$

wobei m die Masse des Neutrons, θ_i der Winkel zwischen einfallendem Neutron und Grenzfläche, b die durchschnittliche kohärente Streulänge und ρ die Dichte der Teilchen im Material der Oberfläche ist. Die angenommene Geometrie ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

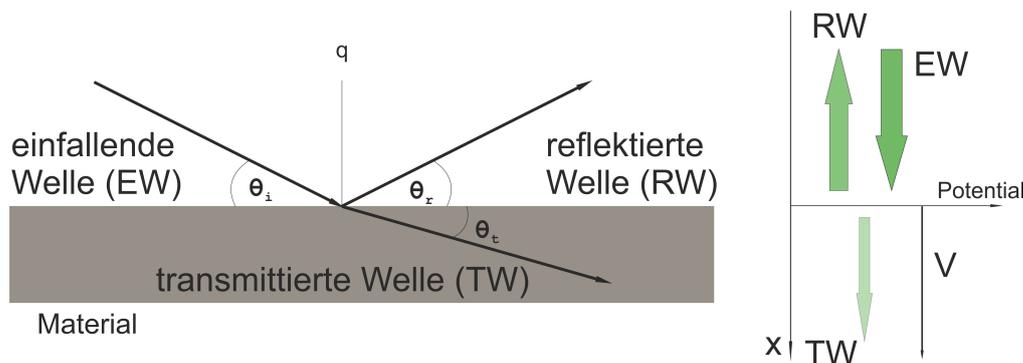


Abbildung 2.2.: Verdeutlichung der Geometrie für die Reflexion und Transmission von Neutronen an einer Grenzfläche. Im Teil rechts ist der Fall anhand einer Potentialstufe dargestellt.

Damit lassen sich auch der Impulsübertrag q und sein kritischer Wert q_c definieren [21], der angibt, ab welchem übertragenen Impuls Totalreflexion auftritt.

$$q = 2k_i \sin \theta_i \quad (2.11)$$

$$q_c = \sqrt{16\pi N_b} \quad (2.12)$$

N_b ist das Produkt aus b und ρ , das auch als Streulängendichte bezeichnet wird.

Mit diesen beiden Werten ist es möglich den Reflexionskoeffizienten R [21] zu definieren:

$$R = \left[\frac{q - (q^2 - q_c^2)^{1/2}}{q + (q^2 - q_c^2)^{1/2}} \right]^2 \quad (2.13)$$

Die Transmission T ist dementsprechend als $T = 1 - R$ gegeben.

Die quantenmechanische Behandlung des Problems zeigt darüber hinaus auch noch, dass sowohl der Tunneleffekt als auch evaneszente Wellen für Neutronen auftreten können [21].

Für die Fälle, in denen hauptsächlich oder nur Transmission auftritt, kann die Intensität des Neutronenflusses nach dem Durchgang durch einen Absorber der Dicke d beschrieben werden durch [24, 25]:

$$I = I_0 * \exp[-d/\mu] \quad (2.14)$$

Dabei ist I die Intensität nach dem Absorber, I_0 die Intensität davor und μ die Absorptionslänge des Materials. Mikroskopisch ist μ gegeben durch:

$$\frac{1}{\mu} = \rho N_A \frac{v_{th}}{v} \sum_k \sigma_k \quad (2.15)$$

Mit der Dichte ρ des Absorbers, N_A der Avogadro-Konstante, der Geschwindigkeit der thermischen Neutronen v_{th} , der Geschwindigkeit der betrachteten Neutronen v und der Summe über die verschiedenen Wirkungsquerschnitte σ_k .

2.3. Transmission sehr kalter Neutronen durch Borstahl

Borstahl² ist jenes Material, aus dem die Blendenblätter der kollimierenden Spalte hergestellt sind. Die Zusammensetzung des Materials ist in Tabelle 2.1 angegeben. Das einfache Transmissionsverhalten (2.14) für Neutronen mit einer Geschwindigkeit von $v = 62,6 \text{ m/s}$ durch Borstahl ist in Abbildung 2.3 gezeigt.

Zusammensetzung	Fe	Cr	Ni	¹¹ B	Mn	¹⁰ B	Si	Al
Anteil [%]	65.21	19.06	12.38	1.45	1.08	0.36	0.27	0.19

Tabelle 2.1: Zusammensetzung des Materials Borstahl mit den enthaltenen Elementen und deren Anteil.

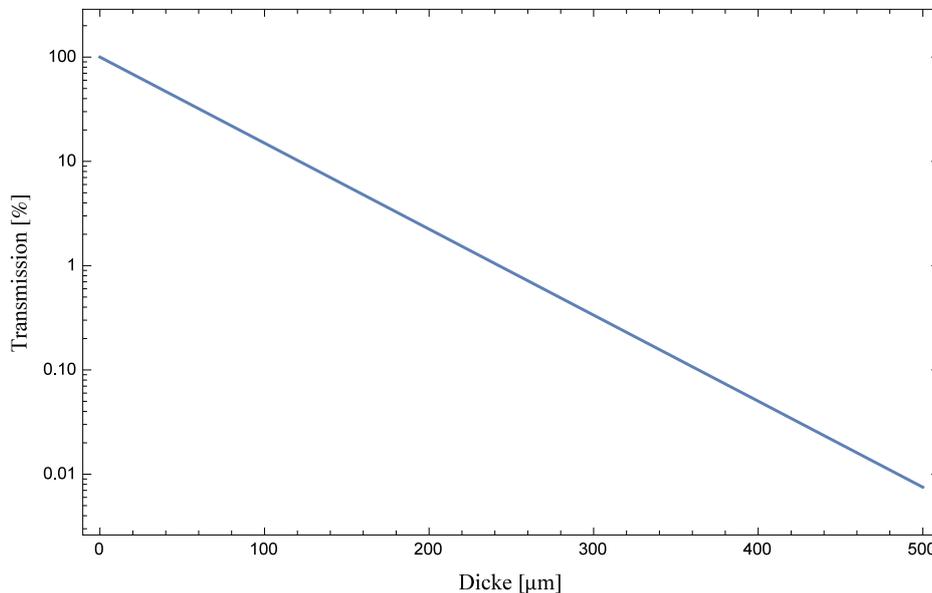


Abbildung 2.3.: Exponentielles Transmissionsverhalten (2.14) durch Borstahl für Neutronen der mittleren Geschwindigkeit $62,6 \text{ m/s}$. Die y-Achse gibt prozentuell an, wie viele Neutronen transmittiert werden.

Das experimentelle Geschwindigkeitsspektrum lässt sich durch eine Summe aus drei Normalverteilungen mit gemeinsamer Amplitude darstellen[26]. Dabei ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit zu $\bar{v} = 62,6 \pm 0,9 \text{ m/s}$ bei einer Standardabweichung von $\sigma = 1,78 \pm 0,11 \text{ m/s}$ der gesamten Verteilung. Für die Zwecke dieser Arbeit ist es aber ausreichend, die genauere Analyse durch eine Normalverteilung mit \bar{v} und σ zu nähern.

Betrachtet man das genäherte Spektrum beim Durchgang durch das Material, so ergibt sich Abbildung 2.4. Die Grafik zeigt die Geschwindigkeiten vor und nach dem Durchgang durch $75 \mu\text{m}$ Borstahl sowie die Differenz der beiden Spektren. Die Verschiebung des Maximums durch die Transmission zu höheren Werten ist so klein, dass sie hier nicht sichtbar

²Die Bezeichnung des Herstellers BÖHLER Bleche GmbH & Co KG ist Neutronit.

ist. Betrachtet man ein entsprechendes Maxwell-Spektrum, so ist der Effekt deutlicher zu sehen. Er kommt dadurch zustande, dass langsamere Neutronen stärker absorbiert werden.

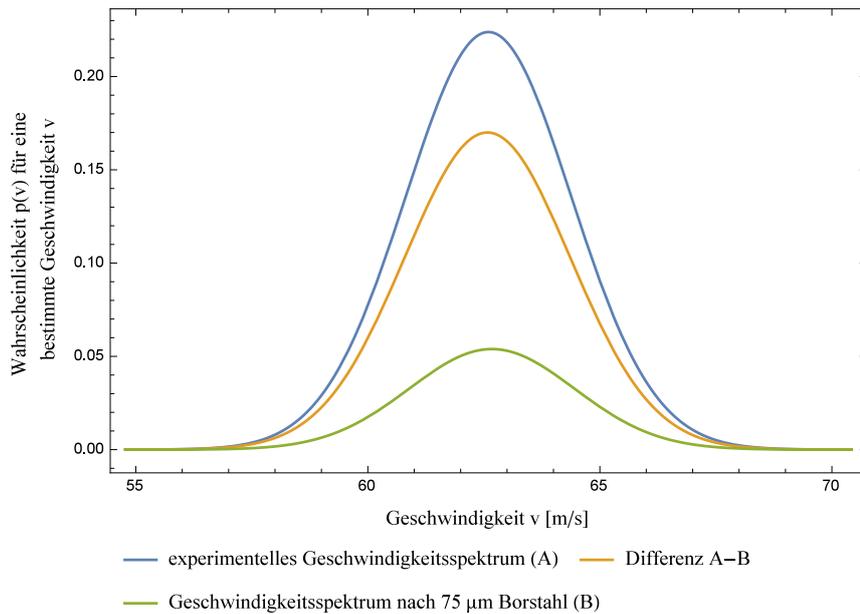


Abbildung 2.4.: Das Experimentelles Geschwindigkeitsspektrum vor und nach der Transmission durch 75 μm Borstahl. Gezeigt ist auch die Differenz zwischen den beiden Verteilungen.

2.4. Fraunhofer-Beugung für Neutronen

In einem Interferometer werden Teilchen durch ihre Welleneigenschaften beschrieben. Gemäß der Formel $\lambda = \frac{h}{p}$ von de Broglie, kann jedem Teilchen eine Wellenlänge zugeordnet werden[27]. Die weitere Beschreibung des Systems muss in weiterer Folge über die Schrödinger-Gleichung für Neutronen erfolgen, die in ihrer stationären Form gleichzeitig das Analogon zur Helmholtz-Gleichung der Lichtoptik ist[23]. Daraus folgt auch, dass die Resultate der Optik weitgehend auch für Neutronen Anwendung findet[28].

Die Beugung einer Neutronenwelle an einer makroskopischen Blende kann somit durch das Kirchhoffsche Beugungsintegral beschrieben werden, sofern die Wellenlänge der Teilchen viel kleiner als die Ausdehnung des Spalts und die Entfernung zwischen Quelle und Blende sowie Blende und Detektor ist. Nach paraxialer Näherung und der Voraussetzung eines kleinen Phasenunterschieds gegenüber 2π für die Randstrahlen³, lässt sich die Intensitätsverteilung durch das Beugungsintegral in Fraunhofer-Näherung zu [23, 29, 30]:

$$I(s, \lambda, \theta) = C \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi s}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi s}{\lambda} \sin \theta} \right]^2 \quad (2.16)$$

berechnen. Dabei ist $I(s, \lambda, \theta)$ die am Detektor zu erwartende Intensität, λ die Wellenlänge der Neutronen, θ der Winkel zwischen Beobachtungspunkt und Strahlachse, s die

³Randstrahlen sind jene Anteile des Strahlenbündels, die in y -Richtung gerade noch durch die Blendenöffnung gelangen.

Spaltbreite sowie C eine Normierungskonstante.

Die Intensitätsverteilung (2.16) ist für unterschiedliche Spaltbreiten s in Abbildung 2.1 dargestellt.

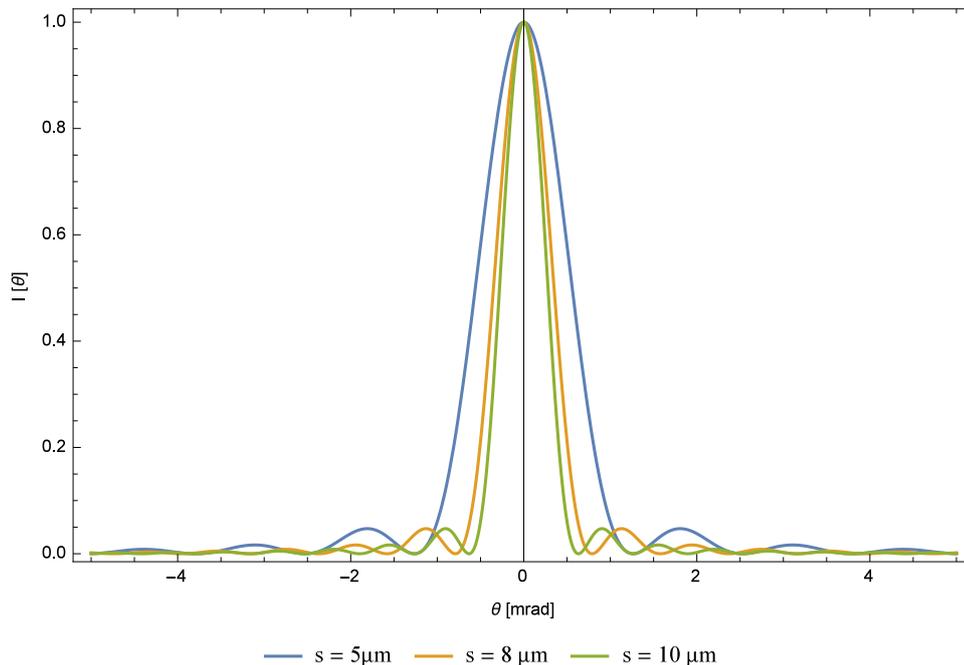


Abbildung 2.5.: Gezeigt ist die Intensitätsverteilung in Fraunhofer-Näherung (2.16), bei der sich das Muster mit der Spaltbreite s ändert. Die Kurven wurden für eine mittlere Geschwindigkeit der Neutronen von 62,6 m/s berechnet.

2.5. Anwendung und Eigenschaften der Poisson-Verteilung

Ein Neutronenstrahl, wie der des Forschungsreaktors in Grenoble, ist ein Produkt des radioaktiven Zerfalls. Dadurch unterliegt er intrinsischen Schwankungen, die mittels statistischer Modelle beschrieben werden müssen.

Die allgemeinste Wahrscheinlichkeitsverteilung für diskrete Prozesse mit binären Ausgangsmöglichkeiten ist die Binomialverteilung. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Wert Messwert x bei einer konstanten Erfolgswahrscheinlichkeit p unter n Messungen auftritt, ist gegeben durch:

$$P(x) = \frac{n!}{(n-x)! x!} p^x (1-p)^{n-x} \quad (2.17)$$

Die Verteilung ist auf 1 normiert und hat den Mittelwert:

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^n xP(x) = pn \quad (2.18)$$

Damit ergibt sich die Varianz zu:

$$\sigma^2 \equiv \sum_{x=0}^n (x - \bar{x})^2 P(x) = pn(1-p) = \bar{x}(1-p), \quad (2.19)$$

wobei die Wurzel der Varianz als Standardabweichung σ bezeichnet wird. Die Varianz ist ein Maß für die intrinsische Streuung der einzelnen Messwerte des gesamten Satzes und damit wie unterschiedlich die Werte sind.

Ist die Erfolgswahrscheinlichkeit p einer einzelnen Möglichkeit x nicht nur konstant, sondern auch klein, kann von der Binomialverteilung auf die Poissonverteilung übergegangen werden. Dabei wird im Rahmen nuklearer Zählereignissen davon ausgegangen, dass die Beobachtungszeit klein ist gegenüber der Halbwertszeit der radioaktiven Quelle. Die entsprechende Verteilungsfunktion ist

$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x e^{-\bar{x}}}{x!} \quad (2.20)$$

mit Mittelwert, Varianz und Standardabweichung zu

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^n xP(x) = pn \quad (2.21)$$

$$\sigma^2 \equiv \sum_{x=0}^n (x - \bar{x})^2 P(x) = pn = \bar{x} \quad (2.22)$$

$$\sigma = \sqrt{\bar{x}} \quad (2.23)$$

Waren bei der Binomialverteilung noch zwei Größen n und p für die Beschreibung der Vorgänge nötig, so ist im Falle der Poissonverteilung nur mehr die Kenntnis von \bar{x} erforderlich. Für die praktische Durchführung ist das ein großer Vorteil, da nicht die einzelnen Wahrscheinlichkeiten p bekannt sein müssen.

Aus (2.19) und (2.22) erkennt man die Näherung der kleinen Erfolgswahrscheinlichkeiten $p \ll 1$ für die Poissonverteilung.

Bei der Auswertung der experimentellen Daten ist es oft interessanter die Zählrate $\dot{n} = \frac{n}{t}$ statt der insgesamten Anzahl der Ereignisse n zu betrachten. Berechnet man die Standardabweichung für diesen Fall, ist die Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_{\dot{n}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{n}}{\partial n}\right)^2 \sigma_n^2 + \left(\frac{\partial \dot{n}}{\partial t}\right)^2 \sigma_t^2} = \sqrt{\frac{n}{t^2} - \left(\frac{n}{t^2}\right)^2 \sigma_t^2} \quad (2.24)$$

zu berücksichtigen. Im Fall kleiner Fehler für die zeitliche Auflösung der Messwerte $\sigma_t \ll 1$ geht $\sigma_{\dot{n}}$ über in

$$\sigma_{\dot{n}} = \frac{\sqrt{n}}{t} = \sqrt{\frac{\dot{n}}{t}} \quad (2.25)$$

Die entsprechende Varianz der Zählrate ist $\sigma_{\dot{n}}^2$ [31, 32].

3. Aufbau und Betrieb des Kollimationssystems

Um ein Lloyd-Materiewellenspektrometer zu realisieren, ist es nötig einen Neutronenstrahl, wie er zum VCN-Experimentierplatz kommt, den Erfordernissen des Experiments anzupassen. Dieser Vorgang wird Strahlpräparation genannt.

Die Strahlpräparation beinhaltet im vorliegenden Fall das Kollimieren, die Monochromatisierung und das Abschirmen unerwünschter primärer sowie sekundärer Strahlung. Diese Aufgaben werden durch ein Kollimationssystem erfüllt, bevor das eigentliche Spektrometer beginnt. Die Kollimation wird durch vertikale und horizontale Blenden erreicht, die an bestimmten Stellen des Aufbaus den Strahl gezielt beschränken und damit die gewünschten Strahlteile selektieren. Wie in Abb. 3.1 ersichtlich, lässt sich damit der Aufbau des gesamten Spektrometers in zwei Abschnitte gliedern. Der erste Abschnitt (Bereich 1) ist das Kollimationssystem mit Monochromator, während der zweite Abschnitt (Bereich 2) das Interferometer selbst beinhaltet.

In diesem Kapitel soll das Kollimationssystem näher erläutert und erklärt werden. Ursprünglich war das System zur Strahlcharakterisierung des VCN-Strahls am PF2-Instrument des Instituts Laue-Langevin gedacht, erwies sich aber als sehr nützlich und flexibel einsetzbar, sodass es zum derzeitigen Kollimationssystem weiterentwickelt wurde.

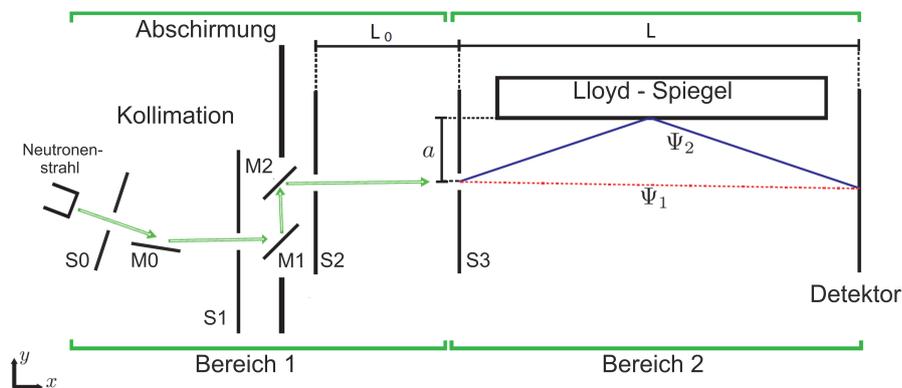


Abbildung 3.1.: Schematischer Aufbau des Lloyd-Interferometers mit der Trennung in Kollimationssystem (Bereich 1) und Interferometer (Bereich 2) [18].

3.1. Einsatzgebiet und Aufbau

3.1.1. Setup zur Charakterisierung des VCN-Strahls

Die genaue Kenntnis des VCN-Strahls, der vom Forschungsreaktor am ILL produziert wird, ist Voraussetzung für die Realisierung des Lloyd-Spektrometers. Die ungefähre Ver-

teilung des primären Strahls war durch die Zusammenarbeit mit einer Forschungsgruppe aus Japan[33] bekannt.

Nachdem der Neutronenstrahl jedoch nicht parallel zur Längsachse der Experimentierkabine einfällt, sondern nach ein bis zwei Metern auf deren Seitenwand trifft, ist der Platz für mögliche Aufbauten stark beschränkt. Der Superspiegel M0⁴ unmittelbar nach dem Strahlausgang in die Kabine ermöglichte es, den Strahl auszurichten, Abbildung 3.1.

Während der Charakterisierung wurde der Neutronenstrahl parallel zu einer Achse des Lochmusters des optischen Tisches⁵ eingerichtet, der die Basis des weiteren Aufbaus ist. Durch die Ablenkung des Strahls wurde automatisch auch der Untergrund reduziert, da nur der reflektierte Teil der Neutronen in das weitere Experiment gelangte, während der Rest daran vorbei ging. Die Positionierung der weiteren Elemente des Setups erfolgte jeweils nach Messung der tatsächlich vorliegenden Neutronenverteilung hinter dem Element davor, um die maximale Zählrate zu selektieren.

Die Anforderungen für die praktische Umsetzung des Aufbaus zur Strahlcharakterisierung waren:

1. Der räumliche Verlauf des Neutronenstrahls nach der Ablenkung durch den Spiegel M0 war nicht bekannt. Darüber hinaus sollten Blendenpositionen im Strahl und außerhalb des Strahls möglich sein. Daraus ergibt sich die Forderung nach einem großen Verfahrbereich im Raum, wobei die Einstellung der unterschiedlichen Positionen schnell, einfach und automatisiert erfolgen soll.
2. Die zur Verfügung stehenden Detektoren gingen bei zu hohen Zählraten in Sättigung. Es war deshalb notwendig variable Spaltbreiten zu realisieren, um die Menge der am Detektor ankommenden Neutronen im Betrieb regulieren zu können.
3. Wie man in Abbildung 1.3 sieht, ist die Kenntnis der Wellenlängenverteilung unbedingt erforderlich. Deswegen musste eine Möglichkeit zur Messung der entsprechenden Verteilung der Neutronen und der dafür nötig Platz vorgesehen werden.
4. Damit die zur Verfügung stehende Zeit optimal genutzt werden kann, war es wichtig die Rate der Neutronen hinter den einzelnen Setupteilen zu maximieren. Dafür waren Detektoren mit einer dementsprechenden örtlichen Auflösung nötig.
5. Die Höhe des optischen Tisches wurde so geplant, dass darauf noch Aufbauten platziert werden konnten. Der Abstand zwischen Tischplatte und Strahlmitte betrug 324 mm, worauf das System ausgelegt sein musste.
6. Die Verwendung des Systems durch mehrere Experimentatoren, die nicht alle jedes Detail des Aufbaus und der Ansteuerung kennen konnten, verlangte eine einfache Bedienung des gesamten Systems.

Für die Charakterisierung wurde angenommen, dass der Strahl unpolarisiert ist.

Die dritte und die vierte Forderung wurden durch vorhandene Geräte am PF2/ILL erfüllt. Das Geschwindigkeitsspektrum wurde mit einem Chopper ermittelt, dessen Triggersignal mit einem Detektor synchronisiert werden konnte. Als Detektoren standen je ein Gerät des Instruments am ILL sowie der japanischen Kollegen zur Verfügung. Beide Detektoren waren ortsauflösend, hatten jedoch unterschiedlich große Detektionsflächen und unterschiedliche Ortsauflösung.

⁴Der verwendete Superspiegel bestand aus 90 Nickel-Titan Schichten.

⁵Die Abmessungen des optischen Tisches sind 1200x3000x305mm ohne Füße.

Der Detektor der japanischen Kollegen hatte eine Auflösung von 1 mm und eine runde Detektionsfläche mit einem Durchmesser von 100 mm. Der Detektor des PF2 war quadratisch mit einer Seitenlänge von 256 mm, wies aber nur eine Auflösung von 2 mm auf. Die in Kapitel 4 vorgestellten Messungen wurden mit dem Detektor des PF2 aufgenommen.

Um auch den anderen Ansprüchen zu genügen, musste ein eigenes System mit am Atominstitut vorhandenen Geräten realisiert werden. Zur Verfügung standen Linearmotoren des Herstellers *Physik Instrumente (PI)* mit Stellwegen von 25 mm und 300 mm. Es handelt sich dabei um Präzisions-Mikrostelltische mit den Bezeichnungen *M-403.1DG* und *M-413.3DG*⁶, die jeweils eine Wiederanfahrergenauigkeit von 0,1 µm aufweisen. Weiters waren bereits Borstahl-Blendenblätter⁷ vorhanden, die dazu verwendet werden sollten, die Spalte zu realisieren.

Das System, das daraus entstand, war eine Konstruktion aus zwei Blenden, die senkrecht zueinander angeordnet waren. Einmal war die Spaltöffnung vertikal und einmal horizontal, wobei jede der beiden Blenden auf zwei Linearverstellern angebracht war, um sie automatisiert öffnen und schließen sowie verschieben zu können. Der Rahmen, in den die Motoren eingebaut wurden, bestand aus Alvaris-Profilstangen. Das Innenmaß des Rahmens beträgt 1 m x 1 m, wobei in beiden Dimensionen die Größe der verwendeten Motoren die effektiven Weglängen reduzierten. Die Zwischenplatten sowie die Halterung für die Blendenblätter wurde aus Aluminium hergestellt. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt und wurde bei den Strahlzeiten 3-14-343 (2014) und TEST-2455 (2016) verwendet.

Blende	Stellweg y-Achse		Stellweg z-Achse	
	elektrisch	mechanisch	elektrisch	mechanisch
Blende 1	18 - 318	bis 930	145 - 1000	-
Blende 2	-	47,5 - 952.5	0 - 50	bis 860

Tabelle 3.1.: Maximale Stellwege der Blenden bei der Strahlcharakterisierung. Alle Angaben in mm.

Abbildung 3.2 zeigt neben dem Aufbau auch die Blendenbezeichnungen sowie das verwendete Koordinatensystem. Wie das System in Realität aussieht, ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Der Verfahrensbereich der beiden Blenden in y- und z-Richtung ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst, wobei zwischen elektrischem Verschub und mechanischem Umbau unterschieden wird.

Die gewählte Konfiguration ist das Optimum, das ohne neue Motoren und mit wenig Zusatzkosten realisierbar war. Bewegung in x-Richtung war nur für Blende 1 möglich, jedoch wurde dieser Freiheitsgrad genutzt, um die beiden Blenden so nah wie möglich zueinander zu bringen. Ausgangspunkt für die Einstellung der Höhe (z-Achse) war der optische Tisch von dem aus 324 mm zwischen Tischplatte und der Strahlhöhe von 1360 mm lagen.

Im Aufbau wurden mehrere *C-884 Motion Controller* der Firma *PI* als notwendige Schnittstelle zwischen Software und Geräten verwendet. Damit war es möglich bis zu vier

⁶Beide Motoren können auf verschiedene Startpositionen am Anfang, in der Mitte und am Ende des Motors initialisiert werden. Je nach Startposition ist dann der gesamte Stellweg um bis zu 2 mm versetzt. Die Datenblätter der verwendeten Geräte befinden sich im Anhang ab Seite 80.

⁷Die Blendenblätter hatten die Abmessungen: (120 ± 0,1) x (30 ± 0,1) x (2,5 ± 0,1) mm und die Zusammensetzung gemäß Tabelle 2.1.

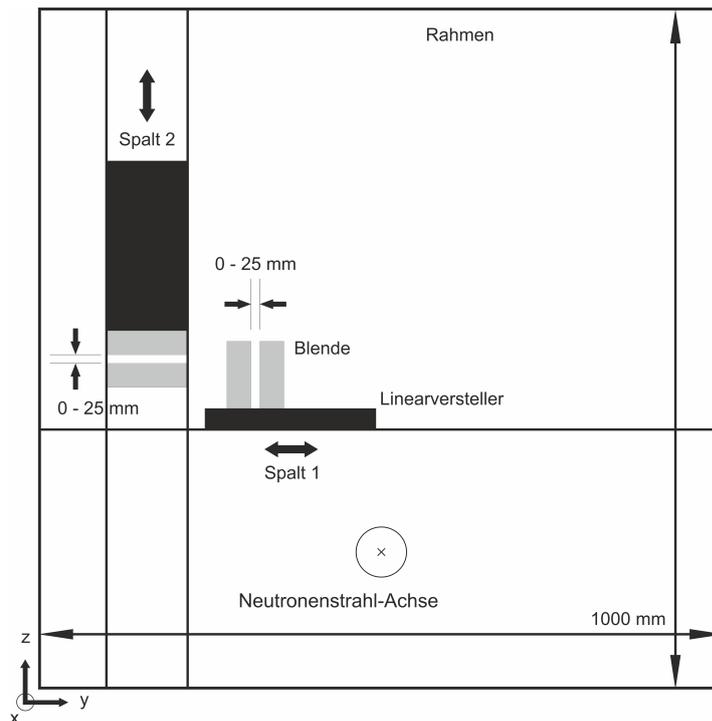


Abbildung 3.2.: Aufbau zur Strahlcharakterisierung; gezeigt ist das System aus zwei Blenden mit Bezeichnungen und einigen Maßen. Für die Strahlcharakterisierung war es geplant, zwei solche Aufbauten hintereinander zu verwenden.

der vorhandenen Motoren zu steuern. Im vorliegenden Fall war damit ein Controller pro Aufbau eingeplant, wobei im späteren Kollimator-Setup mit Monochromator ein Controller beide relevanten Blenden steuerte. Auf die verwendete Software sowie die möglichen Optionen zur manuellen und automatisierten Steuerung wird in Abschnitt 3.2 noch detaillierter eingegangen. Das Schema der Konfiguration aus Rechnern, Controllern, Motoren und weiteren Geräten des Aufbaus ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

Ein Chopper ist eine rotierende Scheibe, die nur an einer bestimmten Position, dem Chopperfenster, Neutronen durchlässt. Während der übrigen Rotation werden die Teilchen in der Scheibe absorbiert. Der Detektor erhält vom Chopper ein periodisches Triggersignal, das angibt, wann sich die Scheibe einmal gedreht hat. Durch den Zeitunterschied zwischen Triggersignal und dem Auftreffen der Neutronen am Detektor kann die Geschwindigkeit der Teilchen bestimmt werden. In der Berechnung muss allerdings der zeitliche Offset zwischen der Position des Triggers und des Chopperfensters berücksichtigt werden. Der im Experiment verwendete Chopper ist schematisch in Abbildung 3.4 zu sehen.

Die typische Spaltbreiten des Aufbaus lagen zwischen $100\ \mu\text{m}$ und $1\ \text{mm}$ und eigneten sich dadurch sehr gut, den Strahl mit einer ungefähren Ausdehnung von $31\ \text{mm} \times 71\ \text{mm}$ (siehe auch Kapitel 4, Tabelle 4.1) zu vermessen und zu kollimieren.

Insgesamt ist das System durch seine geringen Ausmaße in x-Richtung und die Möglichkeit zusätzliche Elemente zu befestigen sehr platzsparend ausgeführt. Der Rahmen des Aufbaus diente auch als Halterung für Abschirmmatten⁸ zur Reduktion des Untergrunds.

⁸Die Abschirmmatten sind Polymere, die Bor enthalten, mehr Informationen dazu sind im Anhang ab Seite 80 zu finden.

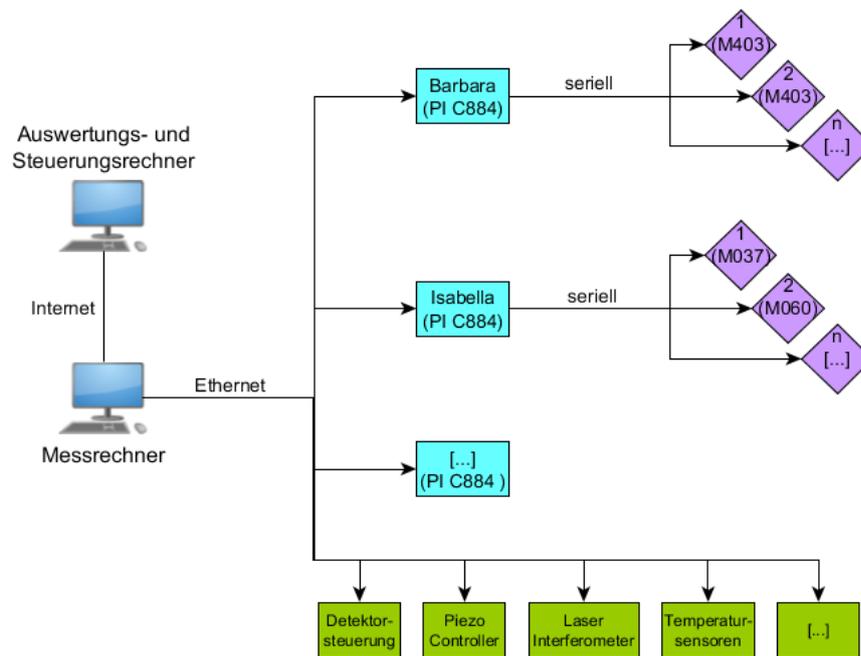


Abbildung 3.3.: Darstellung der elektronischen Hierarchie aus Rechnern und Geräten im Rahmen des Loyd-Experiments. [...] steht für weitere ähnliche Elemente, die noch vorhanden waren. Genauere Informationen zu den Temperatursensoren finden sich in [34].

3.1.2. Weiterentwicklung zum Kollimationssystem

In weiterer Folge erwies sich das gerade beschriebene System als sinnvolle Grundlage für das Kollimationssystem mit Monochromator des Interferometers.

Der große Bereich des M-413 (300mm) konnte dazu verwendet werden, zwei Bereiche zu definieren, einen in dem die Blende im Neutronenstrahl steht und einen, in dem sie aus dem Strahl herausgefahren ist (siehe Abb.3.6). Dadurch konnten die Messungen mit und ohne der jeweiligen Blende durchgeführt werden ohne einen mechanischen Umbau vornehmen zu müssen. Die Verknüpfung der entsprechenden Daten war somit trivial gegeben, da immer im gleichen Bereich gemessen wurde. Die hohe Wiederanfahrergenauigkeit der *PI*-Tische im Bezug auf ihre Position war dafür Voraussetzung.

Um den Neutronenstrahl auf eine Wellenlänge bzw. Geschwindigkeit zu präparieren, ist ein monochromatisierendes Element nötig. Im vorliegenden System wird diese Aufgabe von zwei monochromatisierenden Superspiegeln der japanischen Arbeitsgruppe wahrgenommen, die über die Bragg-Bedingung⁹ eine Wellenlänge selektieren können. Durch den Einsatz von zwei Spiegeln wurde der Strahl parallel zum einfallenden Strahl versetzt und gleichzeitig auf eine bestimmte Wellenlänge präpariert. Die Spiegel wurden zur Realisierung des Aufbaus mit Monochromator zwischen den beiden Blenden platziert [35], wobei der eingestellte Winkel auf die Geschwindigkeit im zuvor gefundenen Maximum abgestimmt wurde.

⁹ $n\lambda = 2d\sin(\varphi)$; mit der Beugungsordnung n , der Wellenlänge der Strahlung λ , dem Gitterabstand d sowie dem Braggwinkel φ

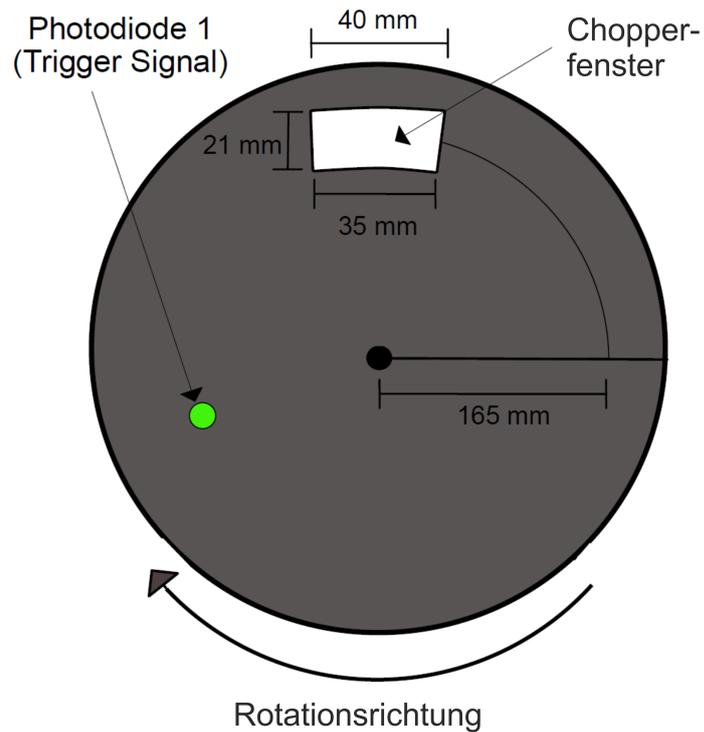


Abbildung 3.4.: Schematische Darstellung der rotierenden Scheibe des Choppers. Neutronen können nur durch das Chopperfenster gelangen, da die restliche Scheibe Neutronen absorbiert. Die Photodiode erzeugt das Triggersignal. Die Abbildung stammt aus [26].

Beide Spiegel waren auf *M-037.DG* und *M-060.DG Präzisionsdrehtischen*¹⁰ von *PI* montiert, sodass sie automatisiert gesteuert werden konnten.

¹⁰Datenblätter zu den Motoren finden sich im Anhang ab Seite 80.

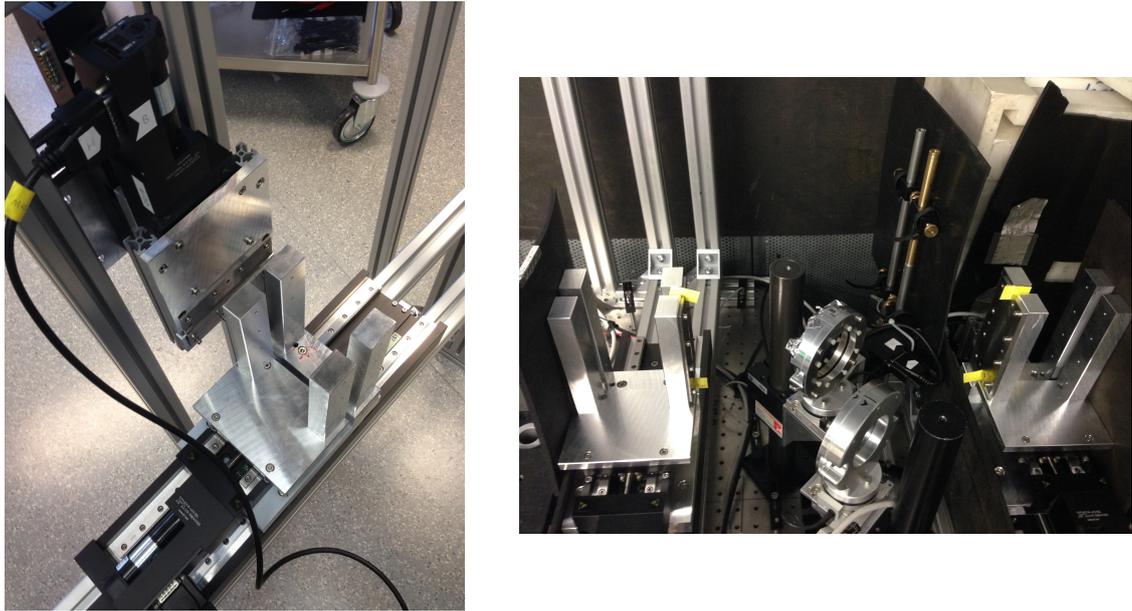


Abbildung 3.5.: Aufbau des Blendensystems im Labor in Wien (links) und in Frankreich am ILL (rechts). Das linke Bild zeigt eine Detailaufnahme der Blenden mit eingesetzten Blendenblättern in der geplanten Konfiguration zur Strahlcharakterisierung. Das rechte Bild zeigt das System im Setup des Experiments, wobei zwischen den Blenden die beiden monochromatisierenden Spiegel positioniert sind.

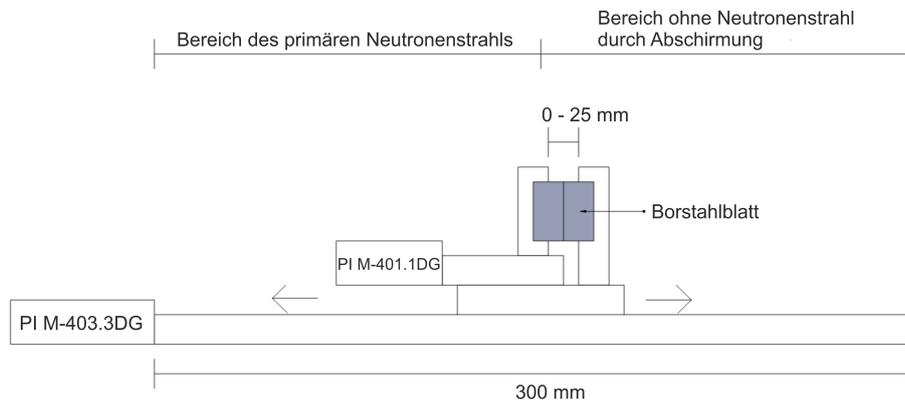


Abbildung 3.6.: Schematische Darstellung des Stellwegs eines M-413.3DG Motors im Kollimationssetup. Der Verfahrweg kann in einen Bereich mit und ohne primären Neutronenstrahl geteilt werden. Die Blende konnte zur Gänze in einen Bereich hinein und heraus bewegt werden.

3.2. Ansteuerung der Komponenten

Als Programmiersprache wurde die Entwicklungsumgebung *LabVIEW*¹¹ von *National Instruments* verwendet, da wir dankenswerterweise ein umfangreiches Projekt der Kollegen vom qBounce-Experiment[36] zur Verfügung gestellt bekamen. Dieses enthielt bereits Programme für einige Geräte, die im Aufbau des gesamten Interferometers vorgesehen waren. *Projekt* ist in *LabVIEW* die Bezeichnung für eine Sammlung aus Programmen, Variablen und Bibliotheken, die zusammen verwendet und untereinander gebraucht werden. Programme werden als *Virtual Instrument(s) - VI(s)* - bezeichnet, dementsprechend auch als sub-VI, wenn sie in einem anderen Programm während dessen Ausführung verwendet werden.

Die korrekte und zeitlich richtige Steuerung der Blenden und Spiegel ist essentiell für das Gelingen des Experiments. Im Folgenden wird darauf eingegangen, wie die nötigen Programme strukturiert sind und wo es Verbesserungsmöglichkeiten gibt.

3.2.1. Wichtige Konzepte in Labview

LabVIEW benutzt im Vergleich zu anderen Programmiersprachen das *dataflow execution model* als Methode der Ausführung der Programme. Dieses Prinzip des Datenflusses gibt vor, dass Programmteile erst ausgeführt werden, wenn alle nötigen Startwerte und Eingaben vorliegen. Die daraus produzierten Daten werden an nachkommende Operationen weitergegeben, die vor ihrer Ausführung darauf warten müssen [37]. Eine vereinfachte Veranschaulichung zeigt Abbildung 3.7. Die Aufgabe des Programmierers besteht darin, die einzelnen Operationen zu verbinden und so den Fluss an Daten zu regeln.

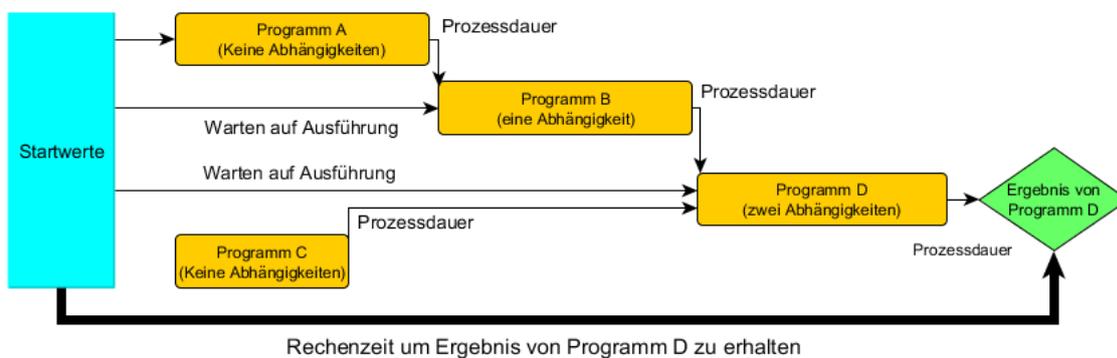


Abbildung 3.7.: Vereinfachte Darstellung eines Programmteils zur Verdeutlichung des Dataflow-Modells. In der Entwicklungsumgebung können die Elemente beliebig angeordnet werden, sofern die Verbindungen ident bleiben. Die Abbildung soll die Rechen- und Wartezeiten sowie die Zeitpunkte der Ausführung symbolisieren.

Nicht in allen Fällen ist es möglich, sich genau an diesen Ablauf zu halten, weswegen auch Variable vorgesehen sind. Die grundlegende Schwierigkeit der Variablen in *LabVIEW* ist aber, dass diese vom *dataflow execution model* ausgenommen sind. Der Zeitpunkt der Exekution ist damit nicht festgelegt, wie sonst durch den Datenfluss. Diese Ausnahme gilt für lokale und globale Variablen sowie *shared variables* [37].

¹¹LabVIEW ist das Akronym von Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench.

Bei Verwendung von Variablen kann es durch den Verlust des klar geregelten Ablaufs zu *race conditions*¹² kommen. Zusätzlich kann sich der Ausgang der *race condition* mit dem Betriebssystem oder der *LabVIEW*-Version ändern. Dementsprechend können hier auch noch nachträglich sehr leicht Fehler in bereits funktionierenden Programmen auftreten.

Das Konzept des *dataflows* ist eine abstrakte, aber sinnvolle Arbeitsweise intern zu steuern, wie Programme möglichst effizient abgearbeitet werden. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die komplexe Hintergrundstruktur von *LabVIEW* nicht mit den entstehenden Programmen in Konflikt gerät. Je umfangreicher und vielschichtiger ein Projekt geplant ist, desto erschöpfender muss diese Struktur miteinbezogen werden [37].

Die *Queue* ist eine zeitgeordnete Struktur, die nach der Reihe Elemente aufnehmen und diese nach dem first-in-first-out-Prinzip (FIFO) wieder ausgeben kann, Abbildung 3.8 [37]. Dadurch können Einträge in der Queue nicht mehr vermischt werden. Eine solche Struktur eignet sich um häufige Änderungen an einem Objekt ohne der Gefahr eines Überschreibens oder Vergessens einzelner Modifikationen zu beherrschen.

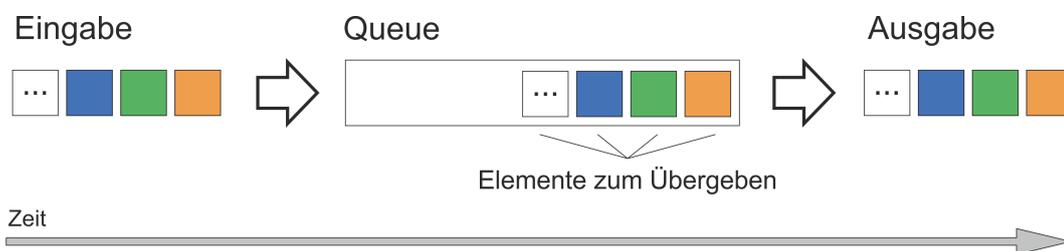


Abbildung 3.8.: Schema der Queue mit dem FIFO-Prinzip. Die Reihenfolge der Elemente zum Zeitpunkt des Einlesens in die Queue bleibt erhalten bis zur Ausgabe erhalten. Werden neue Elemente hinzugefügt bevor die Queue leer ist, werden diese nach dem gleichen Prinzip den bereits vorhandenen Elementen nachgereiht. Die Struktur eignet sich sehr gut zur Kombination mit Schleifen.

3.2.2. Allgemeine Struktur der Programme des Lloyd-Projekts

Die VI, aus der heraus alle Programme gestartet werden konnten, wurde als *Main.vi*¹³ bezeichnet. In diesem Hauptprogramm war es möglich, die anderen Programme zu starten und zu stoppen.

Jedes Gerät erhielt zwei Programme, die die Ansteuerung damit regeln. Einerseits war das eine *Job.vi* zur Abarbeitung der Befehle und andererseits ein Visualisierungsprogramm zur Darstellung und Steuerung der Vorgänge. Der Benutzer kann nur über die Visualisierung mit dem Gerät interagieren, welches wiederum Befehle nur von der Visualisierung bekommen kann. Diese Struktur ist in Abbildung 3.9 veranschaulicht.

Zur Kommunikation zwischen den Programmen gibt es eine String-Variablen, die den Befehlsstring übergibt und zwei Kommunikationsvariablen (KV). Eine davon übergibt die für den Befehl nötigen Daten, während die andere die Rückmeldung zurück an die Visualisierung gibt, um dem Benutzer die Durchführung zu verdeutlichen sowie den Abschluss

¹²Race conditions (dt.: kritischer Wettlauf) sind Programmabläufe, bei denen das Ergebnis einer Operation durch das zeitlichen Verhalten der Einzeloperationen bestimmt ist. Auf Grund der Ungewissheit des Ergebnisses sollten solche Vorgänge vermieden werden.

¹³.vi ist die Dateiendung von *LabVIEW*-Programmen.

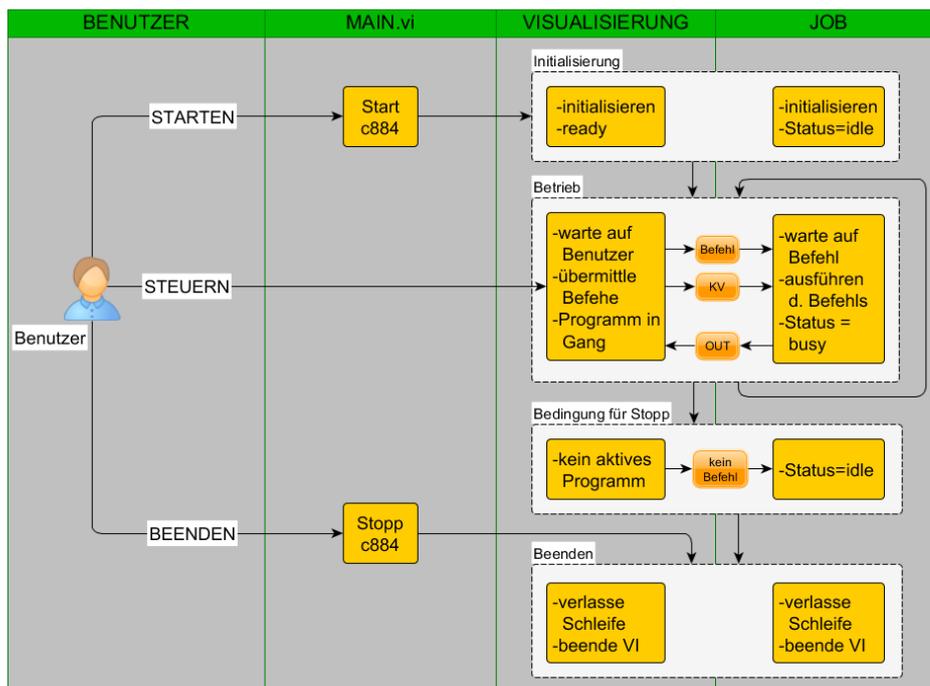


Abbildung 3.9.: Strukturdiagramm der Ansteuerung unserer Geräte mit Darstellung der Abläufe und Interaktionsmöglichkeiten. Der Benutzer kann auf die Main.vi und die Visualisierung direkt zugreifen, nicht jedoch auf das Job-Programm. Gelbe Felder stellen die Programme dar, orangene die Variablen (KV steht für Kommunikationsvariable).

oder die Verweigerung davon zu signalisieren. Im Falle einer Verweigerung wurde dies auch mittels Dialogfenster und Angabe des Fehlers angezeigt. Bei der Umsetzung in *LabVIEW* wurden *shared variables* als Variablentyp genutzt.

Besonderes Augenmerk soll nun auf die Kommunikationsvariablen gelegt werden. Diese sind das Ergebnis einer durch auftretende Fehler vorangetriebenen Entwicklung. Beide Kommunikationsvariablen funktionieren nach den selben Prinzipien, daher wird die Diskussion auf eine beschränkt.

Die Kommunikationsvariable, die den Datenaustausch von Visualisierung zu Job.vi regelt, ist ein zweidimensionales String-Array. Darin steht pro auszuführendem Befehl eine Zeile an Daten, die unterschiedliche Einträge verschiedenster Bedeutung enthält. Am Anfang einer Zeile steht immer der Name des zu bewegenden Geräts, danach folgt der sub-Name, der im nachfolgenden Beispiel eine ansteuerbare Achse ist. Diese beiden Einträge, Name und sub-Name, definieren eine Zeile eindeutig und sind damit für die Identifizierung des richtigen Motors beziehungsweise des richtigen Geräts unerlässlich. Danach folgen als fixierte Einträge die wichtigen Größen der jeweiligen Hardware, beispielsweise die eingestellten Minima und Maxima von Position und Geschwindigkeit. Die Kommunikationsvariable ist damit eine lookup-Tabelle für die Parameter der Geräte. Tabelle 3.2 zeigt die Struktur sowie Beispiele dieser Variablen.

Sobald in der Visualisierung der Befehl zur Bewegung durch das Drücken eines Knopfes erteilt wird, füllt sich die Kommunikationsvariable mit den eingestellten Einträgen und wird an die Job.vi übermittelt. Nur in dem Fall der Befehlsgebung wird die Kommu-

nikationsvariable verändert! Sobald die Job.vi den Befehl erhält, greift sie ebenfalls auf die entsprechende Kommunikationsvariablen zu und führt den spezifizierten Befehl aus. Unmittelbar danach wird aber der entsprechende Eintrag aus der KV gelöscht, um eine mehrmalige Ausführung zu vermeiden. Wichtig hierbei ist aber, dass nicht die gesamte Zeile gelöscht wird, sondern nur der einzelne Eintrag, der für den Befehl wichtig ist, vgl. Tabelle 3.2, 2)-4).

Beispiele zur Kommunikationsvariablen:

1) allgemeine Struktur:

Name / sub-Name / Var 1 / Var 2 / .. / Var n

2) Zeile eines Eintrags:

Barbara/1/pos_uplim=25/pos_lowlim=0/vel_uplim=2.5/vel_lowlim=0.01/vel=1.25

3) Zeile eines Eintrags mit Positionsänderung:

Barbara/1/pos_uplim=25/pos_lowlim=0/.../vel=1.25/posr=14.7

4) Zeile eines Eintrags nach der Bewegung:

Barbara/1/pos_uplim=25/pos_lowlim=0/vel_uplim=2.5/vel_lowlim=0.01/vel=1.25

Tabelle 3.2.: Beispiele zur Struktur und dem Verhalten der Kommunikationsvariablen des C-884 Controllers. Die gleichen Teile des Arrays haben die gleichen Farben (passend zu Abb. 3.3) und die Änderung ist in rot markiert.

Für das Schreiben und Lesen von Kommunikationsvariablen wurden separate sub-VIs geschrieben, die die entsprechende Handhabung übernehmen und leere Einträge sowie doppelte Zeilen verhindern. Diese Struktur ist ausreichend getestet und hat sich als äußerst praktisches und fehlerhemmendes Werkzeug im Umgang mit den Kommunikationsvariablen erwiesen. Zusätzlich ermöglicht diese Aufteilung in kleinere Elemente eine modulare Zusammensetzung und erleichtert die Fehlersuche.

Um sowohl das Vermischen der Einträge für unterschiedliche Geräte (*cross-talk*) als auch das Vergessen davon zu verhindern, musste der nötige Determinismus, der durch die Verwendung von Variablen verloren geht, eine Konsequenz des *dataflow models*, durch die Struktur der Programme wieder geschaffen werden. Dies gelang einerseits durch den Einsatz der *Queue* beim Schreiben der Kommunikationsvariablen in der Visualisierung. Bei diesem Vorgang müssen die Elemente keine besondere Reihenfolge haben, jedoch darf jedes Paar aus Name und sub-Name nur einmal vorkommen. Andererseits war auch die Verwendung von automatisch indizierenden For-Schleifen bei der Handhabung der Kommunikationsvariablen nötig.

Die automatische Schleife wird eingesetzt, da die Anzahl der Zeilen der für den Befehl relevanten Einträge in der Kommunikationsvariablen die Anzahl der Durchläufe bestimmt. Dadurch kann keine Ausführung vergessen werden.

Beim Auslesen wird eine durch Name und sub-Name eindeutig definierte Zeile (s. Tab. 3.2) herausgesucht und an die nächste Routine weiter gegeben. Dort wird die Zeile weiter zerlegt und in ein Datenarray für das spezifizierte Gerät umgewandelt und dorthin übermittelt. Dadurch wird verhindert, dass Daten für ein Gerät ausgelesen werden, aber dann von einem anderen ausgeführt werden. Dieser Mechanismus mit Name und sub-Name ist sowohl beim Schreiben als auch beim Lesen eindeutig und falsche Zuordnungen sind ausgeschlossen.

Sollte eine Aktion nicht möglich sein, z.B. wegen Überschreitung definierter Grenzen, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und keinerlei Aktion durchgeführt. Die Einhaltung der Limits wurde von einer sub-VI überprüft.

Es ergeben sich drei weitere Vorteile des beschriebenen Konzepts der Ansteuerung: Erstens eignet sich die Struktur der Kommunikationsvariablen auch als Liste von Befehlen für eine automatisierte Messung. Dabei wird eine neue Variable des selben Aufbaus mit einer weiteren for-Schleife kombiniert. Pro Iteration werden Einträge der neuen Variable in die Kommunikationsvariable eingetragen. Zusätzlich muss noch eine Messzeit festgelegt werden, wobei diese auch als Parameter in der neuen Variable eingetragen werden kann und damit individuell für jeden Schritt einstellbar ist.

Zweitens ist es einfach möglich, neue Geräte des selben Typs hinzuzufügen, solange auf die Eindeutigkeit des Namen/sub-Name Paares geachtet wird. Die Struktur rund um die Kommunikationsvariablen erweitert sich mit zusätzlichen Zeilen automatisch und die Schleifen laufen dementsprechend länger. Einzig an der Benutzeroberfläche müssen einige Schaltflächen hinzugefügt werden, ansonsten ist das Programm umgehend angepasst.

Drittens können auftretende Fehler leichter lokalisiert und behoben werden. Die modulare Struktur und die einfache Auslese der Kommunikationsvariablen während des Betriebs erlauben es, Programmteile einzeln zu testen und damit Probleme schnell zu finden. Wird ein Modul verändert, gelten diese Modifikationen an jedem Ort, an dem das Modul aufgerufen wird. Änderungen kommen somit im ganzen Projekt zur Anwendung und eine fehlerhafte Stelle kann nicht vergessen oder übersehen werden.

3.2.3. Ansteuerung des PI C-884 Controllers

Im Lieferumfang des *C-884 Controllers* ist unter anderem eine umfangreiche *LabVIEW*-Bibliothek mit zahlreichen Funktionen enthalten. Die mitgelieferten Programme waren dafür ausgelegt, dass sich ein Softwareentwickler nicht mit der genauen Kommunikation zwischen Software und Controller beschäftigen musste und enthielten bereits die nötigen Strings, die zur Ausführung bestimmter Funktionen an den Controller gesendet werden mussten. Der Verbindungsaufbau sowie das Beenden davon waren ebenso Teil der Bibliothek.

Die Entwicklung der Steuerung des Controllers musste darauf Rücksicht nehmen, dass die einzelnen Motoren des Aufbaus nur mehr als sogenannte Achsen des Controllers angesprochen werden konnten. Sobald dem *C-884* die angeschlossenen Motoren bekannt sind (diese Angabe muss beim Verbindungsaufbau übermittelt werden), erfolgt die Referenzierung zu den Motoren nur mehr über die Achsennummer von 1 bis 4. Um die Unterscheidbarkeit zu gewährleisten, wurde die Struktur aus Name und sub-Name verwendet. Der Name war dabei ein beliebiger Vorname, während die Achsennummer der sub-Name war. Damit war die Eindeutigkeit in der Ansprache gegeben.

C-884 job.vi Sobald das Programm zur Steuerung der *C-884 Controller* gestartet wurde, war die erste Aufgabe der *c884_job.vi* das Einlesen der voreingestellten Parameter aus einer Konfigurationsdatei. In dieser waren die Namen der zu initialisierenden Controller, deren angesteckte Motoren, die Art der Verbindung (TCP/IP, USB, RS232) und die dafür nötigen Parameter (IP Adressen, Port-Nr., etc.) sowie die Grenzwerte der Bewegung und Geschwindigkeiten der einzelnen Motoren angegeben. Eine kleine Routine des Projekts zerlegte nun diese als Strings eingetragenen Angaben in Arrays aus ihren Elementen.

Besonders wichtig war die Spezifikation der zu verwendenden Controller, da die Größe dieses Arrays bestimmte, wie viele Controller initialisiert und verbunden wurden. Dies geschah analog zur vorher beschriebenen Struktur mittels automatischer Schleife, und jeder Controller war durch die ihm zugeordnete IP-Adresse eindeutig ansprechbar. Wenn ein Parametersatz in sich nicht stimmig war, wurde eine Fehlermeldung ausgegeben.

Während der Initialisierung wurden dem Controller alle nötigen Daten bereitgestellt, sodass es danach ausreichend war, mit dem Paar aus Name und sub-Name zu arbeiten. In weiterer Folge war die Ansteuerung des Controllers nach dem Initialisieren in einem Leerlaufprozess, *idle* genannt. Befehle wurden in Form einer String-Variablen übergeben, welche jeweils am Anfang der Schleife ausgelesen und mit den möglichen Fällen verglichen wurde. Neben *idle* gab es noch die Optionen *mover*, *movea* und *position*. Eine Übersicht der möglichen Befehle ist in Tabelle 3.3 gegeben. Jeder Befehl hat nach seiner vollständigen Ausführung die Rückversetzung in den Leerlauf zur Folge.

Befehl	Auswirkung
<i>idle</i>	Versetzt die Ansteuerung in den Leerlaufprozess, in dem sie auf weitere Befehle wartet.
<i>mover</i>	Bewegt die ausgewählte(n) Achse(n) um um das eingestellte Inkrement, nach der Bewegung kommt wieder der Befehl <i>idle</i> .
<i>movea</i>	Bewegt die ausgewählte(n) Achse(n) auf die eingestellte(n) Position(en), nach der Bewegung kommt wieder der Befehl <i>idle</i> .
<i>position</i>	Liest die aktuelle Position aller Achsen aus, danach kommt wieder der Befehl <i>idle</i>

Tabelle 3.3.: Befehlsübersicht für den PI C-884 Controller. Während ein Befehl ausgeführt wird, wird jeder weitere mit einer Fehlermeldung abgelehnt. Nur im idle-Prozess können Befehle gegeben werden.

Im Falle der Bewegungsbefehle war es durch die änderbare Definition von Grenzwerten nötig, eine sub-VI zu schreiben, die die Durchführbarkeit der Bewegung überprüft. Neben den Benutzer-Grenzwerten gibt es auch Hersteller-Grenzwerte, die eine Beschädigung der Motoren verhindern sollen. Weiters war es möglich, mehrere Motoren mit dem selben *mover*/-a Befehl zu bewegen.

Zur Dokumentation und Nachvollziehbarkeit des Experiments wurden durchgeführte Bewegungen als String zusammen mit einem Zeitstempel und dem Paar aus Name/sub-Name in eine Protokolldatei geschrieben. Die Protokollierung ist unabhängig davon, wodurch eine Bewegung zustande kommt. Es ist mit diesem Programm nicht möglich, eine nicht protokollierte Positionsänderung durchzuführen. Die Fehlersuche und Problembhebung wird dadurch deutlich erleichtert.

C-884 Visualisierung Die bisher beschriebenen Vorgänge finden alle in der *Job.vi* statt und laufen nach einem *move*-Befehl oder während eines Messprogramms ohne direkten Einfluss des Benutzers ab. Das Visualisierungsprogramm hingegen ist für die Benutzerinteraktion ausgelegt. Darin werden die aktuellen Positionen angezeigt, die auch die Bewegungen in Echtzeit veranschaulichen. Darüber hinaus können neue Positionen definiert und zur Durchführung übermittelt werden. In diesem Programm kann der Nutzer zwischen *mover*, *movea*, voreingestellten Messprogrammen und einer selbst definierten, automatischen

Messung wählen. Für die ersten drei Fälle müssen jeweils einige Parameter zusätzlich eingestellt werden, bei der letzten stehen alle in der abzuarbeitenden Liste von Befehlen und Positionen.

Im Hintergrund der Visualisierung wird nach jedem Befehl jeweils die Kommunikationsvariable zusammengebaut sowie der entsprechende Befehl in die dafür vorgesehene String-Variable eingetragen. Hier kommt die *Queue* zusammen mit den KV-Routinen zum Einsatz, da bei der Fülle an Einträgen die Verwechslungsgefahr besonders hoch ist. Ein zusätzlicher Vorteil ist auch die bessere Übersichtlichkeit im Code des Programms.

In beiden Programmen, also sowohl in der *Job.vi* als auch der Visualisierung, konnte ein Befehl oder ein Messprogramm jederzeit abgebrochen und gestoppt werden. Um das sicherzustellen gab es separate Schleifen, die ständig prüfen, ob eine Stoppbedingung, ein Fehler im Programmablauf oder das manuelle Drücken des Stopp-Knopfes, erfüllt ist.

3.3. Erfahrungsgewinn durch die Strahlzeiten

3.3.1. Erkenntnisse für die Konstruktion

Das System zur Strahlcharakterisierung wurde möglichst einfach konzipiert und war nicht auf Modularität ausgelegt. Das mechanische Zusammenbauen der Einzelteile hat in einer bestimmten Reihenfolge zu erfolgen. Dies hat zur Folge, dass man Erfahrung oder eine detaillierte Anleitung braucht, um den Aufbau korrekt zusammzusetzen.

Die Spaltpräparation musste händisch erfolgen und war daher ab einem gewissen Zeitpunkt des Experiments durch den Platzmangel und die schlechte Zugänglichkeit der Spalte äußerst schwierig. Prinzipiell war ein Blendenblatt mit vier Schrauben auf einem festen Anschlag¹⁴ angebracht, das zweite mit wiederum vier Schrauben auf einer Halterung am kleinen M-403 Motor. Um nun einen parallelen Spalt zu realisieren, wurden oben und unten zwei kleine Abstandshalterplättchen eingeklemmt. Der dafür nötige Druck entstand durch händisches Zusammendrücken. Dazu mussten zuerst alle Schrauben locker sein, damit der Druck möglich war und dann möglichst langsam angezogen werden, ohne dass die Plättchen heraus fielen.

Ein Zusammenpressen mittels Motoren kam nicht in Betracht, da durch die möglicherweise auftretende Überhitzung ein Ausfall des Geräts nicht ausgeschlossen werden konnte.

Die Vertikalität der Blendenöffnung kann bei der Einrichtung des Spalts nicht ausreichend beachtet werden und ist danach nicht korrigierbar.

Durch den Versuch, den Aufbau möglichst kompakt zu halten, wurde einer der beiden Motoren der Spalten 2 zwischen zwei *Alvaris*-Träger gesetzt. Um diesen Motor anzusteuern ist neben dem vorgesehenen 15-poligen Kabel noch ein eigens angefertigter Zwischenstecker¹⁵ notwendig, da zu wenig Platz für den eigentlichen Stecker gelassen wurde.

Im ursprünglichen Aufbau wurde nicht berücksichtigt, dass Abschirmmatten notwendig waren, um den Untergrund effizient zu unterdrücken. Zu der bestehenden Möglichkeit,

¹⁴Mit diesem Anschlag geht die Referenz nicht verloren, wenn die Blende auf- und wieder zugemacht wird. In der Praxis mussten jedoch alle acht Schrauben zur Einstellung gelöst werden und damit konnte dieser Vorteil nicht genutzt werden.

¹⁵Der Zwischenstecker hat sich in weiterer Folge des Experiments als sehr nützlich erwiesen, da der Platz am optischen Tisch sehr knapp wurde. Durch den Stecker war es dann möglich, Teile näher aneinander zu positionieren.

Abschirmmatten an den Halterungen der Blendenblätter zu befestigen, kamen erst in weiterer Folge zugeschnittene Matten vor den Motoren dazu. Der Rahmen des Aufbaus eignet sich ebenfalls als Gerüst für Abschirmung, jedoch war hier keine Vorrichtung vorgesehen. Anfangs wurden Abschirmmatten mit Drähten befestigt, die aber leicht verrutschten und nicht genau platzierbar waren. Insgesamt ist dieses Stückwerk noch nicht ausgereift genug - es fehlt ein umfassendes Gesamtkonzept.

Das Steuern der *C-884 Controller* über die USB-Verbindung war nicht möglich, da keines der Geräte seine Seriennummer intern gespeichert hatte. Um Probleme, die auf diesem Umstand basieren könnten zu vermeiden, wurde jedem Controller einzeln eine eindeutige IP mittels USB-Verbindung zugeordnet, aber danach nur noch das TCP/IP Protokoll als Kommunikationsvariante genutzt.

3.3.2. Ausfallursachen der Ansteuerungssoftware

Die zuerst aufgetretenen Probleme - Vermischungen der Einträge, Vergessen von Befehlen, Verlust einer zeitgeordneten Struktur, übermäßige Benutzung von lokalen Variablen sowie *race conditions* - konnten durch die Weiterentwicklung der Programme zur Struktur von Kommunikationsvariablen und Queue nachhaltig behoben werden. Das dafür nötige Array ist jedoch äußerst ineffizient im Bezug auf die Speicherverwaltung, die von *LabVIEW* automatisch geregelt wird. Jeder Änderung am Array wird separat abgespeichert und vervielfacht so den temporär nötigen Speicherplatz. Erst wenn eine Instanz nicht mehr gebraucht wird, was durch das *Dataflow Model* bestimmt ist, wird der Speicher wieder freigegeben. Unsere Struktur baut jedoch auf solchen kleinen Änderungen auf, um die Prozesse geordnet und korrekt ablaufen zu lassen. Die Problematik wird durch die hohen Zugriffsraten auf die Variablen verschärft. Dadurch kann es vorkommen, dass die Speicherverwaltung langsamer ist, als durch die Zugriffsraten nötig wäre.

ActiveX-Elemente führen bereits kompilierten Code aus, der die Ansteuerung zugekaufter Hardware vereinfachen soll¹⁶. Im derzeitigen Projekt wurden diese Elemente aus Zeitgründen zur Steuerung der Piezo-Controller genutzt. Konträr zur flexiblen Struktur verhindern *ActiveX*-Elemente die automatische Variabilität der Größe des Systems und sind darüber hinaus äußerst undurchsichtig. Sie erzeugen damit ein erhöhtes Fehlerpotential und dürften auch überproportional zu den Speicherproblemen beigetragen haben.

Der Mechanik der Kommunikationsvariablen, die Speicherverwaltung von *LabVIEW* und die Anzahl an laufenden Programmen haben insgesamt zu einer merklichen Belastung des Rechners geführt, die sich auch durch Abstürzen bemerkbar machten. Bei der gleichzeitigen Verwendung von *ActiveX*-Elementen haben diese unvorhersehbaren Abstürze zugenommen und waren teilweise kritisch für die Durchführung des Experiments. Grundlegender Auslöser scheint aber die Überlastung des Speichers zu sein, wobei das bisher noch nicht eindeutig auf allein diese Ursache eingegrenzt werden konnte.

3.4. Entwicklungsmöglichkeiten

Eine Überarbeitung des Aufbaus ist in jedem Fall ein Gewinn für weitere Experimentierzeiten. Allen voran ist die Spaltpräparation zu verbessern. Die Realisierung eines tatsächlich

¹⁶Das Konzept von *ActiveX* ist weitaus umfangreicher und universeller einsetzbar als hier erwähnt, kam aber nur minimal zur Anwendung. Inzwischen gilt es als veraltet.

fixen Anschlags sollte die Einstellung der Spaltbreite erheblich vereinfachen und auch die Vertikalität stärker miteinbeziehen.

Darüber hinaus ist es auch sinnvoll die Größe des Alvaris Gestells zu überdenken und an die neuen Aufgaben anzupassen. Der große Rahmen von 1m x 1m ist sowohl für den Transport also auch für den Aufbau am optischen Tisch nicht optimal. Dabei sollte aber die Größe und das Gewicht weniger Rolle spielen, als die Möglichkeiten zur Befestigung von Abschirmungsmaterialien. Diese Befestigungen sollten in ihrer Größe und Platzierbarkeit flexibel ausgeführt werden.

Je nach gefordertem Aufgabenspektrum kann die manuelle Positionierung der Motoren verbessert werden. In diesem Zusammenhang ist es ratsam das Lochmusters der Zwischenplatten zu verändern.

Im Bereich der Ansteuerung steht die speichereffiziente Programmierung des Systems im Vordergrund. Durch die automatische Verwaltung des Speichers durch *LabVIEW* ist dieser Punkt erst sehr spät aufgefallen und im derzeitigen System zu kurz gekommen. Die beschriebenen Probleme scheinen zu einem großen Teil an den ineffizienten (im Hinblick auf die Speicherverwaltung) Strukturen zu liegen. Nichtsdestotrotz darf der deterministische Ablauf nicht gestört werden. In diesem Zusammenhang ist es unbedingt auch erforderlich, sich mit dem Zugriffsmanagement auf die Kommunikationsvariablen auseinanderzusetzen. Dazu stehen in *LabVIEW* zwei Konzepte zur Verfügung, das eines Semaphors sowie das der *functional global variable*, einer Art sub-Vi, die sich wie eine Variable verhält aber mit definierten Befehlen läuft.

Dem Aufwand dieser Änderungen steht ein effektiverer, schnellerer und sicherer Ablauf des gesamten Projekts gegenüber. Allein im Hinblick auf die Ausfallprävention des Systems scheint diese Mühe gerechtfertigt.

ActiveX als Grundlage zum Steuern der Piezo-Controller sollte durch die selbe flexible und erprobte Struktur der anderen Programme ersetzt werden. Die Adaption der Ansteuerung auf bewährte Prinzipien und der Verzicht auf unklare Softwarekomponenten führt zu Fehlerresistenz, effizienteren Abläufen und besserer Übersichtlichkeit sowie Handhabung.

Die Integration neuer Motoren in den Setup erfordert das Ausschalten des entsprechenden Controllers. Danach müssen dann alle Motoren wieder auf eingebaute Referenzpunkte initialisiert werden, damit nicht nur relative Bewegungen zur aktuellen Position möglich sind und die internen Limits eine Beschädigung verhindern können. Dieser Prozess konnte bisher nur über die Herstellersoftware *PI MicroMove* ausgeführt werden, da die Implementierung in das Lloyd-Projekt sehr viel Zeit in Anspruch genommen hätte. Alle Abläufe ausschließlich über *LabVIEW* zu steuern bringt Benutzerfreundlichkeit, vor allem für unerfahrene Personen, sowie Fehlerresistenz und größeren Schutz vor Beschädigungen.

3.5. Diskussion

Der Strahlcharakterisierungsaufbau hat sich sowohl in seiner ursprünglichen Rolle als auch als Kollimationssystem bewährt. Verfeinerungen der Konstruktion erleichtern den Aufbau des Experiments, die Verbesserung der Spaltpräparation würde die Reproduzierbarkeit enorm steigern.

Die flexible Struktur der Ansteuerung war bis zum Schluss erfolgreich, als gleichzeitig vier *C-884 Controller* fehlerfrei im Einsatz waren. Der Grund für diesen Erfolg ist im modularen

und einfach überprüfbar Aufbau begründet. Zusammen mit der lookup-Struktur rund um die Kommunikationsvariablen ergibt sich ein fehlerresistenter Ablauf.

Ein grundlegendes Problem, das anhand der Speichereffizienz sichtbar wurde, ist, dass drei komplexe Strukturen ineinander greifen: erstens ist das *LabVIEW* selbst, wobei das erst sehr spät erkannt wurde, zweitens die Struktur der Vorbesitzer des Main-Projekts sowie drittens die flexible und leicht erweiterbare Ordnung der neuen Programme, mit der das Projekt vorteilhaft erweitert wurde.

Die Summe dieser drei Strukturen führt zu einer komplexen Steuerungssoftware, die in entscheidenden Momenten nicht immer stabil läuft. Um die Ausfallsicherheit nachhaltig zu gewährleisten, muss die Ansteuerung auf die Programmeigenschaften von *LabVIEW* angepasst werden.

4. Vermessung des VCN-Strahls

Im vorigen Kapitel wurde der Aufbau des Kollimationssystems mit und ohne Monochromator vorgestellt sowie die Funktionsweise beschrieben. Dieser Abschnitt präsentiert einige der durchgeführten Messungen. Primäres Ziel dabei war es, Positionen der Blenden im Strahl zu finden, die geeignet waren das Interferometer zu realisieren. Dabei ist besonders auf eine möglichst geringe Divergenz sowie ein schmales Wellenlängenspektrum zu achten. Wird die Zählrate hinter den einzelnen Elementen maximiert, so werden die notwendigen Messzeiten minimal.

Die Messungen, die im Folgenden vorgestellt werden, wurden mit den Elementen des Bereichs 1 aus Abbildung 3.1 durchgeführt. Die erste Messung nahm ein Bild des Strahls nach dem Spiegel M0 und der Blende S0 als Referenz auf. Danach wurde zunächst Blende S1 eingebaut und vermessen sowie in weiterer Folge S2. Anschließend kamen noch Messungen mit S1 und S2 zusammen, bevor die beiden Spiegel M1 und M2 integriert wurden. Die Funktion der Spiegel ist die einstellbare Wellenlänge der Neutronen, die unverzichtbar für das Interferometer ist. Die Ergebnisse einer Geschwindigkeitsanalyse [26] zeigen, dass diese Selektion funktioniert. Wie die Spiegel den Strahl modifizieren, wird im Folgenden analysiert. Die einzelnen Messpunkte sind in Abbildung 4.1 eingezeichnet.

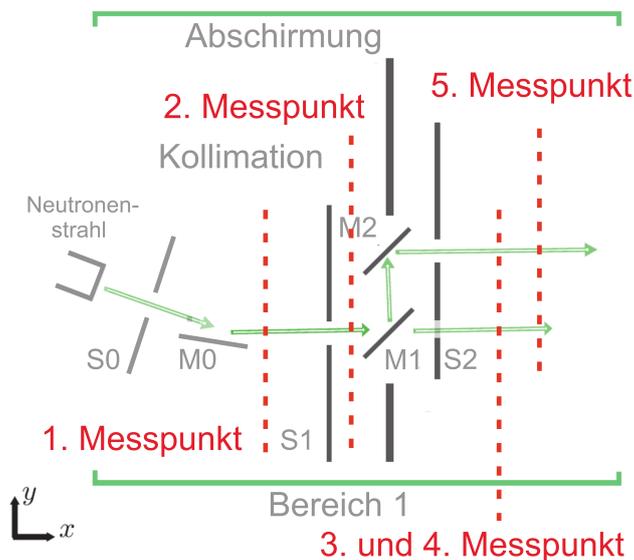


Abbildung 4.1.: Die Abbildung zeigt die verschiedenen Messpositionen, an denen der Strahl aufgenommen wurde. Die Positionen 3 und 4 wurden hinter S2 aufgenommen, als die Spiegel M1 und M2 noch nicht platziert waren, wie durch den horizontalen Pfeil hinter M2 gezeigt werden soll. Der genaue Setup ist bei den einzelnen Messungen nochmal dargestellt.

Es wurde ein zweidimensionaler, ortsauflösender Detektor verwendet, der eine aktive Detektionsfläche von 256 x 256 mm hatte. Die Auflösung des Detektors beträgt 2 mm, da

die einzelnen Pixel (auch Bin(s) genannt) 2×2 mm groß sind.

Die hier vorgestellten Daten stammen aus der Strahlzeit Test-2455, die im Mai und Juni 2015 in Grenoble am ILL stattfand.

4.1. Referenzmessung ohne Blende

Als erstes wurde der Strahl als Ganzes nach dem Superspiegel M0 aufgenommen, noch bevor S1 eingesetzt wurde um den Strahl streifenweise zu detektieren. Damit war eine Referenz gegeben, mit der die späteren Detektoraufnahmen verglichen werden können. Der Aufbau bestehend aus S0, M0 und Detektor wird als Konfiguration I bezeichnet, der Abstand zwischen M0 und Detektor betrug $1568,5 \pm 0,6$ mm.

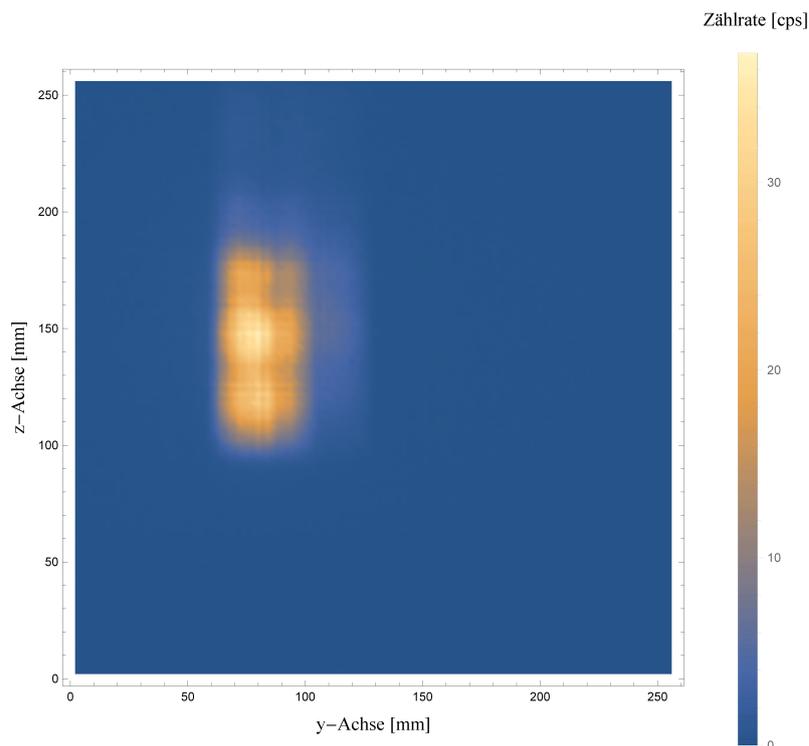


Abbildung 4.2.: Aufnahme des gesamten Strahls hinter M0 nach einer Messzeit von 158 Sekunden.

Abbildung 4.2 zeigt den gesamten Strahl nach dem Spiegel M0. Die Gesamtzählrate beträgt $19499,2 \pm 11,1$ cps¹⁷ nach einer Messzeit von 158 Sekunden.

Um herauszufinden, wie eine Blende den Strahl modifiziert, ist es sinnvoll über die vertikale z-Achse zu integrieren. Die verwendeten Blenden schränken den Strahl nur in horizontaler y-Richtung ein, da die Blendenhöhe größer als die Strahlausdehnung ist. Die Integration ist in Abbildung B.1 auf Seite 77 am Beispiel der z-Achse verdeutlicht. Das Ergebnis der z-Integration (Abb. 4.3) eignet sich dazu die y-Position mit der höchsten Zählrate auszusuchen.

¹⁷cps steht für *counts per second*, dt.: Zählereignisse pro Sekunde; Damit ist die Anzahl der am Detektor auftreffenden Neutronen pro Sekunde gemeint.

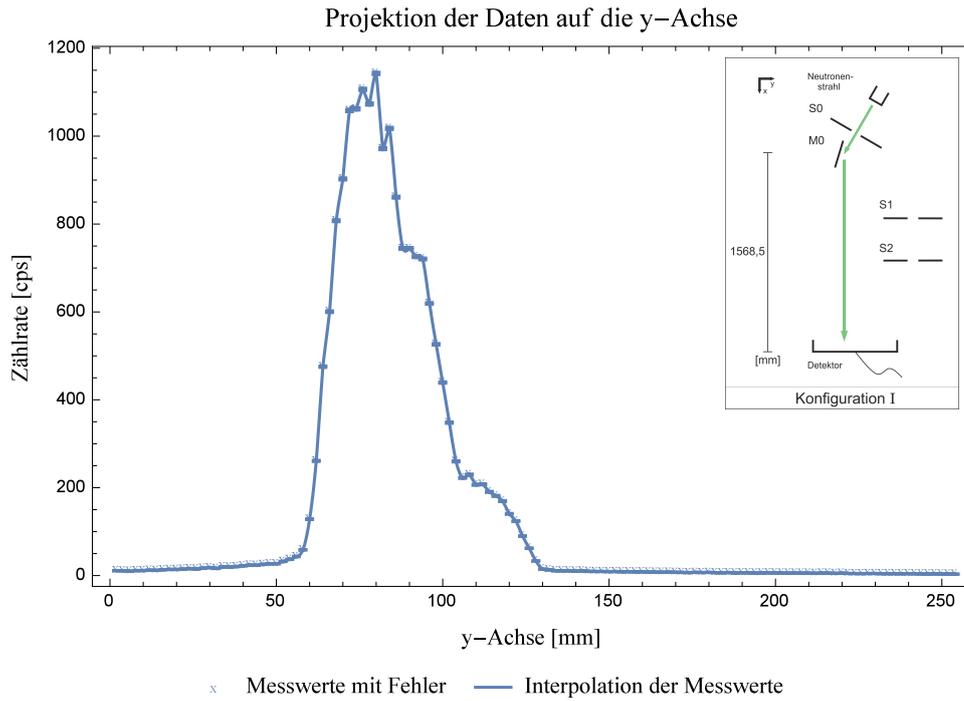


Abbildung 4.3.: Summiert man die der Abbildung 4.2 zugrunde liegenden Daten entlang der z-Achse, erhält man die gezeigte Kurve. Dadurch kann man die Charakteristika des Strahls besser erkennen und die Selektion durch die Blende abschätzen. Die Abbildung zeigt das horizontale Strahlprofil in Konfiguration I.

Integriert man über die y-Achse, kann man Aussagen zum vertikalen Profil des Strahls treffen. Dabei sieht man deutlich, dass der Strahl nicht homogen verteilt ist. Abbildung 4.4 zeigt die Integration über die gesamte y-Achse. Die charakteristischen Größen der globalen Maxima, sind für die Abbildungen 4.3 und 4.4 in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Angegeben sind die Zählrate im Maximum $ZR_{Max,I}$, die volle Breite bei halbem Maximum $B_{FWHM,I}$ ¹⁸ und die Breite bei 10% des Maximums $B_{10\%Max,I}$.

	Integration	Position	$ZR_{Max,I}$	$B_{FWHM,I}$	$B_{10\%Max,I}$
Abb. 4.3	z-Achse	y = 80 mm	1142,79 ± 2,69 cps	31,41 ± 0,39 mm	63,37 ± 0,40 mm
Abb. 4.4	y-Achse	z = 148 mm	573,07 ± 1,91 cps	71,40 ± 0,40 mm	113,99 ± 0,81 mm

Tabelle 4.1.: Übersicht der globalen Maxima für die vertikale und die horizontale Summation über das Detektorbild von Konfiguration I bei einer Messzeit von 158 Sekunden.

¹⁸FWHM ist die Abkürzung von *Full Width at Half Maximum*, dt.: volle Breite bei halber Höhe.

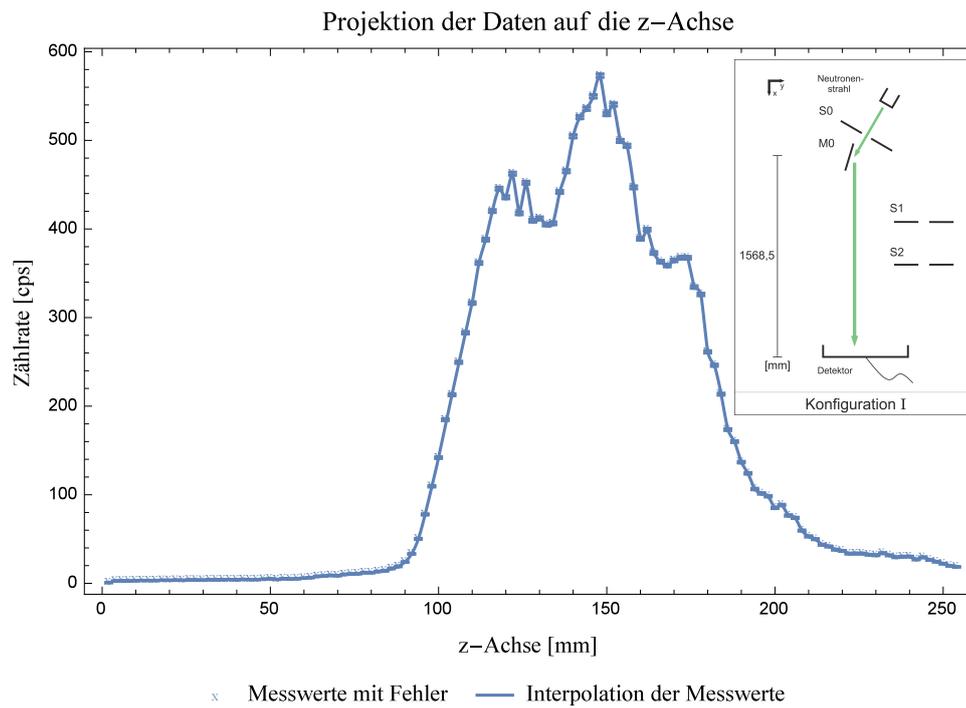


Abbildung 4.4.: Diese Abbildung zeigt die Summation der Daten von Abbildung 4.2 entlang der y-Achse und damit das vertikale Strahlprofil in Konfiguration I. Die Aufnahme dient dazu die Homogenität des Strahls untersuchen zu können.

4.2. Messungen mit einer Blende

4.2.1. Messungen mit der Blende S1

Als nächstes Element des Setups wurde die Blende S1 eingebaut und damit Konfiguration II geschaffen. Die Spaltbreite von S1 betrug $1024 \pm 2 \mu\text{m}$ und die Blende war $69 \pm 0,1 \text{ mm}$ vom Spiegel M0 und $1519,5 \pm 0,1 \text{ mm}$ vom Detektor entfernt. Die grobe Positionierung erfolgte mit Hilfe eines Lasers, der den Strahlengang markierte. Die Suche nach der Position der höchsten Zählrate erfolgte durch das Messen verschiedener Serien von Blendenpositionen mit unterschiedlicher Schrittweite zwischen den einzelnen Positionen. Die Position mit der höchsten Rate wurde bei einer Schrittweite von $0,1 \text{ mm}$ bestimmt. Die Messzeit pro Position einer Serie betrug 60 Sekunden.

Das Maximum der vertikalen Integration lag schließlich bei Blendenposition $90,7 \text{ mm}$ und wies eine Zählrate von $256,75 \pm 2,05 \text{ cps}$ auf. Interessant bei dieser Darstellung (Abbildung 4.5) ist das auftretende Nebenmaximum mit einer Zählrate von $118,73 \pm 1,40 \text{ cps}$, das etwa $8 \pm 2 \text{ mm}$ vom Hauptmaximum entfernt ist. Mögliche Ursachen dafür werden in Abschnitt 4.4 diskutiert.

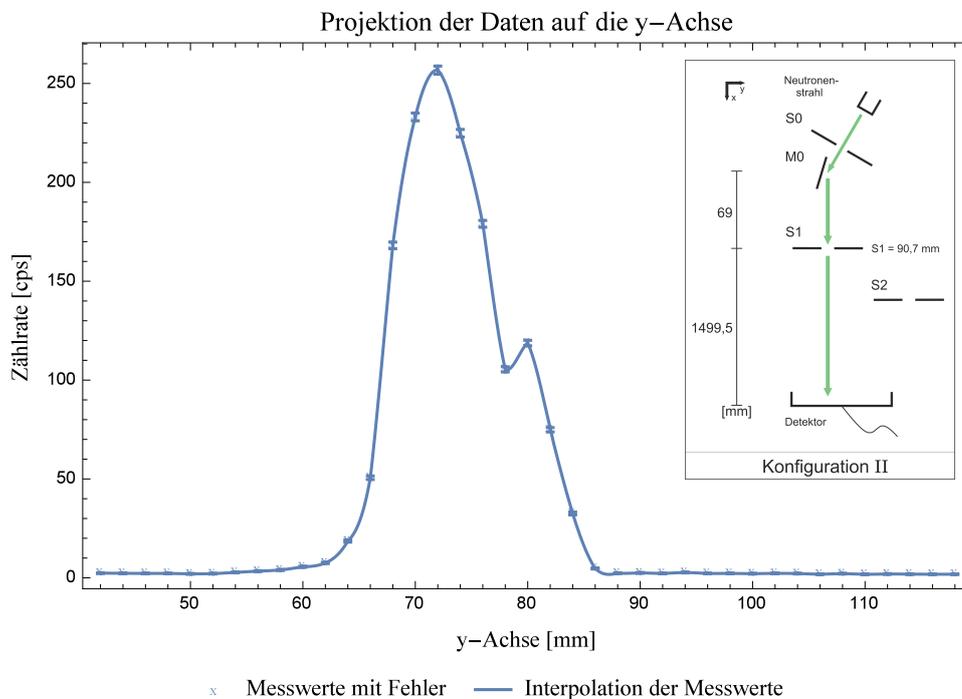


Abbildung 4.5.: Der Plot zeigt das Strahlprofil nach vertikaler Summation für die Position der höchsten Zählrate für S1 in Konfiguration II. Die Elemente dieser Konfiguration sind in der Abbildung rechts erkennbar. Die Grundlage der Summation zeigt Abbildung B.2 auf Seite 78.

Das vertikale Strahlprofil (Abbildung 4.6) hängt teilweise davon ab, wie die *Region-of-Interest* (ROI) gewählt wird. Inkludiert man das Nebenmaximum, führt es zu gleichmäßig höheren Zählraten für alle Punkte der horizontalen Integration, wobei sich die Form des Profils nur geringfügig ändert. Das rechte Nebenmaximum in Abbildung 4.6 ist schwach ausgeprägt und zeigt sich für die Integration ohne Nebenmaximum nur als Sattelpunkt.

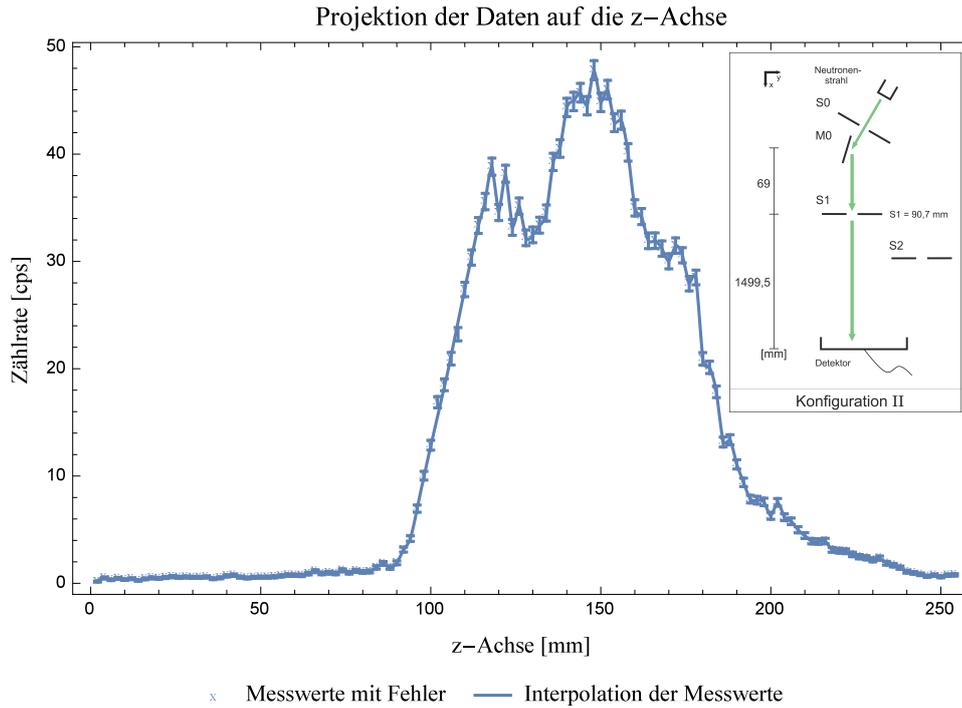


Abbildung 4.6.: Der Plot zeigt das Profil des Strahls nach horizontaler Summation für die Position der höchsten Zählrate für S1 in Konfiguration II, wobei das Nebenmaximum von Abb. 4.5 in der Summation enthalten ist. Im Strahl sind die Elemente S0, M0 und S1, wie aus der Abbildung zu erkennen ist. Die Grundlage der Summation zeigt Abbildung B.2 auf Seite 78.

Aus den Abbildungen 4.4 und 4.6 sowie Tabelle 4.2 sieht man, dass sich die Breite der Kurven nicht ändert. Das liegt daran, dass die Blendenblätter eine Höhe von 120mm aufweisen und die Blende so positioniert wurde, dass ihre Mitte mit der Mitte des Neutronenstrahls übereinstimmte. Daraus folgt auch, dass die vorige Annahme richtig ist, wonach die Blende volle Streifen aus dem Strahl nach dem Spiegel M0 schneidet (Konfiguration I).

Die charakteristischen Werte des Strahls in Konfiguration II - die Zählrate $ZR_{Max,II}$ und die FWHM-Breite $B_{FWHM,II}$ sowie deren Veränderungen $\Delta_{I,II}ZR_{Max}$ und $\Delta_{I,II}B_{FWHM}$ zu Konfiguration I - sind in Tabelle 4.2 zusammengetragen. $B_{FWHM,II}$ wird mit Hilfe der Interpolation bestimmt, weswegen auf Grund der Detektorauflösung ein zusätzlicher Fehler von 1 mm eingerechnet ist.

	Integration	Position	$ZR_{Max,II}$	$B_{FWHM,II}$	$\Delta_{I,II}ZR_{Max}$	$\Delta_{I,II}B_{FWHM}$
Abb. 4.5	z-Achse	S1 = 90,7 mm	$256,75 \pm 2,05$ cps	$9,93 \pm 1,04$ mm	$-77,53 \pm 0,23\%$	$-68,34 \pm 3,70\%$
Abb. 4.6	y-Achse	S1 = 90,7 mm	$47,83 \pm 0,89$ cps	$71,60 \pm 1,60$ mm	$-91,65 \pm 0,18\%$	$+0,30 \pm 2,80\%$

Tabelle 4.2.: Übersicht der globalen Maxima für die vertikale und die horizontale Integration über das Detektorbild für die beste Position für die Blende S1 mit Vergleich zu den Werten ohne Blende. Die Dauer dieser Messung betrug 60 Sekunden.

4.2.2. Messungen mit der Blende S2

Wie für die Blende S1, wurden auch Messungen mit S2 alleine durchgeführt. Der Abstand zwischen S1 und S2 betrug $365,5 \pm 0,1$ mm und der Detektor war $1154 \pm 0,1$ mm von S2 entfernt. Mit einer Spaltbreite von 511 ± 2 μm war S2 halb so breit wie S1. Die ungefähre Lage wurde ebenfalls mit dem Laser ermittelt, bevor die Position der höchsten Zählrate bei mehreren Messserien mit einer minimalen Schrittweite von 0,25 mm zwischen den einzelnen Positionen von S2 bestimmt wurde. Der Aufbau mit S2 aber ohne S1 ist Konfiguration III.

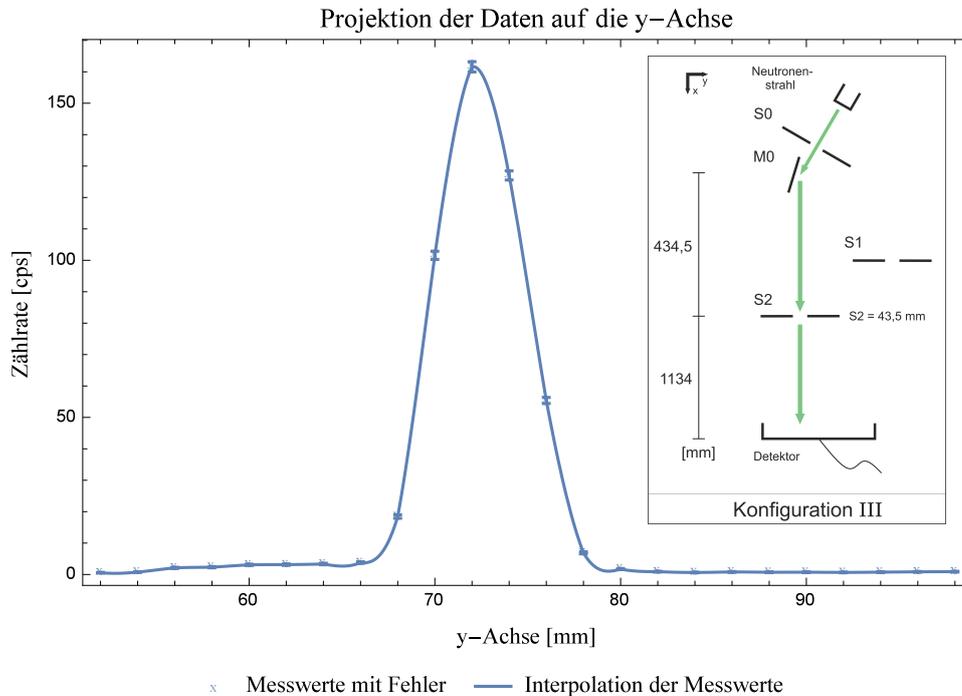


Abbildung 4.7.: Die Abbildung zeigt das vertikale Strahlprofil nach vertikaler Summation für die beste Position für S2 in Konfiguration III (kleines Bild rechts). Im Gegensatz zur analogen Grafik für S1 ist hier kein Nebenmaximum zu sehen. Die Grundlage der Summation zeigt Abbildung B.3 auf Seite 78.

Im gezeigten Graphen (Abbildung 4.7) ist kein Nebenmaximum wie bei S1 zu sehen, da diese in Konfiguration III erst ab Position 47 mm auftreten. Verglichen mit dem Nebenmaximum für S1 fällt auf, dass die auftretenden Nebenmaxima von S2 näher am Hauptmaximum sind, was durch die geringere Entfernung von S2 zum Detektor erklärbar ist. Im Falle von S2 ist der Abstand zwischen Haupt- und Nebenmaximum 6 ± 2 mm.

Untersucht man das vertikale Strahlprofil (Abbildung 4.8), so zeigt sich zwar die gewohnte Struktur, doch ist die Zählrate nochmals deutlich geringer. Das charakteristische Profil ist gut zu erkennen und die Nebenmaxima haben ähnliche relative Zählraten wie zuvor.

Die Werte der globalen Maxima dieser Konfiguration (III) sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt, wobei sich die Abweichungen wieder auf den Fall ohne Blende beziehen. Auch die geringere Spaltbreite wirkt sich erkennbar aus, wie ein Vergleich von Tabelle 4.2 und 4.3 zeigt. Die Angegebenen Größen sind die Zählrate im Maximum $ZR_{\text{Max,III}}$, die Breite des Maximums $B_{\text{FWHM,III}}$ sowie die Änderungen $\Delta_{\text{I,III}}ZR_{\text{Max}}$ und $\Delta_{\text{I,III}}B_{\text{FWHM}}$ im Vergleich zu Konfiguration I. Der Fehler von $B_{\text{FWHM,III}}$ wurde auf Grund der Detektorauflösung um

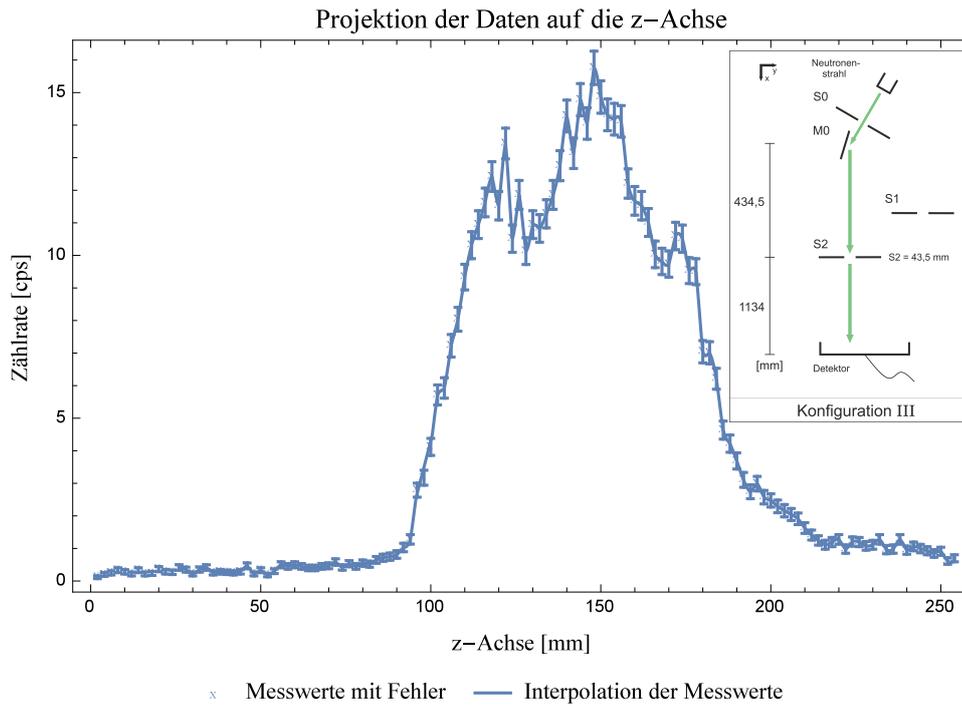


Abbildung 4.8.: Gezeigt ist die Verteilung der Zählraten nach horizontaler Summation für die beste Position nach S2 in Konfiguration III. Das rechte Nebenmaximum ist hier stärker zu sehen, als in den anderen Darstellungen dieser Art. Die Grundlage der Summation zeigt Abbildung B.3 auf Seite 78.

1 mm vergrößert angenommen.

	Integration	Position	ZR _{Max,III}	B _{FWHM,III}	$\Delta_{I,III}ZR_{Max}$	$\Delta_{I,III}B_{FWHM}$
Abb. 4.7	z-Achse	S2 = 43,5 mm	161,59 ± 1,64 cps	5,74 ± 1,13 mm	-85,86 ± 0,18%	-81,68 ± 3,83%
Abb. 4.8	y-Achse	S2 = 43,5 mm	15,76 ± 0,51 cps	71,60 ± 1,60 mm	-97,25 ± 0,10%	+0,30 ± 2,80%

Tabelle 4.3.: Übersicht der globalen Maxima für die vertikale und die horizontale Integration über das Detektorbild für die beste Position der Blende S2 in Konfiguration III mit Vergleich zu den Werten ohne Blende (Konfiguration I). Die Dauer dieser Messung betrug 60 Sekunden.

4.3. Messungen mit beiden Blenden

4.3.1. Ergebnisse und Vergleich mit den Messungen mit nur einem Spalt

Nach den Messungen mit nur einer Blende im Strahl wurden S1 und S2 gemeinsam eingesetzt, um die beste Position in dieser Konfiguration zu finden, sowie die Winkelverteilung des Strahls zu bestimmen. Dieser Setup ist Konfiguration IV. Die Blende S1 wurde auf die Position ihrer höchsten Zählrate gestellt und S2 dahinter in Schritten von 0,2 mm variiert. Die höchste Zählrate wurde für die Positionen S1 = 90,75 mm und S2 = 43,5 mm gemessen und betrug $133,55 \pm 1,48$ cps. Die Positionen stimmen mit den bereits präsentierten Werten für die einzelnen Blenden überein.

Die Plots für vertikale und horizontale Integration der Position der höchsten Rate sind in den Abbildungen 4.9 und 4.10 dargestellt, die Ausgangsdaten in Abbildung B.4 auf Seite 79. Die interessanten Werte der Konfiguration IV zeigt Tabelle 4.4, der auch die Veränderungen zu den Messungen mit nur einer Blende (Konfigurationen II und III) zu entnehmen sind.

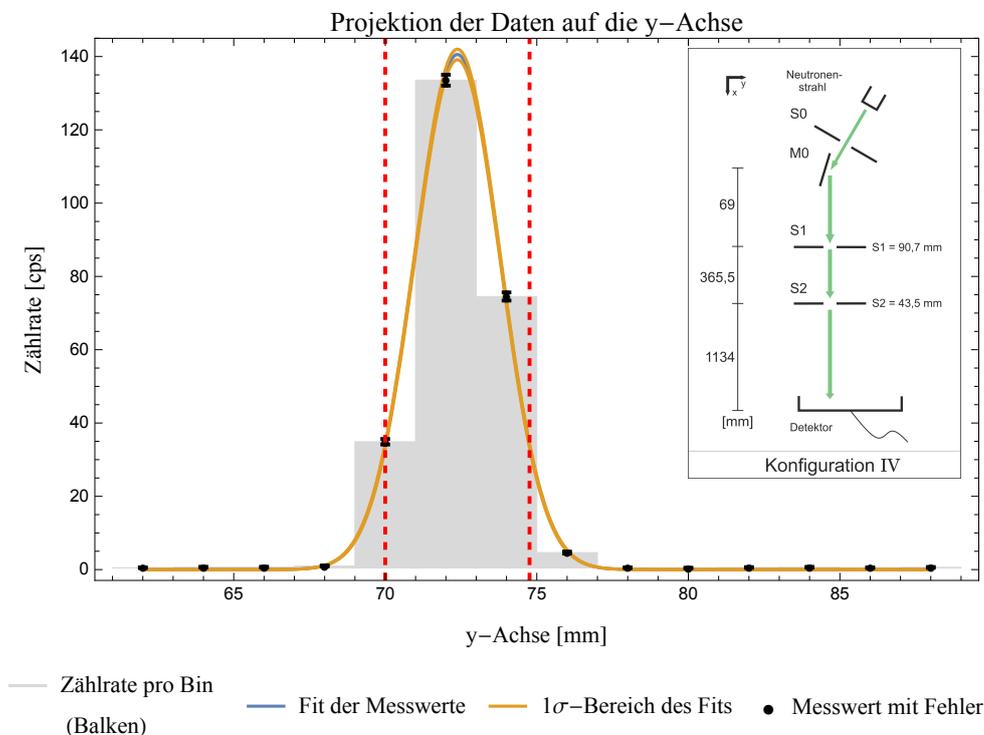


Abbildung 4.9.: Vertikale Summation des Detektorbildes für Konfiguration IV. Die stark gesunkene Zählrate sowie die geringe Breite des Peaks sind zu erkennen. Die Messzeit betrug 60 Sekunden und der gezeigte Fit hat die Form $f(x) = \frac{496,99}{\sqrt{2\pi 1,41^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-72,38)^2}{1,41^2}\right]$ (Angaben zur Unsicherheit im Text). Die Grundlage der Summation zeigt Abbildung B.4 auf Seite 79. Die beiden roten Linien zeigen den maximal möglichen Winkel δ des Strahls, der aufgrund von (4.2) für die Blenden S1 und S2 möglich ist (symmetrisch um das Maximum).

Da der Peak in Abbildung 4.9 nur aus drei Messpunkten besteht, wurde die Interpolation durch einen Fit ersetzt. Die gewählte Form ist den zuvor gemessenen Profilen ähnlich und versucht damit den Strukturverlust durch die geringe Detektoraufösung auszugleichen. Die

	Integration	Position	ZR _{Max,IV}	B _{FWHM,IV}	$\Delta_{II/III,IV}$ ZR _{Max}	$\Delta_{II/III,IV}$ B _{FWHM}
Abb. 4.9	z-Achse	S1 = 90,7 mm	133,55 ±	3,32 ±	-48,0 ± 1,0%/	-65,1 ± 13,9%/
		S2 = 43,5 mm	1,48 cps	1,02 mm	-17,3 ± 1,8%	-36,2 ± 30,3%
Abb. 4.10	y-Achse	S1 = 90,7 mm	8,13 ±	70,3 ±	-83,0 ± 1,1%/	-1,7 ± 4,4%/
		S2 = 43,5 mm	0,37 cps	1,6 mm	-48,3 ± 4,0%	-1,7 ± 4,4%

Tabelle 4.4.: Übersicht der globalen Maxima für die vertikale und die horizontale Integration über das Detektorbild für die Position der höchsten Zählrate von Konfiguration IV. Die Dauer dieser Messung betrug 60 Sekunden. Gezeigt ist auch der Vergleich mit den Messungen für eine Blende alleine (Konfigurationen II und III).

grauen Balken im Hintergrund sind die Verdeutlichung der gemessenen Werte und zeigen durch ihre Breite das Auflösungsvermögen des Detektors. Das Maximum der genäherten Funktion ist im Vergleich zum höchsten Messwert ein kleines Stück in Richtung höherer y-Werte verschoben. Dieser Verschiebung liegt zugrunde, dass der Messwert rechts des Maximums höher ist als der links davon, wodurch der höchste Messwert nicht die Mitte der Funktion darstellen kann. Die Fehler von $B_{FWHM,IV}$ und σ berücksichtigen das Auflösungsvermögen des Detektors, dessen zusätzlicher Fehler durch die halbe Binngöße angenommen wurde.

Der Fit hat die Form:

$$f(x) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.1)$$

mit den Parametern $A = (496,99 \pm 4,07) \text{ cps} \cdot \text{mm}$, $\mu = (72,38 \pm 0,01) \text{ mm}$ und $\sigma = (1,41 \pm 0,43) \text{ mm}$. Der Strahl zeigt keine Nebenmaxima, da bereits bei den Messungen mit S2 an dieser Stelle keine aufgetreten sind.

Die Verwendung von S1 und S2 hintereinander erlaubt, den Divergenzwinkel des Strahls als den maximal zugelassenen Winkel von Strahlteilen zu definieren, der trotz der Einschnitte der Blenden möglich ist:

$$\delta = \arctan\left[\frac{d_1 + d_2}{2\Delta_{x,S1,S2}}\right]. \quad (4.2)$$

Dabei treten die Spaltbreiten von S1 und S2, d_1 und d_2 , sowie der Abstand zwischen den Blenden Δ auf. Der Winkel für Konfiguration IV ergibt sich dadurch zu $\delta_{IV} = 2,099 \pm 0,007 \text{ mrad}$.

In der Ebene des Detektors entspricht dieser Winkel einer Breite von $4,76 \pm 0,02 \text{ mm}$. Die beiden roten Linien in Abbildung 4.9 zeigen den umgerechneten Winkel δ_{IV} . In der Abbildung gibt es Strahlteile außerhalb dieses Bereichs, jedoch ist der Effekt aufgrund der hohen Fehler auf die Breite nicht signifikant.

Gleichung 4.2 ist weiters die Grundlage, mit der die Position der Blenden vorgegeben werden kann, um einen gewünschten Winkel des Strahls zu präparieren.

Das vertikale Profil des Strahls ist weiterhin sehr ähnlich zu den bereits diskutierten Fällen, siehe Abbildung 4.10. Einige Nebenmaxima sind durch die Fehler nicht mehr eindeutig zu erkennen, jedoch bestätigt das Profil, dass trotz niedrigerer Raten die Struktur erhalten bleibt. Das sieht man vor allem an der gleich bleibenden Breite, aber auch an den Positionen der Haupt- und Nebenmaxima. Das Problem der niedrigen Raten sieht man in dieser Darstellung besonders an der Größe der Fehlerangaben.

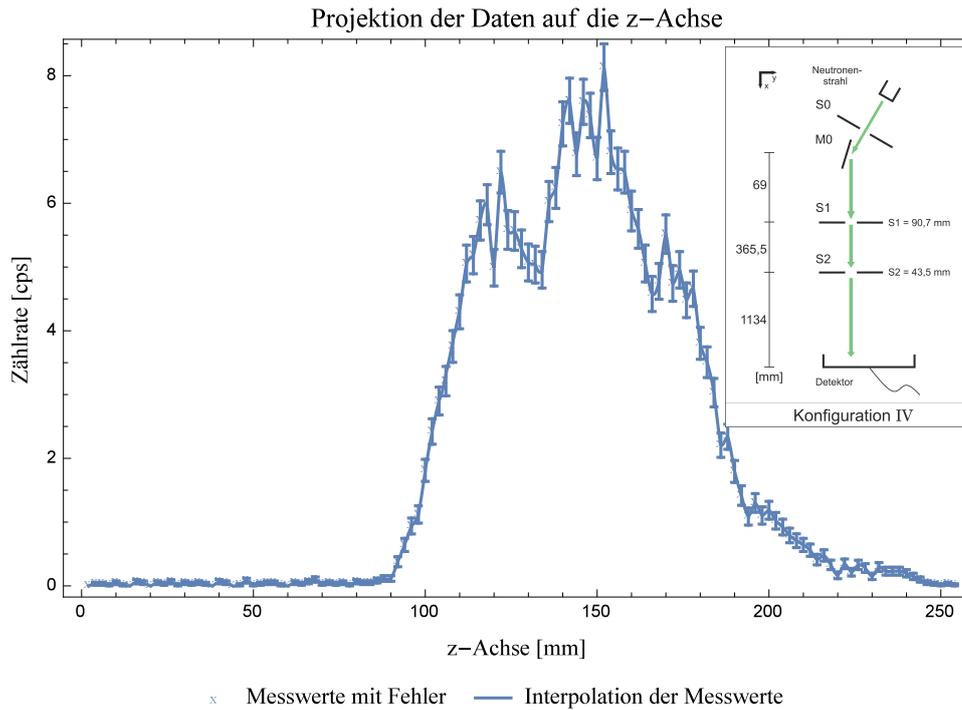


Abbildung 4.10.: Vertikales Profil des Strahls hinter S1 und S2 in Konfiguration IV. Es ändert sich im Vergleich zu den Profilen von Konfiguration II und III nur die Zählrate. Die Grundlage der Summation zeigt Abbildung B.4 auf Seite 79.

Modifikation des Aufbaus durch die Spiegel M1 und M2 Nach den Messungen mit S1 und S2 wurden die Spiegel M1 und M2 eingebaut und damit der Setup mit Monochromator komplettiert, der als Konfiguration V bezeichnet wird. Neben der Geschwindigkeitsselektion ist interessant, ob sich die Strahleigenschaften verändert haben.

Abbildung 4.11 zeigt die vertikal summierte Aufnahme des Detektors sowie die Positionierung der Elemente in dieser Konfiguration. Die Abstände sind im Detail: $\overline{S1M1} = 220 \pm 0,1$ mm, $\overline{M1M2} = 144 \pm 0,1$ mm und $\overline{M2S2} = 166 \pm 0,1$ mm. Damit ergibt sich ein Strahlweg zwischen S1 und S2 von $530 \pm 0,3$ mm.

Bereits an dieser Stelle ist durch die niedrige Zählrate klar, warum der Optimierung der Positionen so viel Raum gegeben wird. Das Maximum dieser Messung weist nach 360 Sekunden Messzeit eine Rate von $0,708 \pm 0,044$ cps auf und besteht aus drei Messpunkten. Wie zuvor wird deswegen die Interpolation durch einen Fit ersetzt. Das Maximum der genäherten Funktion fällt in diesem Fall mit dem höchsten Messwert zusammen, da die Messwerte links und rechts davon gleich groß sind. Auch in diesem Fall wurde der Fehler um die halbe Binbreite vergrößert.

$$f(x) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] + d \quad (4.3)$$

Die Fitparameter sind $A = (1,94 \pm 0,12)$ cps/mm, $\mu = (214,02 \pm 0,09)$ mm, $\sigma = (1,27 \pm 0,49)$ mm und $d = (0,095 \pm 0,003)$ cps.

Vergleicht man die beiden Näherungen (4.1) und (4.3), so fällt als erstes der Parameter

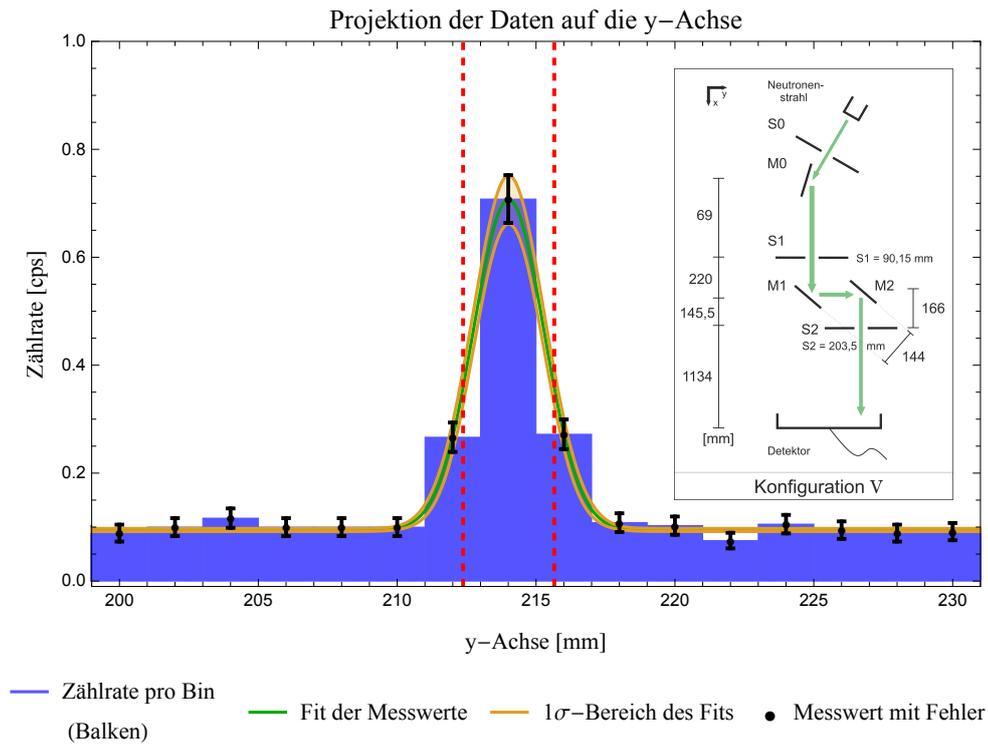


Abbildung 4.11.: Vertikale Integration über das Detektorbild nach allen Elementen des Aufbaus mit Monochromator (Konfiguration V). Die Messzeit beträgt 360 Sekunden. Die deutlich niedrigere Zählrate ist leicht erkennbar. Der gezeigte Fit hat die Form $f(x) = \frac{1,94}{\sqrt{2\pi \cdot 1,27^2}} \exp\left[-\frac{(x-214,02)^2}{2 \cdot 1,27^2}\right] + 0,095$ (Angaben zur Unsicherheit im Text). Die Grundlage der Summation zeigt Abbildung B.5 auf Seite 79. Die beiden roten Linien zeigen den maximal möglichen Winkel δ des Strahls, der aufgrund von (4.2) für die Konfiguration möglich ist (symmetrisch um das Maximum).

d auf, der in (4.3) zusätzlich auftritt. Das liegt daran, dass der Untergrund hier nicht mehr vernachlässigt werden kann und berücksichtigt werden muss. Der Parameter A ist durch die Zählrate bestimmt und damit in (4.3) wesentlich kleiner als in (4.1). Die Position des Maximums am Detektor ist aufgrund des Parallelverschubs des Strahles durch die beiden Spiegel verschieden, weswegen auch μ unterschiedlich ist. Der Parameter σ richtet sich nach der Breite der Werte und ist damit die interessanteste Vergleichsgröße. Man sieht, dass der σ -Wert von 4.1 innerhalb des Fehlerbereichs des anderen liegt. Damit weisen die beiden Näherungen trotz der unterschiedlichen anderen Parameter eine charakteristische Gemeinsamkeit auf.

Mit (4.2) kann für Konfiguration V ein Winkel von $\delta_V = 1,448 \pm 0,005$ mrad berechnet werden, der gleichzeitig einer Breite von $3,28 \pm 0,01$ mm am Detektor entspricht. Das entsprechende Intervall ist in Abbildung 4.11 durch rote Linien gekennzeichnet (symmetrisch um das Maximum). Wie in Konfiguration IV ist der Effekt nicht signifikant.

Die Analyse des vertikalen Strahlprofils kann nicht durchgeführt werden, da die Messung dafür zu kurz war. Die Werte haben so geringe Zählraten, dass die sechsfache Messzeit nicht ausgereicht hat, um die Daten präzise zu kennen.

4.3.2. Winkelverteilung des VCN-Strahls

Die Winkelverteilung ist ein Maß dafür, wie stark die transversale Geschwindigkeitskomponente der Neutronen ist und sich der Neutronenstrahl aufweitet. Prinzipiell kann diese Aufweitung in alle Richtungen normal zum Strahl erfolgen und muss nicht überall gleich stark sein. Von besonderem Interesse ist hier die Aufweitung in y-Richtung, da diese den Kontrast des Musters beim Betrieb des Interferometers verringert und auch zerstören kann. Deshalb sind die Blenden auf die Einschränkung der Abweichung in y-Richtung ausgelegt.

Aus den Daten der Konfigurationen II und III kann der Aufweitungswinkel abgeschätzt werden, der hinter der jeweiligen Blende auftritt. Nimmt man eine Punktquelle an und bezeichnet x_i den Anstand zwischen Blende i und Detektor, b_i die Breite der Peaks bei halbem Maximum und s_i die Breite des Blendenspalts, so folgt mit $i = 1, 2$:

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{b_i - s_i}{x_i}\right) \quad (4.4)$$

Der zusätzlich Faktor $\frac{1}{2}$ tritt auf, da nur die Abweichung von der Vorwärtsrichtung auf eine Seite betrachtet wird. Um den Effekt nicht zu überschätzen, wird die Spaltbreite abgezogen. Die Geometrie dieser Überlegung ist in Abbildung 4.12 schematisch dargestellt. Zusätzlich ist noch die symmetrische Reflexion der Neutronen an der Innenseite der Blenden aufgrund der Winkelverteilung gezeigt, die in den Detektoraufnahmen der Konfigurationen mit den Blenden implizit enthalten ist.

Für die Aufweitung hinter S1, Konfiguration II, ergibt sich damit der Winkel $\alpha_1 = 2,97 \pm 0,35$ mrad. Im Fall von S2, Konfiguration III, ist der Winkel $\alpha_2 = 2,31 \pm 0,50$ mrad. Berechnet man den Winkel für Konfiguration I auf die gleiche Art, obwohl sie weder S1 noch S2 enthält, so erhält man den Vergleichswert $\alpha_0 = 6,19 \pm 0,13$ mrad. Damit sieht man, dass die Blenden die Aufweitung bereits um die Hälfte beziehungsweise mehr als die Hälfte reduzieren.

Um herauszufinden, welche Winkelverteilung hinter S1 tatsächlich vorliegt, kann man die Zählraten pro Position von S2 aufsummieren und über den bewegten Bereich darstellen. Legt man den Nullpunkt auf die Position der höchsten Zählrate für beide Blenden (vgl. Tabelle 4.2) und rechnet die Abweichung von diesem Punkt mit dem Abstand zwischen den Blenden in einen Winkel um, so ergeben sich die einzelnen Punkte in Abbildung 4.13. Zusätzlich wurde der Integrationsbereich auf $y \in [55, 85]$ und $z \in [75, 235]$ eingeschränkt und um den Untergrund bereinigt.

Die experimentellen Daten können durch eine Funktion der Form

$$f(x) = A \cos^2\left(\frac{\pi x}{b}\right) \quad (4.5)$$

genähert werden, deren Parameter $a = (250,14 \pm 0,71)$ cps und $b = (13,02 \pm 0,03)$ mrad sind. Diese Näherung gilt nur für den gezeigten Bereich und kann nicht extrapoliert werden. Der Wert b gibt die Wellenlänge der Funktion an. Daraus kann die FWHM-Breite berechnet

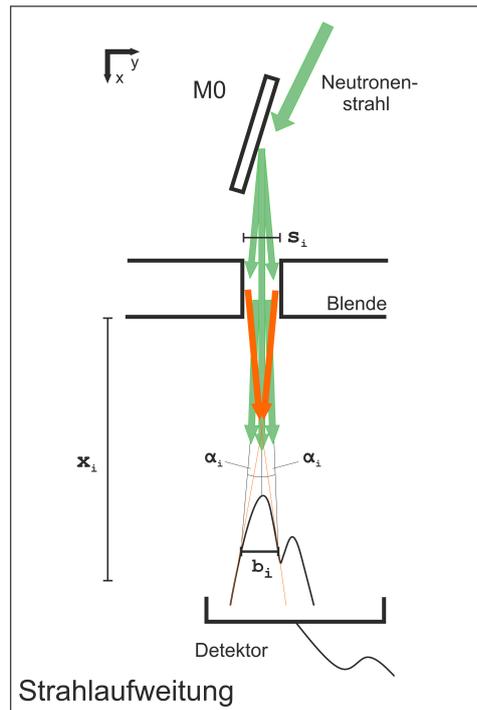


Abbildung 4.12.: Schematische Darstellung der angenommenen Geometrie für die Aufweitung des Strahls hinter einer Blende mit Berücksichtigung der symmetrischen Reflexion an der Innenseite der Blende.

werden, sowie die Breite bei 75% des Maximums und der Winkel der Aufweitung:

$$B_{\text{FWHM}} = \frac{b}{2}, \quad \Delta B_{\text{FWHM}} = \frac{\Delta b}{2} \quad (4.6)$$

$$B_{75\% \text{Max}} = \frac{b}{3}, \quad \Delta B_{75\% \text{Max}} = \frac{\Delta b}{3} \quad (4.7)$$

$$\alpha_{\text{exp}} = \frac{b}{4}, \quad \Delta \alpha_{\text{exp}} = \frac{\Delta b}{4} \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

Formel (4.2) beschreibt den maximalen Winkel, der trotz der Einschränkung der Blenden noch möglich ist, und gibt daher die verbleibende Divergenz des Strahls nach der Kollimation an. Mit den Blenden wird jener Teil aus dem Strahl herausgeschnitten, der nicht stärker als mit dem Winkel δ divergiert. In der vorliegenden Konfiguration selektiert dieser Winkel genau die Region der höchsten Zählraten.

Die berechneten Aufweitungswinkel α_i hatten als Ausgangspunkt die FWHM-Breite der Einzelmessungen. Im Plot der Winkelverteilung liegt diese Breite bei $B_{\text{FWHM}} = 6,51 \pm 0,01$ mrad, woraus sich die Aufweitung zu $\alpha_{\text{exp}} = 3,26 \pm 0,01$ mrad berechnen lässt. Dieser Wert liegt im Fehlerbereich von α_1 , der den selben Fall betrachtet. In der Abbildung sind die beiden Winkel α_1 und α_{exp} auf der linken Seite gezeigt. Die grüne Linie gibt den abgeschätzten Wert an, während die durchgezogene Linie die Berechnung aufgrund der genäherten Funktion zeigt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit dem Aufbau mit zwei Spiegeln sei noch die Breite bei 75% des Maximums angegeben: $B_{75\% \text{Max}} = 4,34 \pm 0,01$ mrad.

Ab der strichlierten Linie bei 3,3 mrad passt die genäherte \cos^2 -Funktion nicht mehr zu den Messwerten. Der abweichende Teil der Grafik ist wie in Abbildung 4.5 rechts des

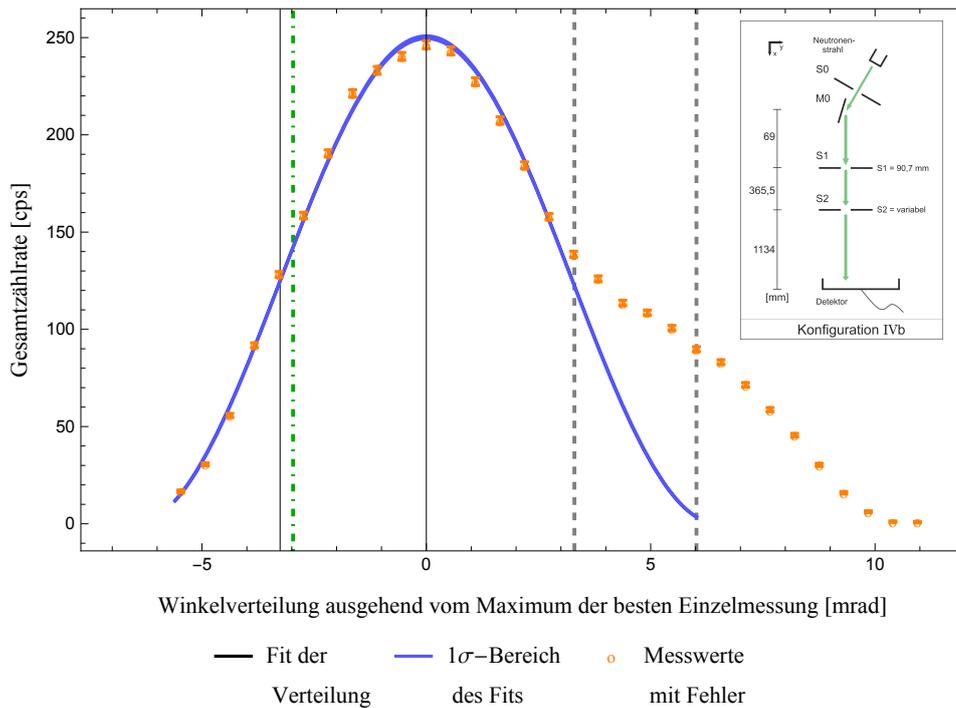


Abbildung 4.13.: Die Abbildung zeigt die Winkelverteilung des Strahls in Konfiguration IVb. Die Null-Position wurde auf die Position des höchsten Maximums der Einzelmessungen gelegt und die Abweichungen berechnet. Die einzelnen Punkte sind Messwerte, die durchgezogene Linie ist der Fit der Form $f(x) = 250,14 * \cos^2\left(\frac{\pi x}{13,02}\right)$ (Angaben zur Unsicherheit im Text). Ab der vertikalen Linie (bei 3,3 mrad) passt der Fit nicht mehr zu den Messwerten, bei der zweiten Linie ist die Fitfunktion Null. Die zentrale Region, die auch die Blenden selektieren, wird aber durch die \cos^2 -Funktion sehr gut beschrieben. Auf der linken Seite sind der abgeschätzte (grün) und der aus dem Fit berechnete (schwarz) Divergenzwinkel zu sehen.

Hauptmaximums. Die möglichen Ursachen dieses Teils der Winkelverteilung werden im nächsten Abschnitt, Kapitel 4.4, diskutiert.

Für die weiteren Messungen war dieser Teil nicht mehr von Bedeutung, da das Maximum selektiert wurde.

Winkelverteilung nach den monochromatisierenden Spiegeln M1 und M2 Um die Winkelverteilung hinter den Spiegeln zu analysieren, kann man analog zum Fall der beiden Blenden S1 und S2 vorgehen. In diesem Fall war die Einzelmessung mit der höchsten Zählrate im Maximum nicht gleichzeitig jene Messung, die auch die höchste Gesamtzählrate aufweist. Die beiden Positionen lagen um 0,94 mrad auseinander, die Messwerte liegen aber in jeweils anderen Fehlerbereich. Die Winkelverteilung wurde um die Position der höchsten Gesamtzählrate zentriert und damit um 0,94 mrad versetzt. Damit die Daten einfacher um den Untergrund zu bereinigen sind, wurde der Integrationsbereich für die Winkeldarstellung auf $y \in [200, 230]$ und $z \in [50, 256]$ eingeschränkt. Den Daten kann eine Funktion der Form

$$f(x) = A \cos^2\left(\frac{\pi x}{b}\right) \tag{4.10}$$

mit den Parametern $A = (0,92 \pm 0,02)$ cps und $b = (13,20 \pm 0,30)$ mrad zugrunde gelegt werden. Messwerte und Näherung sind in Abbildung 4.14 gezeigt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die x-Achse wie in Abbildung 4.13 skaliert.

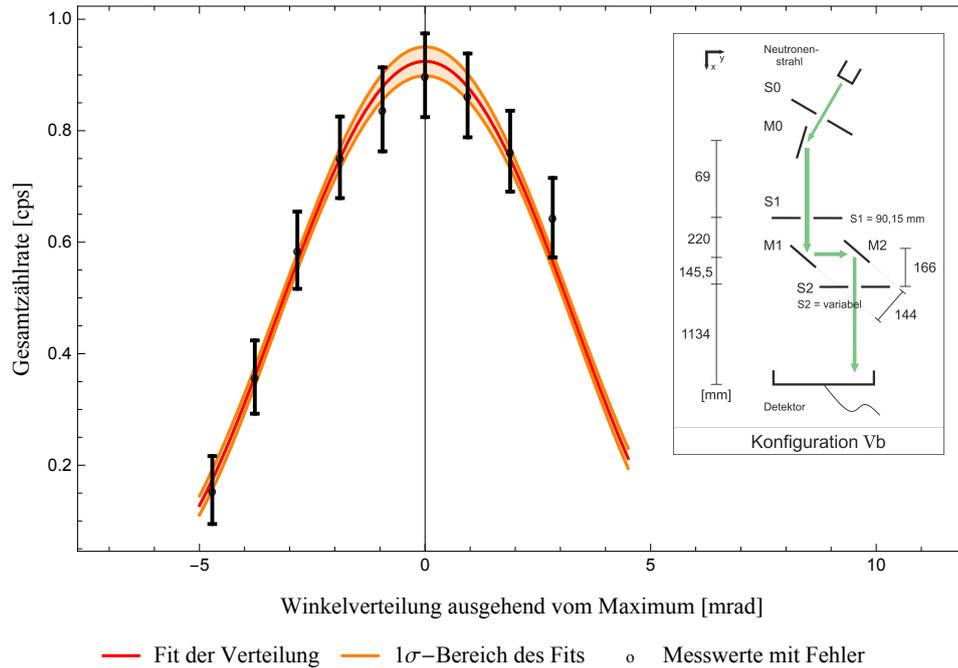


Abbildung 4.14.: Winkelverteilung nach S1 in Konfiguration Vb. Die Zählraten im Plot stellen die Gesamtzählrate am Detektor der jeweiligen Messung nach einer Messzeit von 360 Sekunden dar. Das Maximum wurde als Mitte definiert. Der gezeigte Fit hat die Form $f(x) = 0,92 * \cos^2\left(\frac{\pi x}{13,20}\right)$ (Angaben zur Unsicherheit im Text).

Analog zu (4.6)-(4.8) können aus b die Breiten und der Winkel der Aufweitung berechnet werden. Es ergeben sich: $B_{FWHM} = 6,60 \pm 0,15$ mrad, $B_{75\%Max} = 4,40 \pm 0,10$ mrad und $\alpha_{exp} = 3,30 \pm 0,08$ mrad.

Die berechneten Werte zeigen, dass die Winkelverteilungen in Konfiguration IVb und Vb übereinstimmen. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse in Abbildung 4.15 verstärkt, in der die Näherungen der beide Winkelverteilungen sowie deren zugrunde liegende Daten gezeigt sind. Die Näherungen und Messwerte wurden auf den jeweils höchsten Wert normiert.

Die genäherten Funktionen gleichen sich nach der Normierung, sodass sie einander überlagern und nur in der Maximalregion unterscheidbar sind. Weiters sieht man, dass die Daten der Konfiguration Vb nicht ausreichen, um Aussagen über den von den Näherungen abweichenden Bereich ab 3,3 mrad zu treffen.

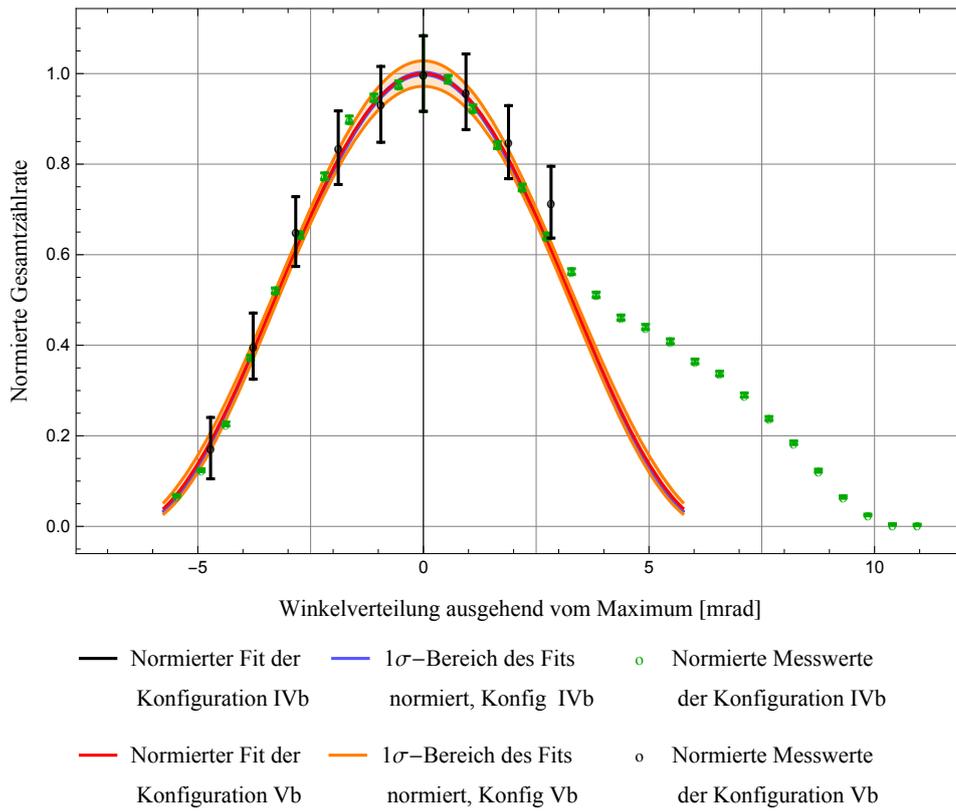


Abbildung 4.15.: Vergleich der Winkelverteilungen für Konfiguration IVb und Vb. Die beiden Verteilungen stimmen überein und die Näherungen überlagern sich. Die Daten von Konfiguration 5b gehen nicht ausreichend weit, um den von der Näherung abweichenden Bereich ab 3,3 mrad zu untersuchen.

4.4. Einseitige Reflexionen an der Blende

In den Konfigurationen II, III, und IVb waren jeweils Strahlteile rechts des Hauptmaximums zu sehen, die aufgrund der Einschränkungen durch die Blenden nicht so große Winkelabweichungen aufweisen dürften. Darüber hinaus treten diese Effekte nur einseitig auf. Eine mögliche Ursache dieser Nebenmaxima sind Reflexionen an der Innenseite der 2,5 mm dicken Borstahlblenden, die in diesem Abschnitt diskutiert werden sollen.

Symmetrische Reflexionen, wie sie bereits in Abbildung 4.12 eingezeichnet sind, treten aufgrund der Winkelverteilung innerhalb des Strahls auf und führen zu einer Verbreiterung des Profils des transmittierten Neutronenstrahls. Das fällt vor allem bei den Flanken des Profils auf, die dadurch breiter sind, als durch die Divergenz (4.2) vorhergesagt wird. Die Strahlachse ist in diesem Fall normal zur Ebene der Blendenblätter.

Im Gegensatz dazu sind asymmetrische Reflexionen nur auf einer Seite des Maximums zu finden und treten durch den nicht normalen Einfall des Strahls auf die Blende auf. Einseitige Reflexionen dieser Art können nur an der Innenseite der linken Blendenblätter auftreten, da die Nebenmaxima immer bei höheren y -Werten liegen als das Hauptmaximum. Damit stellen sie eine Umverteilung des Strahls zu höheren y -Werten dar, wobei der proportionale Anteil dieses Effekts mit zunehmendem y ansteigt. Wie gezeigt werden wird, kann aus der Lage der Reflexionen die ungefähre Verkipfung zwischen Strahlachse und Ebene der Blenden bestimmt werden.

Aus dem Abstand zwischen Haupt- und Nebenmaximum im Detektorbild von Konfiguration II und III kann der ungefähre Reflexionswinkel abgeschätzt werden. Bezeichnet x_i den Anstand zwischen Blende i und Detektor, Δ den Abstand zwischen Haupt- und Nebenmaximum der jeweiligen Blende, s_i die Spaltbreite der Blende und β den Reflexionswinkel, dann folgt mit $i = 1, 2$:

$$x_i * \tan(\beta_i) = \Delta_i + \frac{s_i}{2} \quad (4.11)$$

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{2\Delta_i + s_i}{2x_i}\right) \quad (4.12)$$

Abbildung 4.16 verdeutlicht schematisch die Geometrie der Abschätzung und die beiden Winkel ergeben sich zu $\beta_1 = 5,68 \pm 1,34$ mrad und $\beta_2 = 5,52 \pm 1,77$ mrad.

Um die Annahme, dass Reflexionen auftreten, zu verifizieren, wurde der ursprüngliche Strahl aus den einzelnen Messungen für eine Blende rekonstruiert. Das Ergebnis dieser Rekonstruktion mit den Daten hinter der Blende S2, Konfiguration III, ist in Abbildung 4.17 im Vergleich zum ursprünglichen Strahl (vgl. Abb. 4.3), Konfiguration I, gezeigt.

Die Rekonstruktion, Abbildung 4.17, bildet das ursprüngliche Profil weitgehend nach. Ab $y = 80$ mm bis $y = 100$ mm ist die Zählrate der rekonstruierten Kurve höher als der ursprüngliche Strahl, danach fällt die Summation der Einzelmessungen deutlich darunter.

Links der vertikalen Linie bei $y = 100$ mm sind die Reflexionen an der Innenseite der Grund für den stetig wachsenden Zählratenanstieg mit steigendem y . Rechts der eingezeichneten Linie zeigt die Rekonstruktion einen sehr starken Abfall, der aufgrund fehlender Daten zustande kommt. Am Anfang dieses Bereichs waren die Positionen für S2 bereits zu schlecht für das weitere Experiment, sodass die Messreihe nicht fortgesetzt wurde.

Das rekonstruierte Profil bestätigt, dass Reflexionen nur einseitig auftreten. Darüber hinaus kann durch die Rekonstruktion ausgeschlossen werden, dass ein Nebenmaximum

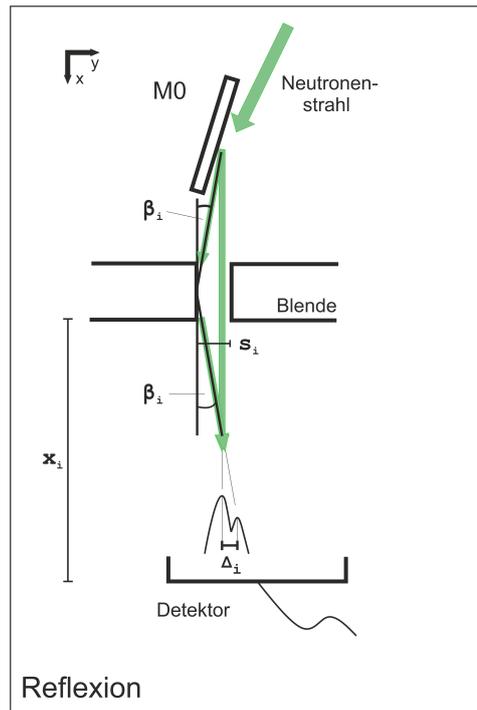


Abbildung 4.16.: Schematische Darstellung der angenommenen Geometrie für die asymmetrische Reflexion an der Innenseite der Blende.

des Strahls, wie er in Abbildung 4.3 zu sehen ist, zu den Nebenmaxima führt, die in den anderen Konfigurationen auftreten.

Bei der Messung der Winkelverteilung misst die Blende S2 die Strahlform hinter S1, Abbildung 4.5, genau aus. Das dort auftretende Nebenmaximum wird damit ebenfalls vermessen und für Positionen weiter rechts schrittweise beigemischt. Diese kontinuierliche Addition an der rechten Flanke des Strahls wäre eine Erklärung für die Form der Winkelverteilung in Abbildung 4.13.

Um das zu untersuchen, wurde die genäherte Funktion von den Messwerten abgezogen. Stellt man die verbleibenden Werte über der gleichen Skala dar, so ergibt sich Abbildung 4.18.

	α_i [mrad]	β_i [mrad]	γ_i [mrad]
ohne Blende	$\alpha_0 = 6,19 \pm 0,13$	-	-
Blende S1	$\alpha_1 = 2,97 \pm 0,35$	$\beta_1 = 5,68 \pm 1,34$	$\gamma_1 = 1,35 \pm 0,84$
Blende S2	$\alpha_2 = 2,31 \pm 0,50$	$\beta_2 = 5,52 \pm 1,77$	$\gamma_2 = 1,61 \pm 1,13$

Tabelle 4.5.: Abgeschätzte Winkel für die Aufweitung des Strahls nach der jeweiligen Blende α_i , die asymmetrische Reflexion an den Blenden β_i und die Verkippung der Blenden aus der Ebene normal zum Strahl γ_i .

Aus der Abbildung sieht man, dass die Reflexionen auch hier eine gute Erklärung für die gemessenen Werte sind. Der höchste Wert der Reflexionen ist durch die rote Linie gekennzeichnet und liegt bei einem Wert von 6,03 mrad. Damit liegt er im σ -Bereich der zuvor abgeschätzten Reflexionswinkel β_i . Die grüne Linie in der Abbildung zeigt β_1 .

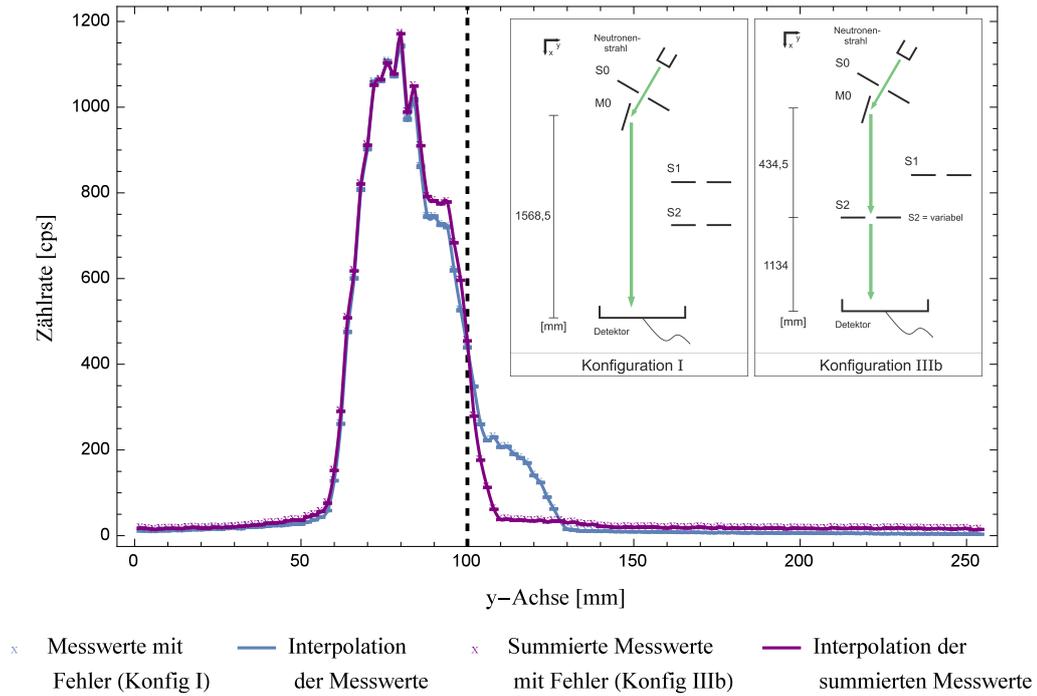


Abbildung 4.17.: Die Abbildung zeigt das Profil des Strahls ohne Blende wie in Abbildung 4.3 (blau), das mit dem aus S2-Daten rekonstruierten Plot (violett) überlagert ist. Zusätzlich ist eine horizontale Linie an der Stelle $y = 100$ eingezeichnet, bis zu der die Rekonstruktion sinnvoll ist, für $y > 100$ stehen keine Daten mehr zur Verfügung.

Der naheliegendste Grund für die nur einseitig auftretenden Reflexionen ist, dass die Blenden nicht exakt normal zur Strahlachse stehen. Nimmt man nun eine Verkipfung der Blende an, so findet man (Abbildung 4.19):

$$\gamma = \frac{\beta - \alpha}{2} \tag{4.13}$$

Die Resultate für γ sind mit den Ergebnissen der Abschätzung für Reflexions- und Divergenzwinkel in Tabelle 4.5 angegeben.

In Kapitel 5 folgt eine umfangreichere theoretische Rechnung zur Totalreflexion von Neutronen an Borstahl. Der Grenzwinkel für die mittlere Geschwindigkeit im Experiment, unter dem immer Totalreflexion auftritt, liegt bei etwa 88 mrad (vgl. Kapitel 5.2).

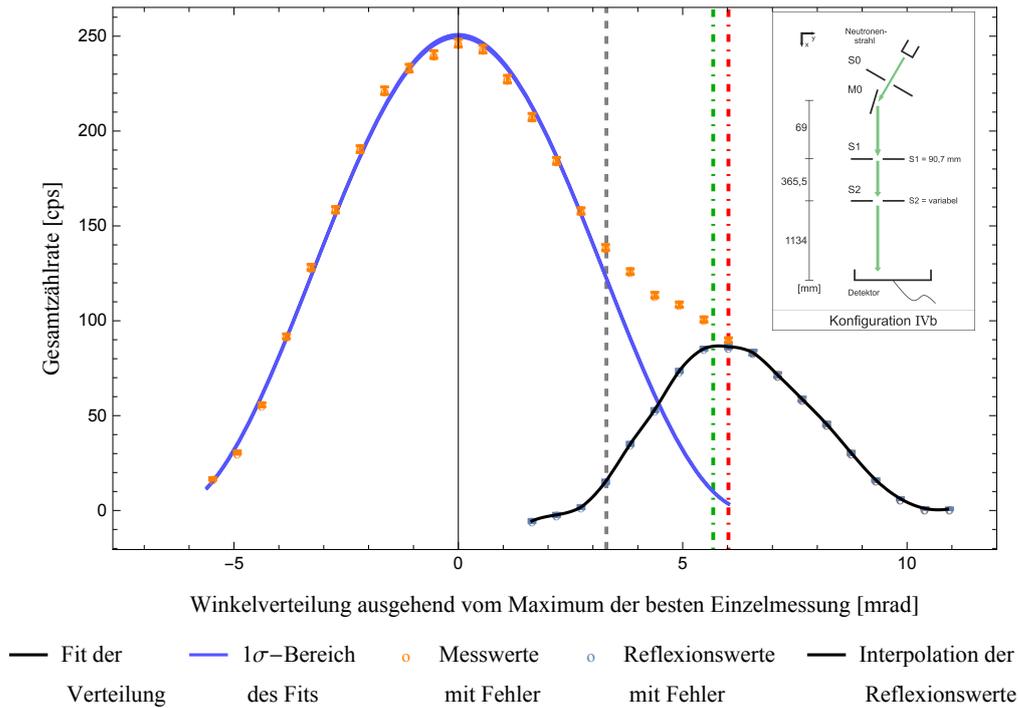


Abbildung 4.18.: Die Abbildung zeigt die Winkelverteilung der Konfiguration 4b sowie die auftretenden Reflexionen. Das schwarze Nebenmaximum entstand durch Subtraktion der genäherten Funktion von den Messwerten bis zur roten Linie, da danach der Fit wieder Werte größer als Null annimmt. Die rote Linie zeigt darüber hinaus die Position des höchsten Messwerts der Reflexionen an, die grüne Linie verdeutlicht den abgeschätzten Reflexionswinkel.

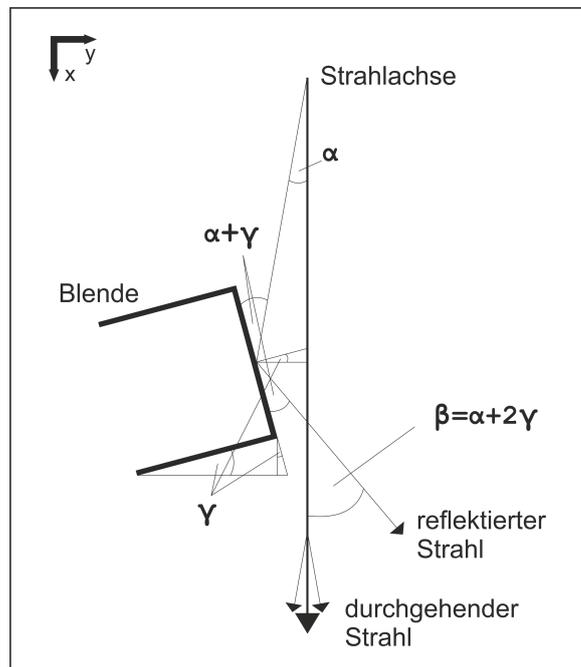


Abbildung 4.19.: Verdeutlichung der Verkippung einer Blende aus der Ebene normal zum Strahl. Im Vergleich zu Abbildung 4.16 tritt zusätzlich der Winkel γ auf.

4.5. Diskussion

An den Messungen für Konfiguration Vb kann man sehen, dass die Suche nach den Positionen der höchsten Zählraten erforderlich ist, damit das Signal nach dem vollständigen Durchgang durch das Kollimationssystem vom Untergrund unterscheidbar bleibt.

Sowohl das vertikale als auch das horizontale Profil des Strahls bleibt über die verschiedenen Konfigurationen gleich. Die Breite des horizontalen Profils wird ebenso wie die Zählrate im Maximum mit der steigenden Anzahl der Elemente im Setup geringer. Nach dem Einbau der monochromatisierenden Spiegel ist das vertikale Profil nicht mehr analysierbar, jedoch kann aufgrund der Messungen davor davon ausgegangen werden, dass es nicht verändert wurde. Die Spiegel verringern deutlich die Zählrate, verändern das Strahlprofil aber nicht.

Die Winkelverteilung der Neutronen in y-Richtung wurde mit und ohne Spiegel M1 und M2 analysiert. Die normierten Verteilungen gleichen einander, woraus geschlossen werden kann, dass die Spiegel keinen Einfluss auf den Strahl haben, außer ihrer primären Funktion, ein kleines Wellenlängenintervall zu selektieren.

Die genäherten Funktionen (4.5) und (4.10) zur Beschreibung der Winkelverteilung wurden aufgrund der zu erwartenden Form (2.8) gewählt. Die Funktionen fallen transversal bis auf Null ab und weisen in Vorwärtsrichtung des Strahls ihr Maximum auf, wie es durch die Messwerte vorgegeben ist. Mit der Symmetrie der Näherungen ergibt sich für die Reflexionen ein eigenes Nebenmaximum, wobei die Lage des höchsten Werts mit den geometrischen Abschätzungen innerhalb des Fehlerbereichs übereinstimmt. Weiters kann die Breite bei halbem Maximum sowie ihr Fehler durch die Näherungen berechnet werden.

Im Bereich des Maximums der Winkelverteilung erkennt man, dass die Messwerte von der Funktion und damit vom gewählten Modell abweichen. Im verwendeten Modell, (2.8), wird nicht berücksichtigt, dass der Strahl durch vertikale Blenden seitlich abgeschnitten wird. Ein verbessertes Modell könnte die \cos^2 -Form im Maximum weiter berücksichtigen und versuchen die abfallenden Seiten genauer zu beschreiben. Die reflektierten Anteile des Strahls können dabei helfen. Durch die Lage der Reflexionen könnte die Breite des Blendenspaltes berechnet werden, während die Breite des Nebenmaximums mit der Dicke der Blendenblätter zusammenhängen muss.

Die gefundene Winkelverteilung weist darauf hin, dass die Näherungen (4.1) und (4.3) nicht das tatsächliche Profil des Strahls wiedergeben. Es ist naheliegend, dass das Profil im Bereich des Maximums eine \cos^2 -Form aufweist und im Bereich der eingezeichneten Divergenzwinkel durch die Blende vertikal abgeschnitten wird. Dadurch würde die Form ab diesen Stellen von einer \cos^2 -Form abweichen und die Flanken müssten durch die auftretenden maximalen Transversalkomponenten beschrieben werden. Versucht man Näherungen für Positionen zu finden, die nicht im Bereich der höchsten Zählraten liegen, muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass dann der höchste Messwert am Rand liegen sollte, da die \cos^2 -Funktion von einem Maximum zu einer Nullstelle streng monoton fällt.

Die aus den Messwerten abgeleiteten Breiten und Aufweitungswinkel zeigen zwischen Konfiguration IVb und Vb keine signifikante Veränderung. Eine Zusammenfassung der charakteristischen Werte ist in Tabelle 4.6 gegeben.

Die auftretenden Nebenmaxima nach den Blenden S1 und S2 sowie die von der \cos^2 -Form abweichenden Teile der Winkelverteilung sind asymmetrische Reflexionen an der Innenseite der Blendenblätter. Diese entstehen dadurch, dass der Neutronenstrahl nicht normal auf die Blende einfällt, sondern leicht verkippt dazu ist. Die berechneten Winkel erlauben die Abschätzung dieser Verkipfung zu $1,35 \pm 0,84$ mrad für die Blende S1 und

	Breite [mm]	Höhe [mm]	Zählrate [cps]	Aufweitung [mrad]
Kollimator	$3,32 \pm 1,02$	$70,3 \pm 1,6$	$133,55 \pm 1,48$	$3,26 \pm 0,01$
Kollimator mit Monochromator	$2,98 \pm 1,16$	n.a.	$0,708 \pm 0,044$	$3,30 \pm 0,08$

Tabelle 4.6.: Charakteristische Strahldaten nach dem Kollimator und dem Aufbau mit Monochromator. Der Monochromator besteht aus den beiden Spiegel M1 und M2. Die Höhe nach diesem Setup kann nicht eindeutig bestimmt werden, jedoch hat sich die vertikale Ausdehnung im Verlauf des Experiments nicht geändert und ist kleiner als der Durchmesser der Spiegel. Es scheint daher gerechtfertigt, dass die gleiche Höhe wie im Fall ohne Spiegel angenommen wird.

zu $1,61 \pm 1,13$ mrad für die Blende S2.

Mit der Klärung der Reflexionen ist das Verhalten der Neutronen im Aufbau mit und ohne Spiegel vollständig geklärt. Die Präparation der Neutronen für das Lloyd-Materiewellen-Interferometer funktioniert und ist vorhersehbar.

Ein sehr deutliches Problem bei der Auswertung war die schlechte Auflösung des Detektors. Im Bereich der geringsten Zählraten ist die Kenntnis der Verteilung eine wichtige Grundlage zur Positionierung der Elemente. Die Auflösung von 2 mm führt für die Konfigurationen IV und V zu großen Fehlern, die durch eine längere Messzeit nicht vollständig ausgeglichen werden können. Um das vertikale Strahlprofil der Konfigurationen IV und V genau zu vermessen, ist eine höhere Ortsauflösung erforderlich.

5. Konzeptentwicklung einer neuen Blende

In diesem Kapitel werden Rechnungen vorgestellt, um daraus Empfehlungen eines optimalen Blendendesigns der letzten Blende vor dem Lloyd-Spiegel abzuleiten. Die Empfehlungen basieren auf den Erfahrungen mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Aufbau, auf der Auswertung der Daten davon (Kapitel 4) sowie auf Vorschlägen der Literatur [38], die für die Parameter des Experiments überprüft wurden.

Aus den Messergebnissen folgt die Notwendigkeit den Strahlweg möglichst kurz zu halten und damit die Verluste zu minimieren. Um den Kontrast des Interferenzmusters nicht zu zerstören, müssen die Parameter des Experiments so variiert werden, dass der beste Kontrast bei größtmöglicher Zählrate, nötiger Divergenzeinschränkung und Selektion der Wellenlänge vorliegt. Darüber hinaus soll die Blende eine Spaltbreite von $7\ \mu\text{m}$ aufweisen, um Beugung der Neutronen am Einzelspalt zu ermöglichen und gleichzeitig den Kontrast zu erhalten. Damit die Spaltbreite genau einstellbar ist, wird eine Genauigkeit von $0,1\ \mu\text{m}$ gefordert. Die Ergebnisse der Analysen des Geschwindigkeitsspektrums [26] bestimmen für welche Geschwindigkeiten die Rechnungen gemacht wurden.

In diesem Kapitel wird zuerst eine Blende mit nicht-parallelen Blendenblättern (in der x-y-Ebene) diskutiert (5.1), bevor die Änderung des Beugungsverhaltens für eine solche Blende untersucht wird (5.2). Im Anschluss wird der Einsatz mechanischer Führungen in der Konstruktion analysiert (5.3) und das Kapitel mit der Diskussion der Ergebnisse abgeschlossen (5.4).

5.1. Auswirkungen nicht-paralleler Blendenblätter

5.1.1. Blendendicke und Transmission

Um die Reflexionen an der Innenseite der Blenden zu verhindern, ist es möglich die Blendenblätter um den Winkel γ zu verkippen [38]. Schematisch ist diese Verkipfung in Abbildung 5.1 gezeigt. Wählt man diesen Winkel größer als den Divergenzwinkel α des Neutronenstrahls, so wird die unerwünschte Reflexion an der Innenseite unterdrückt.

Dennoch muss untersucht werden, bei welchem Winkel Reflexion und Transmission zu welchen Teilen auftreten. Dazu wurden Reflexions- und Transmissionskoeffizient (2.13) über einen Winkelbereich von $\varepsilon \in [0, 300]$ mrad aufgetragen. Die Kurven gelten für eine mittlere Geschwindigkeit der Neutronen von $\bar{v} = 62.6\ \text{m/s}$, wie es die Analyse des Spektrums ergab. Der Verlauf der beiden Koeffizienten ist in Abbildung 5.2 gezeigt, für die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} beträgt der Grenzwinkel der Totalreflexion $\varepsilon_{\text{total}} = 87,79 \pm 1,27\ \text{mrad}$.

Aus Abbildung 5.2 sieht man, dass für kleine Winkel α und γ die Reflexion vernachlässigbar klein wird. Nimmt man genau den Divergenzwinkel β als Verkipfungswinkel γ , so wird $\varepsilon = \pi/2$ und die Reflexion sinkt auf ihr Minimum mit $R < 10^{-5}$. Für die bisher

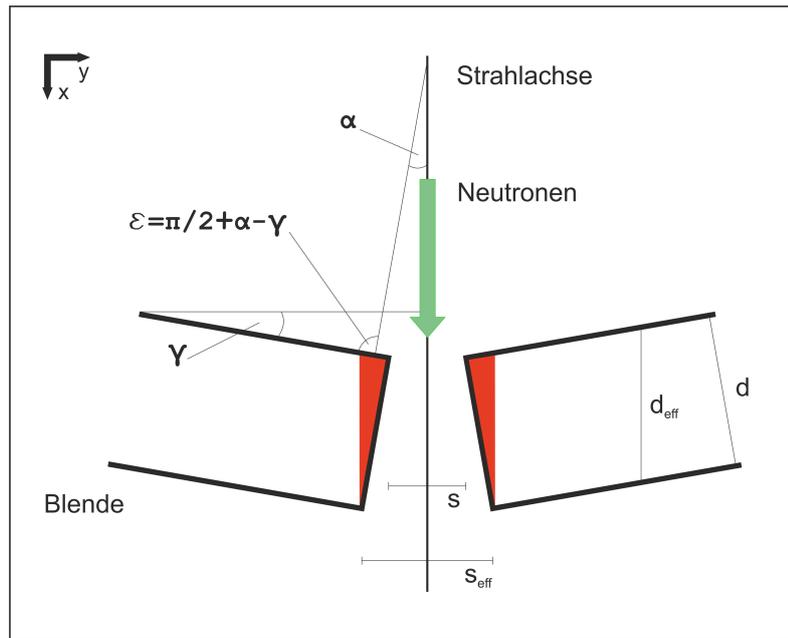


Abbildung 5.1.: Schematische Darstellung der schräggestellten Blendenblätter. Der Anstellwinkel γ sowie seine Relation zum Auftreffwinkel ϵ auf die Blendenoberfläche ist eingezeichnet. Die rot markierten Bereiche zeigen die dünnsten Stellen der Blende, durch die die Transmission größer ist und die Spaltbreite von s auf s_{eff} erhöht wird.

behandelten Winkel des Kapitels tritt also an der Blende links und rechts neben dem Spalt überwiegend Transmission auf. Dadurch kann man (2.14) verwenden.

Durch die Verkippung ist die Transmission im Vergleich zum Fall der normal stehenden Blende verändert. Im in Abbildung 5.1 rot markierten Bereich ist die Blendendicke nicht konstant. Insgesamt ändert sich die Dicke der Blende durch die Verkippung von d zu d_{eff} , wobei bis auf die roten Bereiche $d_{\text{eff}} \geq d$ gilt.

$$d_{\text{eff}} = \frac{d}{\cos(\gamma)} \quad (5.1)$$

In roten Bereichen nimmt die Dicke gemäß der Formel

$$d(y) = \pm \frac{d}{\cos(\gamma)} \mp y \left[\tan(\gamma) + \tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \right] \quad (5.2)$$

kontinuierlich zur Mitte hin ab.

Das gesamte Verhalten ist in Abbildung 5.3 mit einem Offset, der den Spalt signalisieren soll, für verschiedene Anstellwinkel gezeigt. Die gezeigten Winkel entsprechen den genannten Divergenzwinkeln sowie dem ursprünglichen Vorschlag von 1° aus [38]. Berechnet man die Transmission (2.14) für die variable Dicke der vier Fälle, so erhält man Abbildung 5.4.

Die Verkippung der Blendenblätter führt durch die geänderte Transmission auf größere Spaltbreiten, da Neutronen durch die Randbereiche des Spalts gelangen können, die sonst in der Blende absorbiert werden würden. Dadurch kann eine effektive Spaltbreite $s_{\text{eff}} > s$ definiert werden, für deren Berechnung ein Anteil der vollen Transmission als Grenzwert festgelegt werden muss. Die effektiven Spaltbreiten, die sich für die vier Winkel aus den

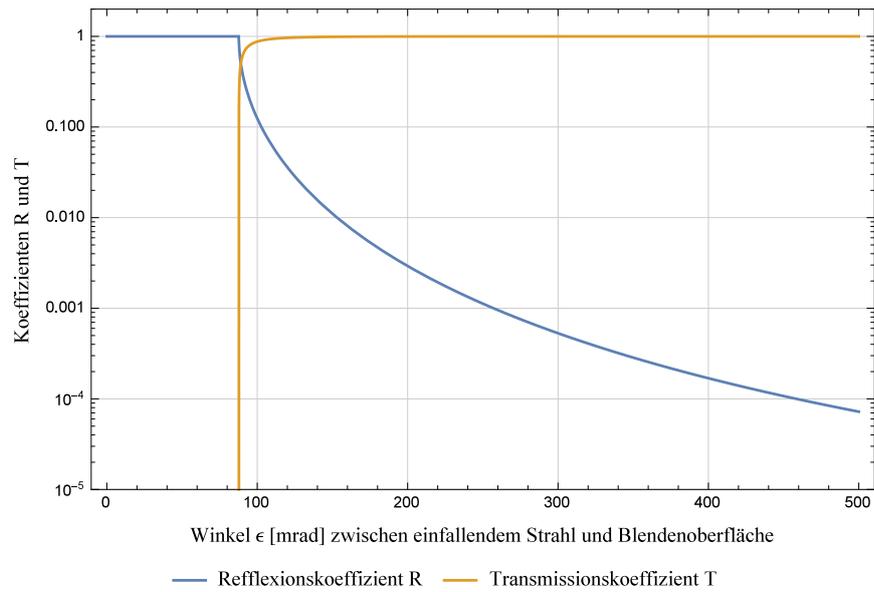


Abbildung 5.2.: Die Abbildung zeigt den Reflexions- und den Transmissionskoeffizienten für Neutronen mit mittlerer Geschwindigkeit $\bar{v} = 62,6 \pm 0,9 \text{ m/s}$ an Borstahl. Der Grenzwinkel der Totalreflexion liegt bei $\epsilon_{\text{total}} = 87,79 \pm 1,27 \text{ mrad}$.

Abbildungen 5.3 und 5.4 ergeben, sind in Tabelle 5.1 angegeben, wobei 10% und 1% als Grenzen genommen wurden.

Winkel [mrad]	Grenzwert: 10%			Grenzwert: 1%			V
	y [μm]	s _{eff} [μm]	Δ [%]	y [μm]	s _{eff} [μm]	Δ [%]	
0,5	0,06	7,12	+1,73	0,12	7,24	+3,46	132,95
1,33	0,16	7,32	+4,61	0,32	7,64	+9,21	49,98
2,1	0,26	7,51	+7,27	0,51	8,02	+14,55	31,66
17,45	2,12	11,23	+60,44	4,23	15,46	+120,89	3,81

Tabelle 5.1.: Die Tabelle fasst die verschiedenen Ergebnisse der Auswirkungen, die durch die Schrägstellung der Blendenblätter entstehen, zusammen. Angegeben sind die Distanzen, nach denen die Transmission für die unterschiedlichen Winkel auf 10% beziehungsweise 1 % gesunken ist. Daraus ergeben sich mit $s_{\text{eff}} = 7 + 2 * y$ die effektiven Spaltbreiten (die Inkonsistenz beruht auf Rundung der genauen Werte). Die Änderung Δ bezieht sich auf die ursprüngliche Spaltbreite von $7\mu\text{m}$. Darüber hinaus ist auch das Signal-Rausch-Verhältnis für die vier Winkel angegeben.

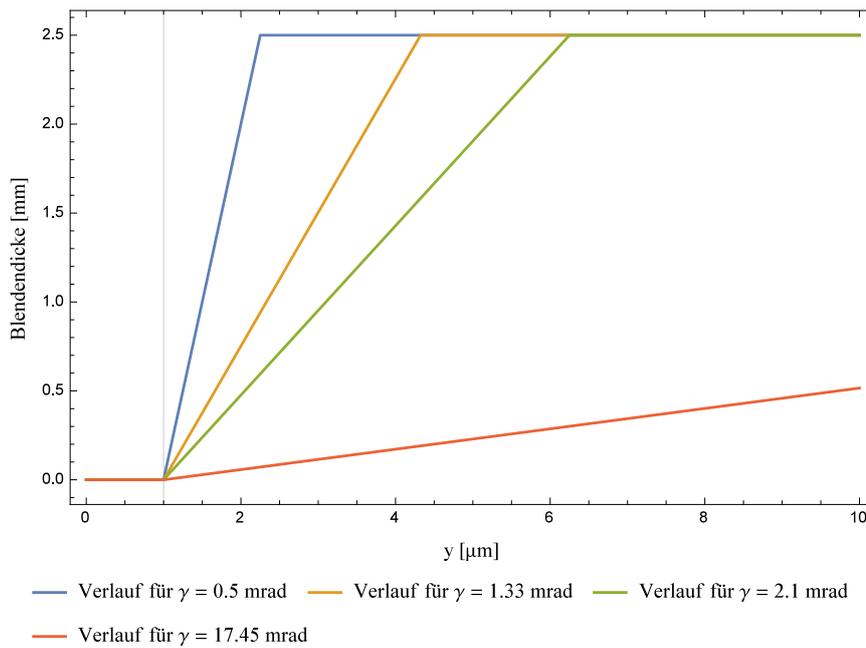


Abbildung 5.3.: Die Abbildung zeigt die Zunahme der Blendendicke in den roten Bereichen der Abbildung 5.1 für verschiedene Winkel. Eingerechnet ist weiters ein Offset von $1\mu\text{m}$, der den Spalt andeuten soll. Die Winkel beziehen sich auf bereits diskutierten Divergenzwinkel beziehungsweise auf den Vorschlag aus der Literatur.

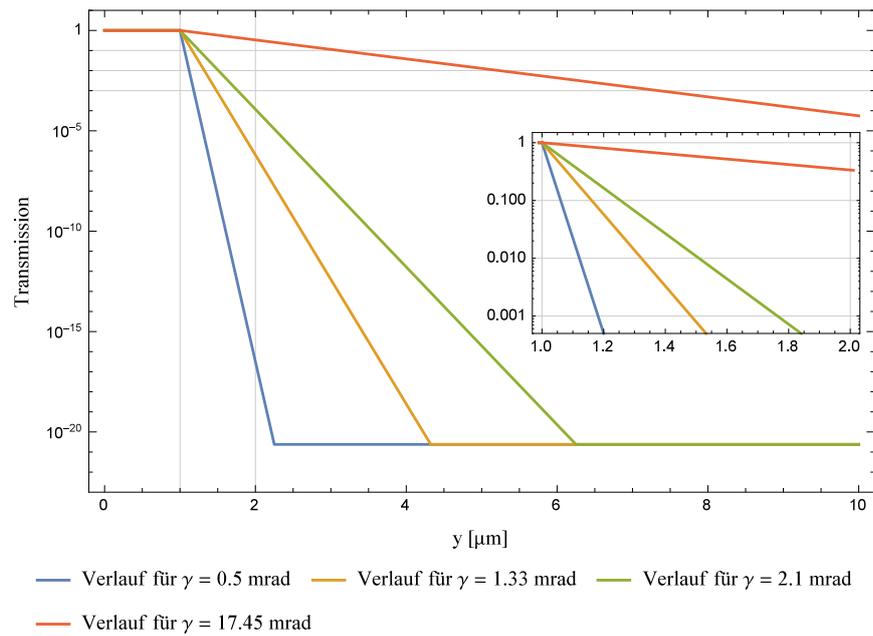


Abbildung 5.4.: Die Transmission für die in Abbildung 5.3 gezeigten Verläufe der Blendendicke. Die kleine Abbildung zeigt weiters einen vergrößerten Ausschnitt des Bereichs zwischen 1 und 2 μm , um die daraus abgeleiteten effektiven Spaltbreiten besser vergleichen zu können.

5.1.2. Unerwünschte Transmission durch das Blendenblatt

Im Fall einer neuen Blende, muss davon ausgegangen werden, dass die Transmission durch die Blendenblätter einen störenden Einfluss auf die Wellenfront hinter der Blende haben wird. Um abschätzen zu können, wie stark dieser Effekt sein wird, kann man die gewünschte Transmission durch den Blendenspalt s in Relation zum unerwünschten Durchgang der Neutronen durch die Blende setzen. Je nach Schrägstellung der Blendenblätter γ ändert sich dieses Verhältnis, da nur die dünneren Eckbereiche zum störenden Anteil beitragen. Die Transmission T für die volle Breite von $\geq 2,5 \text{ mm}$ beträgt $T(2,5 \text{ mm}) < 10^{-20}$, wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist und kann damit vernachlässigt werden. Damit folgt für das Verhältnis V der erwünschten zur unerwünschten Transmission:

$$V(\gamma) \propto \frac{\int_{\text{Spalt}} T(y, \gamma) dy}{2 \int_{\text{Blende}} T(y, \gamma) dy} \quad (5.3)$$

Der Verlauf von V ist in Abhängigkeit von γ in Abbildung 5.5 dargestellt. Die vertikalen Linien markieren wieder die gleichen Winkel wie in Tabelle 5.1, ihre Werte sind ebenfalls dort zusammengefasst.

Je kleiner der Winkel γ ist, desto besser ist das Verhältnis V . Daraus folgt, dass es nicht sinnvoll ist, die Blende stärker zu verkippen als durch die Divergenz und eine Reserve aufgrund der Genauigkeit notwendig ist. Geht man von einer präparierten Divergenz von $0,5 \text{ mrad}$ aus und kann man die Blende auf 10% der Divergenz genau justieren, so sollte γ zu 550 mrad gewählt werden. Es ergibt sich für diesen Fall $V(\gamma = 0,55 \text{ mrad}) = 120,9$. Damit werden die Reflexionen an der Innenseite der Blende verhindert und gleichzeitig das beste Verhältnis von gewünschter zu unerwünschter Transmission eingestellt.

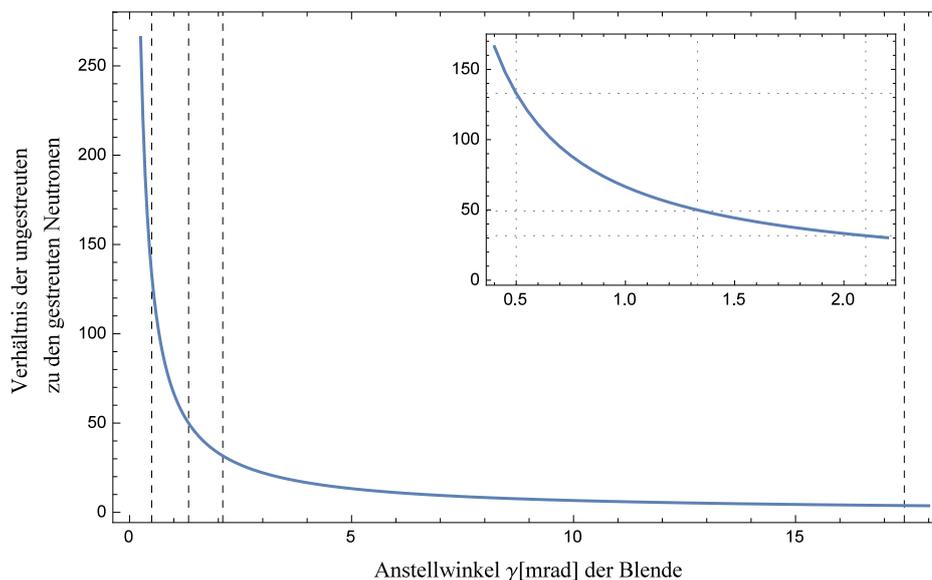


Abbildung 5.5.: Die Abbildung zeigt das Verhältnis V der erwünschten zur unerwünschten Transmission für eine Blende der Breite $7 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit des Winkels der Schrägstellung γ . Der vergrößerte Ausschnitt zeigt das Verhalten der Funktion detaillierter im Bereich der drei Winkel $0,5$, $1,33$ und $2,1 \text{ mrad}$.

5.2. Abweichungen der Fraunhofer-Beugung

Der Blendenspalt von $s = 7 \mu\text{m}$ im Vergleich zum geplanten Abstand zum Spiegel von $e = 10 \text{ cm}$ ergibt ein Verhältnis $\frac{e}{s} \approx 1,4 \cdot 10^4$ und erfüllt damit die Bedingung $e \gg s$ für die Fernfeldnäherung. In Kapitel 2 wurde mit (2.16) und Abbildung 2.5 die als Fraunhofer-Beugung bezeichnete Fernfeldnäherung für Neutronen angegeben.

Um Aussagen für das Experiment treffen zu können, muss die experimentelle Geschwindigkeitsverteilung mit der Intensitätsverteilung gefaltet werden. Aus dem Unterschied zwischen Theorie und Faltung kann beurteilt werden, ob die neue Blende darauf Rücksicht nehmen muss.

Abbildung 5.6 zeigt die Intensitätsverteilung nach Fraunhofer für eine Spaltbreite von $s = 7 \mu\text{m}$ und die Faltung mit der experimentellen Geschwindigkeitsverteilung sowie die Differenz der beiden Kurven.

Der Unterschied zwischen der Faltung und der reinen Intensitätsverteilung ist drei Größenordnungen kleiner als die ursprünglichen Kurven. Die maximalen Abweichungen sind bei $-2,65 \cdot 10^{-4}$ und $2 \cdot 10^{-4}$. Daran sieht man, dass die Auswirkungen der vorliegende Geschwindigkeitsverteilung auf die Beugung vernachlässigt werden kann.

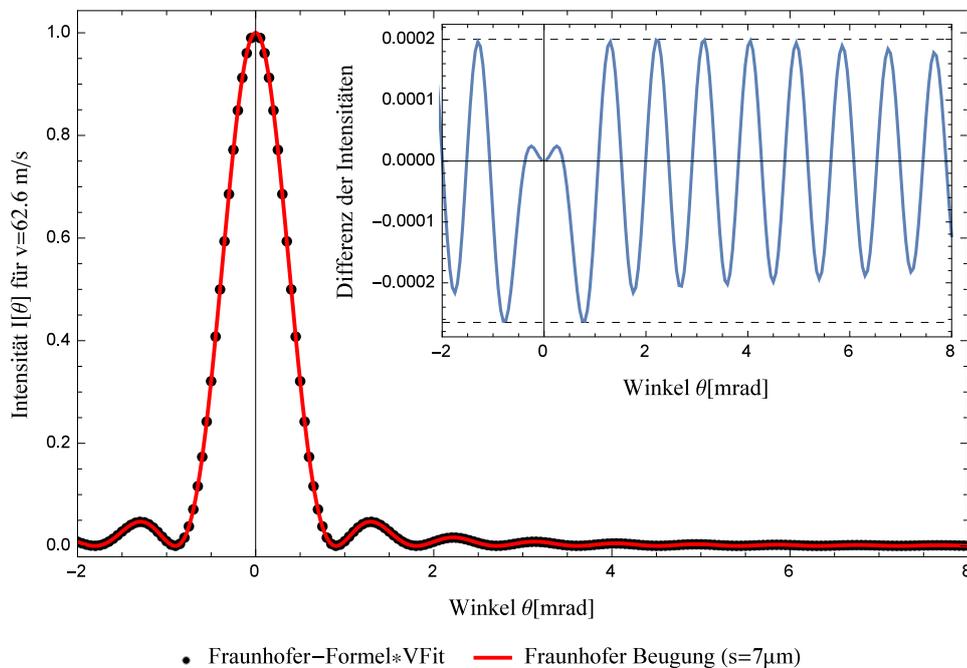


Abbildung 5.6.: Vergleich der Intensitätsverteilung nach Fraunhofer und der Intensitätsverteilung nach Faltung mit der experimentellen Geschwindigkeitsverteilung. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt die Differenz der beiden Kurven. Es wurde eine Spaltbreite von $7 \mu\text{m}$ angenommen.

Nach den Resultaten des vorigen Abschnitts in Bezug auf die Vergrößerung des Blendenspalts, vgl. Tabelle 5.1, muss überprüft werden, wie sich die Beugung in diesen Fällen ändert. Für das Experiment ist nur die zentrale Region des Maximums von Interesse, wie auch der Vergleich mit den bisher genannten Divergenzwinkeln zeigt.

Aus Abbildung 2.5 geht hervor, dass das Beugungsmuster im Zentrum mit steigender Spaltbreite gleich bleibt. Darüber hinaus ist nach Abbildung 5.6 nicht zu erwarten, dass

dieses Verhalten durch die experimentellen Bedingungen verändert wird. Die Konsequenz daraus ist, dass dieser Effekt für das Experiment vernachlässigt werden kann, da die zentrale Region selektiert werden wird.

5.3. Genauigkeit mechanischer Führungen

In Kapitel 3 wurde beschrieben, dass die Spaltpräparation händisch erfolgen musste und fordernd für die Experimentatoren war. Eine Möglichkeit die Einstellung der Spaltbreite zu erleichtern, wäre die Halterungen der Blendenblätter auf möglichst reibungsfreien Führungsschienen zu bewegen und so die Freiheitsgrade zu reduzieren sowie eine variable Spaltbreite zu ermöglichen. In diesem Abschnitt werden drei verschiedene Führungselemente der Hersteller IKO und Schneeberger auf ihre Eignung zum Einsatz im Experiment analysiert.

Die beschränkte Genauigkeiten von Führungen macht es nötig, Toleranzen in der Präparation einzukalkulieren. Eine Verkipfung des Führungselements in der x-y-Ebene führt zu einer Änderung der eingestellten Spaltbreite und könnte die Vermeidung von Reflexionen zunichte machen. Eine Abweichung in der y-z-Ebene führt zu nicht-parallelen Blendenblättern in z-Richtung, die Änderungen der Divergenz zur Folge hätten. Abbildung 5.7 zeigt, wo mögliche Änderungen der Spaltbreite Δs auftreten können. Dabei ist ein Blendenblatt als fest montiert und eines als beweglich angenommen.

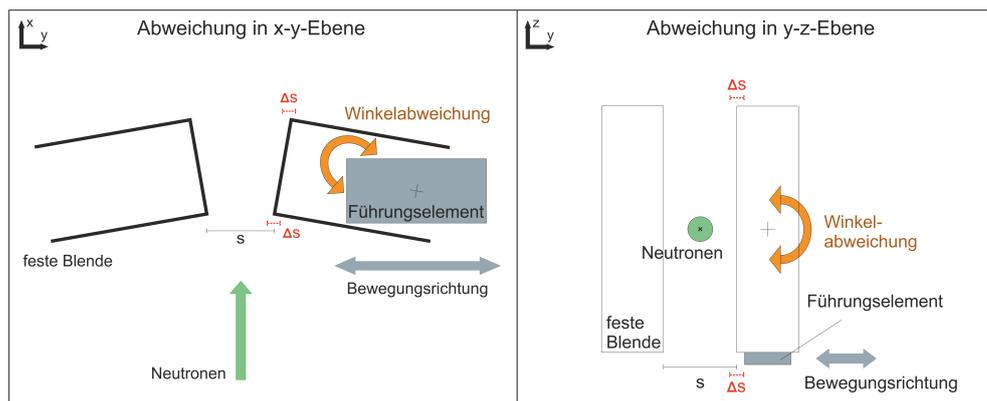


Abbildung 5.7.: Die beschränkte Genauigkeit von Führungselementen kann zu Änderungen der Spaltbreite Δs führen. In der Abbildung ist die Auswirkung einer Winkelabweichung in der x-y-Ebene links und in der y-z-Ebene rechts dargestellt. Im betrachteten Fall ist nur ein Blendenblatt auf einem Führungselement montiert und damit in y-Richtung beweglich.

Die maximalen Abweichungen der betrachteten Führungselemente nach der bewegten Strecke sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Die angegebene Abweichung bezieht sich auf die beiden in Abbildung 5.7 dargestellten Fälle. Auf der rechten Seite ist die Größe der Abweichung im Vergleich zum geforderten Divergenzwinkel von 0,5 mrad gezeigt. Die Grundlage der Abbildung 5.8 sind die Angaben der Hersteller, jedoch mussten die gezeigten Kurven von IKO für den Bereich 0 bis 500 mm aus den Daten ab 500 mm extrapoliert werden, da sie darunter nicht verfügbar waren.

Die maximalen Abweichungen bei 500 mm, dem kleinsten gesicherten Wert, wurden in Tabelle 5.2 zusammen gefasst. Daraus sieht man, dass für das Produkt mit der höchsten Genauigkeit, die MX-Serie von IKO, eine Verdopplung der Spaltbreite möglich wäre.

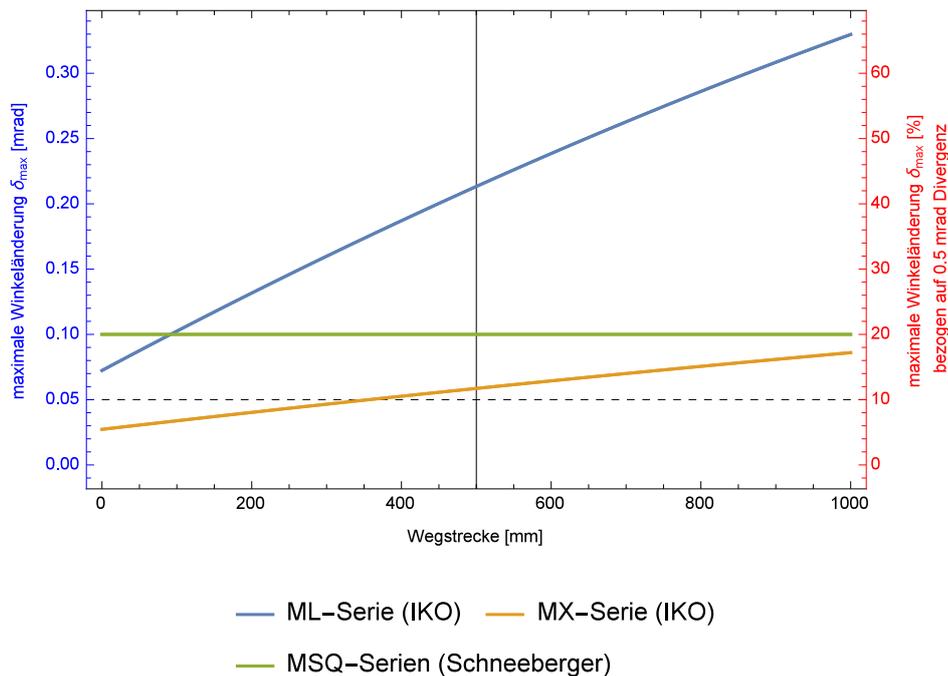


Abbildung 5.8.: Die Abbildung zeigt wie genau die drei Serien von Führungselementen sein können. Die Änderung ist links als absolute Winkeländerung auf die Länge des Führungselements und rechts relativ zu 0,5 mrad aufgetragen. Dadurch soll veranschaulicht werden, wie genau eine Blende, die Führungselemente nutzt, konstruiert werden muss. Für den Bereich der x-Achse unter 500 mm wurden die Werte aus den Daten für $x > 500$ mm extrapoliert, da keine Herstellerangaben verfügbar waren.

Mit diesem Führungselement müsste der Winkel, der zur Vermeidung von Reflexionen eingestellt wird, um knapp 12 % vergrößert werden. Die anderen beiden Produkte zeigen schlechteres Verhalten der betrachteten Größen.

Mit den Ergebnissen von Tabelle 5.2 ist eine Verwendung von Führungselementen zur Unterstützung der Spaltpräparation auszuschließen. Der Bereich für Wegstrecken kleiner als 500 mm in Abbildung 5.8 zeigt aber ein besseres Verhalten der Führungselemente, das durch eigene Messungen überprüft werden kann. Weiters wurde nur die Verwendung von einem Führungselement diskutiert. Werden beispielsweise zwei Elemente für ein Blendenblatt verwendet, so können mit der nötigen Vorspannung bessere Ergebnisse erzielt werden [99]. Die Überprüfung dieser Annahme durch eigene Messungen empfiehlt sich auch in diesem Fall.

5.4. Diskussion

Das interessanteste Konzept im Vergleich zum Aufbau in Kapitel 3 ist die Verkippung der Blendenblätter um die Reflexionen an der Innenseite zu vermeiden. Die berechneten Werte zeigen, dass diese Idee für das Experiment sinnvoll ist und zu vernachlässigbaren

	ML-Serie	MX-Serie	MSQ-Serien
Abweichung in x-y-Richtung [mrad]	0,21	0,059	0,10
Abweichung in y-z-Richtung [μm]	25,60	7,03	12

Tabelle 5.2.: Herausgegriffene Werte der maximalen Abweichung bei 500 mm für die drei Führungselemente aus Abbildung 5.8. Die Abweichungen sind sowohl in der x-y-Ebene als auch in der y-z-Ebene gegeben.

Einschränkungen führt. Die veränderten Beugungseffekte sowie die Transmission durch die Randbereiche sind für die Divergenzwinkel $\phi = 1,33$ mrad und $\phi = 2,1$ mrad vor der neuen Blende klein genug, um sie zu vernachlässigen.

Die Vereinfachung der Spaltpräparation durch mechanische Führungen externer Hersteller muss vorläufig ausgeschlossen werden. Die Berechnungen der maximalen Abweichungen zeigen zu große Differenzen für die vertikale Parallelität der Blendenblätter. Durch den Einsatz von mehr als einem Führungselement mit entsprechender Vorspannung, sowie nach Durchführung eigener Messungen der Genauigkeiten, kann die Verwendung wieder in Betracht gezogen werden.

6. Diskussion der Ergebnisse

Das Kollimationssystem hat die gestellten Anforderungen erfüllt, da es sowohl mechanisch als auch in seiner Ansteuerung modular und flexibel an die Erfordernisse des Experiments anpassbar ist. Im gesamten Aufbau des Experiments konnten dadurch die einzelnen Elemente näher aneinander positioniert und so die Verluste minimiert werden. Die Software des Systems ist durch ihre modulare, erweiterbare und fehlerresistente Struktur die neue Grundlage für die Ansteuerung weiterer Geräte, wie beispielsweise der Piezo-Controller oder der Detektoren. Darüber hinaus lassen sich Messungen automatisiert durchführen, was die Aufenthaltszeit der Experimentatoren in vom Strahlenschutz überwachten Zonen verringert und Zeit für die Vorbereitung der nächsten Schritte schafft.

Die Auswertung der Messdaten liefert ein konsistentes Bild des VCN-Strahls sowie seines Verhaltens bei der Kollimation. Die Ausdehnung des Strahls nach dem Kollimator, Konfiguration 4, ist $(3,32 \pm 1,02) \text{ mm} \cdot (70,3 \pm 1,6) \text{ mm}$ und die Zählrate im Maximum beträgt $(133,55 \pm 2,20) \text{ cps}$ an dieser Stelle, siehe Abbildung 4.9 sowie Tabellen 4.4 und 4.6. Der gemittelte Fluss für diese Position ergibt $(1,62 \pm 0,03) \frac{\text{cps}}{\text{mm}^2}$. Die Aufweitung des Strahls wurde aus der Winkelverteilung zu $(3,26 \pm 0,01) \text{ mrad}$ bestimmt, womit sich ein über den Winkel gemittelter Fluss pro Aufweitungswinkel von $(0,88 \pm 0,02) \frac{\text{cps}}{\text{mm}^2 \cdot \text{mrad}}$ berechnen lässt. In Konfiguration 5, dem Setup mit M1 und M2, siehe Abbildung 4.11, ist der Strahl $(2,98 \pm 1,16) \text{ mm}$ breit. Die vertikale Ausdehnung konnte nicht exakt bestimmt werden, da die Messdaten zu ungenau waren, jedoch war die Höhe vor dem Einbau der letzten Elemente konstant und betrug $(71,23 \pm 1,30) \text{ mm}$. Mit den monochomatisierenden Spiegel beträgt die Zählrate hinter dem Aufbau $(0,708 \pm 0,002) \text{ cps}$ und der gemittelte Fluss $(8,43 \pm 0,81) \cdot 10^{-3} \frac{\text{cps}}{\text{mm}^2}$. Die Aufweitung des Strahls gleicht mit $(3,30 \pm 0,08) \text{ mrad}$ der Aufweitung des Aufbaus ohne Spiegel, woraus geschlossen werden kann, dass die Spiegel keinen messbaren Einfluss auf den Strahl haben, außer ihrer primären Funktion, ein kleines Wellenlängenintervall zu selektieren. Der über den Winkel gemittelte Fluss pro Aufweitungswinkel beträgt in diesem Fall $(3,63 \pm 0,36) \cdot 10^{-3} \frac{\text{cps}}{\text{mm}^2 \cdot \text{mrad}}$. Die Winkelverteilung zeigt in den analysierten Fällen das erwartete \cos^2 -Verhalten, das durch die Theorie, vgl. (2.8), vorausgesagt wird. Auftretende Nebenmaxima und Reflexionen können erklärt und durch die Messdaten verifiziert werden. Damit sind die Auswirkungen der verschiedenen Setup-Elemente auf den Strahl bekannt und die Effekte der Präparation vorhersehbar.

Die diskutierten Konzepte für die Entwicklung einer neuen Blende widmen sich der Frage, ob eine Verkipfung der Blendenblätter aus ihrer Parallelität zur Vermeidung von Reflexionen an der Innenseite sinnvoll ist sowie, ob mechanische Führungen im Experiment eingesetzt werden können. Die Verkipfung eignet sich für kleine Winkel zur Unterdrückung von Reflexionen. Die dabei zusätzlich auftretende, unerwünschte Transmission durch die Blendenblätter sowie die Veränderung der Beugung sind vernachlässigbar, solange der Winkel der Verkipfung knapp oberhalb der auftretenden Divergenzwinkel von $\phi = 1,33 \text{ mrad}$ und $\phi = 2,1 \text{ mrad}$ bleibt. Der Einsatz mechanischer Führungen muss für den Einsatz von nur einem Element in der Konstruktion ausgeschlossen werden, da die maximalen Änderungen der Spaltbreite im Bereich dieser Breite liegen und damit zu groß sind.

7. Ausblick

Für die Verbesserung des Experiments ist es nötig, eine speziell für die Platzierung direkt vor dem Lloyd-Spiegel ausgelegte Blende zu realisieren. Dabei kommt es vor allem auf Präzision und Stabilität gegenüber Veränderungen und Drifts während der Messdauer an. Das Konzept der verkippten Blendenblätter zur Vermeidung von Reflexionen ist sinnvoll und empfiehlt sich zur Anwendung. Sollen in der Konstruktion mechanische Führungen eingesetzt werden, erfordert das mehrere Führungselemente unter Vorspannung, die zuerst auf ihre maximalen Abweichungen überprüft werden müssen.

Der Mechanismus zur Präparation der Spaltbreiten des Kollimationssystems ist zu verbessern. Dieser muss einfach zu bedienen sein, damit die Präparation in jeder Phase des Experiments schnell und fehlerfrei erfolgen kann. Eine Möglichkeit wäre die Konstruktion einer Montagehilfe, die das Herausfallen der Abstandsplättchen verhindert und die Blendenblätter zusammen presst, bis sie fixiert sind. Ebenso wären vorbereitete Rahmen oder Leisten für die Plättchen vorstellbar, die oben auf die Blende gelegt werden um die Plättchen während der Einstellung zu fixieren.

Um die Zählrate insgesamt zu erhöhen, können die monochromatisierenden Spiegel näher am Strahlausgang in die Experimentierkabine platziert werden. Ein Kollimationsstück davor ist aber weiterhin erforderlich, um die Spiegel effektiv einsetzen zu können. Der Strahlweg sollte so kurz wie möglich sein, damit die Verluste minimiert werden.

Die Ansteuerungssoftware wurde ausführlich beschrieben und ihre Grenzen aufgezeigt. Um die derzeitige Software für die künftigen Strahlzeiten verwenden zu können, ist die Anpassung der Struktur an die Speicherverwaltung nötig. Dabei können auch die Kommunikationsvariablen auf einen anderen Variablentyp umgestellt werden, sodass sie keine String-Arrays mehr sind. Dabei wird Speicherplatz eingespart, jedoch geht auch Funktionalität verloren. Die Variable ist dann für den Benutzer schwerer auf Fehler und falsche Einträge zu überprüfen, da nicht mehr Parametername und sein Wert zusammen gespeichert werden können. Weiters muss die Suche nach Einträgen modifiziert werden, da ohne Namen die Eindeutigkeit verloren geht. Eine Queue bietet sich hierbei als Instrument der korrekten Ein- und Ausgabe an. Weiters scheint es unverzichtbar, die Steuerung der Piezo-Controller ohne Active-X zu realisieren. Eine weitere, radikale Variante wäre es auch, die Ansteuerung komplett zu überarbeiten und eine andere Programmiersprache zu verwenden. In diesem Fall fällt eine komplexe Struktur, *LabVIEW*, weg und die Speicherproblematik kann direkt gelöst werden. Allerdings müssen dann alle Programme neu geschrieben werden.

Die theoretischen Rechnungen können noch präzisiert werden, wenn statt der genäherten Geschwindigkeitsverteilung die exakte verwendet wird. Die Fläche unter der experimentellen Geschwindigkeitsverteilung ist um etwa 3% größer als die der genäherten Verteilung, wodurch die relative Häufigkeit der auftretenden Geschwindigkeiten verändert wird.

Der Detektor ist für die Messung einer möglichen Interferenz nicht geeignet und auch nicht vorgesehen. Dennoch sollte bedacht werden, dass eine bessere Ortsauflösung wünschenswert ist, um die Auswertung zu erleichtern.

Danksagung

Zum Gelingen dieser Arbeit haben einige Personen beigetragen, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte:

Herrn Prof. H. Abele und Hanno Filter gebührt mein besonderer Dank für die Aufnahme in ihre Arbeitsgruppe und ihre fürsorgliche Betreuung meiner Arbeit. Durch die umfangreichen Diskussionen und Möglichkeiten, die ich durch sie bekommen habe, konnte ich viele Erfahrungen sammeln und weit mehr lernen, als in diese Arbeit Eingang gefunden hat.

Den Kollegen der anderen Neutronen-Gruppen des Atominstitus danke ich für die zahllosen Male des gemeinsamen Kaffee Trinkens in Frankreich und in Wien, sowie für ihre Hilfe, wenn ich sie benötigt habe.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und besonders meinen Eltern für ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums und in der fordernden Endphase.

A. Ausschnitte der Labview-Programme

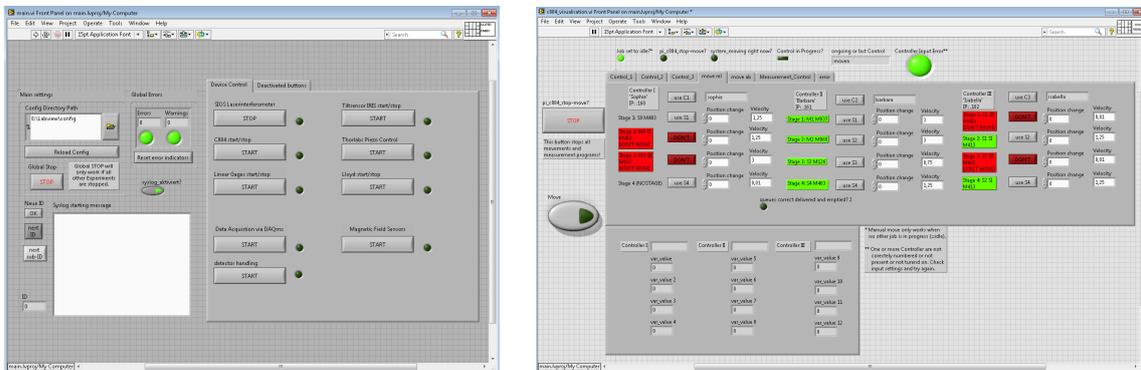


Abbildung A.1.: Aussehen der Steuerungssoftware des gesamten Experiments (links) und des C-884 Controllers für den Fall der relativen Bewegungen (rechts). Im rechten Bild ist zu erkennen, dass gewisse Möglichkeiten nach der Justage deaktiviert und rot gekennzeichnet wurde. Die grünen Elemente zeigen jene Motoren, die für die meisten Programme verwendet wurden.

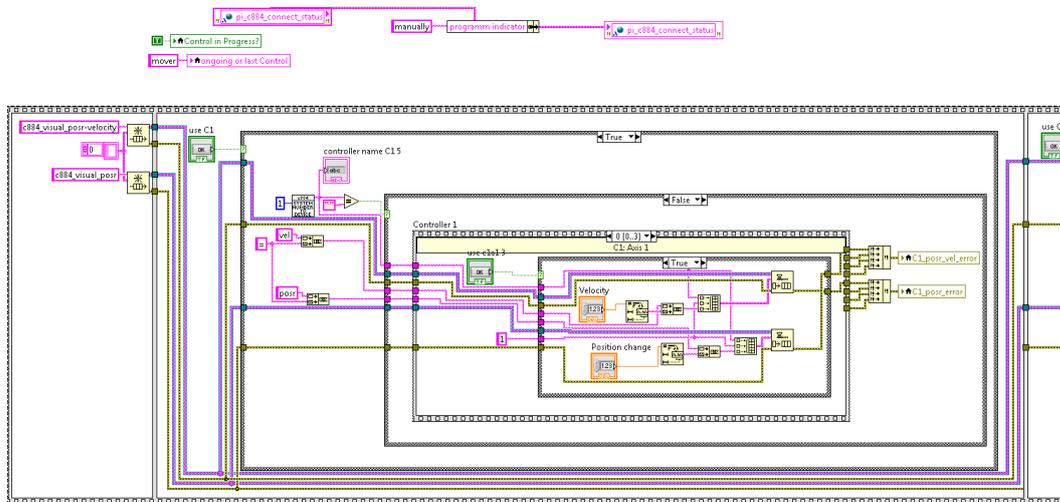


Abbildung A.2.: Der erste Teil des Blockdiagramms der relativen Bewegung zeigt die Initialisierung der Queue (erster Abschnitt der Struktur) und wie sie im Programm befüllt wird. Das Beispiel zeigt die Festlegung von Position und Geschwindigkeit für den ersten Motor des ersten Controllers.

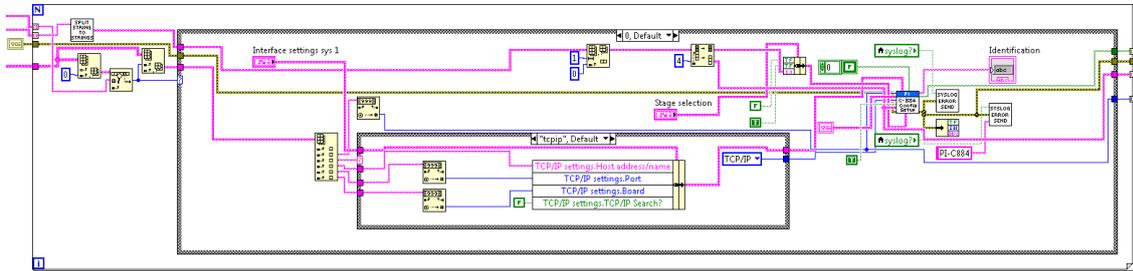


Abbildung A.5.: Initialisierung der C-884 Controller auf Basis der bereits vorliegenden Startwerte und den Parameter für den Verbindungsaufbau (hier: TCP/IP). Die mitgelieferte Routine des Herstellers ist der Kern dieser Mechanik. Die Abbildung zeigt einen kleinen Überlapp mit Grafik A.4, damit die Position der Schleife zu erkennen ist.

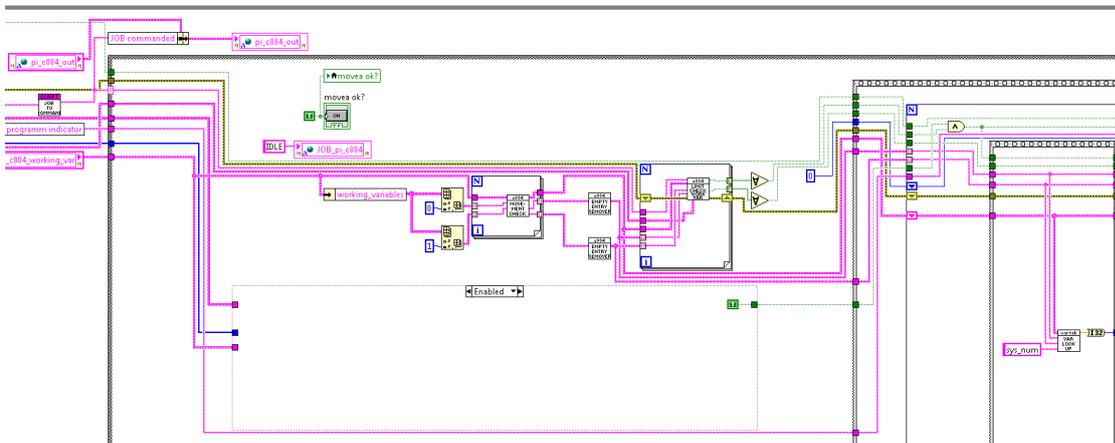


Abbildung A.6.: Nach der Initialisierung kommt das Programm an die Stelle, an der es bereit für Befehle ist. Gezeigt ist der Beginn der relativen Bewegung, an dem die Einhaltung der Grenzwerte überprüft wird.

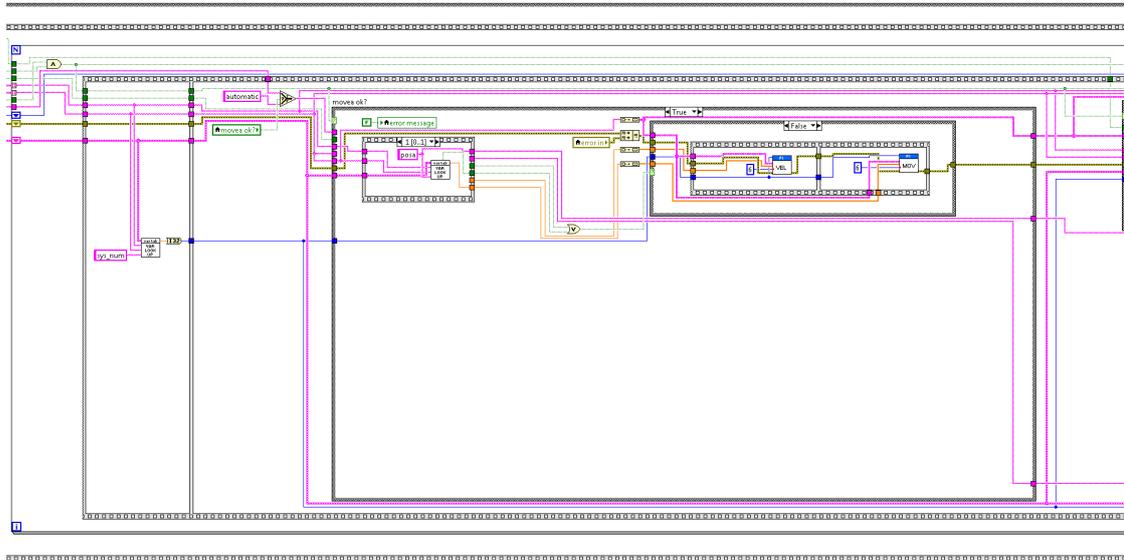


Abbildung A.7.: In Fortsetzung zu Abbildung A.6 werden hier bei Korrektheit aller Angaben die Positionsänderung und die Geschwindigkeit an den Controller gesandt und damit der Motor entsprechend bewegt. Im Kern sind die Programm des Herstellers.

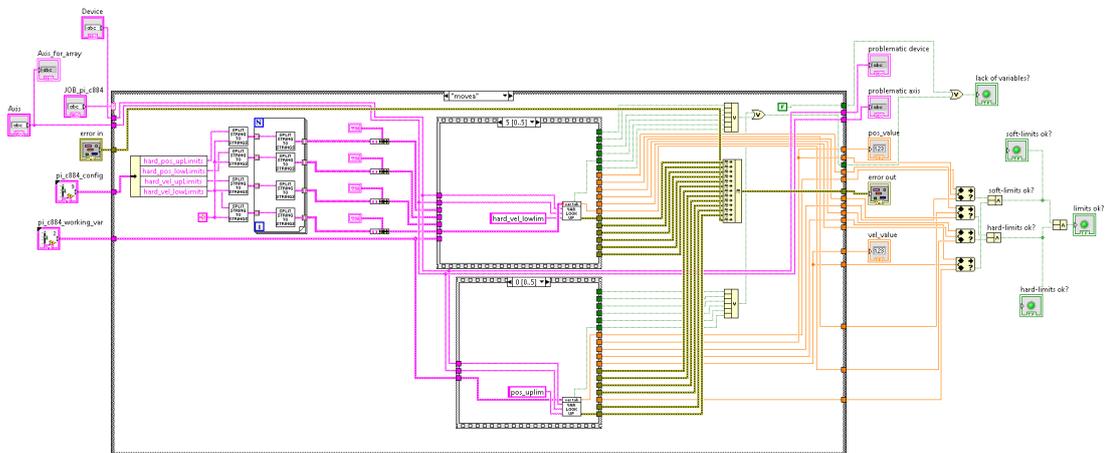


Abbildung A.8.: Die Überprüfung der Grenzwerte, eine kleine Routine in Abbildung A.6, ist hier genauer gezeigt. Es ist zu erkennen, wie die Werte der Kommunikationsvariablen auslesen und mit den in den Konfigurationsdateien spezifizierten Grenzwerten verglichen werden. Am Ende zeigen die grünen Indikatoren an, ob die Bewegung durchgeführt werden kann oder nicht.

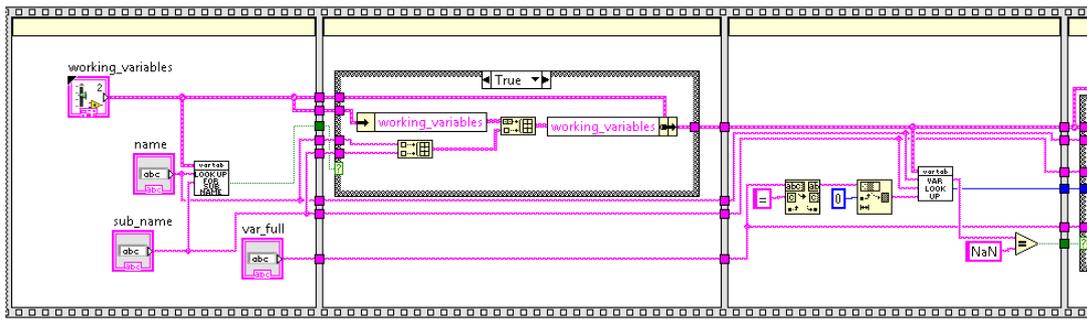


Abbildung A.9.: Beginn der Subroutine, die die Kommunikationsvariable zusammensetzt. Es wird überprüft, ob bereits ein Eintrag des entsprechenden Parameters vorhanden ist, um zwischen Ersetzen und Hinzufügen zu unterscheiden.

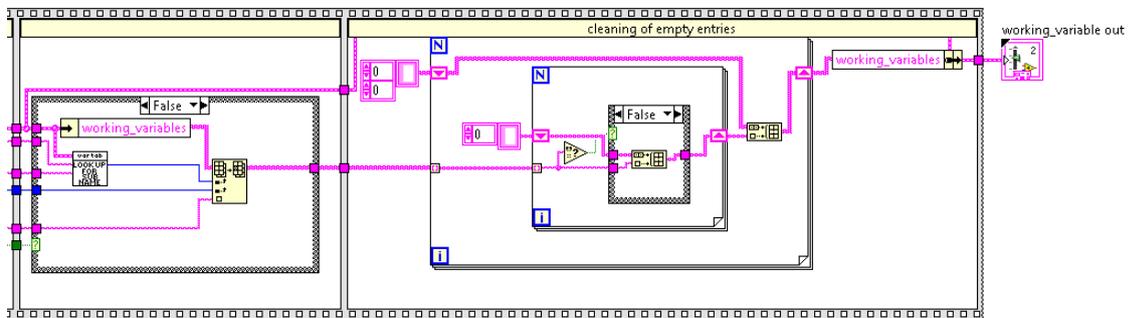


Abbildung A.10.: Das in Abbildung A.9 begonnene Programm wird hier zu Ende geführt, wobei am Ende noch leere Einträge entfernt werden. Danach wird die modifizierte Variable ausgegeben.

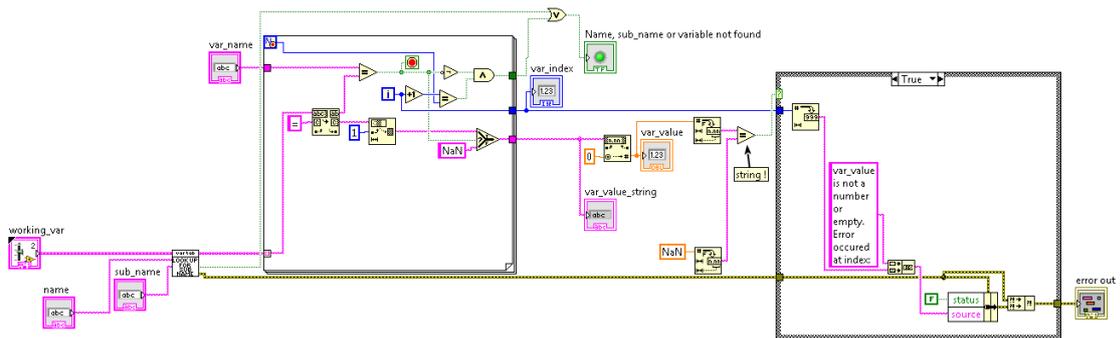


Abbildung A.11.: Häufig verwendete Subroutine zur Kommunikationsvariablen, die auch in Abbildung A.9 und A.10 verwendet wird. Sie Sucht den bereits vorhandenen Eintrag für einen Parameter heraus.

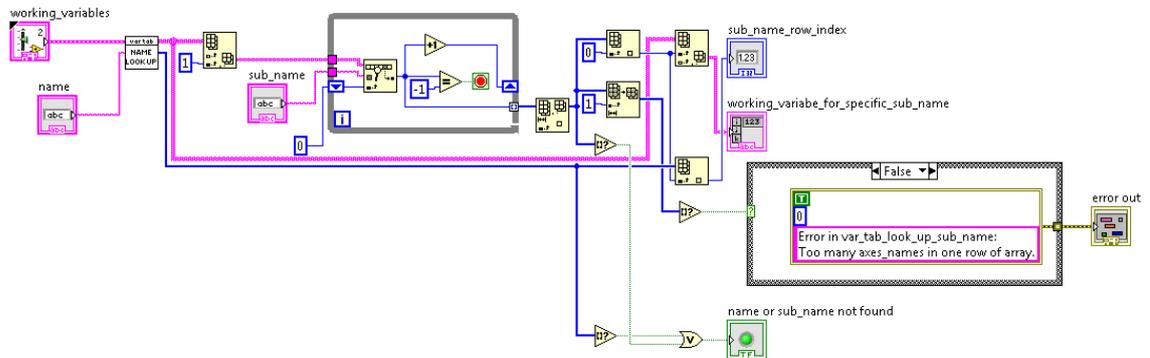


Abbildung A.12.: Dargestellt ist ein weiteres Unterprogramm von Abbildung A.11, das aber auch alleine eingesetzt wird. Es sucht das vorhandene Set an Parametern für die Kombinationen aus Controller und Motor (Name und sub-Name der allgemeinen Struktur) heraus.

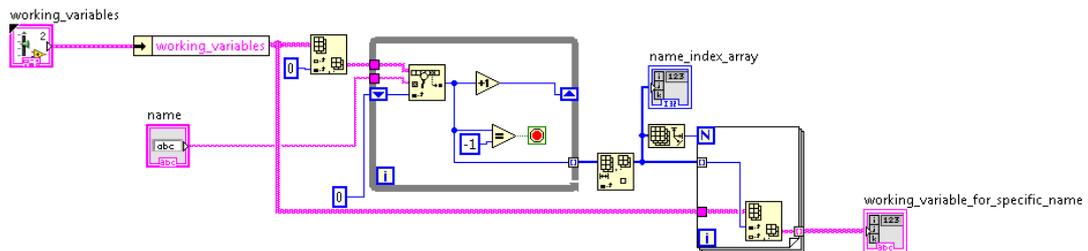


Abbildung A.13.: Unterprogramm von Abbildung A.12, das das Parameterset für alle Achsen (sub-Namen) eines Controllers (Name) herausucht.

B. Ergänzungen zu Kapitel 4

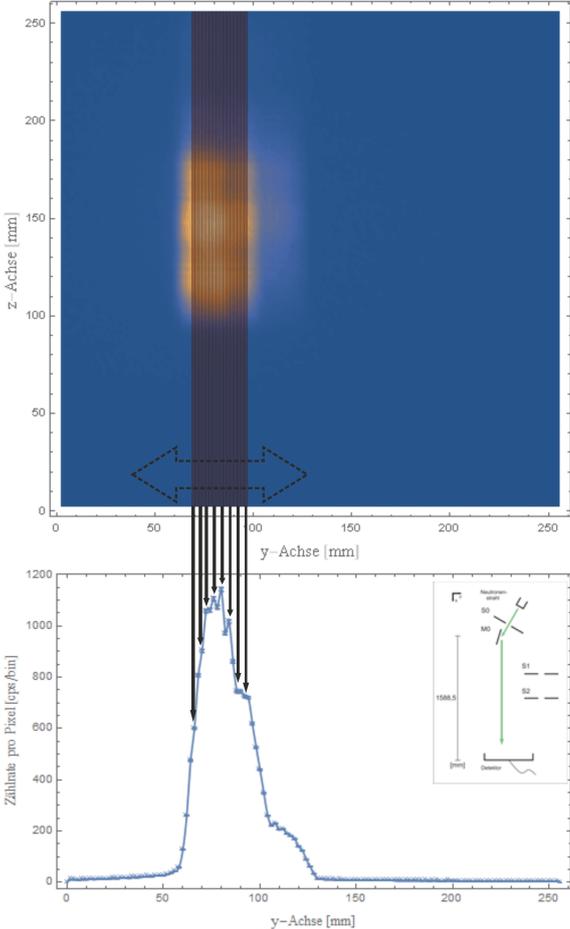


Abbildung B.1.: Schematische Darstellung zur Verdeutlichung der vertikalen Integration. Die roten Linien im oberen Bild sind jene Punkte, die aufsummiert werden und als ein Punkt mit der entsprechenden Zählrate im unteren Graphen dargestellt werden. Jeder der 129 Punkte im unteren Plot ist eine Linie im oberen. Die horizontale Summation funktioniert analog, wobei die roten Linien von links nach rechts verlaufen. Die Ergebnisse wurden anschließend interpoliert. Das Ergebnis davon ist die durchgezogene Linie zwischen den Datenpunkten.

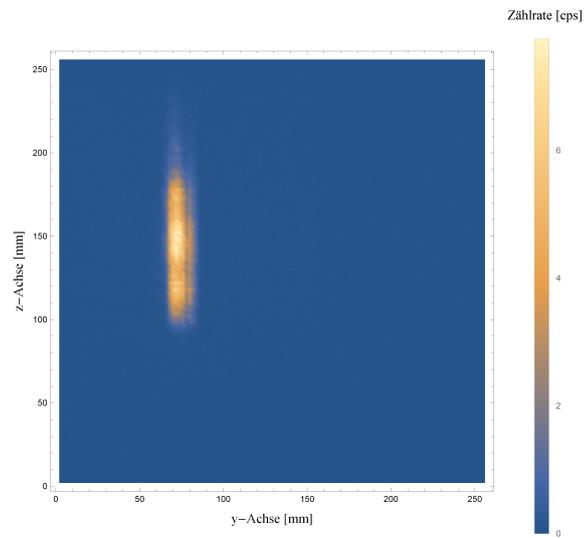


Abbildung B.2.: Das Bild der Rohdaten des Detektors für Konfiguration II. Die Daten dieses Bildes liegen den Integrationen zugrunde, aus denen die Abbildungen 4.5 und 4.6 folgen.

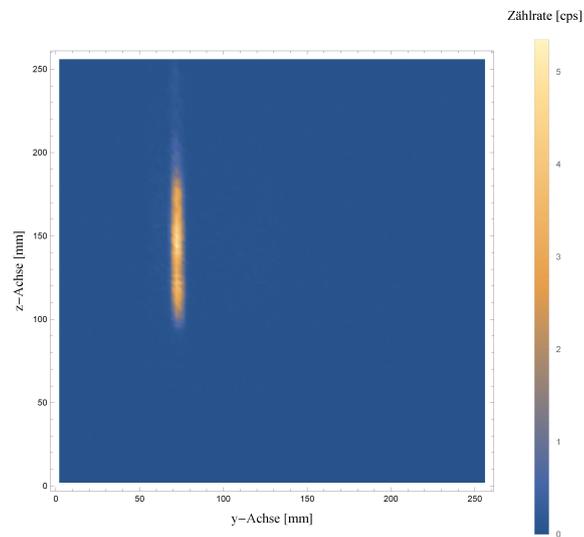


Abbildung B.3.: Das Bild der Rohdaten des Detektors für Konfiguration III. Die Daten dieses Bildes liegen den Integrationen zugrunde, aus denen die Abbildungen 4.7 und 4.8 folgen.

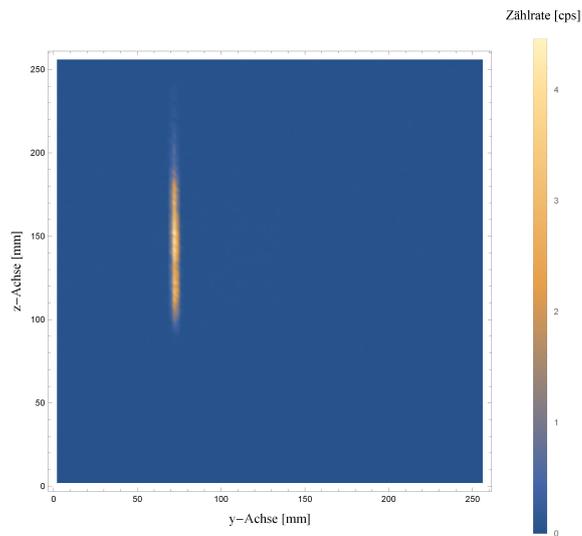


Abbildung B.4.: Das Bild der Rohdaten des Detektors für Konfiguration IV. Die Daten dieses Bildes liegen den Integrationen zugrunde, aus denen die Abbildungen 4.9 und 4.10 folgen.

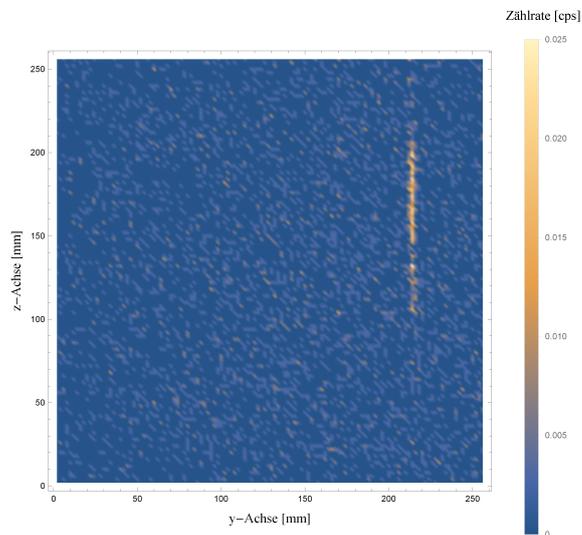


Abbildung B.5.: Das Bild der Rohdaten des Detektors für Konfiguration V. Die Daten dieses Bildes liegt der Integration zugrunde, aus der Abbildung 4.11 folgt.

C. Datenblätter

Boron Rubbers USA

Future Within Nature

[Home](#)

[About Us](#)

[Products](#)

[Technical](#)

[Contact](#)

Flexible Sheet for Thermal Neutron Shielding



This is a flexible, heat resistant, ozone resistant, lightweight polymer based containing of Boron. Boron has a very high macroscopic cross-section for thermal neutrons. Therefore the material has an extremely good attenuation factor for thermal neutrons. Hence, it provides an excellent shield against thermal neutrons. This product is also stable in vacuum.

Flex Boron sheet can easily be handled and installed by non-specialized personnel. It is readily applied to concrete or other wall materials using standard mounting technique. This flexible material can be cut and shaped using an ordinary knife and scissors.

Specification of Standard Sheet

Size	1 m W x 2m L x 3mm (± 0.3 mm)
Boron Contents	41 %
Attenuation Factor	287
Temperature Limit	140 °C
Density	1.41 ± 0.02 g/cc

Sheet available in different Size :

500 cm x 500 cm
500 cm x 1000 cm
500 cm x 2000 cm
1000 cm x 1000 cm
1000 cm x 2000 cm

On customer specification the Product is also available in

- Variable Size
- Variable Thickness (3.0 mm to 25 mm)
- Variable Boron Content = (5% to 52%)
- Variable Thermal attenuation factor
- Variable Shapes

Application : As a Thermal Neutron shield in

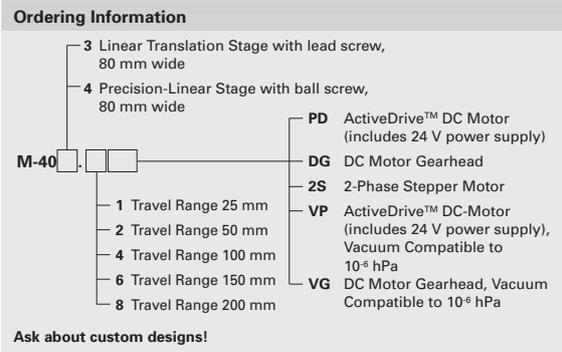
- Neutron Instrumentation
- Nuclear Spectroscopy
- Nuclear Therapy
- Nuclear Power Plant
- Beam Lines
- Transport Storage and packing

Copyright © 2014 [Boron Rubbers USA](#)



M-403 · M-404 Precision Translation Stage

Cost-Effective, Large Choice of Drives & Travel Ranges



- For Cost-Sensitive Precision Positioning Applications
- Travel Ranges 25 to 200 mm
- Resolution to 0.012 μm
- Min. Incremental Motion to 0.1 μm
- Preloaded Precision Leadscrew or Recirculating Ball Screw Drives Provide High Speeds & Long Lifetimes
- Stress-Relieved Aluminum Base for Highest Stability
- Vacuum-Compatible Versions Available
- M-413 and M-414 Versions for Higher Load Requirements

The M-403 and M-404 linear translation stage series provide cost-effective solutions for precision positioning of loads up to 20 kg over travel ranges to 200 mm. They are designed with high-value components and feature a precision-machined, high-density, stress-relieved aluminum base for exceptional stability with minimum weight.

The highly precise M-403 drive includes a preloaded lead screw, providing a minimum incremental motion of 0.2 μm. For higher velocities and long lifetime, the M-404 versions feature a low-friction ball screw

offering a minimum incremental motion down to 0.1 μm. Three motor drive options allow easy adaptation to different automation applications.

Five travel ranges from 25 to 200 mm are offered. The stages can carry up to 20 kg and push/pull up to 50 N. Special versions for vacuum applications are also available (see ordering information).

Maintenance-Free, High Guiding Precision

All models are equipped with high-precision linear guiding rails and recirculating ball bearings. The recirculating ball bearings are maintenance free and immune to cage migration. The choice of components and careful mounting guarantees high load capacity, longer lifetime and high guiding accuracy. Additionally, in the M-404 series the bearings are polished to achieve the optimum guiding accuracy.

Application Examples

- Automation
- R&D
- Semiconductor technology
- Metrology
- Quality assurance testing

Low Cost of System Ownership

The combination of these stages with the networkable single-axis C-863 Mercury™ (see p. 4-114) and C-663 Mercury™ Step (see p. 4-112) controllers offers high performance for a very competitive price in both single and multi-axis configurations. Alternatively, the C-843 motion controller PCI card with on-board servo amplifiers is available.

Three Motor Drive Options

The top-of-the-line M-40x.xPD high-speed versions come equipped with the high-performance ActiveDrive™ system. The ActiveDrive™ design, developed by PI, features a high-efficiency PWM (pulse width modulation) servo-amplifier mounted side-by-side with the DC motor and offers several advantages:

- Increased efficiency, by eliminating power losses between the amplifier and motor
- Reduced cost of ownership and improved reliability, because no external driver is required
- Elimination of PWM amplifier noise radiation, by mounting the amplifier and motor together in a single, electrically shielded case

M-40x.xDG models are equipped with a DC motor and a shaft-mounted optical encoder, providing a minimum incremental motion of down to 0.1 μm. M-40x.x2S models feature a cost-effective direct-drive, 2-phase stepper motor, providing very smooth operation and a resolution of 0.16 μm.

Limit and Reference Switches

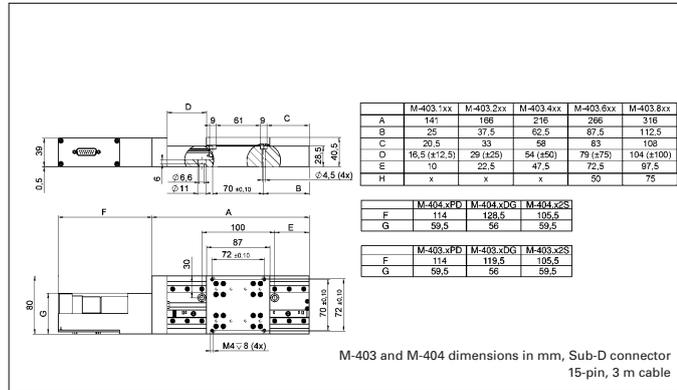
For the protection of your equipment, non-contact Hall-effect limit and reference switches are installed. The direction-sensing reference switch supports advanced automation applications with high precision.

Other Family Members

The M-403/M-413 and M-404/M-414 series of linear stages form a modular system. The M-403 is the basic family, providing travel ranges from 25 to 200 mm. M-413 is designed for higher loads with travel ranges from 100 to 300 mm. The M-404 and M-414 stages have the same travel ranges and load capacities, but offer higher precision and more speed.

© Physik-Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2009. Subject to change without notice. All data are superseded by any new release. The newest release for data sheets is available for download at www.pi.ws. RZ 09/12/07.0

Moving the NanoWorld | www.pi.ws



Technical Data

Model	M-404.xPD	M-404.xDG	M-404.x2S	M-403.xPD	M-403.xDG	M-403.x2S	Units
Motion and positioning							
Travel range	for all models: 25 / 50 / 100 / 150 / 200 mm (see Order Information)						
Integrated sensor	Rotary encoder	Rotary encoder	—	Rotary encoder	Rotary encoder	—	
Sensor resolution	4000	2000	—	4000	2000	—	Cts./rev.
Design resolution	0.25	0.012	0.16**	0.25	0.018	0.16**	µm
Min. incremental motion	0.25	0.1	0.2	0.25	0.2	0.2	µm
Backlash	0.5	2	2	6	10	6	µm
Unidirectional repeatability	0.5	1	1	1	1	1	µm
Pitch***	±75	±75	±75	±200	±200	±200	µrad
Yaw***	±75	±75	±75	±200	±200	±200	µrad
Max. velocity	50	1.5	3	10*	2.5	3	mm/s
Origin repeatability	1	1	1	1	1	1	µm
Mechanical properties							
Spindle	Recirculating ballscrew	Recirculating ballscrew	Recirculating ballscrew	Leadscrew	Leadscrew	Leadscrew	
Spindle pitch	1	1	1	1	1	1	mm
Gear ratio	—	42.92063:1	—	—	28.44444:1	—	
Motor resolution**	—	—	6400**	—	—	6400**	steps/rev.
Stiffness in motion direction	3500	3500	3500	3500	3500	3500	N/µm
Max. load	200	200	200	200	200	200	N
Max. push/pull force	100	100	100	50	50	50	N
Max. lateral force	100	100	100	100	100	100	N
Drive properties							
Motor type	ActiveDrive™ DC Motor	DC-motor, gearhead	2-phase stepper motor**	ActiveDrive™ DC Motor	DC-motor, gearhead	2-phase stepper motor**	
Operating voltage	24	0-12	24	24	0-12	24	V
Electrical power	26	2.5	4.8	26	2.5	4.8	W
Torque	50	3	200	50	3	200	Ncm
Limit and reference switches	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	
Miscellaneous							
Operating temperature range	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	°C
Material	for all models: Aluminum (black anodized)						
Mass (depends on dimensions/travel range)	1.7 / 1.8 / 2.1 / 2.2 / 2.5 kg						
Recommended controller/driver	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-663 (single-axis)	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-663 (single-axis)	

*Max. recommended velocity

**2-phase stepper motor, 24 V chopper voltage, max. 0.8 A/phase, 400 full steps/rev., motor resolution with C-663 stepper motor controller

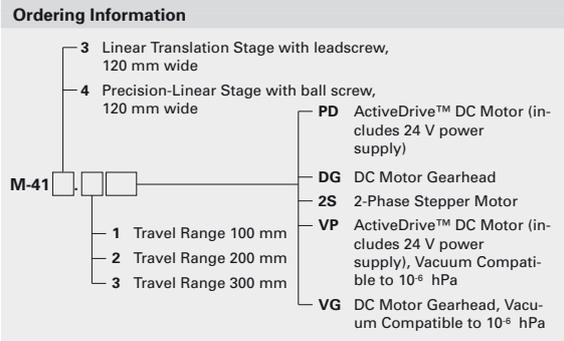
*** For travels >100 mm, the pitch/yaw value is valid for every 100 mm.

Data for vacuum versions may differ.



M-413 · M-414 High-Load Precision Stage

Cost-Effective, Large Choice of Drives & Travel Ranges, Loads to 50 kg



- For Cost-Sensitive Precision Positioning Applications
- Travel Ranges 100 to 300 mm
- Resolution to 0.018 µm
- Min. Incremental Motion to 0.1 µm
- Preloaded Precision Leadscrew or Recirculating Ball Screw Drives Provide High Speeds & Long Lifetimes
- Stress-Relieved Aluminum Base for Highest Stability
- Vacuum-Compatible Versions Available
- M-403 and M-404 Versions for Reduced Load Requirements

The M-413 and M-414 linear translation stage series provide cost effective solutions for precision positioning of higher loads up to 50 kg over travel ranges up to 300 mm. They are designed with a precision-machined, high-density, stress-relieved aluminum base for exceptional stability and robustness. The highly precise M-413 drive includes a preload-ed leadscrew, providing a minimum incremental motion of 0.2 µm.

High Resolution Ball Screws & Lead Screws

For higher velocities and a long lifetime the M-414 versions fea-

Application Examples

- Automation
- R&D
- Semiconductor technology
- Metrology
- Quality assurance testing

ture a low-friction ball screw offering a minimum incremental motion down to 0.1 µm. Three motor drive options allow the optimum adaptation to the requirements of different automation applications. M-413s and M-414s are available in 3 lengths providing travel ranges from 100 to 300 mm. The stages can carry up to 50 kg and push/pull up to 50 N. Special versions for vacuum applications are available (see ordering information).

Maintenance-Free, High Guiding Precision

All models are equipped with high-precision linear guiding rails and recirculating ball bearings. The recirculating ball bearings are maintenance free and immune to cage migration. The choice of components and careful mounting guarantees high load capacity, longer lifetime and high guiding accuracy. Additionally the bearings are

polished to guide the carriage with optimum straightness and flatness.

Low Cost of System Ownership

The combination of these stages with the networkable single-axis C-863 Mercury™ (see p. 4-114) and C-663 Mercury™ Step (see p. 4-112) controllers offers high performance for a very competitive price in both single and multi-axis configurations. Alternatively, the C-843 motion controller PCI card with on-board servo amplifiers (!) is available.

Three Motor Drive Options

M-41x.xPD high-speed versions come equipped with the high-performance ActiveDrive™ system. The ActiveDrive™ design, developed by PI, features a high-efficiency PWM (pulse width modulation) servo-amplifier mounted side-by-side with the DC motor and offers several advantages:

- Increased efficiency, by eliminating power losses between the amplifier and motor
- Reduced cost of ownership and improved reliability, because no external driver is required
- Elimination of PWM amplifier noise radiation, by mounting the amplifier and

motor together in a single, electrically shielded case

M41x.xDG models are equipped with a DC motor with a low-backlash gearhead and a shaft-mounted optical encoder to give a minimum incremental motion of 0.1 µm.

M-41x.x2S models feature a cost-effective direct-drive, 2-phase stepper motor, providing very smooth operation and a resolution of 0.2 µm.

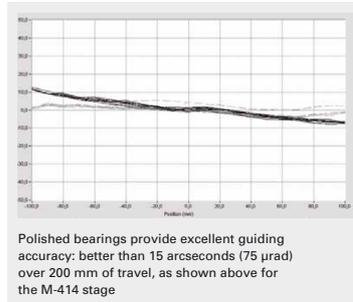
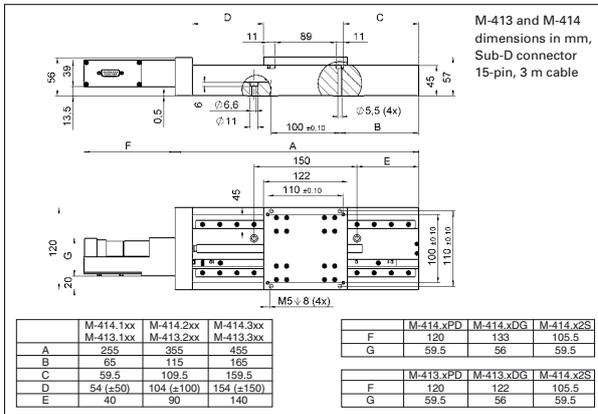
Limit and Reference Switches

For the protection of your equipment, non-contact Hall-effect limit and reference switches are installed. The direction-sensing reference switch supports advanced automation applications with high precision.

Other Family Members

The M-403/M-413 and M-404/M-414 series of linear stages form a modular system. The M-403 is the basic family, providing travel ranges from 25 to 200 mm. M-413 is designed for higher loads with travel ranges from 100 to 300 mm. The M-404 and M-414 stages have the same travel ranges and load capacities, but offer higher precision and more speed.

© Physik-Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2009. Subject to change without notice. All data are superseded by any new release. The newest release for data sheets is available for download at www.pi.ws. R2 09/12/07.0



Technical Data

Model	M-414.xPD	M-414.xDG	M-414.x2S	M-413.xPD	M-413.xDG	M-413.x2S	Units
Motion and positioning							
Travel range	for all models: 100 / 200 / 300 mm (see Ordering Information)						
Integrated sensor	Rotary encoder	Rotary encoder	–	Rotary encoder	Rotary encoder	–	
Sensor resolution	4000	2000	–	4000	2000	–	cts/rev.
Design resolution	0.5	0.023	0.31	0.25	0.018	0.16	µm
Min. incremental motion	0.5	0.1	0.4	0.25	0.2	0.2	µm
Backlash	0.5	4	2	6	10	6	µm
Unidirectional repeatability	0.5	1	1	1	1	1	µm
Pitch**	±100	±100	±100	±300	±300	±300	µrad
Yaw**	±100	±100	±100	±300	±300	±300	µrad
Max. velocity	100	3	6	10 [#]	2.5	3	mm/s
Origin repeatability	1	1	1	1	1	1	µm
Mechanical properties							
Spindle	Recirculating ballscrew	Recirculating ballscrew	Recirculating ballscrew	Leadscrew	Leadscrew	Leadscrew	
Spindle pitch	2	2	2	1	1	1	mm
Gear ratio	–	42.92063:1	–	–	28.44444:1	–	
Motor resolution	–	–	6400*	–	–	6400*	steps/rev.
Stiffness in motion direction	6000	6000	6000	6000	6000	6000	N/µm
Max. load	500	500	500	500	500	500	N
Max. push/pull force	200	200	150	50	50	50	N
Max. lateral force	200	200	200	200	200	200	N
Drive properties							
Motor type	ActiveDrive™ DC motor	DC motor, gearhead	2-phase stepper motor*	ActiveDrive™ DC motor	DC motor, gearhead	2-phase stepper motor*	
Operating voltage	24	0–12	24	24	0–12	24	V
Electrical power	70	3.6	4.8	70	3.6	4.8	W
Torque	80	3	200	80	3	200	Ncm
Limit and reference switches	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	Hall-effect	
Miscellaneous							
Operating temperature range	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	-20 to +65	°C
Material	for all models: Aluminum (black anodized)						
Mass (depends on dimensions/travel range)	4.4 / 5.4 / 6.6	4.2 / 5.2 / 6.4	4.4 / 5.4 / 6.6	4.4 / 5.4 / 6.6	4.2 / 5.2 / 6.4	4.4 / 5.4 / 6.6	kg
Recommended controller/driver	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-663 (single-axis)	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-863 (single-axis) C-843 PCI board (up to 4 axes)	C-663 (single-axis)	

Data for vacuum versions may differ.
 *2-phase stepper motor, 24 V chopper voltage, max. 0.8 A/phase, 400 full steps/rev., motor resolution with C-663 stepper motor controller
 #Max. recommended velocity
 **For travels >100 mm, the pitch/yaw value is valid for every 100 mm.

Four Axis Motion Controller

FOR DC MOTORS AND BRUSHLESS DC MOTORS



C-884

- + High- speed encoder input up to 50 MHz
- + Non- volatile memory for stand- alone operation
- + Data recorder
- + Interfaces: TCP/ IP, USB and RS-232
- + USB interface for human interface devices
- + Digital I/ O ports (TTL)
- + Control signal for motor brake

Digital motion controller for DC servo motors

4 channels. Dual core architecture for increased performance and flexibility by separating command processing and PID position control. Simple adaptation / extension for OEM products possible.

Motion control of PI positioning systems with DC motors: direct motor control, PWM control for PI positioning stages with integrated ActiveDrive amplifiers or for stages with integrated block commutation (brushless motors). Supports motor brake

Extensive functionality

Powerful macro command language. Non- volatile macro storage, e. g. for stand- alone functionality with autostart macro. Data recorder. Parameter changes on the fly. Extensive software support, e. g. for LabVIEW, shared libraries for Windows and Linux

Mercury class motion controller

Interfaces: TCP/ IP, USB and RS-232 for commands. A/ B (quadrature) encoder input. TTL inputs for limit and reference point switches. I/ O ports (analog / digital) for automation. USB interface for HID compliant devices. Delivery scope including wide- range power supply, USB and RS-232 cable, network cable

Specifications

C-884.4DB	
Function	Position control for closed- loop DC motors
Channels	4
Processor	Dual core architecture. Controller on DSP core, with extendable command interpreter on Linux ARM core
Motion and control	
Servo characteristics	PID controller, parameter changes on the fly
Servo cycle time	50 μ s
Profile generator	Trapezoid velocity profile
Encoder input	AB (quadrature) single- ended or differential TTL signal acc. to RS-422; 50 MHz
Stall detection	Servo off, triggered by programmable position error
Limit switches	2 \times TTL per channel (polarity programmable)
Reference point switch	1 \times TTL per channel
Motor brake	1 \times TTL per channel, software controlled
Electrical properties	
Max. output voltage*	4 PWM full bridges with ± 2.5 A maximum output current each for direct motor control
Max. output power	240 W
Current limitation	2.5 A per channel
Interface and operation	
Communication interfaces	TCP/ IP; RJ45/ EthernetUSB: Mini- USB type BRS-232: Sub- D 9- pin (m)
Motor connector	4 \times Sub- D, 15- pin (f)
I/ O ports	4 analog in (-10 to 10 V)4 digital in (5 V TTL)4 digital out (5 V TTL)
Command set	PI General Command Set (GCS)
User software	PI MikroMove
Software drivers	LabVIEW driver, shared libraries for Windows and Linux
Supported functionality	Linear vector motion, point- to- point motion; start- up macro, data recorder for recording parameters as motor input voltage, velocity, position or position error
Manual control	USB interface for HID compliant devices
Miscellaneous	
Operating voltage	External power supply 24 V / 5 A (120 W) included in scope of delivery
Max. operating current	1 mA plus motor current (max. 11 A)
Operating temperature range	5 to 50°C
Mass	2.5 kg
Dimensions	320 mm \times 150 mm \times 80.5 mm (incl. mounting rails)

* The output voltage depends on the connected power supply.

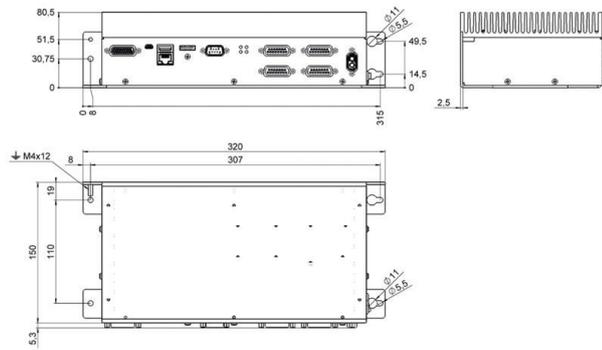
Order Information

C-884.4DB
DC Motor Controller, 4 Channels, TCP/ IP, USB and RS-232 Interface

Related Products

[C-863 Mercury Servo Controller](#)

Drawings / Images

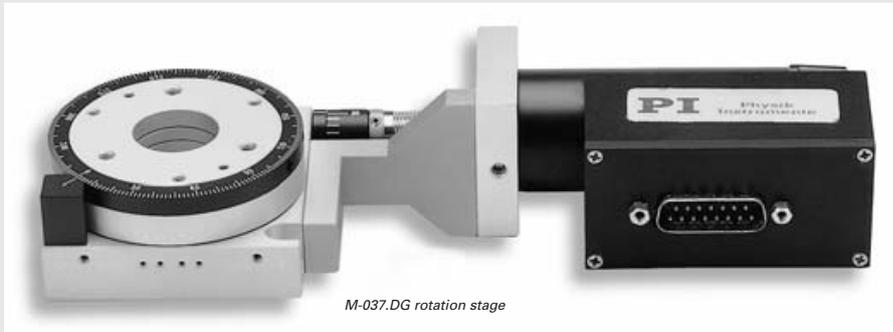


C-884, dimensions in mm



M-037

Rotation Stages with Worm Gear Drive



M-037.DG rotation stage

ActiveDrive™

The top model, M-037.PD, is equipped with a 30 Watt ActiveDrive™ DC motor providing 9 µrad minimum incremental motion and velocity to 45 deg/sec. The novel ActiveDrive™ concept features an integrated, high-efficiency servo-amplifier increasing dynamic performance and reliability while reducing cost of ownership, because no external driver is required.

Ordering Information

M-037.00

Rotation Stage, Ø 60 mm, > 360°, Manual Drive

M-037.DG

Rotation Stage, Ø 60 mm, > 360°, Closed-Loop DC Motor / Gearhead Drive

M-037.PD

Rotation Stage, Ø 60 mm, > 360°, ActiveDrive™ DC Motor (Includes Power Supply)

M-037.2S

Rotation Stage, Ø 60 mm, > 360°, 2-Phase Stepper Motor Drive

Custom Designs for Volume Buyers

- Ultra-High Resolution
- Compact Design
- Continuous Rotation Range
- Preloaded Worm Drive for Zero Backlash
- ActiveDrive™ DC Motor, Stepper Motor and Manual Versions
- Compatible with Leading Industrial Motion Controllers
- 20 mm Ø Clear Aperture

M-037 rotation stages are equipped with ultra-precise worm gear drives allowing unlimited rotation in either direction. An integrated spring preload eliminates backlash. The worm gear ratio is 180:1, corresponding to a turntable rotation of 2 degrees per revolution of the drive shaft. Coarse position can be read from an adjustable scale ring on the outer edge of the turntable graduated in 2 degree increments and a drive shaft mounted indicator with 0.1 degree graduations.

DC motor and stepper motor drives are available.

M-037.DG features a 3 Watt DC motor with 29.6:1 backlash free gearhead and a

2000 counts/revolution encoder, mounted on the motor shaft. M-037.2S is equipped with a 2-phase stepper motor providing 20,000 micro-steps/revolution. 5-phase stepper motors are available on request.

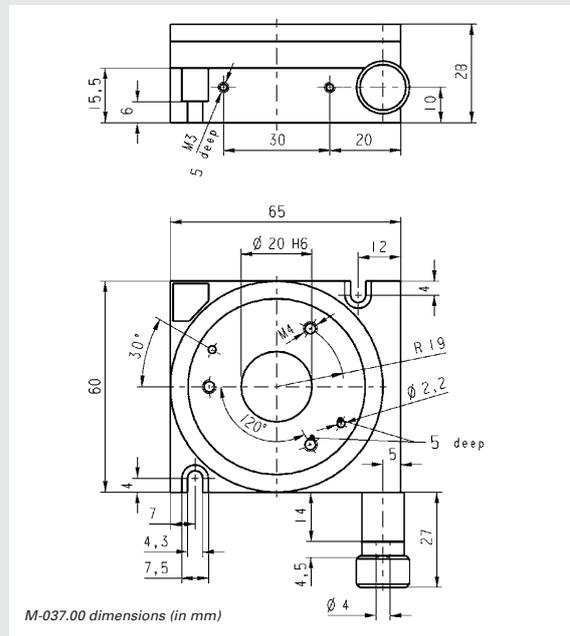
Each M-037 stage is individually broken in before delivery to achieve the exceptional mechanical precision.



M-037.00 rotation stage

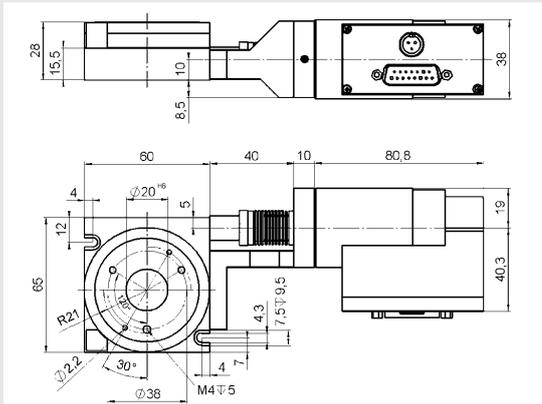
Notes

See "Accessories," page 7-82 ff. for adapters, brackets, etc.

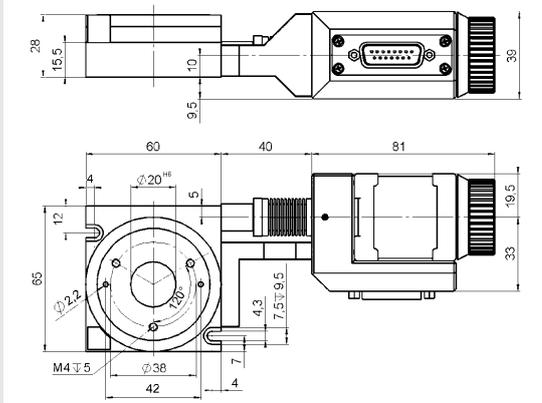


M-037.00 dimensions (in mm)

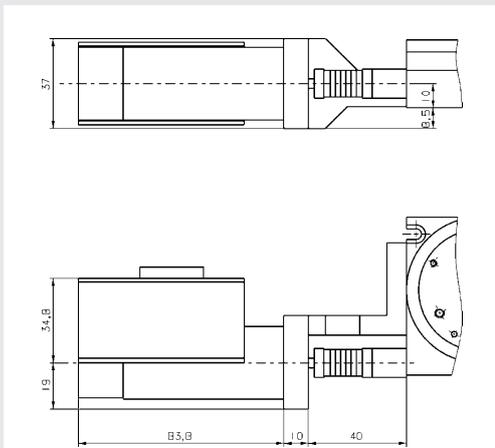
<http://www.pi.ws>
info@pi.ws



M-037.PD dimensions (in mm)



M-037.2S dimensions (in mm)



M-037.DG dimensions (in mm)

- PZT Actuators
- PZT Flexure NanoPositioners
- PZT Active Optics / Steering Mirrors
- Tutorial: Piezoelectrics...
- Capacitive Position Sensors
- PZT Control Electronics
- MicroPositioners / Hexapod Systems**
- Photonics Alignment & Packaging Systems
- Motor Controllers
- Index

<http://www.pi.ws>
info@pi.ws

Technical Data

Models	M-037.00	M-037.DG	M-037.PD	M-037.2S	Units	Notes see p. 7-96
Rotation range	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous		
Design resolution	-	0.59 (34 x 10 ⁻⁴)	8.75 (0.0005)	1.75 (0.0001)	µrad (deg)	A3
Min. incremental motion	-	5	8.75	17.5	µrad	A4
Unidirectional repeatability	-	30	30	30	µrad	
Backlash	-	200	200	200	µrad	
Max. velocity	-	6	45	10	deg/sec	
Wobble	< 150	< 150	< 150	< 150	µrad	
Maximum axial force	±300	±300	±300	±300	N	
Maximum torque (θ _z , θ _y)	±3	±3	±3	±3	Nm	
Maximum torque CW**	1	1	1	1	Nm	
Maximum torque CCW**	0.5	0.5	0.5	0.5	Nm	
Encoder resolution	-	2000	4000	-	counts/rev.	
Motor resolution	-	-	-	20000*	steps/rev.	
Gear ratio	-	(28/12) ² : 1 ≈ 29.6:1	-	-		
Worm Gear ratio	180:1	180:1	180:1	180:1		
Nominal motor power	-	3	30 ***	- *	W	
Motor voltage range	-	0 to ±12	0 to ±24	24 *	V	
Weight	0.3	0.65	0.62	0.64	kg	
Body material	Al	Al	Al	Al		L
Recommended motor controller	-	C-842, C-844, C-860	C-842, C-844, C-860	C-600, C-630		D2

* 2-phase stepper, 24 V chopper voltage, max. 1.5 A / phase, 20,000 microsteps with C-600, C-630 controllers;
 ** CW: clockwise; CCW: counter-clockwise;
 *** ActiveDrive™ (integrated PWM servo amplifier)

Präzisionsdrehtisch

UNBEGRENZT IM STELLBEREICH



M-060 • M-061 • M-062

- + Unbegrenzter Stellbereich
- + Sehr hohe Auflösung
- + Höchstgeschwindigkeit 90°/s
- + Spielfrei vorgespannter Schneckenantrieb
- + ActiveDrive DC- Motor, Schrittmotor oder manueller Antrieb
- + Richtungserkennender Referenzschalter

Spezifikationen

	M-060.M0 / M-061.M0 / M-062.M0	M-060.PD / M-061.PD / M-062.PD	M-060.DG / M-061.DG / M-062.DG	M-060.2S / M-061.2S / M-062.2S	Einheit	Toleranz
Aktive Achsen	Rotation	Rotation	Rotation	Rotation		
Bewegung und Positionieren						
Rotationsbereich	>360	>360	>360	>360	°	
Integrierter Sensor	–	Rotationsencoder	Rotationsencoder			
Sensorauflösung	–	4000	2000		Imp./U	
Rechnerische Auflösung	–	32 (0,0018) / 17,5 (0,001) / 15 (0,0008)	2,1 (0,00012) / 1,2 (6,9 x 10 ⁻⁵) / 0,96 (5,5x10 ⁻⁵)	19,7 (0,0011) / 10,9 (0,00063) / 8,9 (0,00051)*	µrad (°)	
Kleinste Schrittweite	–	32 / 17,5 / 15	6,3 / 6 / 5	40 / 20 / 18*	µrad	
Umkehrspiel	–	200 / 200 / 240	200 / 200 / 240	200 / 200 / 240	µrad	
Unidirektionale Wiederholgenauigkeit	–	50 / 50 / 60	50 / 50 / 60	50 / 50 / 60	µrad	
Geschwindigkeit	–	90	16 / 9 / 7,3	36 / 20 / 16	°/s	max.
Mechanische Eigenschaften						
Schneckengetriebe-Untersetzung	50:1 / 90 : 1 / 110:1	50:1 / 90 : 1 / 110:1	50:1 / 90 : 1 / 110:1	50:1 / 90 : 1 / 110:1		
Getriebeuntersetzung	–	–	(28/12) 4:129,6:1	–		
Motorauflösung	–	–	–	6.400*	Schritte/ U	
Belastbarkeit / Axialkraft	±500 / ±550 / ±650	±500 / ±550 / ±650	±500 / ±550 / ±650	±500 / ±550 / ±650	N	
Drehmoment θ_x, θ_y	±6 / ±6 / ±7	±6 / ±6 / ±7	±6 / ±6 / ±7	±6 / ±6 / ±7	Nm	max.
Drehmoment θ_z	±4 / ±6 / ±8	±4 / ±6 / ±8	±4 / ±6 / ±8	±4 / ±6 / ±8	Nm	max.
Antriebs-eigenschaften						
Motortyp	–	DC- Motor, ActiveDrive	DC- Getriebemotor	2- Phasen-Schrittmotor**		
Betriebsspannung	–	24 (PWM)	12 differenziell	24	V	
Motorleistung	–	30	3	–	W	
Referenzschalter	Hall- Effekt	Hall- Effekt	Hall- Effekt	Hall- Effekt		
Anschlüsse und Umgebung						
Betriebstemperaturbereich	-20 bis 65	-20 bis 65	-20 bis 65	-20 bis 65	°C	
Material	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium		

Masse	0,42 / 1,36 / 2,24	0,94 / 1,88 / 2,76	0,94 / 1,88 / 2,76	0,96 / 1,9 / 2,78	kg
Empfohlene Controller / Treiber		C-863 (einachsig) C-843 PCI- Karte (bis 4 Achsen)	C-863 (einachsig) C-843 PCI- Karte (bis 4 Achsen)	C-663 (einachsig)	

Bestellinformation

- M-060.PD**
Präzisionsdrehtisch, Ø 60 mm, 360°, ActiveDrive DC- Motor
- M-060.PDV**
Präzisionsdrehtisch, Ø 60 mm, 360°, ActiveDrive DC- Motor, vakuumkompatibel bis 10⁻⁶ hPa
- M-060.DG**
Präzisionsdrehtisch, Ø 60 mm, 360°, geregelter DC- Getriebemotor
- M-060.DGV**
Präzisionsdrehtisch, Ø 60 mm, 360°, DC- Getriebemotor, vakuumkompatibel bis 10⁻⁶ hPa
- M-060.2S**
Präzisionsdrehtisch, Ø 60 mm, 360°, 2- Phasen- Schrittmotor
- M-060.M0**
Präzisionsdrehtisch, Ø 60 mm, 360°, manueller Antrieb
- M-061.PD**
Präzisionsdrehtisch, Ø 100 mm, 360°, ActiveDrive DC- Motor
- M-061.PDV**
Präzisionsdrehtisch, Ø 100 mm, 360°, ActiveDrive DC- Motor, vakuumkompatibel bis 10⁻⁶ hPa
- M-061.DG**
Präzisionsdrehtisch, Ø 100 mm, 360°, geregelter DC- Getriebemotor
- M-061.DGV**
Präzisionsdrehtisch, Ø 100 mm, 360°, geregelter DC- Getriebemotor, vakuumkompatibel bis 10⁻⁶ hPa
- M-061.2S**
Präzisionsdrehtisch, Ø 100 mm, 360°, 2- Phasen- Schrittmotor
- M-061.M0**
Präzisionsdrehtisch, Ø 100 mm, 360°, manueller Antrieb
- M-062.PD**
Präzisionsdrehtisch, Ø 120 mm, 360°, ActiveDrive DC- Motor
- M-062.PDV**
Präzisionsdrehtisch, Ø 120 mm, 360°, ActiveDrive DC- Motor, vakuumkompatibel bis 10⁻⁶ hPa
- M-062.DG**
Präzisionsdrehtisch, Ø 120 mm, 360°, geregelter DC- Getriebemotor
- M-062.DGV**
Präzisionsdrehtisch, Ø 120 mm, 360°, geregelter DC- Getriebemotor, vakuumkompatibel bis 10⁻⁶ hPa
- M-062.2S**
Präzisionsdrehtisch, Ø 120 mm, 360°, 2- Phasen- Schrittmotor
- M-062.M0**
Präzisionsdrehtisch, Ø 120 mm, 360°, manueller Antrieb

Sonderausführungen auf Anfrage.

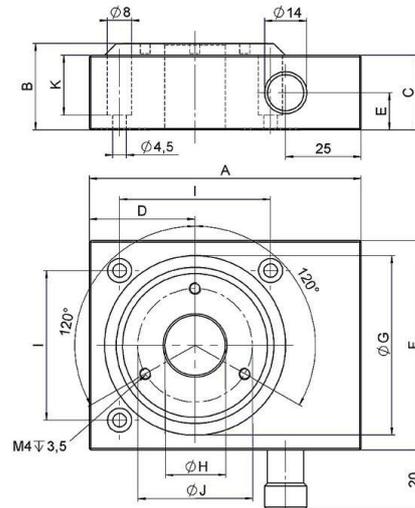
Controller / Treiber / Verstärker

- [C-863 Mercury Servocontroller](#)
- [C-884 Vierkanaliger Motion Controller](#)
- [C-663 Mercury Step Controller](#)
- [C-843 DC- Servomotorcontroller](#)

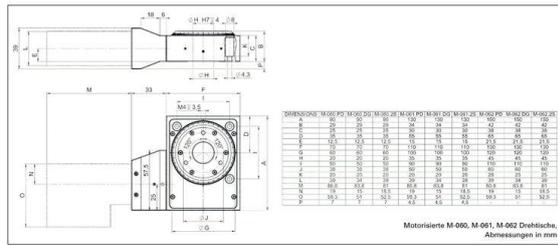
Verwandte Produkte

- [M-660 Rotationstisch mit Direktantrieb](#)

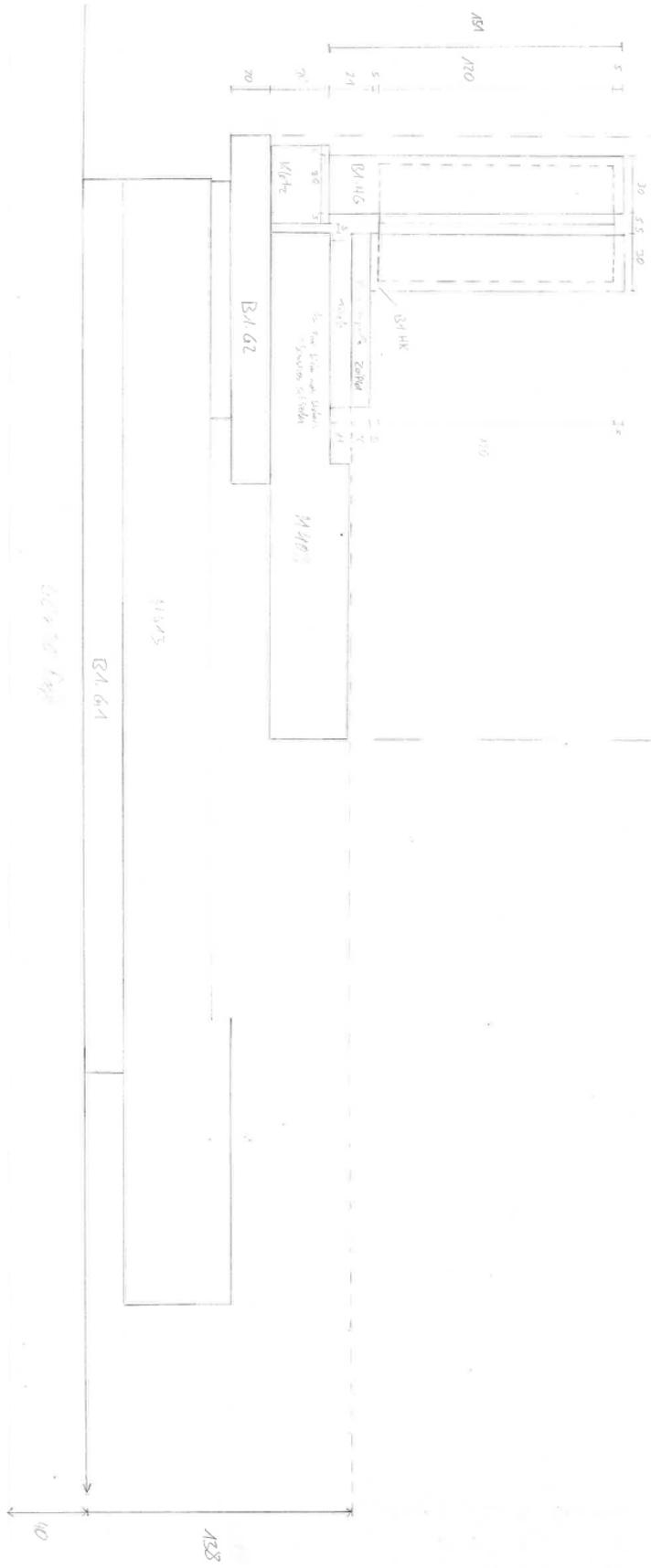
Zeichnungen / Bilder

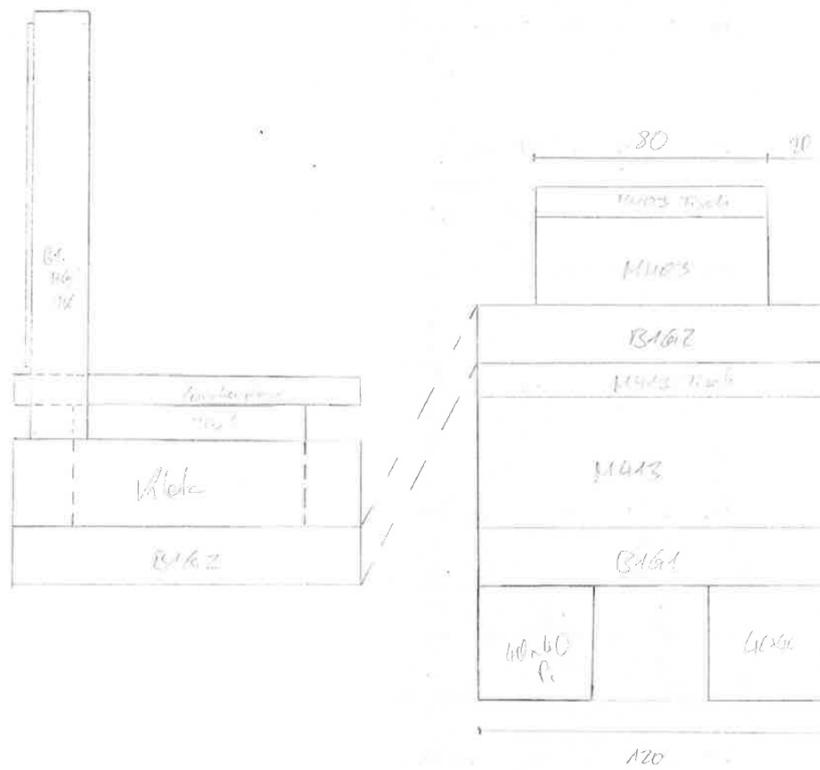


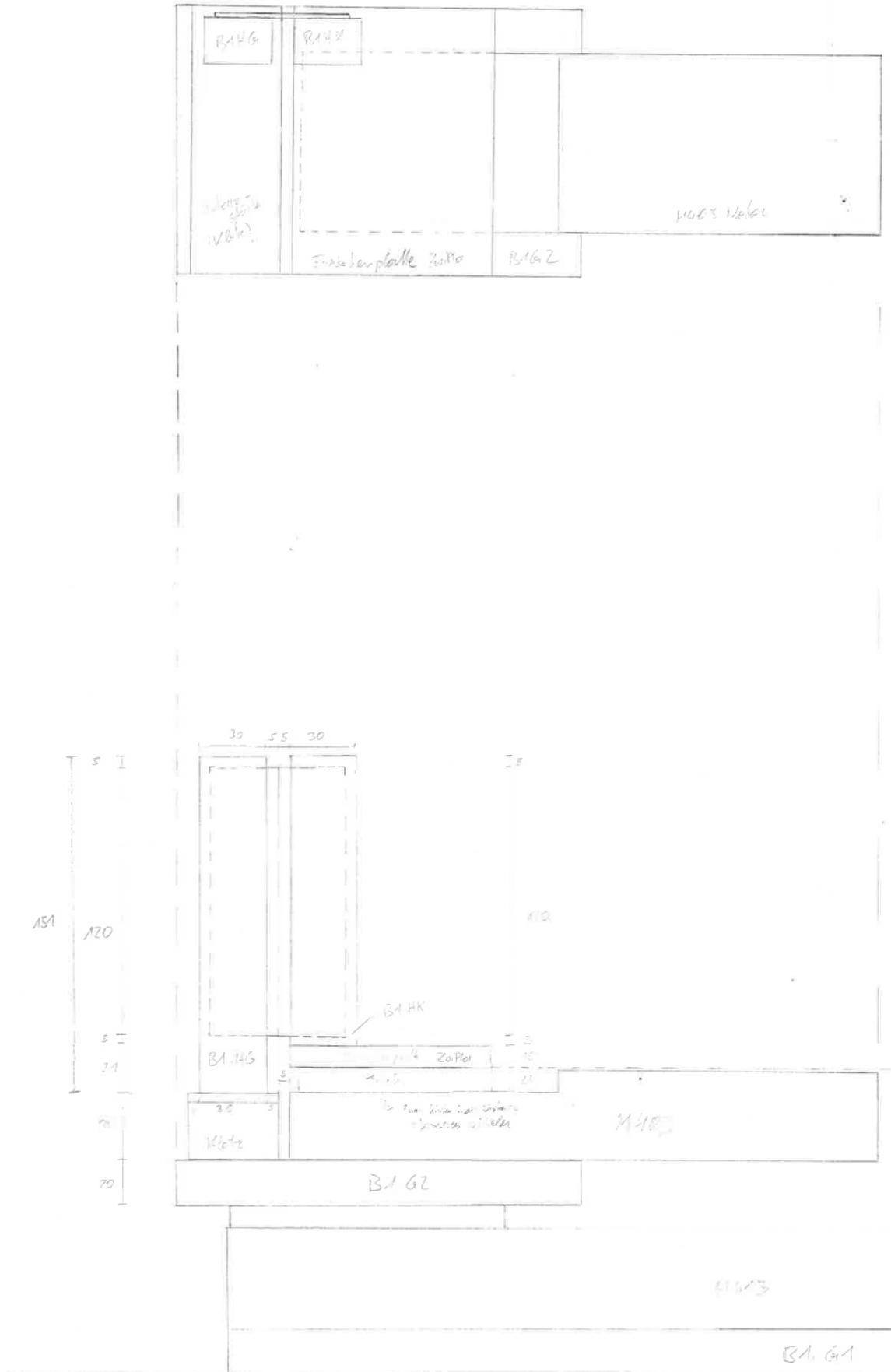
Dimensions	M-060.M0	M-061.M0	M-062.M0
A	90	130	150
B	29	34	42
C	25	30	38
D	35	55	65
E	12,5	15	21,5
F	70	110	130
G	60	100	120
H	20	35	45
I	50	90	110
J	38	50	60
K	20	20	28

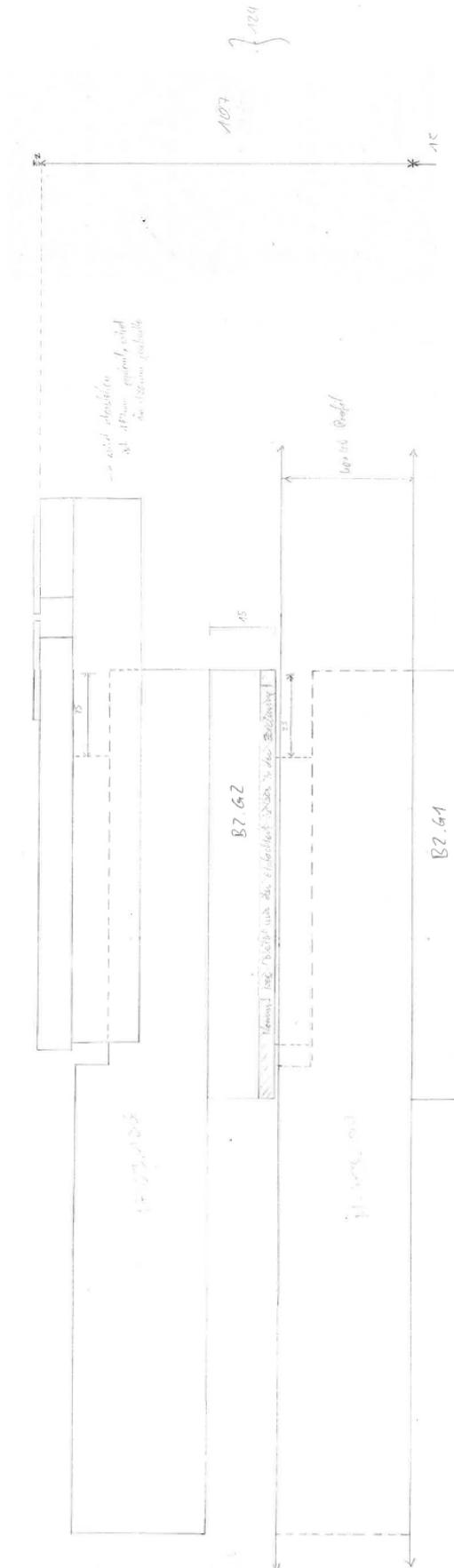


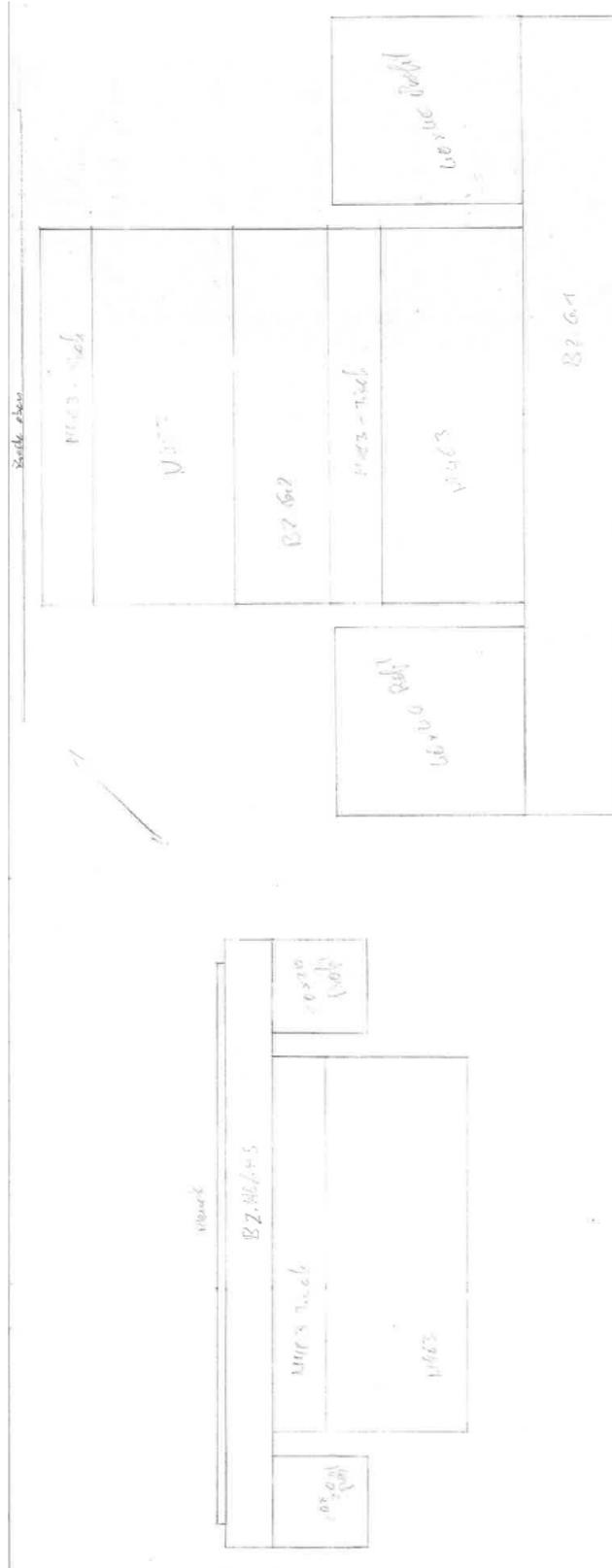
D. Konstruktionszeichnungen

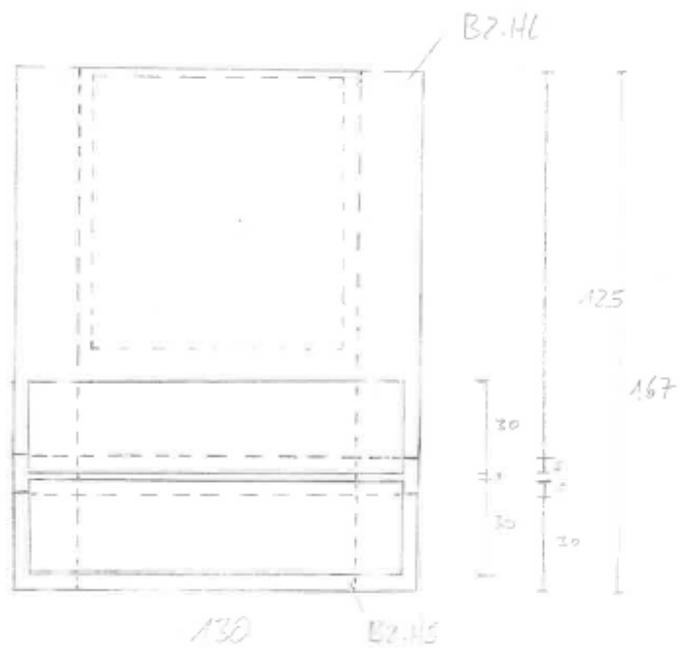












Literaturverzeichnis

- [1] Yu. N. Pokotilovski. Potential of the neutron lloyd's mirror interferometer for the search for new interactions. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 116(4):609–619, November 2013.
- [2] Justin Khoury and Amanda Weltman. Chameleon cosmology. *Phys. Rev. D*, 69:044026, Feb 2004.
- [3] Steven Weinberg. A new light boson? *Phys. Rev. Lett.*, 40(4):223–226, January 1978.
- [4] Bharat Ratra and P. J. E. Peebles. Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field. *Physical Review D*, 37(12):3406–3427, June 1988.
- [5] John Kielkopf and Lawrence Portaro. Lloyd's mirror as a laser wavemeter. *Appl. Opt.*, 31(33):7083, November 1992.
- [6] P. F. Titchmarsh. Lloyd's single-mirror interference fringes. *Proc. Phys. Soc.*, 53(4):391–402, July 1941.
- [7] Harvey E. White and Francis A. Jenkins. *Fundamentals of Optics*. McGraw Hill Book, 2001.
- [8] P. Sikivie. Experimental Tests of the “Invisible“ Axion. *Phys. Rev. Lett.*, 51(16):1415–1417, October 1983.
- [9] Maxim Pospelov, Adam Ritz, and Mikhail Voloshin. Bosonic super-WIMPs as keV-scale dark matter. *Phys. Rev. D*, 78(11), December 2008.
- [10] K. Eder, M. Gruber, A. Zeilinger, R. Gähler, W. Mampe, and W. Drexel. The new very-cold-neutron optics facility at ILL. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 284(1):171–175, November 1989.
- [11] H. Abele. The neutron. Its properties and basic interactions. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 60(1):9, January 2008.
- [12] V. V. Nesvizhevsky, G. Pignol, and K. V. Protasov. Neutron scattering and extra-short-range interactions. *Phys. Rev. D*, 77(3), February 2008.
- [13] Philippe Brax and Guillaume Pignol. Strongly coupled chameleons and the neutronic quantum bouncer. *Phys. Rev. Lett.*, 107(11), September 2011.
- [14] H. Lemmel, Ph. Brax, A. N. Ivanov, T. Jenke, G. Pignol, M. Pitschmann, T. Potocar, M. Wellenzohn, M. Zawisky, and H. Abele. Neutron interferometry constrains dark energy chameleon fields. *Phys. Lett. B*, 743:310–314, April 2015.

- [15] J. E. Moody and Frank Wilczek. New macroscopic forces? *Phys. Rev. D*, 30(1):130–138, July 1984.
- [16] Georg Raffelt. Limits on a cp -violating scalar axion-nucleon interaction. *Phys. Rev. D*, 86(1):015001, July 2012.
- [17] D. K. Atwood, M. A. Horne, C. G. Shull, and J. Arthur. Neutron Phase Shift in a Rotating Two-Crystal Interferometer. *Phys. Rev. Lett.*, 52(19):1673–1676, May 1984.
- [18] Hanno M. Filter. Private Korrespondenz, 2015 und 2016. Die Daten wurden im Rahmen der Dissertation von Hrn. Filter von ihm gesammelt und erstellt.
- [19] K. A. Olive *et al.* (Particle Data Group). *Chin. Phys. C*, 38, 090001 (2014) and 2015 update.
- [20] Helmut Rauch and Samuel A. Werner. *Neutron Interferometry: Lessons in Experimental Quantum Mechanics, Wave-Particle Duality, and Entanglement*. Oxford University Press, 2015.
- [21] Albert-Jose Dianoux and Gerry Lander, editors. *Neutron Data Booklet*. OCP Science, 2nd edition, 2003.
- [22] D. J. Richardson R. Golub and S. K. Lamoreaux. *Ultra-Cold Neutrons*. INST OF PHYSICS PUB, 1991.
- [23] Ludwig Bergmann, Clemens Schaefer, and Heinz Niedrig. *Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3: Optik*. Gruyter, 1993.
- [24] Dieter Meschede (Hrsg.). *Gerthsen Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 24. Aufl., 2010.
- [25] Ernst-Wilhelm Otten. *Repetitorium Experimentalphysik*. Berlin; Heidelberg: Springer, 3. Aufl., 2009.
- [26] David Bricher. *Velocity spectrum analysis of VCNs at a Lloyd-Mirror Interferometer experiment*. Projektarbeit, Atominstitut der Technischen Universität Wien, Wien, October 2015.
- [27] Louis De Broglie. *Recherches sur la théorie des Quanta*. PhD thesis, Physics. Migration - université en cours d’affectation, 1924. French. <tel-00006807>.
- [28] C. G. Shull. Single-slit diffraction of neutrons. *Phys. Rev.*, 179(3):752–754, March 1969.
- [29] J. M. Cowley. *Diffraction Physics*. ELSEVIER LTD / North-Holland personal library, Amsterdam, 3rd edition, 1995.
- [30] Masahiko Utsuro and Vladimir K. Ignatovich. *Handbook of Neutron Optics*. Wiley VCH Verlag GmbH, 2010.
- [31] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. JOHN WILEY & SONS INC., 4th edition, 2010.

- [32] Ifan G. Hughes and Thomas P. A. Hase. *Measurements and their Uncertainties: A practical guide to modern error analysis*. Oxford University Press, USA, 2010.
- [33] M. Hino, T. Oda, Y. Abe, and Y. Kawabata. A Diode-like Neutron Mirror for a Cold Neutron Moderator for Use in Neutron Beam Facilities. *Physics Procedia*, 60:294–299, 2014.
- [34] Dominic Blöch. *Temperatursensoren für das Lloyd-Experiment*. Projektarbeit, Atominstitut der Technischen Universität Wien, Jänner 2016.
- [35] Patrick M. Kappl. *Vorbereitung einer Strahlzeit für ein Lloyd-Interferometer mit sehr kalten Neutronen*. Bachelorarbeit, Atominstitut der Technischen Universität Wien, Wien, Februar 2016.
- [36] H. Abele, G. Cronenberg, P. Geltenbort, T. Jenke, T. Lins, and H. Saul. qBounce, the quantum bouncing ball experiment. *Physics Procedia*, 17:4–9, 2011.
- [37] National Instruments Corporation. *LabVIEW 2012 Help*. <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/>, Stand: Juni 2012. Zuletzt aufgerufen am 18.11.2015.
- [38] M. Tschernitz, R. Gähler, W. Mampe, B. Schillinger, and A. Zeilinger. Precision measurement of single slit diffraction with very cold neutrons. *Phys. Lett. A*, 164(5-6):365–368, April 1992.