

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

# Neuerrichtung der Neutronen-Interferometer-Station am Atominstitut Wien

ausgeführt am  
Atominstitut, Technische Universität Wien

unter Anleitung von  
Priv. Doz. Dr. Yuji Hasegawa

durch  
**Hermann Geppert**  
Matr. Nr. 0426329  
Frauenberg 25  
A-3500 Krems Stein

Wien, Mai 2012

.....  
Hermann Geppert

# Danksagung

Ich möchte all jenen danke die mich im Lauf dieser Diplomarbeit unterstützt haben. Allen voran möchte ich meinem Betreuer Yuji Hasegawa danken, der immer ein offenes Ohr für mich hatte, mich tatkräftig und kollegial unterstützte und ohne den diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Mein herzlicher Dank gilt Michael Zawisky, der mir sowohl beim Ätzen des Interferometers als auch beim Justieren des Interferometers mit Rat und Tat zur Seite stand. Erwin Jericha danke ich für die Hilfe beim Erstellen der Programme, diverse Ratschläge und Hilfeleistungen. Stephan Sponar gilt mein Dank für die unermüdliche Bereitwilligkeit mich bei einer Vielzahl großer und kleiner Probleme, oft mit hohem Zeitaufwand, zu unterstützen. Herzlichen Dank auch an Hartmut Lemmel für die Unterstützung bei den Messungen in Grenoble.

Ich möchte allen Kollegen am Atominstitut danken für das gut Arbeitsklima, für die Unterstützung mit kleinen und großen Gefallen und die Gespräche bei diversen Mittagessen.

Mein innigster Dank gilt meinen Eltern die mich immer in jeder erdenkliche Weise unterstützt haben und mir das Studium ermöglicht haben.

Vielen Dank

## Kurzfassung

Die Neutroneninterferometrie bietet die Möglichkeit eine Vielzahl an Quantenphänomenen zu erforschen. Aus Neutronenzählraten der Interferogramme kann man Kontrast und Phasenlage als Messparameter heranziehen. Viele Experimente, die die  $4\pi$ -Periodizität, Spinorsuperposition oder den Einfluss der Gravitation erforschen, wurden bereits durchgeführt. Wird der Spin als zusätzlicher Freiheitsgrad eingeführt, kann die Zahl der Freiheitsgrade der Manipulation noch um Spin und Energie erweitert werden. Dadurch können mehrfach verschränkte Zustände gemessen werden. Die Neutroneninterferometrie wurde in den 1970er Jahren am TRIGA-Reaktor am Atominstitut der TU Wien erstmals durchgeführt. Nun wurde beschlossen, einen Neuaufbau der Interferometerstation durchzuführen.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde eine Versuchsanordnung konstruiert und aufgebaut, die sehr flexibel für verschiedene Experimente verändert werden kann. Ein Interferometer wurde gefräst und geätzt, um hohe Kontraste zu ermöglichen. Das Interferometer wurde am ILL in Grenoble getestet. Da die Interferometrie auf Vibrationen und Temperatureinflüsse anfällig ist, wurde großer Wert auf eine möglichst gute Entkoppelung von äußeren Einflüssen durch Isolation und Vibrationsdämpfung gelegt. Die für die Steuerung und Messung benötigten Programme wurden erstellt. Im zweiten Teil der Arbeit wurden die Versuchsanordnung justiert und Messungen durchgeführt. Die Detektoren wurden kalibriert, um elektronisches Rauschen zu minimieren. Damit möglichst hohe Kontraste erreicht werden können, wurde die Lagerung des Interferometers verbessert und der Untergrund durch Abschirmung der Versuchsanordnung reduziert. Es konnte ein Kontrast von  $0,445 \pm 0,021$  erreicht werden. Abschließend fanden zwei Experimente statt, die den Einfluss der Gravitation auf die Phase der Neutronen bei Verkippung des Interferometers messen. Das Messergebnis von  $260 \pm 10^\circ$  bei einer Verkippung des Interferometers um ein Grad stimmt gut mit der theoretischen Vorhersage von  $258,6^\circ$  überein.

# Abstract

Perfect crystal neutron interferometry is a suitable tool to explore quantum mechanics by using the measurements of phase and contrast of the interferogram. Lots of experiments, such as  $4\pi$ -periodicity, spinor-superposition, gravitational-induced phase, have been carried out with perfect crystal neutron interferometer. When an additional measurement parameter - the spin - is introduced to neutron interferometry, the degrees of freedom of the experiment expand to include spin and energy, which enables the measurement of multiple entangled states. Neutron interferometry was first accomplished at the TRIGA-reactor of the Atominstitut, Vienna in the 1970s.

The first part of this master's thesis work focused on constructing and building an experimental design for a new neutron interferometry station at the Atominstitut. A neutron interferometer was prepared by cutting and etching to increase the achievable contrast. The performance of the neutron interferometer was tested at the ILL in Grenoble. Since neutron interferometry is susceptible to vibrations and temperature fluctuations, the experiment was designed to minimize such effects. Several LabVIEW computer programs were created to control the measurement process. In the second part of this thesis gives an overview of the adjustment and optimization of the instrument. The neutron detectors were finely calibrated to minimize disturbance electronic noise. To maximize contrast, the underlayment for the neutron interferometer was improved and the neutron background was decreased using optimized shielding. A contrast of  $0.445 \pm 0.021$  was achieved. Using this advanced instrument two different measurements were carried out to evaluate the effect of gravity on the phase of neutrons. Theory predicts a  $258,6^\circ$  phaseshift when tilting the interferometer by one degree. The experiment showed a phaseshift of  $260 \pm 10^\circ$ , which is consistent with theory.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>9</b>
2.1	Reaktor . . . . .	9
2.2	Neutronenoptik . . . . .	11
2.3	Neutroneninterferometer . . . . .	14
2.4	Anwendungen . . . . .	18
2.5	Statistik . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Präparation des Interferometers</b>	<b>23</b>
3.1	Vorbereitung . . . . .	23
3.2	Ätzworgang . . . . .	26
	Erstes Ätzen . . . . .	29
	Zweites Ätzen . . . . .	29
	Drittes Ätzen . . . . .	31
3.3	Interferenzmessung . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Aufbau der Station</b>	<b>37</b>
4.1	Interferometerhaus . . . . .	37
4.2	Detektortisch . . . . .	42
4.3	Detektor . . . . .	44
4.4	Lagerung und Steuerung des Interferometers . . . . .	46
4.5	Justierung . . . . .	54
	Strahlvermessung . . . . .	54
	Detektorposition . . . . .	55
	Einstellen der Detektorelektronik . . . . .	59
4.6	Reduktion des physikalischen Untergrunds . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>69</b>
5.1	Interferenzmessung . . . . .	69
5.2	Gravitationsmessung . . . . .	75

6	Zusammenfassung und Ausblick	79
7	Anhang	81
8	Spezifikationen	89

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Neutronen-Interferometrie hat eine lange Tradition am Atominstitut TU Wien. Im Jahr 1974 wurde von H. Rauch, W. Treimer und U. Bonse am TRIGA-Reaktor in Wien erstmals Neutroneninterferenz betrieben [1] und damit die quantenmechanische Struktur des Neutrons und sein Welleilchen-Dualismus gezeigt. Seither fand sowohl in Wien als auch am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble Forschung mit Neutroneninterferometern statt und viele Experimente, die tiefe Einblicke in die Struktur der Quantenmechanik ermöglichten, wurden durchgeführt. Das Neutron kann leicht manipuliert werden und unterliegt der Gravitation, dem Elektromagnetismus, der starken und der schwachen Wechselwirkung. Dadurch kann eine Vielzahl von quantenmechanischen Effekten gemessen werden. So wurde etwa der Phasenschub gemessen, der von engen Kanälen induziert wird, durch die das Neutron fliegt [2]. In anderen Experimenten konnte der Einfluss der Geometrischen Phase auf das Neutron gezeigt werden [3]. Weiters können dreifach verschränkte Zustände -in Spin, Energie und Weg- durch das Interferometer in Kombination mit einem Polarimeter erzeugt werden. Damit wurden Messungen zum Greenberger-Horne-Zeilinger Zustand durchgeführt [4].

Da die alte Versuchsanordnung nach 30 Jahren Betrieb modernen Ansprüchen genügt nicht mehr hat, wurde sie im Zuge des Umbaus des Atominstututs abgebaut, um einer neuen Interferometerstation Platz zu schaffen. Die neue Station soll interessierten Studenten die Möglichkeit geben, im Rahmen von Praktika und Projektarbeiten Einblick in die Neutronenoptik zu erlangen. So ist es auch möglich, den Einfluss der Gravitation, in Form eines induzierten Phasenschubs, zu messen. Dieses solches Experiment soll im Rahmen eines Praktikums von Studenten einfach wiederholt werden können. Weiters werden Vorbereitungsarbeiten für Messungen am ILL durch einen flexiblen Versuchsaufbau ermöglicht.

Die Neutroneninterferometrie stellt hohe Ansprüche an Vibrationsfreiheit und thermische Stabilität der Versuchsanordnung. Das Interferometer muss möglichst gut von der Umwelt entkoppelt sein. Vibrationsfreiheit kann durch standardmäßige Antivibrationstische erreicht werden. Die thermische Isolierung stellt ein größeres Problem dar, weil Temperaturschwankungen einen großen Einfluss auf die Phasenstabilität und den Kontrast des Interferometers haben. Der geringe Neutronenfluss am TRIGA-Reaktor in Wien in Kombination mit der Nähe der Versuchsanordnung zum Neutronenstrahl aus dem Reaktor werfen das Problem eines hohen Untergrunds im Vergleich zu den Zählraten der Detektoren auf.

Im ersten Teil der Arbeit wird der theoretische Hintergrund zur Neutroneninterferometrie beschrieben. Weiters werden noch die Grundlagen zweier im Folgenden durchgeführten Experimente und der bei dieser Arbeit verwendeten Fehlerrechnung erläutert. Der zweite Teil befasst sich mit der Präparation des Interferometers. Es wurde gefräst und mehrfach mit Salpeter- und Flusssäure geätzt, um den erreichbaren Kontrast zu erhöhen. Am ILL in Grenoble wurde Interferometer nach Beendigung der Präparation getestet. Aufbau und Justierung der Versuchsanordnung werden im dritten Teil behandelt. Hier wird die Konstruktion des Interferometerhauses und der Detektortische beschrieben. Weiters werden Einstellung und Ausrichtung der Detektoren behandelt. Den letzten Teil dieses Kapitels bildet die Reduktion des Untergrunds durch verbesserte Abschirmung. Die abschließenden Messungen von Interferenzen und des durch Gravitation induzierten Phasenschubs werden im vierten Teil behandelt. Dabei werden der Prozess der Verbesserung des Kontrastes und das Vorgehen bei der Messung des Gravitationsphasenschubs beschrieben.

# Kapitel 2

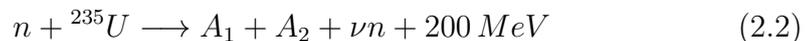
## Theorie

### 2.1 Reaktor

Das Atominstitut der Technischen Universität Wien betreibt seit 1962 einen Forschungsreaktor vom Typ TRIGA MARK II der Firma General Atomics. Triga steht für Training, Reserch, Isotopes, General Atomic. Der Reaktor hat eine Dauerleistung von  $250\text{ kW}$ , es können jedoch Pulse gefahren werden mit einer Spitzenleistung von  $380\text{ MW}$  und einer Dauer von  $40\text{ ms}$ . Der thermische Fluss bei Dauerbetrieb beträgt im Zentrum des Kerns  $10^{13}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ . Es führen drei radiale und ein tangenciales Strahlrohre (siehe Abb.(2.1)) durch den Schwerbetonmantel nach außen. An der Öffnung des Strahlrohrs beträgt der thermische Fluss  $10^{12}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ . Der Neutronenfluss  $\Phi$  ist abhängig von der Temperatur  $T$  des Tankwassers und kann mit der Formel

$$\Phi(E, T) = \Phi_{th} \frac{E}{(k_B T)^2} e^{-\frac{E}{k_B T}} \quad (2.1)$$

errechnet werden. Es ist zu erkennen, dass sich mit steigender Temperatur das Maximum des Flusses zu kleineren Wellenlängen verschiebt. Die größte Intensität liegt bei diesem Reaktor bei einer Wellenlänge von  $2\text{ \AA}$ . Die Neutronen werden im Reaktor durch die Reaktion



erzeugt. Die Spaltung wird durch thermische Neutronen induziert, wobei im Durchschnitt  $\nu = 2,4$  Neutronen entstehen, wodurch eine selbsterhaltende Kettenreaktion möglich ist.  $A_1$  und  $A_2$  sind Spaltprodukte von  ${}^{235}\text{U}$ .

Um am Strahlrohr C (siehe Abb.: 2.1) Interferometrie betreiben zu können, wurde ein Soller-Kollimator mit  $40 \times 50\text{ mm}^2$  Querschnittsfläche und  $1\text{ m}$  Länge in die Reaktorabschirmung verbaut. Dieser besteht aus einer Anordnung von

vielen sehr dünnen parallelen Platten, die den Neutronenstrahl auf auf  $1,4^\circ$  vertikale und  $0,2^\circ$  horizontale Divergenz begrenzen. Der Kollimator lässt 1% der nicht-kollimierte Strahlung passieren, die Untergrund erzeugen. Am Ausgang des Kollimators befindet sich ein manueller Shutter, der von außen bedient werden kann.

Zur Verringerung der Strahlen-Belastung an den Arbeitsplätzen befindet sich ein mit borhaltigem Wasser gefüllter Stahltank vor dem Kollimator. Von diesem Tank umgeben sind, die Monochromatoren die durch, im Stahltank eingebaute Stahlrohre, den Neutronenstrahl zum Experiment leiten.

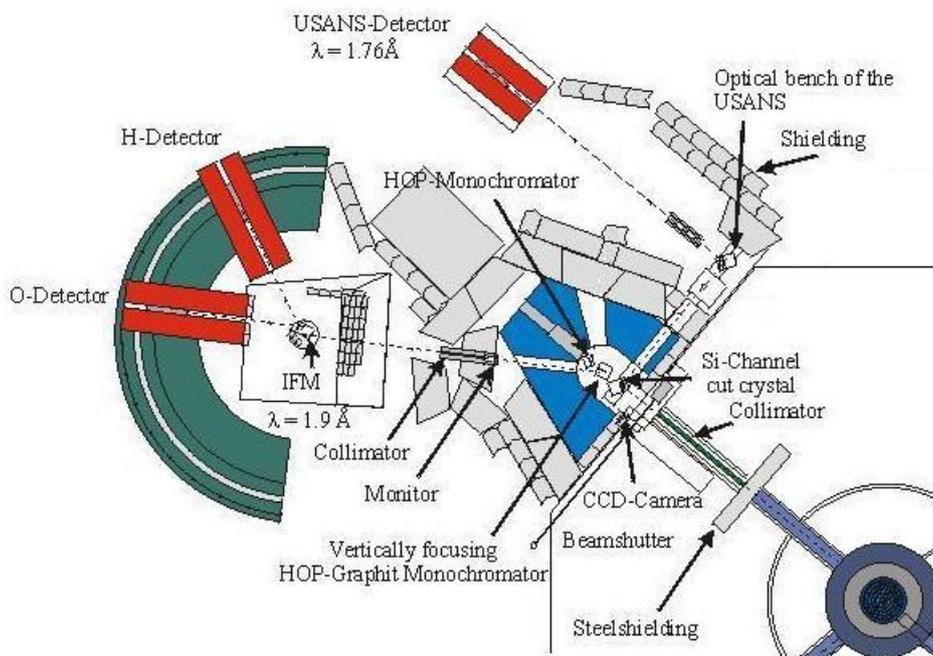


Abbildung 2.1: Versuchsanordnung vor dem Umbau.

## 2.2 Neutronenoptik

Wegen der quantenmechanischen Eigenschaften des Neutron, d.h. des Welleilchen Dualismus, der auch für das Neutron gilt, weist es sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften auf. Die Welleneigenschaften rechtfertigen die Bezeichnung Neutronenoptik, da die Beschreibung der Ausbreitung, Brechung, Interferenz usw. für Neutronen mittels der Schrödingergleichung, analog der Beschreibung von Licht mittels der Maxwellgleichungen ist. Der Zusammenhang zwischen der Teilchenbewegung und dem Wellenbild wird über die de Broglie Beziehung hergestellt

$$mv = \frac{h}{\lambda} = \hbar k. \quad (2.3)$$

Dabei ist  $m$  die Masse des Teilchens,  $v$  die Gruppengeschwindigkeit,  $\lambda$  und die Wellenlänge. Für die Neutroneninterferometrie werden thermische Neutronen, das heißt mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1,92 \text{ \AA}$ , verwendet. Relativistische Effekte können im weiteren vernachlässigt werden, da die Geschwindigkeit  $v$  klein gegen die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist  $\frac{v}{c} < 10^{-5}$ . Die Beschreibung der Materiewellen erfolgt durch die Schrödinger-Gleichung

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right) \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}. \quad (2.4)$$

Ersetzt man das Potential  $V(\mathbf{r}, t)$  durch ein zeitunabhängiges Potential  $V=V(\mathbf{r})$ , kann der ortsabhängige Teil der Wellenfunktion durch die Helmholtzgleichung

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}) + \mathbf{k}^2 \psi(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.5)$$

beschrieben werden. Der Vektor  $\mathbf{k}$  ist der potentialabhängige Wellenvektor, er wird beschrieben durch

$$\mathbf{k}^2 = \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(\mathbf{r})]. \quad (2.6)$$

Der Brechungsindex  $n$  wird durch das Verhältnis des Betrags des Wellenvektors im Potential  $\mathbf{k}$  zu dem im freien Raum  $\mathbf{k}_f$  (d.h. ohne Potential) berechnet

$$n(r) = \frac{|\mathbf{k}(r)|}{|\mathbf{k}_f|} = \left( 1 - \frac{V(r)}{E} \right)^{1/2}. \quad (2.7)$$

Das Neutron unterliegt allen vier fundamentalen Wechselwirkungen (Ww). Über die starke Ww mit den Atomkernen, die schwache Ww ist für die endliche Lebensdauer und damit für den Zerfall des Neutrons verantwortlich, auf Grund des magnetischen Moments mit der elektromagnetischen WW und

schließlich mit der Gravitation, da das Neutron eine endliche Ruhemasse hat. Für nicht magnetische Materie ist die starke Wechselwirkung vorherrschend, diese hat eine Reichweite in der Größenordnung der Atomkerne. Damit kann das Potential im Vergleich mit der Wellenlänge des Neutrons als punktförmig angenähert werden und durch ein Fermi-Pseudopotential (Fermi 1936) beschrieben werden

$$V_{nuc}(\mathbf{r}) = \sum_j \frac{2\pi\hbar}{m} b \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j). \quad (2.8)$$

Hier beschreibt  $\mathbf{r}_j$  die Position der Atomkerne und  $b$  wird als gebundene Streulänge bezeichnet, die im Bereich von  $-5\text{fm}$  bis  $+10\text{fm}$ . Das effektive optische Potential ergibt sich durch Mittelung über ein makroskopisches Volumen zu

$$V_{opt}(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} b_c N \quad (2.9)$$

mit  $N$  der Atomdichte und der kohärenten Streulänge  $b_c$ . Da bei Silizium die Absorption vernachlässigt werden kann und  $V/E \ll 1$  gilt, kann der Brechungsindex  $n$  als

$$n = 1 - \frac{\lambda^2 N b_c}{2\pi} \quad (2.10)$$

geschrieben werden.

Bei Interferometern wird die einfallende Welle in zwei Teilwellen aufgespalten, manipuliert und an einem anderen Punkt rekombiniert. Dabei kann ein Phasenschub zwischen den beiden Teilwellen entstehen. Die Phase  $\Phi(\mathbf{r}, t)$  der Wellenfunktion  $\Psi(\mathbf{r}, t)$ , dehnt sich als Skalarfeld über die gesamte experimentelle Anordnung aus. Die, entlang des zurückgelegten Wegs durch die Messanordnung, akkumulierte Phase ergibt sich durch das Linienintegral über den Lagrangeoperator  $L = \mathbf{p}\mathbf{v} - H$ ,

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\hbar} \int L dt \quad (2.11)$$

mit dem kanonischen Moment  $\mathbf{p}$  und der Gruppengeschwindigkeit  $\mathbf{v}$ . Um den Phasenschub zu bestimmen muss jeweils über beide möglichen Wege durch das Interferometer integriert und die Differenz

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_I - \delta\Phi_{II} \quad (2.12)$$

gebildet werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden nur zeitunabhängige Potentiale verwendet. Der kanonische Impuls wird hier nur durch die kinetische Energie gegeben. Das Neutron wird beim Eintritt in einen Bereich

$R$  mit Potential ungleich Null  $V(\mathbf{r}) \neq 0$  beschleunigt oder verzögert, dadurch reduziert sich der Phasenschub zu

$$\Delta\Phi = \frac{12}{\hbar} \int_R \Delta\mathbf{r}_{kin} ds. \quad (2.13)$$

Auf Grund der Symmetrie des Interferometers ergibt sich im Idealfall der Phasenschub nur durch den unten beschriebenen Phasenschieber.

## 2.3 Neutroneninterferometer

Das Interferometer, das im Folgenden mit IFM abgekürzt wird, stellt die experimentelle Grundlage dar und soll hier näher beschrieben werden. Derartige IFM wurden von Bonse und Hart 1965 mit Röntgenstrahlen verwendet. H. Rauch, W. Treimer und U. Bonse konnten erstmals Neutroneninterferometrie betreiben in den 1970er Jahren am TRIGA-Reaktor in Wien [1]. Beim IFM handelt es sich um einen Silizium-Perfektkristall, der versetzungs- und spannungsfrei sein soll und daher große Ansprüche an die Produktion stellt. Abbildung 2.2 zeigt sowohl parallel-, als auch schiefsymmetrische IFM. Bei

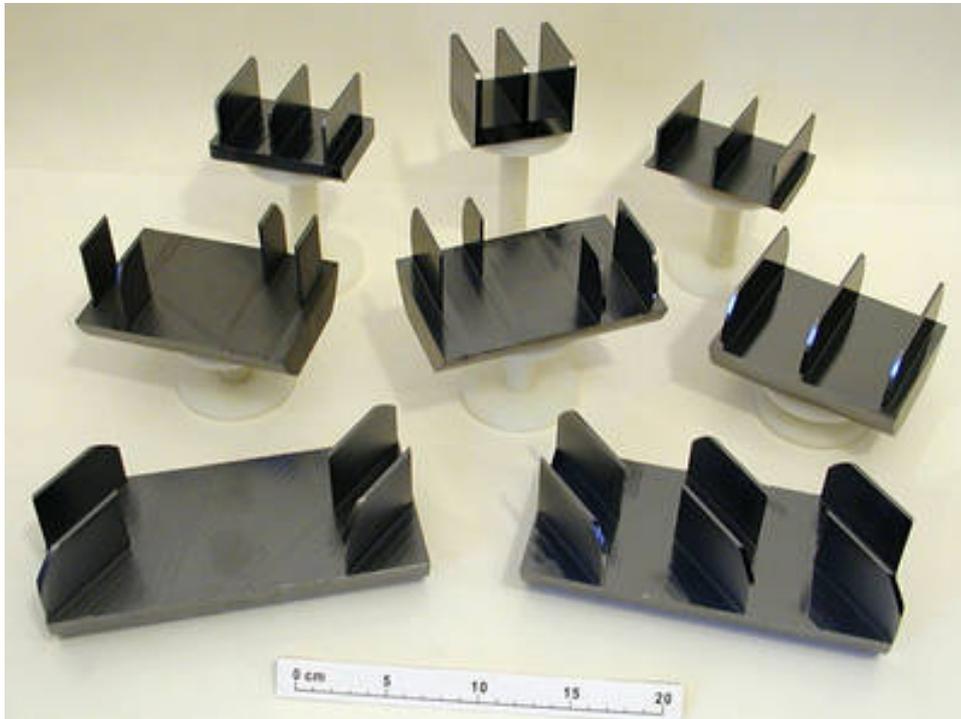


Abbildung 2.2: Verschiedene Perfekt-Kristall-IFM.

dem, in dieser Arbeit verwendeten IFM, handelt es sich um ein LLL-IFM oder auch Trippel-Laue-IFM, wobei die drei L für drei Platten stehen an denen jeweils Laue-Streuung stattfindet. Aus der Gitterkonstante von Silizium  $d = 5,43 \text{ \AA}$ , der Wellenlänge  $\lambda = 1,92 \text{ \AA}$  und der Brechungsebene  $(h,k,l)=(220)$  ergibt sich nach Formel

$$n\lambda = \frac{2d \sin \theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.14)$$

ein Braggwinkel von  $\theta = 30^\circ$ . Wenn der Neutronenstrahl, der unter dem Winkel  $\theta$  einfällt, wird er an der ersten Platte (Strahlteiler) aufgespalten in zwei Teilstrahlen, einen der die Platte ungebrochen durchläuft und einen gebrochenen, der in der Platte reflektiert wird, wie in Abbildung 2.3 gezeigt. Auf der zweiten Platte (Spiegel) treffen, räumlich getrennt, die Teilstrahlen auf und werden jeweils teilweise reflektiert, teilweise transmittiert. Die Strahlen, die hinter dem IFM selbiges verlassen, werden zur Vermeidung von Untergrund durch Kadmium-Blenden abgeschirmt. Die, auf die dritte Platte (Analysator) ankommenden Strahlen, treffen sich idealer Weise im selben Punkt und werden dort rekombiniert und zur Interferenz gebracht. Der Strahl der parallel zum einfallenden Strahl das IFM verlässt, wird im Folgenden als O-Strahl bezeichnet, der gebrochene als H-Strahl. Die Intesität des O-Strahls kann so beschrieben werden [5]:

$$I_O = |\Psi_I + \Psi_{II}| = |trr\Psi_0e^{i\chi_1} + rrt\Psi_0e^{i\chi_2}|^2 \quad (2.15)$$

Die einfallende Welle wird mit  $\Psi_0$  bezeichnet,  $\Psi_I$  und  $\Psi_{II}$  bezeichnen den linken (Path I) bzw. rechten (Path II) Strahlengang, die zum Detektor (O-Detektor) im O-Strahl führen. Die Amplituden, die die Reflexion beschreiben, werden mit  $r$  bezeichnet, die für Transmission mit  $t$ . Diese Koeffizienten werden durch dynamische Beugungstheorie berechnet.

Die Phasendifferenz der Strahlen, die am O-Detektor ankommen, wird zu  $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$  gesetzt. Damit ergibt sich die Intensität am O-Detektor zu

$$I_O(\Delta) = A[1 + \cos \Delta\chi], \quad (2.16)$$

mit  $A = |r|^4|t|^2|\Psi_0|^2$ . Die Intensität für den H-Strahl ergibt sich durch:

$$I_H(\Delta) = |trt\Psi_0e^{i\chi_1} + rrr\Psi_0e^{i\chi_2}| = B + A \cos \Delta\chi, \quad (2.17)$$

mit  $B = (|r|^2|t|^4 + |r|^6)|\Psi_0|^2$ . Es gilt Teilchenerhaltung und damit

$$I_O + I_H = \text{const.} \quad (2.18)$$

Durch Variation von  $\Delta\chi$  ändert sich das Verhältniss der Intensität zwischen O-Strahl und H-Strahl. Dies kann mittels eines Phasenschiebers der Dicke ( $D$ ), der ein optisches Potential erzeugt, erreicht werden. Der Phasenschieber befindet sich dazu so im Strahlengang, dass die beiden Teilstrahlen eine unterschiedliche Weglänge durch den Phasenschieber zurücklegen, wobei die Differenz in der Weglänge ( $\Delta D$ ) variiert werden kann, durch den Winkel ( $\delta$ ) den der Phasenschieber zu den IFM-Platten einnimmt. Der Wegunterschied wird beschrieben durch

$$\Delta D(\delta) = \left( \frac{1}{\cos(\theta_B + \delta)} - \frac{1}{\cos(\theta_B - \delta)} \right) D. \quad (2.19)$$

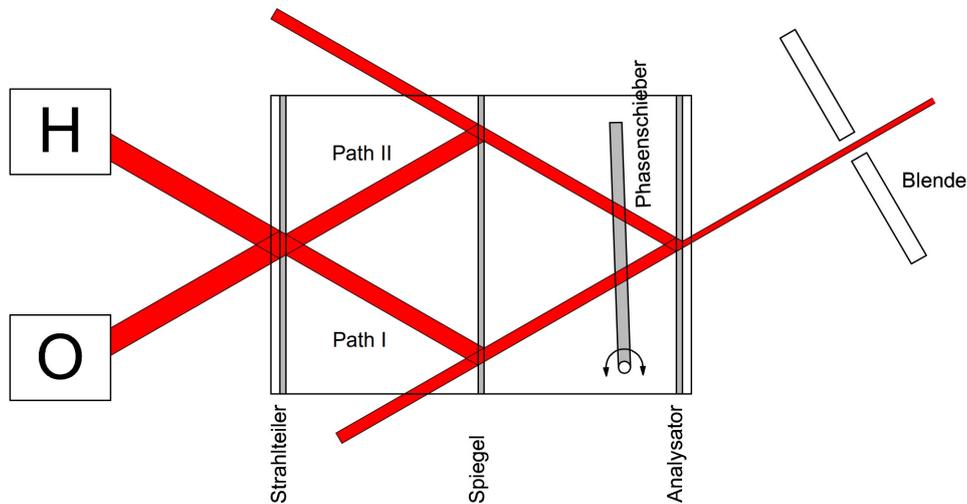


Abbildung 2.3: Strahlengang durch das LLL/IFM.

Mit Hilfe des zuvor hergeleiteten Brechungsindex  $n$ , kann der Phasenschub  $\Delta\chi$  berechnet werden gemäß:

$$\Delta\chi = (n - 1)k\Delta D = -\lambda N b_c \Delta D, \quad (2.20)$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der Neutronen,  $N$  die Atomdichte,  $b_c$  die Streulänge und  $\Delta D$  die Differenz der von den Teilstrahlen im Phasenschieber zurückgelegten Strecke ist. Durch ändern des Winkels erzeugt Oszillationen der Intensität an den Detektoren, die jeweils zwischen einem Minimal- ( $I_{min}$ ) und einem Maximalwert ( $I_{max}$ ) schwanken. Als Grundlage für viele Messungen ist der Kontrast ( $C$ ):

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (2.21)$$

Der Leerkontrast, der gemessen wird, wenn sich nur der Phasenschieber im IFM befindet, ist ein Maß für die Güte der Versuchsanordnung. Der Kontrast kann theoretisch nach Formel 2.16 im O-Strahl 100% erreichen.

Das reale IFM erreicht aus verschiedenen Gründen nie 100% Kontrast. Das ideale IFM sollte ein Perfektkristall sein, jedoch existieren Kristallfehler (Punktfehler, Netzebenenfehler, ...), weiters sind im Allgemeinen die Platten nicht perfekt parallel zueinander. Diese Faktoren können als interne Fehler zusammengefasst werden und sind bereits eingehend untersucht [6], [7]. Weiters gibt es externe Störungen, die Einfluss auf den Kontrast haben. Aus der Formel 2.21 geht hervor, dass ein Untergrund am Detektor 100% Kontrast unmöglich macht. Auf Grund des Eigengewichts verbiegt sich das IFM, was Einfluss auf die Parallelität der Platten hat. Ein unebene Unterlage bewirkt

eine Verformung des IFM, so auch eine zu weiche oder zu harte Unterlage. Vibrationen verringern den Kontrast, ebenso Temperaturschwankungen während des Messens eines Punktes.

## 2.4 Anwendungen

Hier sollen Experimente beschrieben werden, die auf der entstandenen Versuchsanordnung messbar sind und im Rahmen von Projektarbeiten und Praktikern durchgeführt werden können.

### Gravitationsmessung

Da das Neutron auch der Gravitation unterliegt, kann ihr Effekt auf das Neutron gemessen werden. Das erste Experiment das diesen Effekt zeigte, wurde Werner (1975) am University of Missouri Reserch Reaktor [8],[9] durchgeführt. Daher wird es auch oft als COW-Experiment bezeichnet. Hierzu wird das IFM parallel zur Strahlachse um den Winkel  $\alpha$  verkippt und der so induzierte Phasenschub ( $\Delta\Phi_{COW}$ ) gemessen. Abbildung 2.4 zeigt den Strahlengang durch das IFM und die Rotationsachse der Verkipfung. Die zwei Wege Path I und Path II beeinflussen das Neutron unterschiedlich, bei beiden wird aber die Energie ( $E_0$ ) erhalten, aber auf Grund der Gravitation wird das Neutron beschleunigt (2.22).

$$E_0 = \frac{\hbar k_0^2}{2m} = \frac{\hbar k^2}{2m} + mgH(\alpha) \quad (2.22)$$

Das Neutron in Path I fliegt im ersten Teil des IFMs parallel zur Erdoberfläche und wird bei Platte zwei gebrochen und erfährt eine Beschleunigung, da es jetzt nicht mehr parallel zur Erdoberfläche fliegt. Während das Neutron in Path II zuerst beschleunigt wird und nach der Brechung an Platte zwei eben fliegt. Der Punkt an der dritten Platte, an dem die Rekombination stattfindet ist um die Höhe  $H(\alpha) = H_0 \sin(\alpha)$  niedriger, als der Punkt auf der ersten Platte, bei dem die Neutronen in das IFM eindringen. Dadurch entsteht eine Änderung des Impulses ( $k$ ) um

$$\Delta k = (k - k_0) = -\frac{m^2 g H}{\hbar^2 k_0} \sin(\alpha), \quad (2.23)$$

abhängig vom Winkel  $\alpha$  um den gekippt wird. Der dabei induzierte Phasenschub ergibt sich zu

$$\Delta\Phi_{COW} = \Phi_I - \Phi_{II} = \Delta k S, \quad (2.24)$$

wobei S die Länge des parallel zur Erdoberfläche zurückgelegte Weg ist. Mit  $k_0 = 2\pi/\lambda$  und  $A_0 = H_0 S$  kann die Gleichung umgeschrieben werden zu

$$\Delta\Phi_{COW} = -2\pi\lambda \frac{m^2}{\hbar^2} g A_0 \sin(\alpha). \quad (2.25)$$

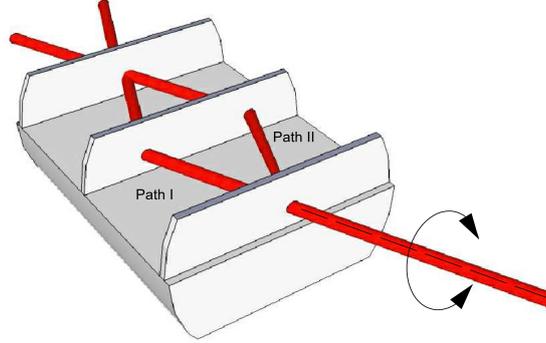


Abbildung 2.4: Strahlengang bei der Messung des Gravitationsphasenschub mit der Achse um die das IFM gekippt wird.

Um die Größenordnung der Verkippung abzuschätzen, kann von einem IFM von einer Größe von etwa  $10\text{ cm}$ , einem Bragg-Winkel von  $30^\circ$  und Neutronen einer Wellenlänge von  $2\text{ \AA}$  ausgegangen werden, daraus ergibt sich ein Phasenschub von  $\pi$  bei einem Kippwinkel von ca.  $1^\circ$ .

## Stochastische und deterministische Strahlabsorption

Bei diesem Experiment wird in einem der beiden Strahlengänge ein Absorber eingebracht und die Auswirkung auf den Kontrast gemessen [10]. Stochastische Absorption bedeutet dabei, dass jedes Neutron mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit absorbiert wird, während bei deterministischer Absorption nur Neutronen in einem bestimmten Zeit- bzw. Ortsintervall absorbiert werden können. Also auf Grund der Absorption theoretisch eine Weginformation erhalten wird. Stochastische Absorption wird erreicht indem ein Absorberblättchen z.B. in Path I gegeben wird, der gemäß

$$a = \frac{I}{I_0} = e^{-\sigma_r ND}. \quad (2.26)$$

Neutronen transmittieren lässt. Dabei ist  $I_0$  die Intensität im leeren Strahlengang,  $I$  die Intensität nach der Absorption und  $a$  die Transmissionswahrscheinlichkeit. Die Wellenfunktion in Path I kann beschrieben werden durch

$$\psi^I = \psi e^{i(\chi^I + i\chi^I)} = \psi \sqrt{a} e^{i\chi^I}. \quad (2.27)$$

Nach der Superposition wird am O-Detektor die Intensität

$$I_O = |\psi_O^I + \psi_O^{II}|^2 \propto |\psi_O^I|^2 [(a + 1) + 2\sqrt{a} \cos(\chi^I)], \quad (2.28)$$

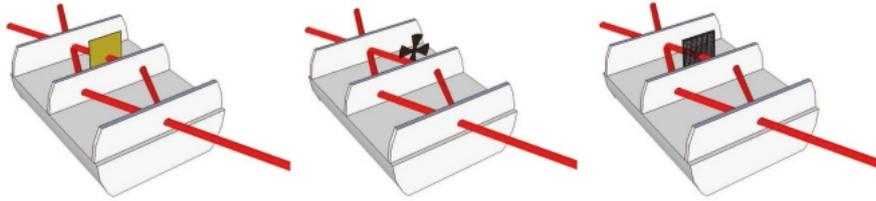


Abbildung 2.5: Plazierung der Absorber im Strahlengang. links stochastische Absorption mittels Goldfolie; Mitte deterministische Absorption durch einen Chopper; rechts deterministische Absorption mittels Gitter.

also ist der Kontrast proportional zu  $\sqrt{a}$ . Eine deterministische Absorption kann verwirklicht werden durch einen Neutronen-Chopper, z.B. eine rotierende Absorberscheibe in die Schlitze geschnitten sind, der einen gewissen Zeitraum alle Neutronen durchlässt und den Rest der Zeit alle Neutronen absorbiert. Die Transmission hier zu  $a = t_{\text{offen}}/(t_{\text{offen}} + t_{\text{zu}})$ , mit der Zeit  $t_{\text{offen}}$  die geöffnet ist und der Zeit  $t_{\text{zu}}$  in der die Neutronen absorbiert werden. Eine zweite Möglichkeit ist ein Gitter, das ortsabhängig entweder alle Neutronen absorbiert oder alle passieren lässt. Hier ergibt sich die Transmission mit der Schlitzbreite  $b$  und der Gitterperiode  $p$  zu  $a = b/p$ . Die Absorber werden wie in Abbildung 2.5 im Strahlengang platziert. Damit ergibt sich die Intensität am O-Detektor aus der Summe aus der Intensität mit geschlossenem und offenem Strahl nach

$$I_O \propto [(1 - a) |\psi_O^H|^2 + a |\psi_O^I + \psi_O^H|^2]. \quad (2.29)$$

Bei der deterministischen Absorption ist der Kontrast also proportional zu  $a$ . In Graph 2.6 sind die Theoriekurven der beiden Arten der Absorption gezeigt.

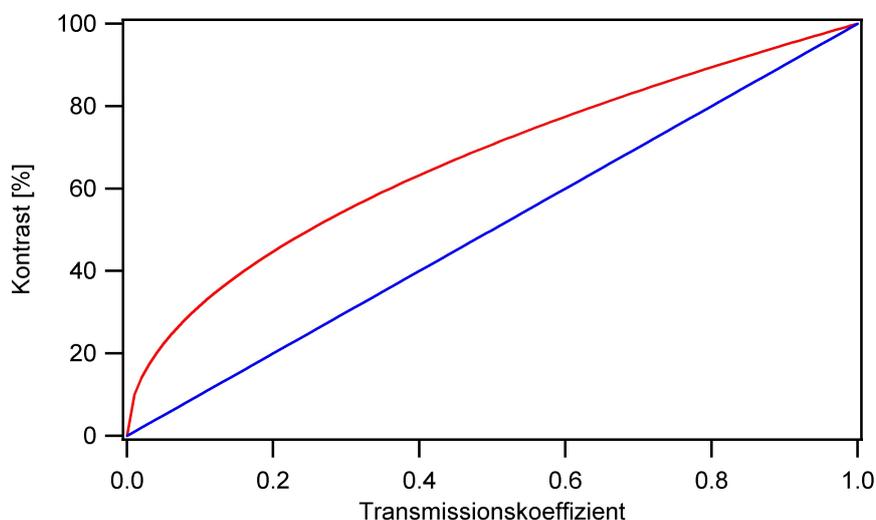


Abbildung 2.6: Vergleich der Theoriekurven von stochastischer (rot) und deterministischer (blau) Absorption.

## 2.5 Statistik

Bei der Auswertung der experimentellen Daten ist es unerlässlich sich statistischer Methoden zu bedienen. Messgrößen sind einem Fehler behaftet, selbst wenn alle systematische Fehler beseitigt sind. Grundlage der Auswertung der Experimente sind die Neutronenzählraten, die einer Poisson- oder Binomialstatistik.

$$B_{nk}(p) = \binom{n}{k} p^k (1-k)^{n-k}. \quad (2.30)$$

Daraus ergibt sich der Fehler der Einzelmessung mit Zählrate  $N$  zu

$$\sigma = \sqrt{N}. \quad (2.31)$$

Dieser Fehler wird als Grundlage für alle weiteren Fehlerrechnungen verwendet. Die Fehlerfortpflanzung für eine Funktion  $f(x_i)$  die von den unabhängigen Messgrößen  $x_i$  abhängt wird gemäß der Formel

$$\Delta f(x_i) = \sqrt{\left( \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (2.32)$$

Im Lauf der Diplomarbeit wurden Rockingkurven gemessen aus denen die Intensität des Neutronenstrahls und der Untergrund als Messgrößen enthalten sind und die einer Gaußfunktion entsprechen. Weiters ergeben die

Interferogramme Sinuskurven aus denen der Kontrast der Interferenz berechnet wird. Die Messergebnisse wurden mit dem Datenanalyseprogramm IGOR ausgewertet und Fitfunktionen erstellt. Als Fitfunktionen dienen bei den Rockingkurven ein Gaußfit und bei den Interferogrammen ein Sinusfit verwendet. Der Gaußfit hat die Form

$$g(x) = U + Pe^{-\frac{x-x_0}{v}}. \quad (2.33)$$

Dabei ist  $U$  der Untergrund,  $P$  die Peakhöhe,  $x_0$  ist die Stelle des Peaks und  $v$  die Varianz ist. Der Sinusfit ist gegeben durch die Formel

$$f(x) = y_0 + A\sin(x + \phi). \quad (2.34)$$

Aus dem Sinusfit kann der Kontrast berechnet werden aus dem Verhältnis von der Amplitude  $A$  zum Offset  $y_0$ . Dies ist analog zur oben angeführten Definition des Kontrastes. Dabei verwendet IGOR den Levenberg-Marquardt Algorithmus um von einem Startwert aus ein Minimum von  $X^2$  zu finden. Grundlage diese Algorithmus ist Das Gauß-Newton-Verfahren und die  $X^2$  Verteilung mit  $n$  Freiheitsgraden. So ergibt sich der Kontrastes inklusive der Berücksichtigung des Untergrunds der mit der Formel

$$C = \frac{A}{y_0 - U * t/100}. \quad (2.35)$$

Wobei mit den Einheiten Counts pro 100s ( $n/100s$ ) und der Messzeit  $t$  in Sekunden (s) gerechnet wurde. Der Fehler des Kontrastes ergibt sich nach Fehlerfortpflanzung 2.32 nach der Gleichung

$$\Delta C = \sqrt{\frac{\Delta A^2}{(y_0 - Ut)^2} + \frac{A^2 t^2 \Delta U}{(y_0 - Ut)^4} + \frac{A^2 \Delta y_0^2}{(y_0 - Ut)^4}}. \quad (2.36)$$

In gleicher Weise ergibt sich die Fehlerfortpflanzung für alle zusammengesetzten Ergebnisse. Die systematischen Fehler ergeben sich aus der Wiederholbarkeit der Positionierung von IFM und Phasenschieber anhand der Fehler durch die Motorstellungen. Der Fehler durch die Motoren wird in der Größenordnung von  $10^{-4}$  erwartet und kann vernachlässigt werden gegen die Fehler durch die Zählraten die eine Größenordnung von  $10^{-2}$  haben, bei 1000 gezählten Neutronen.

# Kapitel 3

## Präparation des Interferometers

Durch eine Beschädigung des sogenannten *Großen-Kaiser-Interferometers* bei einem Experiment am ILL in Grenoble, ist der Kontrast von ca. 80% auf unter 20% gesunken. Ein solches Einbrechen des Kontrasts kann von Spannungen verursacht werden, die von Haarrissen an der Kristalloberfläche herrühren. Durch Fräsen und Ätzen des IFMs, kann Spannungsfreiheit erreicht werden und damit höherer Kontrast.

### 3.1 Vorbereitung

Zum Ätzen braucht man ein Labor in dem sich ein säurefester Luftabzug befindet. Vor dem Ätzen muss das Labor und auch der Luftabzug gründlich gereinigt werden, mit dem Ziel eine möglichst staubfreie Umgebung zu schaffen. Anschließend wird das IFM gereinigt, um es öl- fett- und staubfrei zu machen. Das gereinigte IFM wird vor dem Ätzen gewogen, um nach dem Ätzen den Masseverlust zu ermitteln. Im Anschluss wird das IFM geätzt. Nach dem Ätzen wird das IFM abgespült, um es von Säureresten zu befreien und abermals gewogen. Aus dem Masseverlust und der Oberfläche des IFM wird dann die Ätztiefe errechnet. Während der ganzen Tätigkeit mit dem IFM ist darauf zu achten, nicht mit harten oder spitzen Gegenständen gegen das IFM zu stoßen oder es unsanft zu behandeln, da Stöße und Kratzer wieder zu Spannungen führen können.

Vor Beginn des Reinigens und Ätzens werden Ausrüstung und Chemikalien vorbereitet. Da mit aggressiven Chemikalien gearbeitet wird, ist für den Schutz der eigenen Person folgende Ausrüstung nötig:

- Säurefeste Schuhe

- Labormantel
- Säurefeste Schürze
- Säurefeste Handschuhe
- Gesichtsschutz

Für das Reinigen des Labors, des Abzugs und des IFM wird ein Spülmittel gebraucht, das rückstandsfrei reinigt z.B. Extran neutral oder Dekon. Weiters braucht man Laborpapier und staubfreie Wischtücher aus Papier (Makeup-Tücher), destilliertes Wasser und pro Analysis (p. A.) Aceton. Um Fingerabdrücke auf dem IFM zu vermeiden empfiehlt es sich saubere Stoffhandschuhe zu verwenden. Da das IFM nach dem Herausnehmen aus dem Aceton-Bad schnell getrocknet werden muss, ist auch eine Stickstoffflasche mit Pistole nötig, mit der das IFM trocken geblasen werden kann. Zum Wägen wird eine Waage benötigt, die auf Milligramm genau messen kann. Weiters werden PE-Behältnisse gebraucht die säurefest, ausreichend dickwandig und groß sind. Eine Ätzwanne die der Größe des zu ätzenden IFM angepasst ist. Eine große Wasserwanne in der eine mit der Säure gefüllte Ätzwanne Platz hat, die zur Kühlung der Ätzwanne dient. Drei weitere Wannen für destilliertes Wasser und p.A. Aceton die zum Spülen bzw. Lagern des IFM gebraucht werden. Es sollten auch ausreichend Deckel angeschafft werden um Säuredämpfe und Acetonverdampfung zu verringern. Zum Abmessen der Säuren werden zwei Messbecher benötigt, einer, mit dem man auf Liter genau messen kann und einen, der eine Milliliter Einteilung besitzt und etwa 100 ml Fassungsvermögen besitzt. Für das IFM braucht man eine Halterung die säurefest, dem IFM und der Ätzwanne angepasst und einen guten Säurefluss durch entsprechende Öffnungen gewährleisten kann. Sie muss dem IFM auch Halt bieten um ein Herausrutschen sicher zu verhindern.

Bevor man mit der Reinigung des IFMs beginnen kann, müssen das Labor, alle Behälter, Trichter und Messbecher gereinigt werden. Das Labor sollte möglichst staubfrei gemacht werden, und alle Arbeitsflächen gut gereinigt werden. Der Luftabzug sollte ebenfalls möglichst staubfrei geputzt werden. Hierzu wird eine schwache (2-3%ige) Extran-Lösung verwendet. Grobe Verunreinigungen der Behälter, Trichter und Messbecher werden mit einer Extran-Lösung und einem Tuch mechanisch entfernt. Anschließend werden die Behälter mit einer schwachen Extran-Lösung befüllt und bis zum Gebrauch so belassen. Die Arbeitsfläche im Luftabzug und eine weitere im Labor werden mit etwa drei Schichten Laborpapier ausgelegt, um etwaige Säurespritzer aufzusaugen. In Abbildung 3.1 ist der vorbereitete Ätzplatz zu



Abbildung 3.1: Ätzplatz unter dem Luftabzug mit Ätzwanne, Messbehältern, Aceton- und Dest.-Wasserbad.

sehen.

Nun kann das IFM gereinigt werden. Hierzu wird eine Reinigungslösung aus neutralem Extran und destilliertem (dest.) Wasser in einem sauberen Behälter gemischt. Extran und Decon sind Reinigungsmittel die rückstandsfrei verdunsten. Das IFM wird nun mit staubfreien Reinigungstüchern (Kosmetiktücher), die in die Lösung getaucht werden so lange abgewischt, bis keine Verfärbungen auf den Tüchern mehr zu sehen sind. Falls nötig, kann die Reinigungslösung erneuert werden. Anschließend wird das IFM einige Stunden in eine schwache Lösung von Extran in dest. Wasser gestellt. Auch Decon (2-3 % Lösung) ist gut möglich. Der nächste Schritt ist die mechanische Reinigung mittels p. A. Aceton. Diese wird abermals mit Kosmetiktüchern durchgeführt. Wenn sich auf den Tüchern keine Verfärbungen mehr erkennen lassen bzw. dem IFM keine Schlieren mehr sichtbar sind, wird das IFM einige Stunden in ein Bad aus p.A. Aceton gestellt. Auf Grund der raschen Verdunstung muss ausreichend Aceton im Behälter sein sodass die Platten immer voll eingetaucht bleiben. Die Reinigung des IFM muss sehr sorgfältig erfolgen, da Verunreinigungen, wie Fett und Staub das Ätzergebnis negativ beeinflussen.



Abbildung 3.2: Trocknen und Wägen des IFM.

## 3.2 Ätzworgang

Während des gesamten Ätzworgangs ist mit dem Vorhandensein von gesundheitsschädlichen Dämpfen zu rechnen, weiters werden große Mengen an teils giftigen Säuren verwendet. Daher ist mit Sorgfalt zu arbeiten, um Verätzungen und ein Einatmen von Dämpfen zu vermeiden.

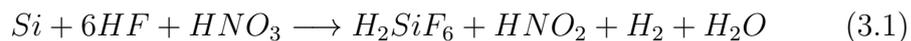
Um später die Ätztiefe bestimmen zu können ist es im Voraus nötig, die Oberfläche des IFM zu berechnen und das genaue Gewicht zu ermitteln. Das IFM kann mit einem Plastiklineal vermessen werden, man muss aber vorsichtig sein um das IFM mit dem Lineal nicht zu beschädigen. Vor dem Ätzen muss noch das Gewicht des IFM bestimmt werden um über die Gewichtsabnahme die mittlere Ätztiefe zu bestimmen. Das IFM steht zu diesem Zeitpunkt in einem Aceton-Bad. Nach dem Herausnehmen aus dem Bad muss das IFM mit Stickstoff trocken geblasen werden, um kein Aceton mit zu wägen, und anschließend auf die vorbereitete Waage gestellt. Es wurde eine Sartorio PT-300 Waage verwendet, sie hat laut Hersteller bis zu einer zu messenden Masse von 1000 g eine Genauigkeit von 0,001 g. So lange sich noch Aceton auf dem IFM befindet wird es durch die Verdunstung leichter, aber im Anschluss daran durch die am IFM kondensierende Luftfeuchtigkeit schwerer (die Massenabnahme wird nur wenige Gramm betragen). Diese Effekte sind nicht zu vermeiden, aber bei immer gleicher Durchführung des Vorgangs können die Fehler ausgeglichen werden. Es ist daher ratsam, das Interferometer mehrfach zu wägen und während des Wägens die Fenster zu schließen und den Abzug auszuschalten. Das Trocknen und Wägen des IFM ist in Abbildung 3.2 gezeigt.

Vor dem Ätzen muss die Zeit, die geätzt werden soll, um eine bestimmte Ätztiefe zu erreichen, berechnet werden. Hierzu kann eine mittlere Ätztiefe von etwa  $0,3 \mu\text{m}/\text{min}$  angenommen werden, diese Annahme stützt sich auf Erfah-



Abbildung 3.3: Das IFM während des Ätzens.

rungswerte die bei vorhergehenden Ätzungen von Zawisky [11] durchgeführt wurden. Unter den Dunstabzug wird ein großer Behälter gestellt, in den die Ätzwanne auf einen Sockel platziert wird. Ebenfalls unter den Abzug kommen zwei Behälter mit dest. Wasser die später zum Abspülen des IFM dienen. Nun wird der Abzug eingeschaltet. Die Ätzwanne wird nun so hoch mit Salpetersäure gefüllt, dass das IFM in der Halterung stehend, gut mit Säure bedeckt wird. In Abbildung 3.3 ist das IFM während des Ätzens gezeigt. Man muss die Salpetersäure messen, um die richtige Menge Flusssäure begeben zu können. Die 65%ige Salpetersäure wird mit der 40%igen Flusssäure im Verhältnis 60:1 gemischt. Dieses Verhältniss hat sich bei vorhergehenden Ätzvorgängen bewährt, da bei diesem Mischungsverhältnis ein langsames, gleichmäßiges und blasenfreies Ätzen möglich ist. Die Reaktion läuft ab durch die oxidierende Wirkung der Salpetersäure und anschließender Auflösung des Oxids in der Flusssäure, gemäßfolgender Formel:



Während des Ätzens muss Flusssäure nachgegeben werden und zwar 20 ml pro Gramm des zu erwarteten Massenverlusts des IFM. Damit wird der Verbrauch ausgeglichen und die Ätzrate bleibt konstant. Diese Menge wird in mehreren Portionen während des Ätzvorgangs beigegeben (z.B. alle 10 min). Den Massenverlust ( $\Delta m$ ) kann man durch die Ätztiefe ( $\Delta d$ ), die Oberfläche

(A) des IFM, die Dichte ( $\rho$ ) von Silizium mit folgender Formel berechnen:

$$\Delta m = \Delta d A \rho \quad (3.2)$$

Die Dichte von Silizium beträgt  $2,363 \text{ g/cm}^3$ . Nun wird die große Wanne, in der der Behälter für die Säure steht, mit Wasser gefüllt, um die Säure während des Ätzens zu kühlen. Es darf nicht so viel Wasser in das Becken gefüllt werden, dass das Säurebad aufschwimmt. Das IFM wird nun in das Säurebad gestellt und muss in regelmäßigen Abständen (minütlich) bewegt werden um immer wieder frische Säure zum IFM zu bringen, bzw. wenn sich Blasen auf dem IFM bilden um diese zu entfernen, weil sie sonst ein ungleichmäßiges Ätzergebnis erzeugen. Da die Säuredämpfe nicht eingeatmet werden sollen, ist das Atmen in unmittelbarer Nähe zu dem Säurebad zu vermeiden. Flusssäure ist giftig und das Schmerzempfinden bei einer reinen Flusssäure Verätzung kann sehr verspätet auftreten, daher ist im Umgang mit ihr sehr vorsichtig zu arbeiten. Wenn die gewünschte Zeit geätzt wurde, wird das IFM aus dem Säurebad in einen Behälter mit dest. Wasser gestellt, um es zu spülen. Dann kommt das IFM in den zweiten Behälter, ebenfalls mit dest. Wasser, zum nochmaligen Spülen. Vor dem Wägen wird das IFM aus dem Spülbecken in das Acetonbecken gegeben. Der Wägevorgang wird nun analog zum ersten Wägen durchgeführt.

Vor dem Ätzen muss man sich überlegen, wie weit geätzt werden soll. Dies ist nach Erfahrungswerten abzuschätzen und der gegebenen Situation anzupassen. Ein frisch geschliffener Kristall muss mindestens  $20 \mu\text{m}$  geätzt werden, um die Spannungen durch die mechanische Bearbeitung zu beseitigen. Ab Ätztiefen von mehr als  $100 \mu\text{m}$  wird die Geometrie des IFM beeinträchtigt, weil die Ränder der Platten stärker geätzt werden als die Mitte der Platten, auf Grund des besseren Umspülens mit Säure. Aus der gewünschten Ätztiefe ( $\Delta d$ ) kann mit Hilfe der Ätzrate ( $v$ ) die Ätz-Zeit ( $T$ ) berechnet werden.

$$T = \frac{\Delta d}{v} \quad (3.3)$$

Da während des Ätzens Flusssäure verbraucht wird, muss diese laufend zugegeben werden. Um die benötigte Menge zu berechnen, ist es wichtig die Oberfläche ( $A$ ) des IFM zu kennen. Aus der Dichte ( $\rho$ ) von Silizium, der Ätztiefe ( $\Delta d$ ) und der Oberfläche ( $A$ ) des IFM kann nun der zu erwartende Massenverlust des IFM gemäß Formel (3.2) abgeschätzt werden.

Aus dem Massenverlust ergibt sich die nötige Zugabe von Flusssäure durch den Faktor von  $20 \text{ ml/g}$ . Die resultierende Menge an Flusssäure wird in mehreren Dosen über die Ätz-Zeit verteilt zum Säurebad zugegeben. Nach

dem Ätzen wird das IFM abermals gewogen und aus der Differenz zur Wägung vor dem Ätzen wird der Masseverlust erhalten. Hieraus kann die tatsächliche Ätztiefe ( $\Delta d$ ) berechnet werden:

$$\Delta d = \frac{A\rho}{\Delta m} \quad (3.4)$$

Folglich kann auch die mittlere Ätzrate ( $v$ ) ermittelt werden

$$v = \frac{\Delta d}{T}. \quad (3.5)$$

### Erstes Ätzen

Nach der Beschädigung des *Kaiser-IFM* am ILL konnten keine augenscheinlichen Beschädigungen festgestellt werden. Da kein großer Schaden vermutet wurde, hat man die als zu ätzende Tiefe mit  $10 \mu\text{m}$  angenommen. Ausgehend von einer Ätzgeschwindigkeit von  $0,3 \mu\text{m}/\text{min}$  wurde die Ätz-Zeit auf 34 min festgelegt. Wegen der Oberfläche des IFM von  $567,7 \text{ cm}^2$  wurde mit einem Masseverlust von ca.  $1,3 \text{ g}$  gerechnet. Was nach dem Faktor von  $20 \text{ ml/g}$  eine Zugabe von  $26 \text{ ml}$  Flusssäure erfordert. Die Flusssäure wurde in zwei Etappen,  $16 \text{ ml}$  nach  $10 \text{ min}$  und  $10 \text{ ml}$  nach  $25 \text{ min}$ , zugegeben. Das Säurebecken wurde mit  $6 \text{ l}$  Salpetersäure gefüllt und demnach  $100 \text{ ml}$  Flusssäure zugegeben, um eine 60:1 Mischung zu erzeugen. Das Ätzen fand ohne nennenswerte Blasenbildung statt, was auf zwei Gründe zurückgeführt werden kann und zwar, dass das IFM durch vorherige Ätzvorgänge schon eine sehr glatte Oberfläche hatte und durch gute Reinigung kein Schmutz die Blasenbildung förderte. Das IFM wurde während des Ätzens häufig bewegt. Da es in dem Becken nur längs einer Achse bewegt werden konnte, wurde es zweimal um  $90^\circ$  gedreht um ein gleichmäßiges Ätzen zu ermöglichen. Vor dem Ätzen hatte das IFM eine Masse von  $935,01 \pm 0,01 \text{ g}$  nach dem Ätzen nur noch  $933,16 \pm 0,01 \text{ g}$ , daraus ergibt sich ein Massenverlust von  $1,85 \text{ g}$ . Dies entspricht einer Ätztiefe von  $14,1 \mu\text{m}$  und somit eine unerwartet hohe Ätzrate von  $0,41 \mu\text{m}/\text{min}$ . Die hohe Ätzgeschwindigkeit wurde durch das deutlich öftere Bewegen des IFM, als vorangegangenen Ätzungen hervorgerufen. Bei der nachfolgenden Bestimmung des Kontrastes des IFM am ILL konnte keine Verbesserung festgestellt werden. Demnach wurden die Spannungen, die durch die Beschädigung entstanden sind nicht ausreichend beseitigt.

### Zweites Ätzen

Vor dem zweiten Ätzen wurde das IFM von der Gerhard Rauch GmbH nachgeschliffen. Es wurden die Oberseite der Basis und die Seitenflächen

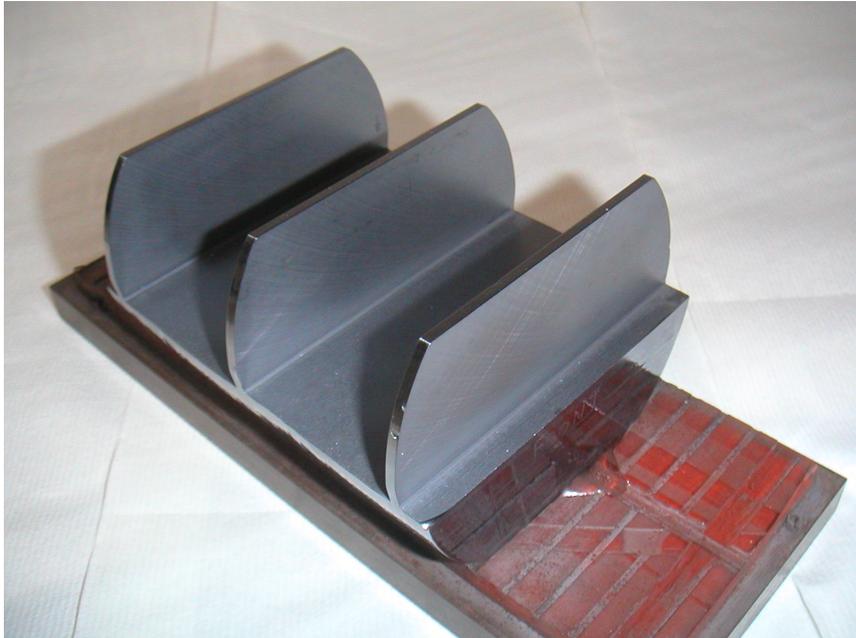


Abbildung 3.4: Das IFM nach dem Schleifen noch aufgeklebt auf die Unterlage.

der Streuplatten geschliffen. Da das IFM zum Schleifen mit Harz auf eine Unterlage geklebt wird, musste diese vor dem Ätzen erst entfernt werden. In Abbildung 3.4 ist das aufgeklebte IFM zu sehen. Dazu wird das IFM in einem Ofen 3 Stunden bei  $160^{\circ}\text{C}$  erwärmt, damit das Harz weich wird. Das IFM kann dann mit Handschuhen von der Unterlage entfernt werden. Dabei löst man durch vorsichtiges Drehen das IFM von der Unterlage und legt es dann auf vorbereitetes Papier im Ofen ab. Der Ofen wird dann wieder geschlossen und abgeschaltet, um das IFM langsam abkühlen zu lassen. Wenn der Ofen vollständig ausgekühlt ist wird das IFM in Aceton gestellt um das verbliebene Harz zu lösen. Zur Unterstützung kann man mit einem Pinsel weiches Harz entfernen. Vor dem zweiten Ätzen wurden kleine Absplitterungen an der ersten Platte gefunden. Absplitterungen können an Stellen entstehen, die unter Spannung standen und durch das Ausbrechen kleiner Stücke diese Spannung abbauen.

Um das Ergebnis des zweiten Ätzens zu verbessern, wurde das IFM vor dem Ätzen noch händisch an den Kanten der Platten und der Basis abgeschliffen, da an den Kanten bevorzugt Spannungen entstehen. Hierzu wurde Nassschleifpapier der Körnung 2000 verwendet und mit dest. Wasser befeuchtet. Beim Schleifen ist darauf zu achten, die Flächen der Platten nicht mit dem Schleifpapier zu beschädigen. Es wird mit gleichmäßigen Bewegungen ohne

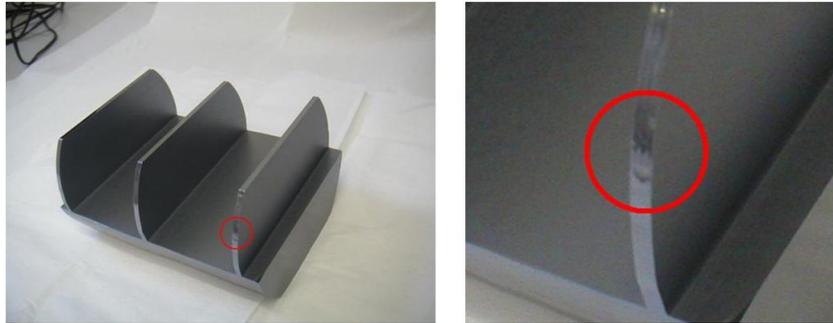


Abbildung 3.5: Die Abplatzungen an der ersten Platte.

Druck geschliffen. Anschließend wird die Reinigung des IFM wie gehabt, mit Extran und p.A. Aceton, durchgeführt. Als Ziel des zweiten Ätzens wurde  $25\ \mu\text{m}$  angenommen. Da man mit der Ätzgeschwindigkeit von  $0,4\ \mu\text{m}/\text{min}$  gerechnet wurde, lag die Ätz-Zeit bei  $63\ \text{min}$ . Demnach entstand ein Masseverlust von  $3,3\ \text{g}$  und eine Zugabe von Flusssäure von  $66\ \text{ml}$ , die in fünf etwa gleichen Portionen alle zehn Minuten getätigt wurde. Es wurden  $6,3\ \text{l}$  Salpetersäure und  $105\ \text{ml}$  Flusssäure in das Säurebecken gegeben. Die Ätz-Zeit wurde auf  $65\ \text{min}$  verlängert um sicher zu gehen die gewünschte Tiefe nicht zu unterschreiten. Da die Oberfläche nach dem Schleifen sehr rau ist, war anfangs Blasenbildung zu beobachten, die sehr schnell nachließ. Abermals wurde das IFM viel bewegt und das IFM zweimal um  $90^\circ$  gedreht um für Gleichmäßigkeit des Ätzens zu sorgen. Das IFM wog vor dem Ätzen  $924,40 \pm 0,01\ \text{g}$  danach  $920,79 \pm 0,01\ \text{g}$ , was  $3,61\ \text{g}$  Masseverlust bedeutet und somit  $27,2\ \mu\text{m}$  Ätztiefe bzw.  $0,42\ \mu\text{m}/\text{min}$ . Die raue Oberfläche ist der Grund für die etwas höhere Ätzgeschwindigkeit. Die Messung des Kontrastes am ILL zeigte, dass das IFM nur sehr nahe an der Basis einen Kontrast von 50% hat. Weiter oben war der Kontrast immer noch schlecht bis nicht vorhanden. Das legte eine Beschädigung auf den oberen Enden der Streuplatten nahe.

### Drittes Ätzen

Vor dem dritten Ätzen wurde eine Stelle entdeckt, die unter Umständen ein Sprung sein könnte, der noch nicht ausgeätzt wurde, oder nur eine Spur des Schleifens. Die Abbildungen 3.5 und 3.6 zeigen die Stellen an denen Abplatzungen vermutet wurden. Um sicher zu gehen, dass der mutmaßliche Sprung sicher ausgeätzt wird, sind die Streuplatten am oberen Ende, vor dem eigentlichen Ätzen, vorgeätzt worden mit einem starken Säuregemisch. Um herauszufinden, wie schnell mit einer Mischung von 5 : 1 geätzt wird, wurde

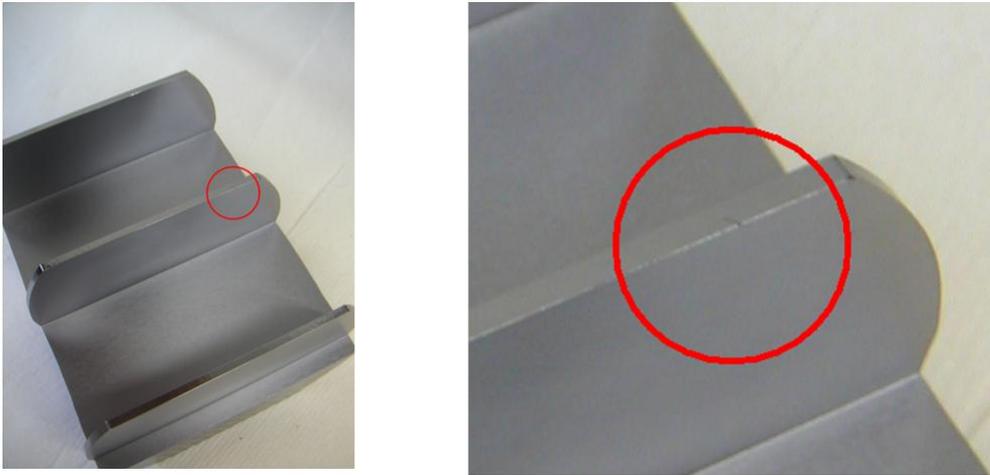


Abbildung 3.6: Die Beschädigung an der Zweiten Platte vor dem dritten Ätzen.

ein Versuch mit einem Silizium Probestück gemacht. Hierzu wurde erstens die Probe gewogen, um über die Oberfläche die Ätztiefe zu bestimmen, zweitens mit einer Mikrometerschraube die Dicke gemessen. Die geätzte Oberfläche der Probe betrug etwa  $77,8 \text{ cm}^2$ . Bei einer Ätzung von 3 min verlor die Probe  $0,44 \text{ g}$  dies ergibt eine mittlere Ätzgeschwindigkeit von  $8 \mu\text{m}/\text{min}$ . Die Dickenmessung ergab eine Ätzrate von  $13 \mu\text{m}/\text{min}$ . Diese große Geschwindigkeit ist damit zu begründen, dass am Rand gemessen wurde und dort immer schneller geätzt wird, als in der Mitte der Fläche. Da die Säure, auf Grund der hohen Ätzrate schnell heiß wurde, und die Messungen der Dicke und der Oberfläche ungenau sind, ist die resultierende Ätzrate eher als Abschätzung zu verstehen. Die oberen Enden der Streuplatten und die Abplatzungen an der ersten Platte wurden jeweils drei Minuten geätzt, indem sie freihändig in ein Säurebad mit einem Mischungsverhältniss zwischen Salpetersäure und Flusssäure von 5 : 1 gehalten wurden. In Abbildung 3.7 ist der Ätzvorgang gezeigt und in Abbildung 3.8 sieht man die Spuren des partiellen Ätzens. Damit wurden etwa  $30 \mu\text{m}$  an den besagten Stellen geätzt. Während des Ätzens ist es sehr schwierig zu erkennen wie weit das IFM wirklich eingetaucht ist, da Dampf und der Gesichtsschutz die Sicht beeinträchtigen. Bei diesem Ätzvorgang platzte ein weiterer Splitter an der Basis nahe der ersten Platte ab, wie in Abbildung 3.9 zu sehen ist. Wie In Abbildung 3.10 ersichtlich, konnte der Sprung an der mittleren Platte nun eindeutig als solcher identifiziert werden. Für die dritte Ätzung wurde ein Mindestmaß von  $23 \mu\text{m}$  angesetzt, um eine gesamte Tiefe von  $50 \mu\text{m}$  zu erzielen. Es wurde abermals mit einer Ätzrate von  $0,4 \mu\text{m}/\text{min}$  gerechnet und die daraus resultierenden



Abbildung 3.7: Partielles Ätzen mit starkem Säuregemisch.



Abbildung 3.8: Man sieht deutlich die Spuren des partiellen Ätzens an den Oberkanten der Platten und links.

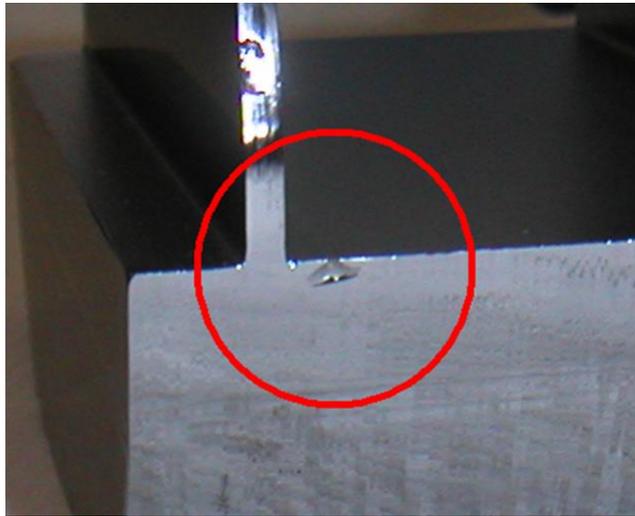


Abbildung 3.9: Abplatzung an der ersten Platte nach dem partiellen Ätzen.

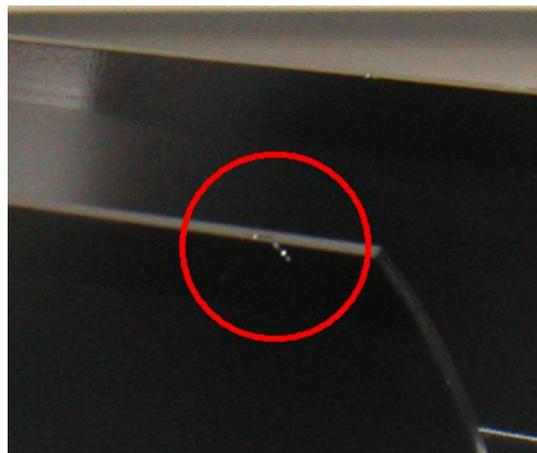


Abbildung 3.10: Deutlich erkennbarer ausgeätzter Riss in der zweiten Platte.

57 min Ätz-Zeit auf 60 *min* aufgerundet. Der geschätzte Masseverlust ergab eine Flusssäurezugabe von 60 *ml* die in Abständen von 10 *min* in 15 *ml*-Portionen erfolgte. Es wurden 6,6 *l* Salpetersäure mit 110 *ml* Flusssäure in die Ätzwanne gegeben. Das IFM wurde ebenfalls zweimal um 90° gedreht während des Ätzens. Die Masse des IFM nahm von  $920,41 \pm 0,01$  *g* auf  $917,35 \pm 0,01$  *g* um 3,06 *g* ab und ergibt somit eine Ätztiefe von 23,0  $\mu\text{m}$  bei einer Ätzrate von 0,38  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Die Ätzrate fiel geringer aus, als bei den ersten beiden Ätzungen, weil das IFM weniger bewegt wurde.

### 3.3 Interferenzmessung

Die Messungen die am ILL in Grenoble gemacht wurden, ergaben einen Kontrast von bis zu 91%. Dabei wurde mit einem 4 x 6 *mm* großen Strahl das IFM zweidimensional abgerastert und an jedem Punkt der Kontrast gemessen. Dabei wurden seitwärts ein Inkrement von 3 *mm* und senkrecht eines von 5 *mm* zum Abrastern benutzt. Das Ergebniss ist in Abbildung 3.11 zu sehen. Der günstigste Punkt zum Betreiben von Interferometrie wurde als in der Mitte des Bereichs mit um die 90% Kontrast gewählt. Das entspricht dem Punkt  $y = 11$  und  $z = 2$  im Graphen, bzw. auf das IFM umgelegt, ist der Punkt von der Seite, die mit '*Front*' beschriftet ist, eine Höhe von 12 *mm* über der IFM-Basis und 3 *mm* links von der Mitte. Die farbige Abbildung stellt die induzierte Phase dar. Wird bei einer Messung einen Bereich verwendet in dem der Phasenschub nicht homogen ist, so kann dies beschrieben werden durch die Superposition von einzelnen Sinusschwingungen mit unterschiedlichem Phasenschub. Das Ergebnis großer Phasenschübe ist ein Einbruch des Kontrasts. Bei Interferenzmessungen ist die Blendengröße und ihre Position nach diesen Gesichtspunkten zu wählen.

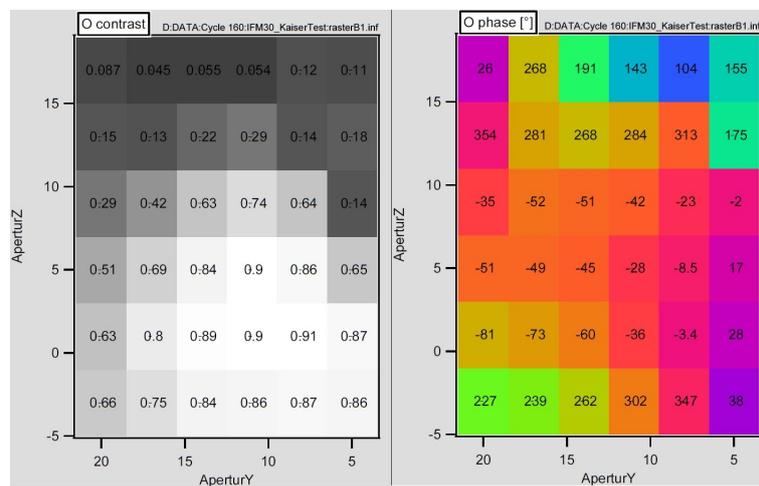


Abbildung 3.11: Kontrast und Phasenschub nach dem dritten Ätzen an verschiedenen Positionen.

# Kapitel 4

## Aufbau der Station

Die Neutronen-Interferometrie stellt hohe Ansprüche an die thermische Stabilität und an Vibrationsfreiheit. Weiters soll der Aufbau eine bequeme Handhabung ermöglichen. Unter Berücksichtigung dieser beiden Gesichtspunkte wurden Planung und Aufbau vollzogen. Ein IFM-Haus wurde errichtet, das dem IFM und die dafür benötigte Steuerung, Lagerung und einen Temperaturfühler aufnimmt. Weiters wurden zwei Detektortische für die Lagerung des O- und des H-Detektors und ein Rack, das Stromversorgung, Computerschnittstelle und Motorsteuerungsschnittstellen aufnimmt, errichtet.

### 4.1 Interferometerhaus

Das IFM ist stark abhängig von äußeren Einflüssen und muss von diesen abgeschirmt werden. Die Aufgabe des IFM-Häuschens ist es, Temperaturschwankungen und Auswirkung von Sonneneinstrahlung zu verhindern und dabei einen ungehinderten Neutronenfluss zu ermöglichen. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen den Grundriss der Versuchsanordnung und einen Schnitt durch das IFM-Haus. Das IFM-Haus hat einen quadratischen Grundriss, mit einer Seitenlänge von  $l = 1390 \text{ mm}$  und es ist  $h = 1890 \text{ mm}$  hoch. Auf einer Seite ermöglicht eine horizontal geteilte Tür den Zugriff auf das IFM. Das Haus besteht aus einem Rahmen aus  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  ITEM-Profilen, der als Träger für Kunststoffplatten dient, auf die eine Isolierung aufgeklebt ist. In die Wände sind Durchlässe für Neutronen ausgespart. Diese wurden verwirklicht durch in die Platten und Isolierung gesägte Löcher, die von außen mit Aluminiumplatten einer Stärke von  $1 \text{ mm}$  zugeklebt sind. Aluminium hat einen absoluten Streuquerschnitt für Neutronen von  $\sigma_A = 0.231(3) \text{ barn}$ , damit kann der Einfluss auf den Neutronenstrahl vernachlässigt werden. Drei solcher Aussparungen befinden sich in den Wänden, eine auf der Seite bei

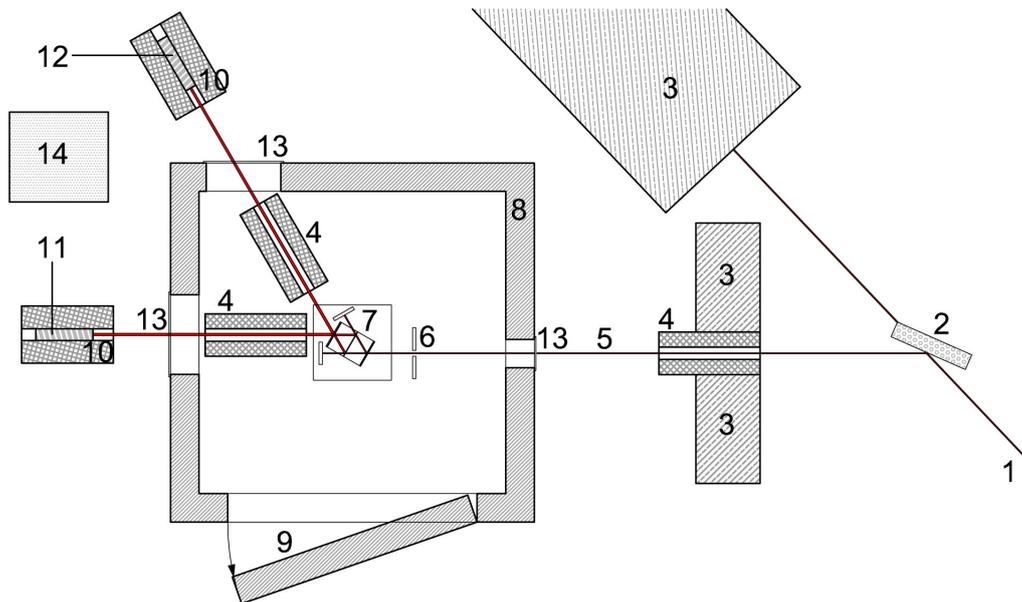


Abbildung 4.1: Grundriss des Versuchsaufbau: 1 weißer Neutronenstrahl vom Reaktor; 2 Polygraphitmonochromator; 3 Schwerbetonabschirmungen; 4 Kollimatoren aus boriertem Paraffin; 5 Monochromatischer Neutronenstrahl; 6 Blende aus Kadmium; 7 IFM; 8 Isolierung aus Polystyrol; 9 Tür; 10 Detektorabschirmungen aus boriertem Paraffin; 11 O-Detektor; 12 H-Detektor; 13 Strahldurchlässe aus Aluminium; 14 Rack mit Steuer und Zähl-einheiten.

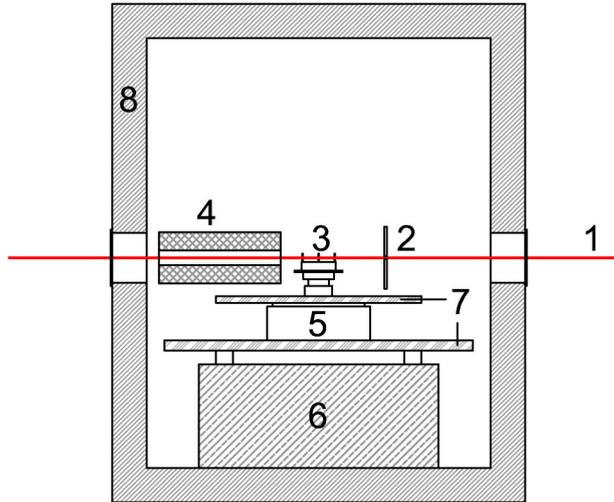


Abbildung 4.2: Schnitt des Versuchsaufbaus: 1 monochromatischer Strahl; 2 Blende; 3 IFM; 4 Kollimator; 5 Anvibrationstisch; 6 Betonblock; 7 Aluminiumplatten; 8 Isolierung.

der der Strahl eintritt, eine gegenüber um den Austritt des Originalstrahls bzw. des doppelt gebrochenen O-Strahls und die Dritte, unter einem Winkel von  $60^\circ$  zum Originalstrahl, vom geplanten Standpunkt des IFMs gegenüber der Tür das IFM-Hauses. Die Öffnungen sind  $70\text{ mm}$  hoch und in einer Höhe von  $920\text{ mm}$  über Boden, was der Strahlhöhe aus dem Reaktor entspricht. Die Breite ist auf die Position angepasst und variiert von  $80 - 500\text{ mm}$ . Dabei ist das Fenster für den Eintritt am kleinsten und das für den H-Strahl am größten. Die Isolierung besteht aus  $100\text{ mm}$  dickem Polystyrol mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $\lambda = 0,036\text{ W/Khm}^2$  (8). Die Oberfläche ergibt sich mit

$$A = 2l^2 + 4hl \quad (4.1)$$

zu  $A = 14,4\text{ m}^2$  und weiters mit

$$\Phi = kA \quad (4.2)$$

ergibt sich ein Wärmefluss von  $\Phi = 51,8\text{ W/Kh}$  ohne Berücksichtigung der Strahldurchlässe. Die Gesamtfläche der Einlässe beträgt

$$A_{Al} = h(l_1 + l_2 + l_3) = 0,051\text{ m}^2. \quad (4.3)$$

Aluminium hat einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $\lambda_{Al} = 235\text{ W/Khm}$ , damit ergibt sich ein Wärmefluss von  $\Phi_{Al} = 13.056\text{ W/Kh}$ . Daraus ergibt

sich die Abschätzung des gesamten Wärmeflusses zu  $\Phi_{ges} = 13.108 W/Kh$ , ein Großteil des Wärmeleitung findet also auf Grund der Strahleinlässe statt. Um eine möglichst hohe Temperaturstabilität zu erreichen befindet sich ein  $m = 800 kg$  Betonblock im IFM-Haus der aufgrund der Wärmekapazität  $C = 1000 J/kgK$  von Beton  $C_{Beton} = 800 kJ/K$  Energie speichert. Damit ergibt sich bei einem Temperaturunterschied zwischen Außen und Innen von  $\Delta T_{a-i} = 5 K$  gemäß

$$\Delta T/h = \frac{\Phi_{ges} \Delta T_{a-i}}{C_{Beton}} = 0,08 K/h \quad (4.4)$$

eine Temperaturänderung von  $\Delta T/h = 0,08 K/h$ . Da hier kein Widerstand der Wärmeleitung durch die Konvektion von Luft berücksichtigt wird, ist der wahre Wärmeverlust etwas geringer. Die Temperatur wird mit einem PT100 Widerstandsthermometer, das durch ein Multimeter ausgelesen wird, gemessen. Die Verbindung des PT100 Elements mit dem Computer ist in Abbildung 4.9 gezeigt. Die Ergebnisse können von einem Computer ausgelesen werden, der über das PXI-Chassis und einer GPIB-Verbindung 8. Das LabVIEW-Programm '*Temperature\_2.vi*' misst minütlich die Temperatur und gibt sie am Bildschirm als Graph über die Zeit aus und schreibt die Daten fortlaufend als Tabelle in eine Datei. Die Temperatur wird dabei als Mittelwert von zehn kurz aufeinanderfolgenden Einzelmessungen bestimmt. Da das Multimeter einen Widerstand als Rückgabewert liefert, muss dieser erst durch eine Eichkurve in eine Temperatur umgerechnet werden. Zum Bestimmen der Eichkurve wurde die Temperatur von verschiedenen warmen Wasserproben gleichzeitig mit Hilfe eines zweiten Messgeräts, das eine Temperatur angibt und dem Multimeter gemessen. Dadurch kann gemäß der Tabelle 4.1, einem Widerstand (R) das PT100-Elements einer Temperatur (T) zugeordnet werden. Die Eichkurve wurde durch eine Gerade angenähert, was über weite Strecken um den Interessensbereich von  $25^\circ C$  gut erfüllt ist. Die Messergebnisse wurden mit Hilfe vom Mathematikprogramm Igor gefittet, die resultierenden Gerade ergibt sich zu

$$T(R) = 25.61(8)R - 90(4). \quad (4.5)$$

Die Temperatur im geschlossenen IFM-Haus bleibt im Lauf eines Tages auf  $\pm 0,3^\circ C$  stabil. In Abbildung 4.3 ist der Temperaturverlauf im IFM-Haus am Montag den 19.9.'11 zwischen 9.00 h und 18.00 h angegeben. Ein Öffnen der Tür des IFM-Hauses erzeugt eine deutlich sichtbare Störung der Temperaturstabilität, wie in Abbildung 4.4 zu sehen.

Probe	T[°C]	R[Ω]
1	21.9	4.36855
2	25.5	4.51521
3	26.0	4,56511
4	26.2	4,56617
5	35.9	4.92520
6	36.0	4.93282

Tabelle 4.1: Werte zur Bestimmung der Eichkurve.

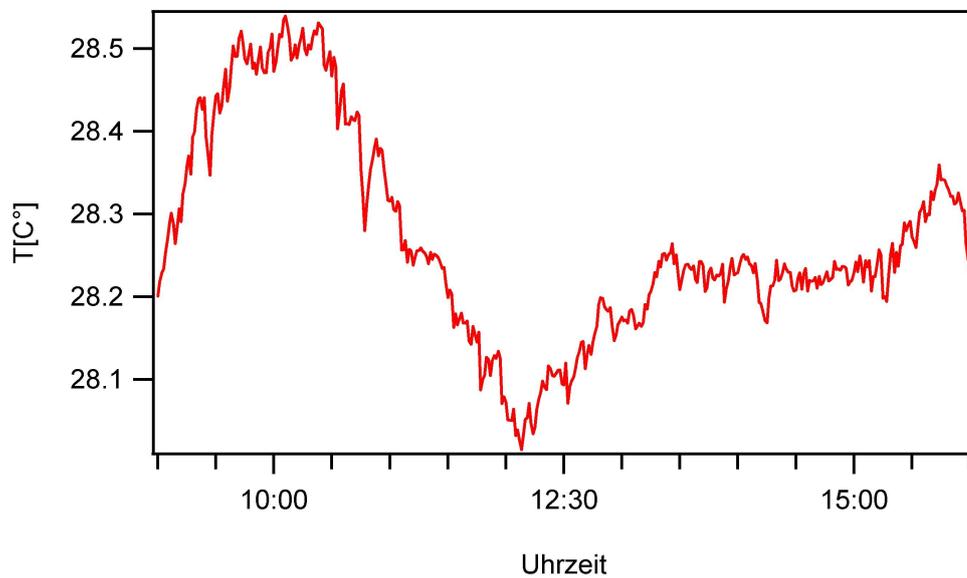


Abbildung 4.3: Temperaturverlauf im IFM-Haus am 19.9.'11.

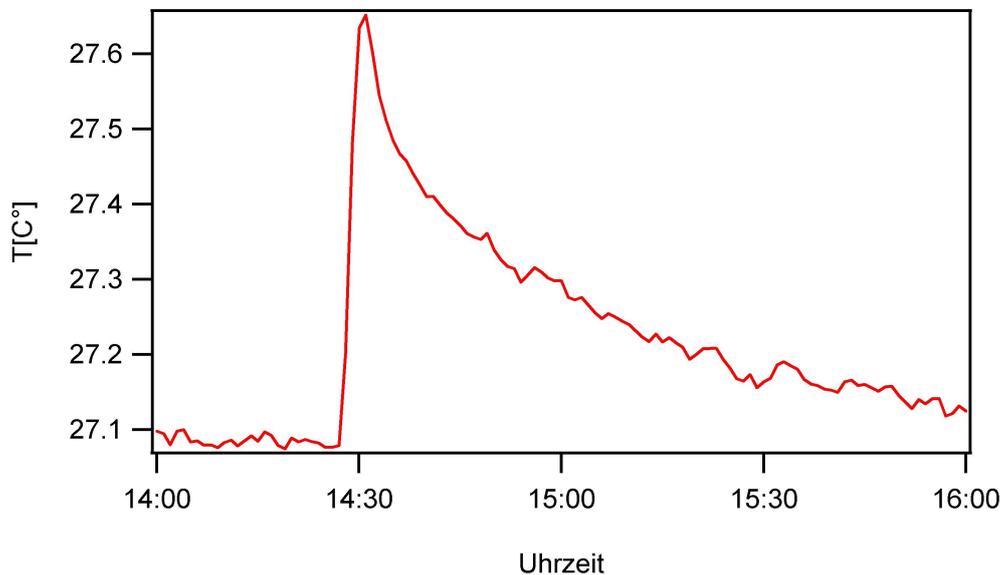


Abbildung 4.4: Temperaturänderung durch öffnen der Türe.

## 4.2 Detektortisch

Der Detektortisch soll neben der sicheren und stabilen Lagerung der Abschirmung, die den Detektor beinhaltet, weitere Aufgaben erfüllen. Er soll weiters Positionierung des Detektors im Neutronenstrahl leicht möglich machen. Das heißt die Höhe, die Richtung und die seitliche Position des Detektors, leicht und wiederholbar variieren zu können und das hohe Gewicht der Abschirmung von knapp  $70\text{ kg}$  sicher aufnehmen. Der Entwurf des Detektortisches berücksichtigt diese Punkte wie folgt.

Die Konstruktion basiert auf  $40 \times 40\text{ mm}^2$  ITEM-Profilen, die eine ausreichende Tragkraft haben. Der Unterbau ist mit Stellfüßen versehen um den Tisch in der Höhe anpassen bzw. und die Auflagefläche nivellieren zu können. Auf dem Unterbau ist ein mit Gleitlagern befestigter Rahmen, der Translation normal zur Neutronen-Strahlrichtung ermöglicht. Die nächste Lage ermöglicht eine Rotation des Detektors um die Höhenachse (entspricht der Z-Achse). Die Position der Achse ist so gewählt, dass der Detektor um die Eingangsöffnung dreht und so der Strahl bei Rotation nicht den Eingang verlässt. Die beiden beweglichen Ebenen sind mit Feststellschrauben ausgestattet um ein Fixieren der Position zu ermöglichen. In Abbildung 4.5 ist der Detektortisch mit der Abschirmung und dem Vorverstärker zu sehen. Um Wiederholbarkeit der Positionierung zu ermöglichen sind Skalen und Zeiger auf der Rückseite der Tische montiert, wie in Abbildung 4.6 ersichtlich. Da



Abbildung 4.5: Detektortisch mit Abschirmung, Detektor und Vorverstärker.

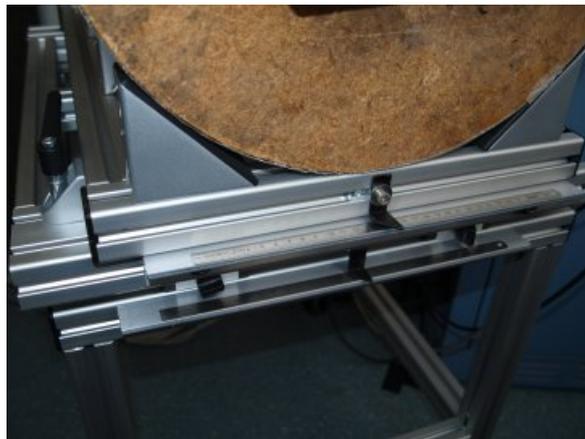
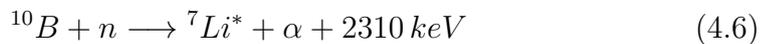


Abbildung 4.6: Skalen zur Positionierung der Detektoren.

die Abschirmung des Detektors rund ist, wurden Winkel montiert, die ein Herunterrollen vermeiden. Ein Plan des Detektortisches befindet sich im Anhang.

### 4.3 Detektor

Für das Experiment werden drei Detektoren benötigt, zwei für O- und H-Detektor und einer als Monitor zur Kontrolle des Neutronenflusses aus dem Reaktor. O- und H-Detektor sollen eine hohe Effizienz und kurze Totzeit haben und Diskriminierung des elektronischen Untergrunds ermöglichen. Ein Effekt auf das Experiment durch die Totzeit wird durch die geringe Neutronenzahl in der Größenordnung von  $1\text{ n/s}$  bereits ausgeschlossen. Der verwendete Detektor ist ein  $BF_3$  gefüllter Zylinder, der als Proportionalzählrohr betrieben wird [12] und sich, zur Vermeidung von physikalischem Untergrund, in einer ebenfalls zylindrischen Abschirmung aus boriiertem Paraffin befindet. Das  $BF_3$ -Gas reagiert mit den Neutronen gemäß der Formel



Es wird eine Spannung zwischen dem äußeren Zylinder und einem in der Mitte befindlichen coaxialen Draht angelegt, wodurch die bei der Reaktion entstandenen geladenen Teilchen zur Kathode (Zylinder) bzw. zur Anode (Draht) hin beschleunigt werden und dort ein elektrisches Signal erzeugen. Das so erzeugte Signal muss elektronisch verstärkt und ein elektrisches Rauschen unterdrückt werden. Der  $BF_3$ -Detektor zeichnet sich durch eine hohe Effizienz von 99% und durch Insensitivität gegen  $\gamma$ -Strahlung aus. Der Vorverstärker hat drei Anschlüsse, für Hochspannung ( $kV$ ) mit der der Detektor versorgt wird, Stromversorgung ( $\pm 12V$ ) für den Vorverstärker selbst und einen Signalausgang. Die Stromversorgung erfolgt über ein NIM-Rack, in dem sich auch die Hochspannungsquelle (TC942 High Voltage BIOS) befindet. Das Rack mit der Stromversorgung ist in Abbildung 4.7 gezeigt. Der Signalausgang wird mit einem BNC-Kabel über den TB-2715 Terminal Block an das PXI Chassis angeschlossen, wie in Abbildung 4.9 ersichtlich. Mit Hilfe des PIX Chassis können die elektrischen Impulse durch ein Computerprogramm gezählt werden.

Der Monitor ist ein Ionisationszähler, der ebenfalls über eine Hochspannungsquelle (TC950 5kV BIOS) im NIM-Rack versorgt wird. Das Ausgangssignal wird mittels eines Vorverstärkers (TC246 AMP/SCA) im NIM-Rack verstärkt und der elektronische Untergrund diskriminiert. Das bearbeitete Signal wird, wie bei O- und H-Detektor über das PXI-Chassis an den Computer weitergegeben.



Abbildung 4.7: NIM-Rack mit Spannungsquellen.



Abbildung 4.8: PXI Chassis und Motion I/O Interfaces.

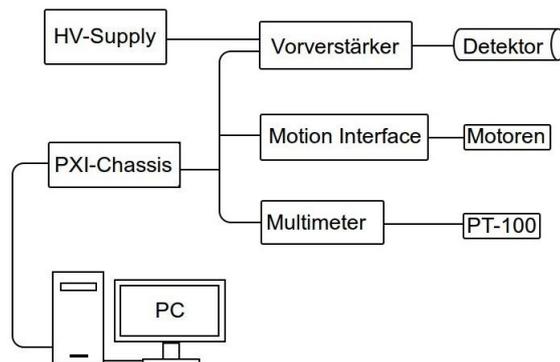


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung der Verbindung des PC, über das PXI-Chassis, mit den Detektoren, der Motorsteuerung und der Temperaturmessung.

## 4.4 Lagerung und Steuerung des Interferometers

Die Lagerung soll Vibrationsfreiheit des IFMs garantieren und eine wiederholbare von außen gesteuerte Positionierung ermöglichen. Weiters sollen Phasenschieber und die Eingangsblende angesteuert werden können.

Das Innenleben des IFM-Hauses ist in Abbildung 4.10 gezeigt. Auf dem Betonblock ist eine 10 mm starke Aluminiumplatte auf vier Stellschrauben gelagert, die ein Nivellieren und ein Justieren der Höhe der Platte ermöglichen. Auf dieser befindet sich der Antivibrationstisch, der eine Resonanzfrequenz von 0,5 Hz hat, bzw. einer Periode von 2 s. Schwingungen dieser Frequenz können vernachlässigt werden da die Neutronen, mit einer Geschwindigkeit von  $v_N = 2000 \text{ m/s}$  bei einer Länge des IFMs von 140 mm, nur 70  $\mu\text{s}$  brauchen, um das IFM zu durchqueren und die Bewegung des IFMs gegen die der Neutronen vernachlässigt werden kann. Auf dem Antivibrationstisch ist eine schwarz eloxierte Aluplatte mit M10 Löchern um ein Anschrauben von Stellmotoren zu ermöglichen. Auf dieser Platte befestigt sind die Motoreinheiten zum Steuern des IFMs, für die Blende vor dem IFM und ein Rotationsmotor für die Betätigung des Phasenschiebers. Die Abbildung 4.11 zeigt das IFM mit den Motoren die es Steuern. Eine schematische Zeichnung der Steuerung ist in 4.12 gezeigt.

### Steuerung

Die Steuerung der Versuchsanordnung erfolgt über Schrittmotoren die entweder Translation oder Rotation ermöglichen und die mittels des PXI-Chassis und zwei Motion I/O Interfaces von einem Computer gesteuert werden. Hierzu kann einerseits das Programm MAX von National-Instruments oder die im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellten LabVIEW-Programme verwendet werden.

Das IFM kann mittels eines Translationsmotors quer zur Strahlrichtung bewegt werden, um die optimale Position des IFMs zu finden. Weiters kann es um die Z-Achse (senkrechte Achse) gedreht werden, um den Bragg-Peak zu finden. Die dritte Möglichkeit das IFM zu bewegen, ist die Rotation um die sogenannte  $\rho$ -Achse, die parallel zum einfallenden Strahl liegt, und mit der das IFM gekippt werden kann. Die Motoren werden in *steps* gemessen und können wie in Tabelle 4.2 in Grad bzw. Millimeter umgerechnet werden. Die Höhe des IFMs kann durch Unterlegen von Glasplatten einer Dicke von 5mm angepasst werden. Hier wurde kein Stellmotor verwendet um Vibrationen durch den Haltestrom des Motors zu verhindern.



Abbildung 4.10: Innenleben des IFM-Hauses. ganz unten ist der Betonblock zu sehen, darauf eine nivellierte Aluminiumplatte, auf der der Antivibrationstisch steht. auf dem Tisch sind die Steuermotoren für das IFM, die Blende und der Phasenschieber montiert. Auf der rechten Seite befinden sich Parafinziegel zur Abschirmung von Untergrund.



Abbildung 4.11: IFM mit Stellmotoren. Im Vordergrund ist der Drehmotor für den Phasenschieber zu sehen, im Hintergrund die Steuereinheit für das IFM.

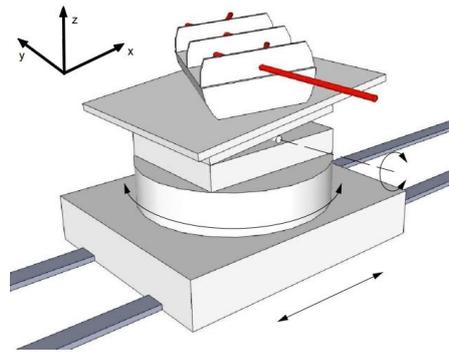


Abbildung 4.12: Schematische Zeichnung der Lagerung des IFM mit der Möglichkeit das IFM parallel zum Strahl zu fahren, um die Höhenachse zu rotieren und parallel zur Strahlrichtung zu Kippen.

Rotationsmotor	28.000 <i>steps</i>	1°
Translationsmotor	68.000 <i>steps</i>	1 <i>mm</i>
Kippmotor	70.800 <i>steps</i>	1°

Tabelle 4.2: Umrechnung zwischen Motoreinheiten in Grad bzw. Millimeter. Translationsmotoren wurden für die Steuerung der Blenden verwendet, Rotationsmotoren für die Steuerung des Phasenschibers und zum Drehen des IFM bei Rockingkurven, und ein Kippmotor wurde eingesetzt bei den Messungen des Gravitationsphasenschubs.

Vor dem IFM befindet sich die Eingangsblende die den einfallenden Strahl kollimiert. Diese Blende kann mittels zweier Translationsmotoren in der Höhe (Z-Achse) und quer zum Strahl (entlang der X-Achse) verstellt werden. Weiters befindet sich noch ein Rotationsmotor neben dem IFM, auf dem der Phasenschieber montiert ist. Als Phasenschieber dient eine hochreine Aluminiumplatte, die 5 mm dick ist und mittels 20 x 20 mm<sup>2</sup> ITEM-Profilen befestigt ist. Die Befestigung ermöglicht die Position des Phasenschiebers im IFM zu ändern.

## Programme

Bei allen im Folgenden beschriebenen Programmen handelt es sich um LabVIEW Programme, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen: in Hauptprogramme und Unterprogramme.

Die Programme zum Zählen der Neutronen wurden in LabView geschrieben und zählen immer parallel die Impulse (Counts, cts) von Monitor, O- und H-Detektor. Das einfachste Programm namens '*Monitor + Counter\_1.vi*' welches in Abbildung 4.13 gezeigt ist, zählt die Impulse über eine in Feld '*measurementtime*' in Sekunden angegebene Zeit und gibt sie in den Feldern '*Monitor*', '*O - Det*' und '*H - det*' aus. Am Ende der Messzeit stoppt das Programm automatisch. Dieses Programm kann als Subroutine von anderen Programmen aufgerufen werden und gibt die Counts nach Ablauf der Messzeit als Zahlenwert zurück. Das zweite Programm heißt '*Monitor + Counter\_Continouse.vi*'. Hier kann eine Messzeit und eine Wartezeit eingestellt werden, die das Programm abwechselnd durchläuft, nur während der Messzeit werden Neutronen gezählt und die Ergebnisse werden als Graph bzw. als Tabelle am Bildschirm ausgegeben. Das Programm läuft so lange bis es manuell mit dem 'Stop'-Knopf beendet wird. Das dritte Programm namens '*Monitor + Counter\_file.vi*' durchläuft eine angegebene Messzeit fortlaufend, gibt die Counts als Graph aus und speichert die Ergebnisse in einer Tabelle. Es läuft ebenfalls bis der 'Stop'-Knopf betätigt wird. Exemplarisch für die drei Programme wird hier das Programm '*Monitor + Counter\_Continouse.vi*' in Abbildung 4.13 gezeigt. Es gibt zwei Programme, die Motoren steuern und zwar *Move\_2.vi* und *Move\_Limits\_2.vi*. Das Programm *Move\_Limits\_2.vi* ist in Abbildung 4.14 gezeigt. Das erste dient zur manuellen Bewegung einzelner Motoren. Hier wird, nachdem der Run-Button betätigt wurde eine '*Board - ID*', ein Motor '*Axis*' und eine Zielposition '*TargetPosition*' ausgewählt, durch Klicken auf den Button '*Start*' wird der Motor in die angegebene Position gebracht, dabei wird laufend die aktuelle Position angezeigt. Weiters können die '*Limits*' eingestellt werden, sie geben an, in welchen Rahmen die einzelnen Motoren bewegt

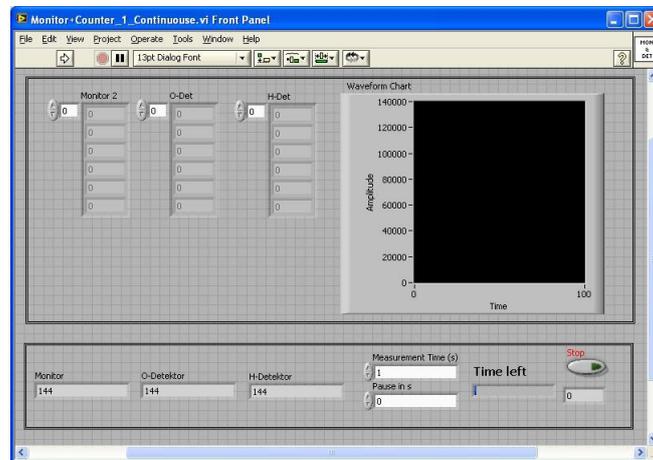


Abbildung 4.13: LabVIEW-Programm Monitor+Counter\_1\_Continuous.vi.

werden können. Es werden dabei zwei Arten von Limits unterschieden und zwar absolute Limits, die die Möglichkeiten der einzelnen Motoren angeben, um zu verhindern, dass der Motor beschädigt wird. Diese Limits können für den jeweilig angewählten Motor umgestellt werden durch Klicken auf *'SaveAbsoluteLimits'*. Ein Pop-Up-Fenster erscheint, und die neuen Grenzen *'Upper – und 'Lower – Limits'* können angegeben werden. Weiters gibt es noch Limits die ein Beschädigen des IFMs verhindern sollen. Sie können durch Betätigung von *'SaveSwitchLimits'* geändert werden. Das zweite ist eine Subroutine, die von anderen Programmen aufgerufen wird und dafür die Inputs *'BoardID'*, *'Axis'* und *'Targetposition'* braucht. Das Programm prüft ob die Bewegung zulässig ist, also innerhalb der Limits liegt und bringt, falls ja, den Motor in die angegebene Position, falls nein, wird eine Fehlermeldung am Bildschirm ausgegeben, sie lautet *'LimitsError'*. Das Programm gibt bei Erreichen der Zielposition ein Signal zurück ans Hauptprogramm. Um eine ideale Position für die Eingangsblende zu finden, kann die Blende in X- und Z-Richtung bewegt werden, um den Ort des stärksten Teilchenflusses zu finden. Hierzu gibt es ein Programm, das die Blende entlang der Z-Richtung bewegt, namens *'Blende\_Z – Achse.vi'* und ein weiteres, das zuständig ist für die Bewegung entlang der X-Richtung *'Blende\_X – Achse.vi'*. Das Programm zur Blendensteuerung ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Sie unterscheiden sich nur durch den vom Programm angesprochenen Motor und dessen Limits, die die Bewegung begrenzen. Hier kann eine Schrittweite für den Motor eingestellt werden im Feld *'Increment'*, einen Start- *'Start'*, einen Zielpunkt *'Finish'* und eine Zeit, die beim jeweiligen Punkt gezählt werden soll im Feld *'MeasurementTime'*. Das Programm schreibt die Ergebnisse in eine Tabelle

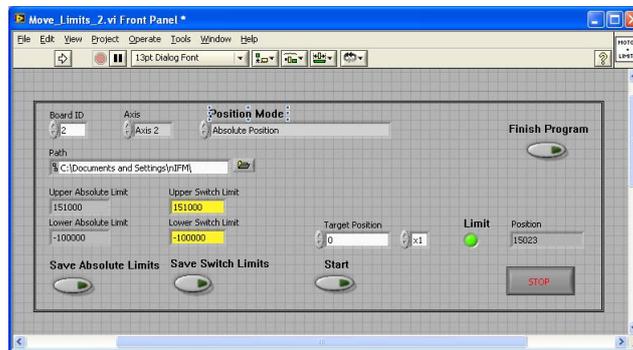


Abbildung 4.14: Programm zum Steuern der Motoren und Speichern der Limits.

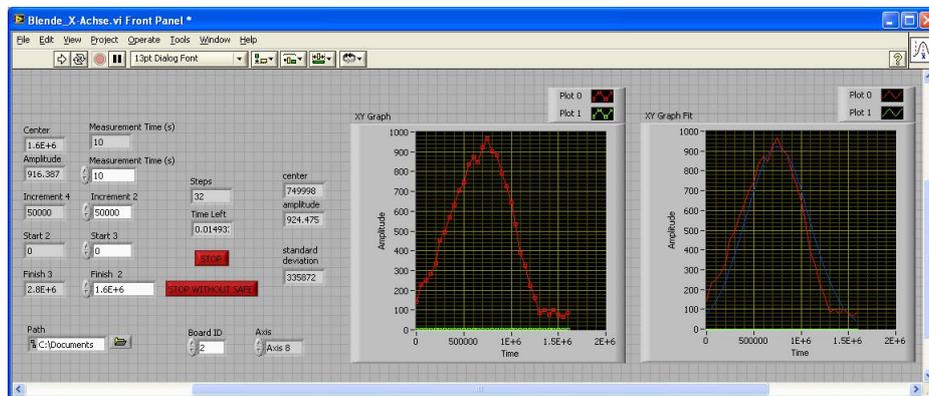


Abbildung 4.15: Programm zum Steuern der Blende.

und gibt sie auch als Graph aus. Nach Erreichen des Zielpunkts, bzw. des letzten möglichen Punktes vor dem Zielpunkt wird die Messung beendet und wird ein Gauß-Fit durch die Messkurve gelegt, und der jeweilige Motor fährt an die Stelle des Maximums des Gauß-Fits. Das Programm berechnet laufend während der Messung die Restzeit '*Timeleft*', die es benötigen wird in Minuten und die Anzahl an Schritten, die für diese Messung nötig ist. Für das Suchen des O-Strahls wurde im Laufe der Versuchsdurchführung auch eine Blende hinter dem IFM eingebaut. Diese wurde analog zu der Eingangsblende durch das Programm '*Blende\_2\_X.vi*' gesteuert. Allerdings ist hierbei nur die Bewegung entlang der X-Achse nicht aber entlang der Z-Achse möglich gewesen.

Der Begriff '*Rocking*' meint das Drehen des IFMs um die Z-Achse um den Bragg-Peak zu finden. Es wurden zwei Programme geschrieben, die diese Aufgabe erfüllen, '*Rocking\_1.vi*' und '*Rocking\_auto.vi*'. Das erste ist in

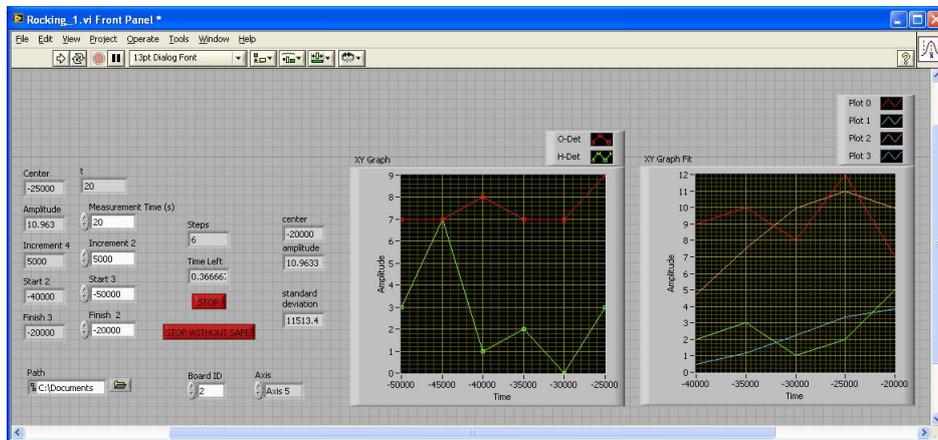


Abbildung 4.16: Rocking\_1.vi

Abbildung 4.16 zu sehen. Bei diesem Programm wird, wie bei den Programmen zur Blendensteuerung ein Start- '*Start*', ein Zielpunkt '*Finish*', ein '*Increment*' und eine Messzeit '*MeasurementTime*' eingestellt. Das Programm durchläuft dann eine Messung, fittet dann sowohl die Messpunkte von O- und H-Strahl mit einer Gauß-Kurve und stellt abschließend den Motor auf das Maximum des Fits, der ein größeres Verhältniss zwischen Peakhöhe und Untergrund hat. Dies dient dazu den signifikanteren Peak zur Positionsfindung zu verwenden. Die Ergebnisse und die Fit-Kurven werden als Graph am Bildschirm ausgegeben und als Tabelle gespeichert. Weiters wird auch hier die Restzeit und die benötigten Schritte angegeben. Das Programm '*Rocking\_auto.vi*' liest aus den letzten Messergebnissen den Ort des Peaks aus und durchläuft einen unter '*range*' einstellbaren Bereich vor und nach diesem Peak. Die Messdauer pro Punkt ist unter '*MeasurementTime*' einstellbar. Das Programm läuft dann wie oben ab.

Bei einer Interferenzmessung muss sich das IFM zunächst im Bragg-Peak befinden, bevor durch systematisches Drehen des Phasenschiebers und anschließendes Messen ein Interferogramm erstellt wird. Wie unter Neutronenoptik beschrieben, kann dadurch die Phasenlage zwischen Strahlengang '*PathI*' und '*PathII*' variiert werden. Ein sogenanntes Interferogramm kann mit dem Programm '*Interferenz\_normed\_01\_2012.vi*' gemessen werden. Analog zu den oben beschriebenen Programmen kann auch hier ein Start- '*Start*', ein Zielpunkt '*Finish*', ein '*Increment*' und eine Messzeit '*MeasurementTime*' eingestellt werden. Das Programm zeigt die Messpunkte laufend an und speichert die Ergebnisse in einer Datei. Es zeigt aber auch normierte Werte an, die sich auf einen durchschnittlichen Wert des Monitors beziehen und ebenfalls gespeichert werden. Hierzu wird die Monitorzählrate durch diesen Mittel-

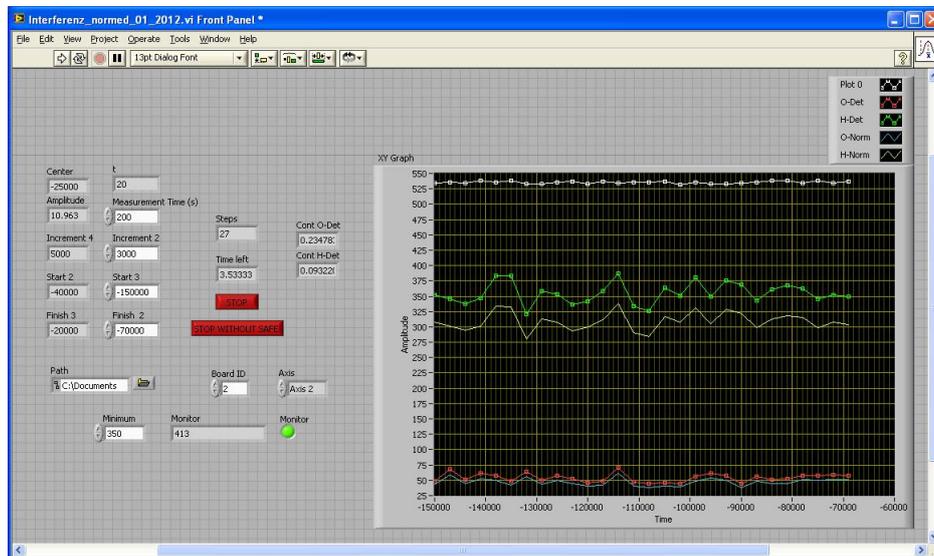


Abbildung 4.17: Rocking\_1.vi

wert dividiert, und der resultierende Faktor wird mit den Zählraten von O- und H-Detektor multipliziert. Das Resultat sind die normierten Zählraten. Während der Messung wird behelfsmäßig ein Kontrast berechnet, der unter '*ContO - Det*' bzw. '*contH - Det*' angezeigt wird. Dazu wird aus der, bei der Messung entstehenden Datei der höchste ( $cts_{max}$ ) und niedrigste Zählwert ( $cts_{min}$ ) von O- und H-Strahl ausgelesen und mit folgender Formel in einen Kontrast umgerechnet:

$$C = \frac{cts_{max} - cts_{min}}{cts_{max} + cts_{min}} \quad (4.8)$$

Das Ergebnis dieser Rechnung kann nur als Anhaltspunkt dienen, da weder statistische Extrema und der Untergrund berücksichtigt werden. Das Programm kontrolliert die Monitorzählrate und unterbricht die Messung, bis wieder genug Neutronen am Monitor ankommen.

## 4.5 Justierung

Wie hoch der erreichbare Kontrast ist, hängt von vielen Faktoren ab. Die Güte des IFM stellt die erste Begrenzung des möglichen Kontrastes dar. Der Untergrund, der zum einen physikalisch ist, zum anderen durch elektronisches Rauschen verursacht wird, soll möglichst klein sein. Die Eingangsblende sollte vor allem bei dem niedrigen Fluss des TRIGA-Reaktors am Ort des stärksten Flusses stehen. Dies verbessert das Verhältnis von Strahlintensität zu Untergrund. Die Detektoren sollen erstens parallel zum und mittig im Strahl stehen, zweitens muss die Einstellung der Elektronik optimiert werden um Rauschen zu vermeiden. Das IFM benötigt Vibrationsfreiheit und ebenen Stand um optimal zu funktionieren, was durch Einstellen des Antivibrationstisches erreicht werden kann.

### Strahlvermessung

Das IFM soll am Ort des größten Neutronenflusses stehen. Dieser wird ermittelt indem der Strahl mit einer Blende abgerastert wird. Dazu wird ein Detektor direkt in den Strahl gestellt und davor die Blende, die mittels Stellmotoren entlang der horizontalen X- und der vertikalen Z-Achse bewegt werden kann. Die Blende wurde auf eine Größe von  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  gestellt. Mit Hilfe der Programme '*Blende\_X - Achse.vi*' und '*Blende\_Z - Achse.vi*' kann die Blende gesteuert werden. Der Stellmotor für die X-Achse lässt  $2,5 \text{ cm}$  Stellweg zu, der für die Z-Achse  $50 \text{ mm}$ . Das ist ausreichend, da der Kollimator den Strahl, der vom Monochromator kommt, auf  $15 \text{ mm}$  Breite und  $40 \text{ mm}$  Höhe beschränkt. Bei der Positionierung des Detektors mit  $60 \text{ mm}$  Durchmesser ist darauf zu achten, dass die Blende nicht aus der Eingangsöffnung wandern und damit das Messergebnis beeinträchtigen kann. Zuerst wurde die X-Achse mit einer Schrittweite von  $1,56 \text{ mm}$  grob vermessen. Dabei gilt  $64.000 \text{ steps} \hat{=} 1 \text{ mm}$ , über eine Distanz von  $25 \text{ mm}$  und einer Messzeit von  $10 \text{ s}$  pro Punkt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.19 zu sehen. Die Asymmetrie der Intensität ist auf die Geometrie des Strahlengangs und des Monochromators zurückzuführen [13]. Anschließend wurde die Blende an den Ort der stärksten Intensität gestellt, was der Position  $11,7 \text{ mm}$  entspricht. Danach wurde eine feine Messung der Intensität entlang Z-Achse gemacht. Als Schrittweite wurde  $0,78 \text{ mm} = 50.000 \text{ steps}$  eingestellt und eine Distanz von  $44 \text{ mm} = 2.800.000 \text{ steps}$  bei  $10 \text{ s}$  Messzeit pro Punkt vermessen. Durch die Messpunkte wurde ein Gauß-Fit gelegt, wie in Abbildung 4.20. Die Fitfunktion hat folgende Form:

$$g(x) = U + e^{-\left\{\frac{x-x_0}{v}\right\}^2} \quad (4.9)$$

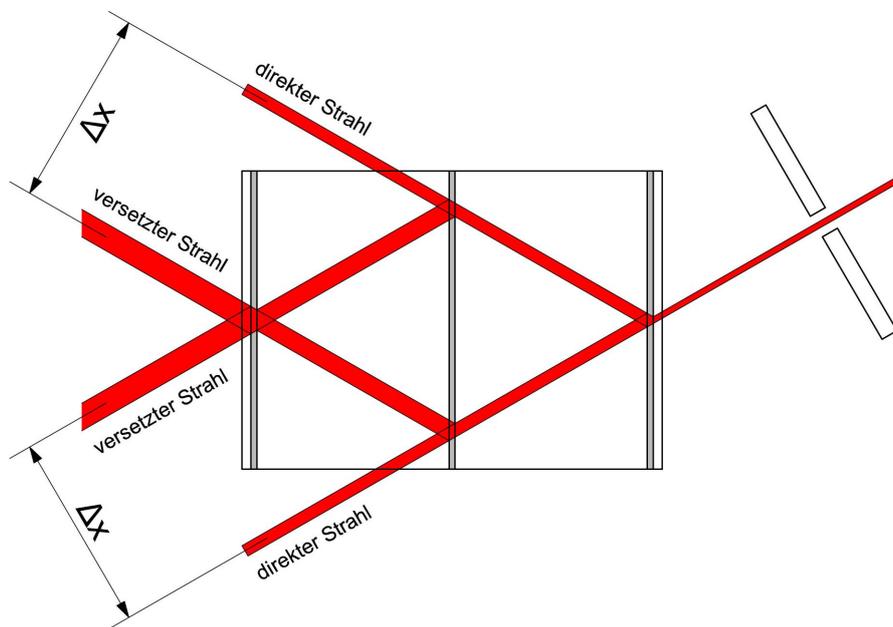


Abbildung 4.18: Strahlengang Durch das IMF,  $\Delta x$  ist der Strahlversatz, der für O- und H-Detektor gleich ist

Wobei  $U$  der Untergrund,  $x_0$  die Stelle des Maximums, und  $v$  die Varianz ist. Daraus kann man sehen, dass die ideale Z-Position bei  $x_0 = 25 \text{ mm}$  liegt; dort wurde die Blende positioniert. Um zu kontrollieren, ob sich das Maximum in der X-Richtung geändert hat, wurde nun abermals die X-Achse vermessen. Dazu wurde die Blende auf das Maximum des Gauß-Fits gestellt. Bei dieser Messung wurde eine kleinere Schrittweite von  $0.78 \text{ mm} = 50.000 \text{ steps}$  eingestellt, pro Punkt wurde  $10 \text{ s}$  gezählt. Diese Messung ist in Abbildung 4.21 zu sehen. Da sich keine Änderung der idealen X-Position ergab, ist davon auszugehen, dass der Ort der höchsten Strahlintensität gefunden wurde.

## Detektorposition

Eine gute Position der Detektoren ist wichtig um keine Neutronen zu verlieren, also eine möglichst hohe Zählrate zu erreichen. Da man von außen nicht in das IFM-Haus sehen kann, ist die Einrichtung der Detektorposition von O-Detektor und besonders von H-Detektor schwierig, mangels guter Anhaltspunkte. Da die Intensität der gebrochenen Strahlen sehr klein ist (der O-Strahl hat eine Intensität von  $1 \text{ n/s}$ ), wird zuerst der direkte Strahl gesucht, ohne dass das IFM im Strahlengang steht. Dann der Detektor verschoben um den parallel zum direkten Strahl verlaufenden O-Strahl zu finden. Der

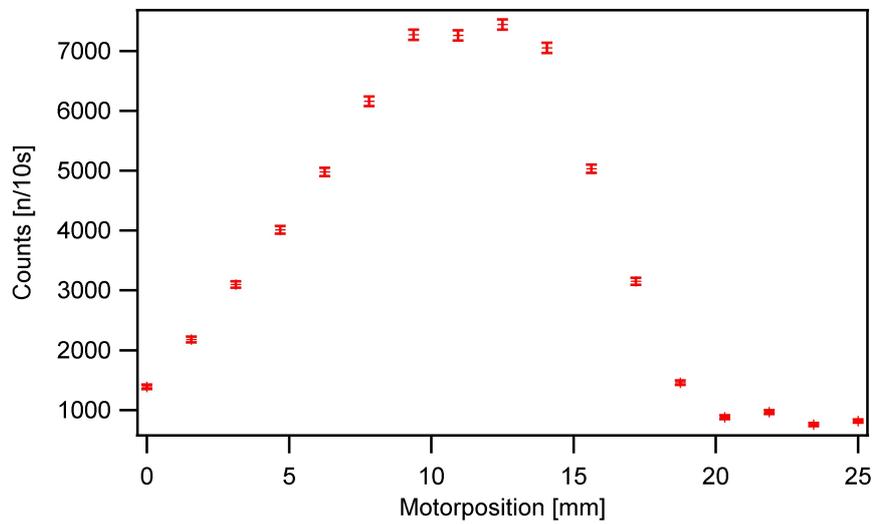


Abbildung 4.19: Ergebnis der ersten Strahlvermessung in horizontaler Richtung, mit der höchsten Intensität bei  $11,7\text{ mm}$ .

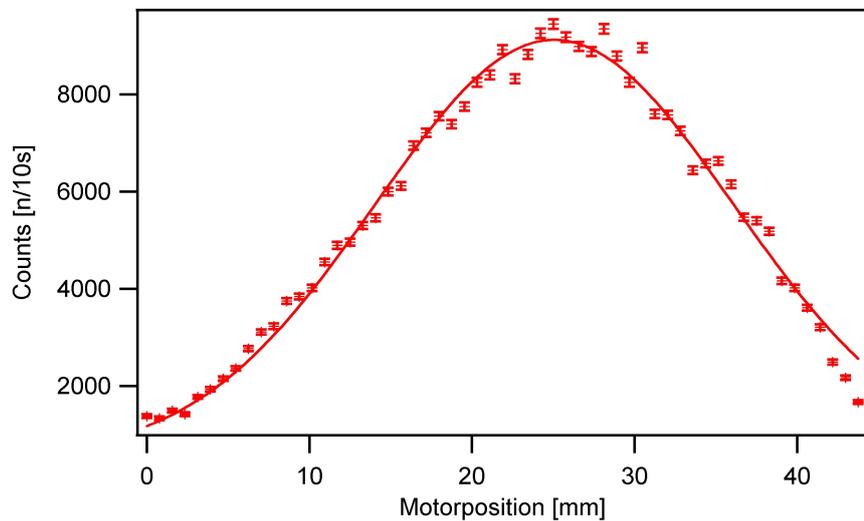


Abbildung 4.20: Vermessung des Strahls in vertikaler Richtung. Der Ort des höchsten Neutronenflusses liegt bei  $x_0 = 25\text{ mm}$ .

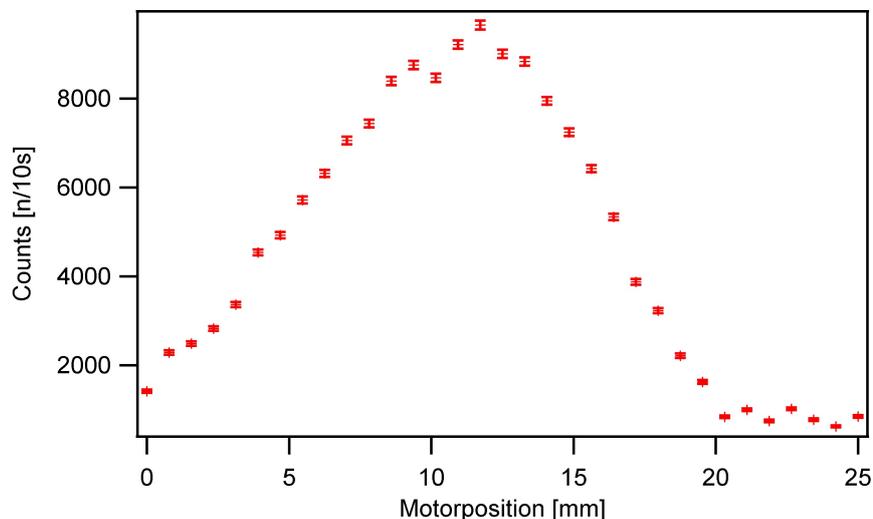


Abbildung 4.21: Zweite Messung der horizontalen Richtung. Abermals liegt der Ort der höchsten Intensität bei  $11,7\text{ mm}$ .

Verlauf von O-, H-Strahl, direktem Strahl und der Strahlenversatz sind in Abbildung 4.5 skizziert.

Als erster Schritt wurde die Höhe der Detektoren eingestellt. Dabei wurde die Mitte der Abschirmung, wo die Aufnahme für den Detektor ist, auf die Strahlhöhe von  $920\text{ mm}$  gestellt und mit Hilfe einer Wasserwaage eben eingerichtet. Dies war durch die Stellfüße der Detektortische problemlos möglich. Der O-Detektor wurde in die Abschirmung auf dem Detektortisch eingebaut und angeschlossen. Der Detektortisch hat zwei Skalen auf der Rückseite 4.6, um die Bewegung des Detektors messen und reproduzieren zu können. Diese Skalen sind in Abbildung 4.6 gezeigt. Zuerst wurde der Detektor seitlich bewegt und an jeder Position  $100\text{ s}$  gezählt. Um eine bessere Ortsauflösung zu erreichen, wurde vor dem Eingang des Detektors eine Schlitzblende aus Cadmium und Borcarbid angebracht. Das Ergebnis der ersten Messung ist in Tabelle 4.5 angeführt. Der Detektor wurde auf die Position  $115\text{ mm}$ , die dem Ort der höchsten Intensität entspricht gestellt und mit den dafür vorgesehenen Schrauben fixiert. Anschließend wurde die Rotationsachse vermessen, analog zur Messung der seitlichen Translation. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.5 zu sehen. Der Detektor wurde auf Position  $146\text{ mm}$  gestellt. Danach wurde nochmals die Translation gemessen. Aus Tabelle 4.5 sieht man die Erhöhung der Intensität um  $84\text{ n}/100\text{ s}$  durch die Optimierung des Winkels des Detektors.

Nun wird das IFM im Strahlengang platziert und darauf geachtet, dass es waagrecht steht. Aus der Länge des IFMs  $l_{IFM} = 106\text{ mm}$  und dem Bragg-

1.)		2.)		3.)	
Position [mm]	Cts [100s]	Position [mm]	Cts [100s]	Position [mm]	Cts [100s]
90	69	110	1508	90	68
100	110	122	1748	100	123
105	272	134	1874	105	280
110	967	146	1943	110	1007
115	1859	158	1892	115	1948
120	785	170	1710	120	825
125	527	182	1407	125	548
130	250			130	248
140	73			140	70

Tabelle 4.3: **1.)** Erste Translationsmessung, **2.)** Rotationsmessung, **3.)** Zweite Translationsmessung.

winkel  $\alpha = 60^\circ$  kann man den Strahlenversatz  $\Delta x$  des O-Strahls zum direkten Strahl errechnen. Mit  $\Delta x = l_{IFM}/2\sin(2\alpha)$  kann berechnet werden, dass der O-Detektor um  $46\text{ mm}$  verschoben werden muss, um im O-Strahl zu stehen. Um möglichst wenig Fehler durch die Einstreuung vom direkten Strahl, zu erhalten wurde dieser provisorisch mit boriiertem Paraffin und Cadmium abgeschirmt. Mit Hilfe des Programms '*Rocking-1.vi*' wird der Bragg-Peak gesucht. Dabei wurde pro Punkt  $100\text{ s}$  gemessen und mit einem Inkrement von  $0,089^\circ = 2500\text{ steps}$  von Position  $2,82^\circ$  bis  $4,69^\circ$  der Strahl abgeschritten. Ein Grad entspricht dabei  $28.000\text{ steps}$ . Aus Graph 4.22 ist ersichtlich, dass das Maximum des Bragg-Peaks bei  $3,89^\circ$  liegt und der Peak eine Halbwertsbreite von  $0,52^\circ$  hat. Das IFM wird nun in diese Position gebracht und der H-Detektor kann justiert werden.

Analog zum O-Detektor kann der H-Detektor in den direkten bei der ersten Platte reflektierten Strahl eingestellt werden und anschließend um  $\Delta x$ , wie in Abbildung 4.5 ersichtlich, verschoben werden. Der direkte Strahl ist leichter zu finden, da er eine höhere Intensität hat. Zuerst wurde der H-Detektor seitlich Schrittweise um  $10\text{ mm}$  verschoben, um den direkten Strahl zu finden. Wie aus der ersten Tabelle von 4.4 ersichtlich, wurde die Position mit höchster Intensität bei  $90\text{ mm}$  gefunden. Bei dieser Position wurde der Detektor rotiert, um ihn parallel zur Strahlrichtung einzustellen. die zweite Tabelle von 4.4 zeigt das Ergebnis der Messung und die ideale Position bei  $80\text{ mm}$ . Danach wurde der H-Detektor um  $\Delta x$  verschoben, um die Suche nach dem versetzten Strahl durchzuführen. Um keinen Untergrund vom di-

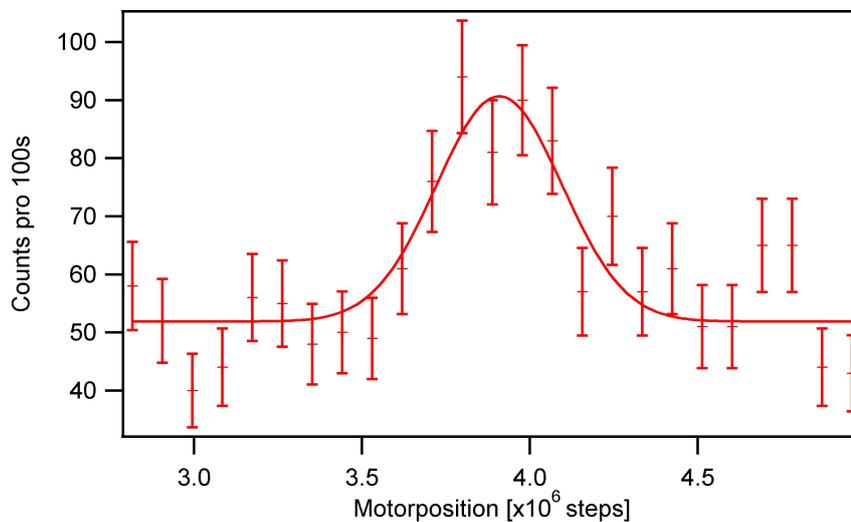


Abbildung 4.22: Ergebnis des ersten Rockings im O-Strahl. Die Höhe des Peaks ist  $P = 38,8 n/100s$  und der Untergrund beträgt  $U = 51,9 n/100s$

rekten Strahl zu bekommen, wurde dieser mit Cadmium blockiert. Die zweite Translationsmessung ist in der dritten Tabelle von 4.4 angeführt und ergibt eine Idealposition von  $120 mm$ .

Zum Abschluss der Positionierung wurde noch eine Rockingkurve gemessen. Dabei wurde mit einem Inkrement von  $0,089^\circ$  und einer Messzeit von  $50 s$  pro Punkt ein Bereich von  $2,82^\circ$  bis  $4,96^\circ$  vermessen. Man sieht, dass der Bragg-Peak sowohl im O-Strahl als auch im H-Strahl an der selben Stelle gemessen wurde.

## Einstellen der Detektorelektronik

Der Detektor soll alle Neutronen, die auf ihn auftreffen, zählen und elektronisches Rauschen, das Untergrund erzeugt, unterdrücken. Man kann die Versorgungsspannung und den Diskriminator des Detektors einstellen. Durch Variieren dieser beiden Einstellmöglichkeiten soll ein optimaler Betrieb erreicht werden.

Der gemessene Untergrund kann zwei Ursachen haben: realen physikalischen Untergrund durch Neutronen, und elektronischen durch Rauschen. Erster kann durch Verbesserung der Abschirmung reduziert werden. Um zweiten zu vermeiden, kann die Einstellung des Diskriminators optimiert werden. Die zu zählenden Signale sind rechteckige Spannungsimpulse einer Höhe von  $5 V$ . Der Diskriminator ist eine elektronische Schaltung im Vorverstärker, die alle Signale unter einer gewissen Signalhöhe, unterdrückt. Wie hoch die

1.)		2.)		3.)	
Position [mm]	Cts [100s]	Position [mm]	Cts [100s]	Position [mm]	Cts [100s]
50	17	60	59	80	18
60	24	70	315	90	23
70	30	80	431	100	109
80	319	90	421	110	174
90	400	100	295	120	190
100	198	110	164	130	120
110	51	120	57	140	37
120	20	130	22	150	16

Tabelle 4.4: **1.)** Positionsbestimmung des H-Detektors im direkten Strahl, **2.)** Rotationsmessung des H-Detektors im direkten Strahl, **3.)** Translationsmessung des H-Detektors im versetzten Strahl.

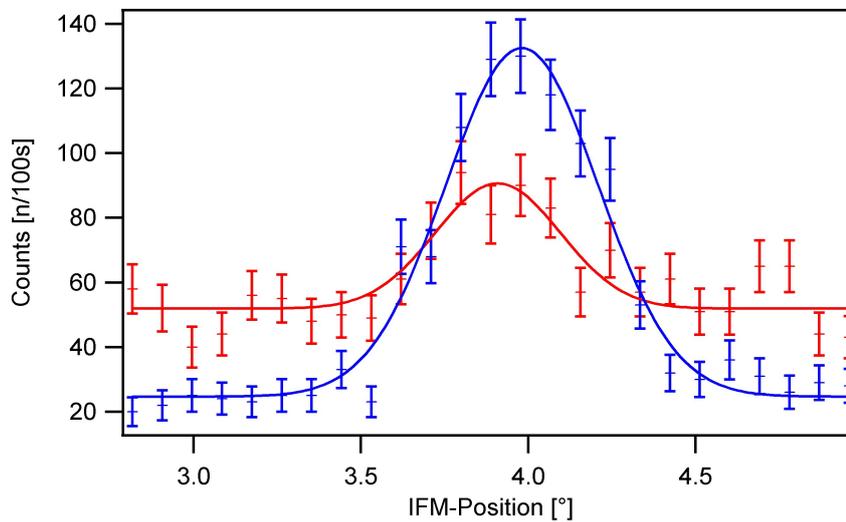


Abbildung 4.23: Rockingkurve nach der Positionsbestimmung der Detektoren. Der O-Strahl ist rot eingezeichnet, der H-Strahl blau. Die Höhe des Peaks ist  $P = 38,8 n/100s$  und der Untergrund beträgt  $U = 51,9 n/100s$ .

Schwelle ist, unter der diskriminiert wird, kann durch eine Schlitzschraube am Vorverstärker eingestellt werden. Da es keine Skala oder andere Einrichtungen, zum Messen der Einstellung gibt, ist die Reproduzierbarkeit nur eingeschränkt möglich. Nach der Einstellung des Diskriminators wird die Versorgungsspannung justiert. Hier bildet sich ein Plateau aus, in dem die Zählrate für verschiedene Versorgungsspannungen konstant bleibt. Unter und über dem Plateau zeigt die Zählrate eine starke Abhängigkeit von der Höhe der Versorgungsspannung, wie in Abbildung 4.27 ersichtlich. Wenn die Versorgungsspannung so gewählt wird, dass sie sich in der Mitte des Plateaus befindet, so haben kleine Spannungsschwankungen der Spannungsquelle keinen Effekt auf die Zählung. Anfangs wurden bei abgeschaltetem Reaktor ein elektronisches Rauschen von ca.  $30\text{ n}/100\text{ s}$  gemessen.

Da sich die Position des Plateaus und die Diskriminatorstellung gegenseitig beeinflussen, wurde zuerst eine Messung durchgeführt, die es ermöglicht diese Auswirkung abzuschätzen. Da beide Detektoren und Vorverstärker identisch sind, werden beide Detektoren mit derselben Spannungsquelle versorgt und die erste Messung nur am H-Detektor durchgeführt. Der Detektor wurde mangels Reaktorbetrieb bei dieser Messung einer Neutronenquelle (Pu-Be-Quelle) ausgesetzt, deshalb sind die Zählraten nicht mit denen der Strahlensuche vergleichbar. Es wurde pro Punkt  $10\text{ s}$  gemessen und die Versorgungsspannung in  $100\text{ V}$  Schritten von  $2000\text{ V}$  bis  $3000\text{ V}$  variiert. Nach jedem solchen Durchlauf wurde die Diskriminatorstellung um einen Schritt weiter gestellt. Ein Schritt bedeutet dabei, dass die Schlitzschraube um eine Achteldrehung bzw.  $45^\circ$  im Uhrzeigersinn gedreht wurde. Die Nullposition wurde bei senkrechtem Schlitz gewählt. Die Ergebnisse sind für ausgewählte Diskriminatorstellungen in Abbildung 4.24 dargestellt. Als Versorgungsspannung für die genaue Einstellung des Diskriminators wurde  $2500\text{ V}$  gewählt. Bei dieser Messung befanden sich O- und H-Detektor nicht im Strahl und die Diskriminatorstellung wurde, wie oben, in  $45^\circ$ -Schritten im Uhrzeigersinn, von der Senkrechten an variiert. Auf Grund der in den Graphen 4.25 und 4.26 dargestellten Ergebnisse, wurde für den O-Detektor die Stellung 8 und für den H-Detektor die Stellung 6 gewählt.

Zur Bestimmung der bestmöglichen Versorgungsspannung wurden beide Detektoren der Neutronenquelle ausgesetzt und die Spannung in  $100\text{ V}$  Schritten von  $2000\text{ V}$  bis  $3800\text{ V}$  variiert. In Graph 4.27 ist das Ergebnis zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das Plateau beim O-Detektor von  $3000\text{ V}$  bis  $3500\text{ V}$  reicht und beim H-Detektor von  $2800\text{ V}$  bis  $3300\text{ V}$ . Der Bereich in dem kein Einfluss der Spannungsversorgung auf die Zählung erwartet wird, reicht von  $3000\text{ V}$  bis  $3300\text{ V}$ , daher wurde die Versorgungsspannung auf  $3100\text{ V}$ , also die Mitte dieses Bereichs eingestellt.

Abschließend wurde eine Messung des elektronischen Untergrunds durch-

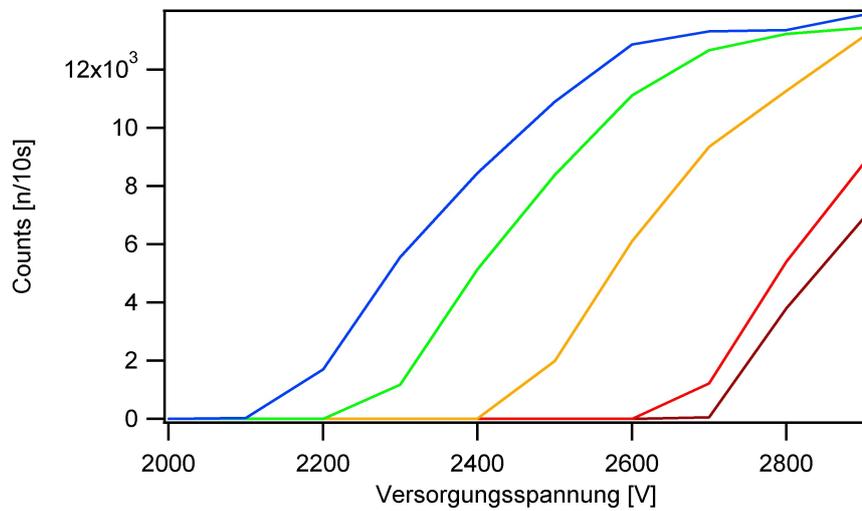


Abbildung 4.24: Abhängigkeit des Plateaus von der Diskriminatorstellung. Dabei ist die Diskriminatorstellung bei blau 1, grün 2, gelb 4, rot 9 und bei braun 11.

geführt, indem über Nacht von 18.33 Uhr bis 8.25 Uhr bei abgeschaltetem Reaktor die Neutronen gezählt wurden. Das Ergebnis ist ein elektronischer Untergrund von  $3,08 \pm 0,08 n/100s$  beim O-Detektor und  $5,56 \pm 0,11 n/100s$  beim H-Detektor.

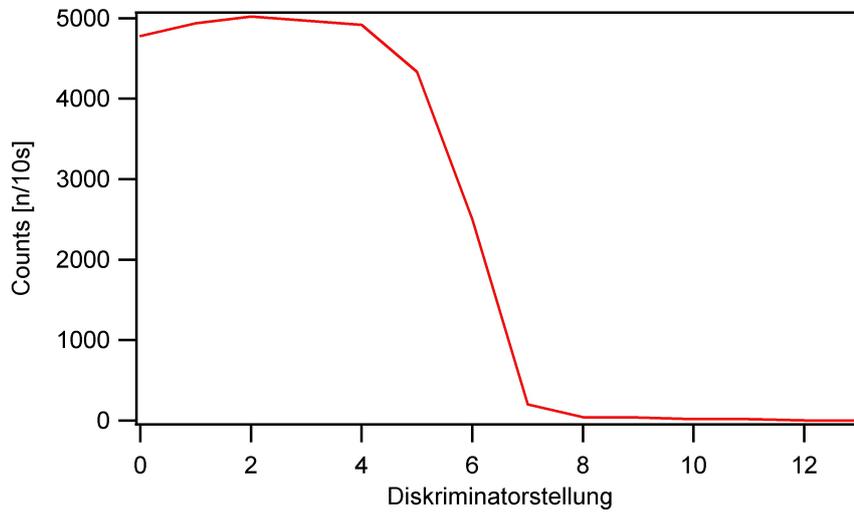


Abbildung 4.25: Diskriminatorvermessung des O-Detektors. Wobei der diskriminator in Schritten von  $45^\circ$  weitergedreht wurde.

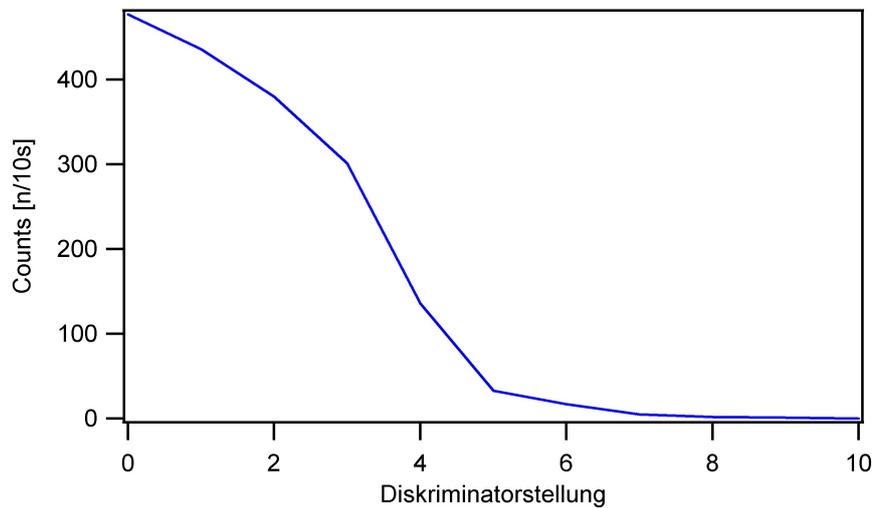


Abbildung 4.26: Diskriminatorvermessung des H-Detektors. Wobei der diskriminator in Schritten von  $45^\circ$  weitergedreht wurde.

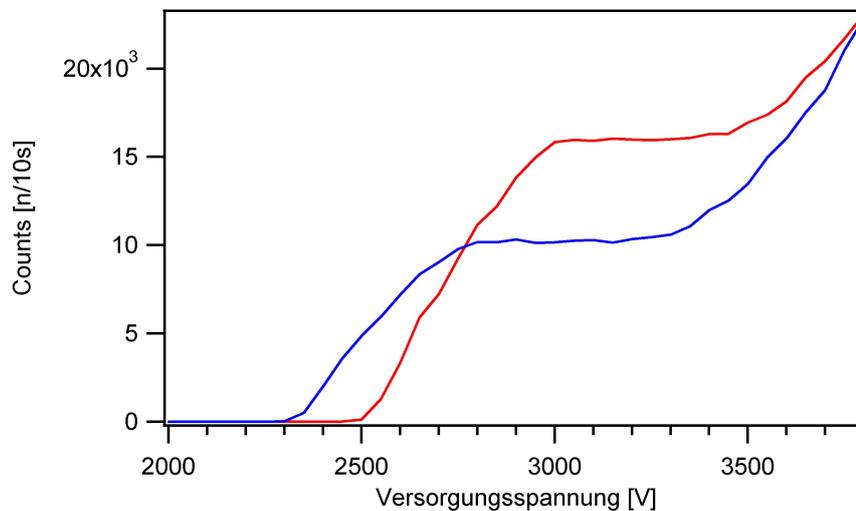


Abbildung 4.27: Messung zur Bestimmung der Versorgungsspannung; rot O-Detektor; blau H-Detektor. Man sieht beim O-Detektor ein Plateau von 3000 V bis 3500 V und beim H-Detektor eines von 2800 V bis 3300 V.

## 4.6 Reduktion des physikalischen Untergrunds

Da die Abschirmung des Neutronenstrahls aus dem Reaktor nicht alle Neutronen aufhält, und so Neutronen in die Detektoren eingestreut werden können, entsteht Untergrund. Weiters entsteht Untergrund im O-Detektor durch den direkten monochromatischen Strahl. Es wurde besonders auf Verringerung des Untergrundes beim O-Detektor geachtet, da dieser später für die Berechnung des Kontrastes herangezogen wird wie im Kapitel Theorie beschrieben.

Da der Neutronenstrahl neben dem IFM-Haus durch einen Schwerbetonblock gestoppt wird, ist dort mit einem erhöhten Untergrund zu rechnen. Um diesen zu minimieren, wurden außen auf das IFM-Haus Borcarbidmatten angebracht und um das IFM, vor allem in Richtung des Strahlstoppers, wurden borierte Paraffinziegel gestellt. Danach wurde eine Rockingkurve gemessen. Wenn das IFM aus dem Bragg-Peak gedreht wird, kommen keine vom IFM reflektierten Neutronen mehr an den Detektoren an und man kann den Untergrund messen. Als Referenz für die Verbesserungen wurde die Messung verwendet, die in Graph 4.23 dargestellt ist. Durch die Messpunkte wurde ein Gauß-Fit gelegt, der die Wurzel der Zählrate als statistischen Fehler der einzelnen Messpunkte verwendet. Die entscheidenden Werte sind: der Untergrund  $U = 51,9 \pm 2,2 \text{ n}/100\text{s}$  und die Höhe des Peaks  $P = 38,8 \pm 5,3 \text{ n}/100\text{s}$ . Nach der Installation der Abschirmung außen und der Paraffinziegel innen, wurde die Rockingkurve 4.28 gemessen. Dabei wurde, wie bei obiger Mes-

sung, mit einem Inkrement von  $0,089^\circ$  und einer Messzeit von  $50\text{ s}$  pro Punkt ein Bereich von  $2,82^\circ$  bis  $4,96^\circ$  vermessen. Der Gauß-Fit ergibt die Werte  $U = 48,4 \pm 2,5\text{ n}/100\text{ s}$  und  $P = 45,3 \pm 4,9\text{ n}/100\text{ s}$  für den O-Strahl, was einer Verringerung des Untergrunds um  $3,5$  Counts pro  $100\text{ s}$  entspricht. Die Erhöhung des Gauß-Peaks kann durch einen thermisch induzierten Phasenschub hervorgerufen worden sein. Der Anstieg des Untergrunds im H-Detektor von  $24,6\text{ n}/100\text{ s}$  auf  $36,2 \pm 1,9\text{ n}/100\text{ s}$  wurde durch das Entfernen der Cadmiumblende im direkten H-Strahl hervorgerufen.

Im nächsten Schritt wurden Kollimatoren zwischen das IFM und die Detektoren gestellt, um seitliche Einstreuung von Neutronen in die Detektoren zu vermeiden. Abermals wurden die obigen Parameter für die Rockingkurve verwendet. Eine Reduktion des Untergrunds von  $30\text{ n}/100\text{ s}$  auf  $18,4 \pm 1,8\text{ n}/100\text{ s}$  und eine Peakhöhe von  $51,6 \pm 3,6\text{ n}/100\text{ s}$  konnten im O-Strahl gemessen werden. Im H-Strahl wurde ein Untergrund von  $35,1 \pm 3,1\text{ n}/100\text{ s}$  und eine Peakhöhe von  $155,6 \pm 6,3\text{ n}/100\text{ s}$  gemessen. Die Änderung der Peakhöhe kann wieder durch einen thermisch induzierten Phasenschub erklärt werden. Die große Reduktion des Untergrunds im O-Strahl ist durch das verbesserte Abschirmen des direkten Strahls zu erklären. Im H-Strahl ist keine merkliche Reduktion gemessen worden, da die Änderung innerhalb des Fehlers liegt. Bei einer weiteren Messung wurden um den Kollimator noch Paraffinziegel aufgestellt und die Blende auf  $9 \times 9\text{ mm}^2$  erweitert. Das Messergebnis ist in Abbildung 4.30 zu sehen. Es wurde eine Peakhöhe von  $102,8 \pm 5,4\text{ n}/100\text{ s}$  und ein Untergrund von  $15,4 \pm 2,6\text{ n}/100\text{ s}$  im O-Detektor gemessen. Im H-Detektor wurde eine Peakhöhe von  $392,9 \pm 6,5\text{ n}/100\text{ s}$  und ein Untergrund von  $33,6 \pm 2,3\text{ n}/100\text{ s}$  gemessen.

Von den so erhaltenen Ergebnissen kann nun noch der elektronische Untergrund abgezogen werden. Das ergibt  $12,4\text{ n}/100\text{ s}$  physikalischen Untergrund für den O-Detektor und  $30,6 \pm 2,3\text{ n}/100\text{ s}$  für den H-Detektor. Der Untergrund könnte reduziert werden indem der O-Detektor weiter nach hinten geschoben wird und somit der Raumwinkel, den der Detektor von den vom IFM kommenden Neutronen misst verringert wird. Da der Kollimator etwa so breit ist wie die Distanz die der Strahl vom IFM versetzt wird, ist durch bessere Abschirmung des direkten Strahls noch Verbesserungspotential zu erwarten. Da die Peakhöhe durch das Einbringen des Kollimators in den Strahl nicht reduziert wurde, kann darauf geschlossen werden dass ein schmalerer Schlitz im Kollimator eine Reduktion des Untergrunds erfolgen kann. In Tabelle 4.5 sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von den getroffenen Abschirmungsmaßnahmen angeführt. Die Grafik 4.31 zeigt die Positionierung der einzelnen Abschirmungselemente.

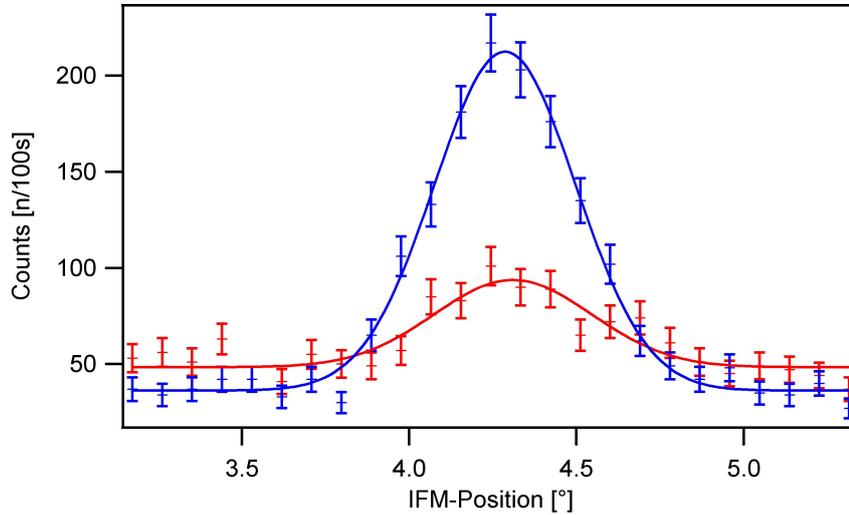


Abbildung 4.28: Rockingkurve nach der Installation der Abschirmung am IFM-Haus und dem Aufstellen der Paraffinziegel im IFM-Haus. Rot eingezeichnet der O-Strahl, blau der H-Strahl. Die Höhe des O-Peaks ist  $P = 45,7 n/100s$  und der Untergrund beträgt  $U = 48,4 n/100s$ , damit wurde der Untergrund um  $3,5 n/100s$  reduziert.

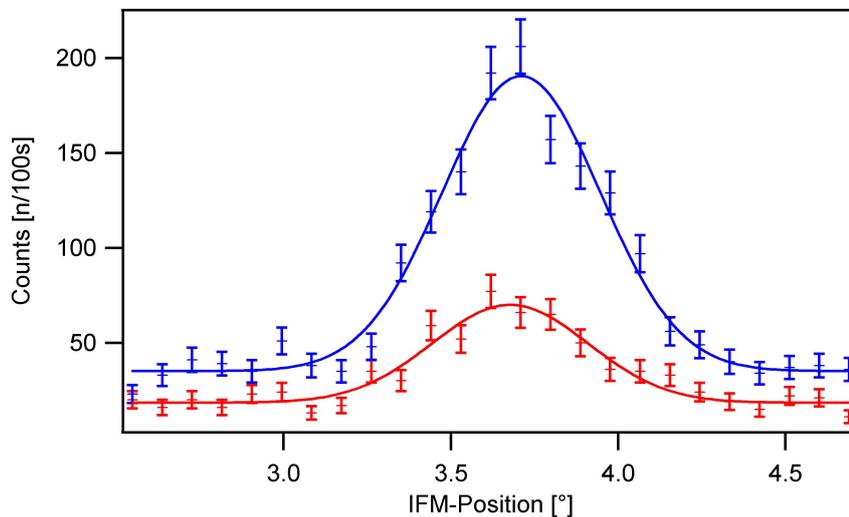


Abbildung 4.29: Rockingkurve nach der Platzierung der Kollimatoren. Im O-Strahl (blau) wurde ein Untergrund  $U = 18,4 n/100s$ , was einer weiteren Reduktion um  $30 n/100s$  entspricht, und ein Peak  $P = 51,7 n/100s$  gemessen. Der H-Strahl ist blau eingezeichnet.

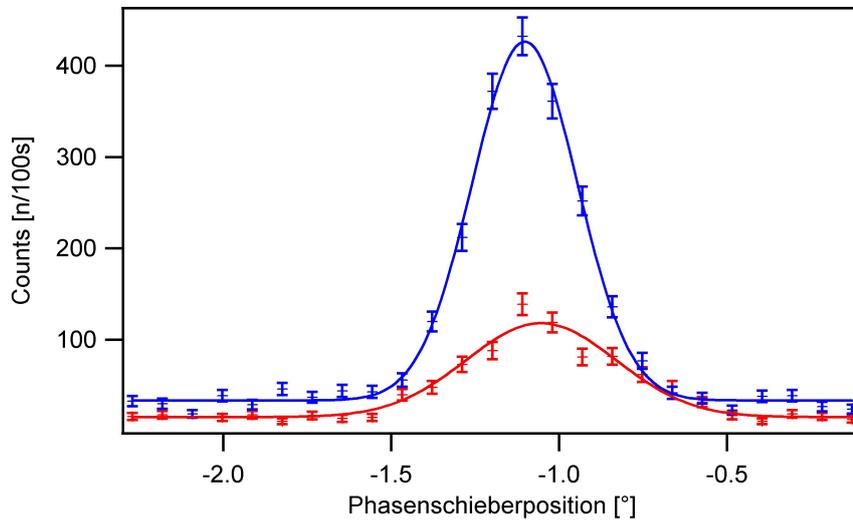


Abbildung 4.30: Rockingkurve mit vergrößerter Blende ( $9 \times 9 \text{ mm}$ ) und zusätzlichen Paraffinziegeln. Der Untergrund bei dieser Messung ergab im O-Strahl (rot)  $U = 15,4 \pm 2,6 \text{ n}/100\text{s}$  und eine Peakhöhe von  $102,8 \pm 5,4 \text{ n}/100\text{s}$ . Damit wurde der Untergrund um weitere  $3,5 \text{ n}/100\text{s}$  gesenkt.

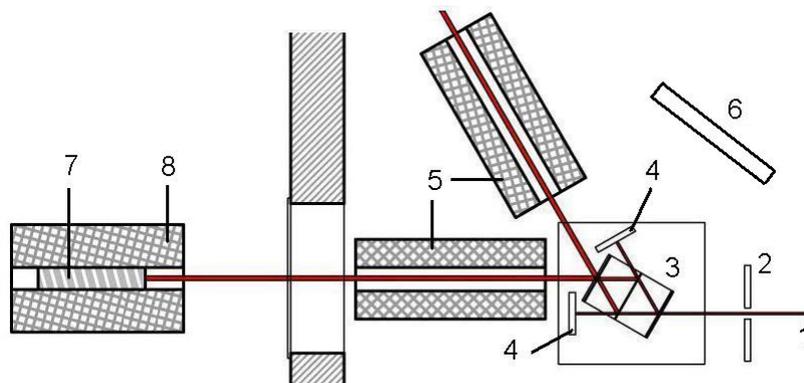


Abbildung 4.31: Schematische Darstellung des Strahlengangs. 1: einfallender Neutronenstrahl, 2: Blende aus Cadmium, 3: IFM, 4: Paraffinziegel mit Cadmium beklebt, 5: Kollimatoren, 6: Abschirmung vor dem IFM, 7: O-Detektor, 8: Detektorabschirmung.

<b>Paraffin vor dem IFM</b>	<b>Kollimator</b>	<b>Paraffinziegel im ungebroschenen Strahl</b>	<b>Untergrund [n/100s]</b>	<b>Abb.</b>
nein	nein	nein	$51,9 \pm 2,2$	4.22
ja	nein	nein	$48,4 \pm 2,5$	4.28
ja	ja	nein	$18,4 \pm 1,8$	4.29
ja	ja	ja	$15,4 \pm 2,6$	4.30

Tabelle 4.5: Abhängigkeit des Untergrund von den getroffenen Abschirmungsmaßnahmen.

# Kapitel 5

## Ergebnisse

Nach der Errichtung des IFM-Hauses, der Erstellung der Programme und der Justierung der Versuchsanordnung wurden zwei Messungen durchgeführt. Eine Interferenzmessung und eine Messung des durch die Gravitation induzierten Phasenschubs.

### 5.1 Interferenzmessung

Für Interferenzmessungen ist es nötig einen Phasenschub zwischen den Strahlengängen, Path I und Path II, zu induzieren. Dies wird mit einem Phasenschieberplatte dessen Winkel zu den Strahlen geändert werden kann erreicht, gemäß der in Kapitel 1 relativen Weglänge der Teilstrahlen. Bei dieser experimentellen Anordnung wird eine  $5\text{ mm}$  dicke Aluminiumplatte verwendet, die wie im Kapitel Theorie beschrieben, gemäß Formel 2.20, einen Phasenschub erzeugt. Wichtig für die Interferenzmessungen ist, dass das IFM vibrationsfrei gelagert ist, also der Antivibrationstisch richtig eingestellt ist, und dass keine thermischen Störungen die Messung beeinflussen. Die Abbildung 5.1 zeigt die zwei Einstellmöglichkeiten des Antivibrationstisches, die Eigenfrequenz des Tisches (Vertical Stiffness Adjust) und die Masse die auf dem Tisch lagert (Load Adjust). Weiters befindet sich ein Indikator (Vertical Position Indicator) für Einstellung auf die Masse auf dem Antivibrationstisch. Die Eigenfrequenz des Tisches ist auf  $0,5\text{ Hz}$  eingestellt und muss nicht variiert werden. Die Einstellung des Tisches auf die Masse, die darauf lastet, ist sehr sensibel und schon  $100\text{ g}$  mehr oder weniger bewirken, dass der Tisch seine dämpfenden Eigenschaften verliert. Wenn der Tisch richtig eingestellt ist, ist der Indikator auf einer Höhe mit der Linie High-Low (Abb.: 5.1). Weiters muss darauf geachtet werden, dass die Tischplatte eben ist, das kann durch Verschieben von Gewichten auf der Platte erreicht werden.



Abbildung 5.1: Detailansicht des Antivibrationstischs.

Versagt die Dämpfung des IFM, kann kein Kontrast gemessen werden. In Graph 5.2 ist das Messergebnis bei ungedämpftem IFM abgebildet. bei dieser Messung wurde eine Blendengröße von  $4 \times 3 \text{ mm}^2$  verwendet. Dabei wurden  $26,9 \pm 4,7 \text{ n}/100\text{s}$  Neutronen pro  $100 \text{ s}$  gemessen, dieser Wert wurde durch fitten der Messpunkt mit einer Linie ermittelt  $a$  ist dabei der Schnittpunkt mit der Y-Achse und  $b$  ist die Steigung, die Fehler einer Größenordnung von  $10^{-5}$  verursacht und daher vernachlässigt werden kann. Zieht man den Untergrund von  $15,4 \pm 1,8 \text{ n}/100\text{s}$  ab, beträgt beträgt der Neutronenfluss nur  $11,6 \pm 6,5 \text{ n}/100\text{s}$ . Deshalb wird für die weiteren Messungen die Blende auf  $7 \times 7 \text{ mm}^2$  vergrößert, was einer Erhöhung des Neutronenflusses um den Faktor  $7 * 7 / (4 * 3) = 4,1$  bewirken soll.

Die Höhe des Kontrasts ist abhängig von der Unterlage auf der das IFM steht. Ist die Unterlage zu hart, kann das IMF Unebenheiten, die es auf der Unterseite hat, nicht ausgleichen und verwindet sich. Dadurch sind die Platten nicht mehr parallel zu einander und der Kontrast wird geringer. Ist die Unterlage zu weich, biegt sich das IFM durch sein Eigengewicht mit dem Effekt, dass die Ausrichtung der Platten wieder nicht parallel ist. Als Unterlage wurde eine Glasplatte mit ebener Oberfläche verwendet, auf die mehrere Lagen Papier gelegt wurde. Es wurden drei Interferenzmessungen durchgeführt mit 8, 12 und 16 Papierlagen. Dabei wurde jeweils von Position des Phasenschiebers  $1,79^\circ$  bis  $4,29^\circ$ , mit einem Inkrement von  $0,179^\circ$  und  $500 \text{ s}$  pro Punkt gemessen. Dabei entsprechen  $28.000 \text{ steps}$  einem Winkel von  $1^\circ$ . Diese Einstellung bewirkt, dass ca. 13 Punkte pro  $2\pi$ -Phasenschub gemessen werden und mehr als eine Periode der Interferenz. Mit der gewählten Blendengröße und einer Messzeit von  $500 \text{ s}$  wird eine Zählrate von  $238 \text{ n}/100\text{s}$

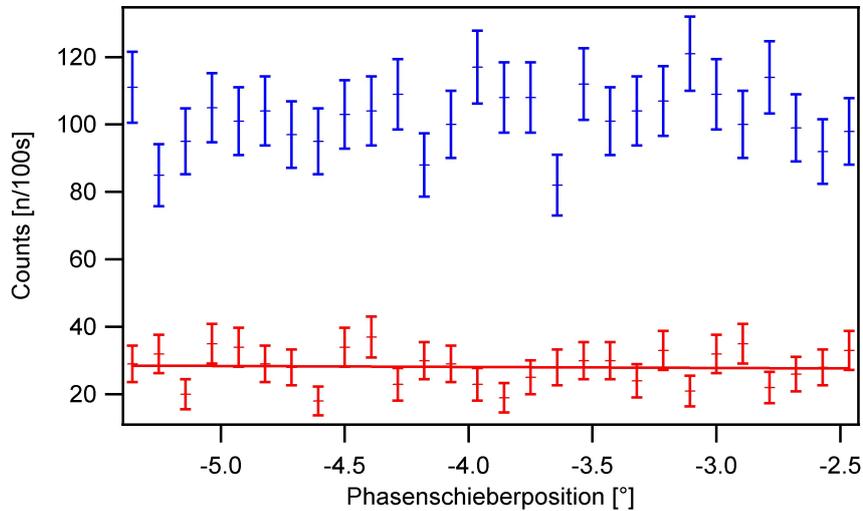


Abbildung 5.2: Bei der Interferenzmessung mit ungedämpftem IFM ist kein Kontrast zu messbar.

Papierlagen	$y_0[n/500s]$	$A[n/500s]$	$C[\%]$
8	$297,4 \pm 2,4$	$68,2 \pm 3,9$	$33,7 \pm 2,9$
12	$262,8 \pm 6,7$	$79,4 \pm 8,1$	$42,7 \pm 4,9$
16	$252,5 \pm 3,5$	$43,6 \pm 4,9$	$24,8 \pm 3,6$

Tabelle 5.1: Der Kontrast in abhängigkeit von der Unterlage.

erwartet. Der relative Fehler pro Messpunkt ergibt sich zu

$$\frac{\sqrt{Counts}}{Counts} = \text{relativerFehler.} \quad (5.1)$$

Mit der zu erwartenden Zählrate ergibt sich ein relativer Fehler von  $6,4 \pm 0,4\%$  pro Punkt. Eine Messung dauert  $125 \text{ min}$ . In den Graphen 5.3, 5.4 und 5.5 sind die drei Messungen dargestellt und in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Der beste Kontrast ergibt sich mit  $0,427 \pm 0,049$  bei 12 Papierlagen. Der Kontrast wurde mit Hilfe der Formel

$$C = \frac{A}{y_0 - U * t/100} \quad (5.2)$$

berechnet, wobei die Werte  $A$  die Amplitude und  $y_0$  der Offset des Sinus-Fits durch die Messpunkte sind.  $U$  ist der Untergrund pro 100 s und  $t$  die Messzeit. Das Verhältnis von Untergrund zu mittlerer Zählrate ist  $0,063$ . Der

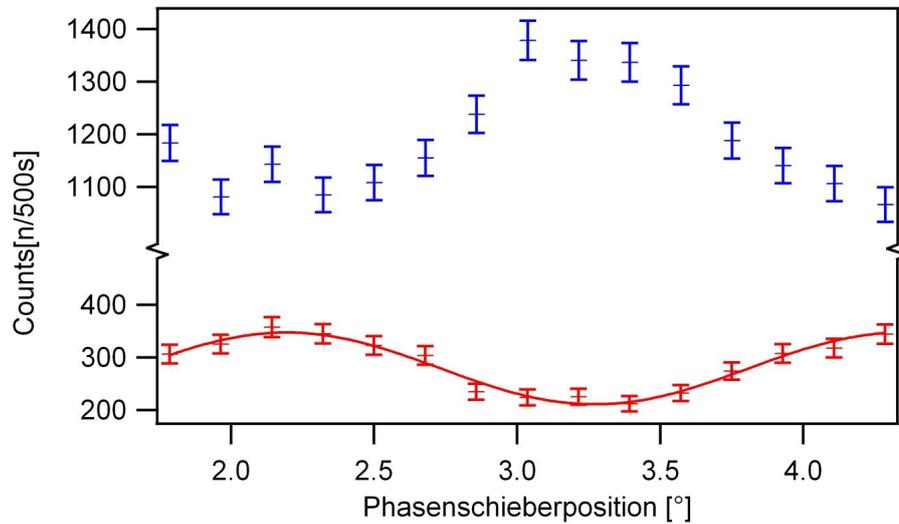


Abbildung 5.3: Interferenz mit 8 Blatt Papier und einer Blendengröße von  $7 \times 7 \text{ mm}^2$ , ergibt einen Kontrast von  $C = 0,337 \pm 0,029$ .

Sinusfit ergibt entsprechend der Formel

$$f(x) = y_0 + \sin(x + \phi), \quad (5.3)$$

wobei  $\phi$  ein etwaiger Phasenfaktor ist.

die Blende wurde auf  $9 \times 9 \text{ mm}^2$  vergrößert und abermals eine Interferenz gemessen. Im Zuge der Vergrößerung der Blende wurde die Höhe des IFM angepasst, um zu gewährleisten, dass die Neutronen auf dem Bereich des besten Kontrasts auftreffen. Eine Messung mit 500 s Messzeit, einem Inkrement von  $0,179^\circ$  von  $-46,2^\circ$  bis  $-2,5^\circ$  ergab die in Graph 5.6 gezeigte Interferenz. Der Graph 5.7 zeigt zur besseren Veranschaulichung nur den O-Strahl. Die Veränderte Position des Phasenschiebers ist durch den Umbau entstanden. Der Kontrast liegt bei 0,445. Das Verhältnis von Untergrund zu mittlerer Zählrate ist 0,034.

Aus der Messung der Interferenz mit der  $9 \times 9 \text{ mm}^2$  Blende ergibt sich eine Intensität von  $7,7 \text{ n/s}$  auf eine Fläche von  $1 \text{ cm}^2$  normiert. Frühere Messungen von M. Hafner [14] ergaben bei einer Blendengröße von  $6 \times 12 \text{ mm}^2$  einen Neutronenfluss von  $8,2 \text{ n/s}$ , oder auf eine Fläche von  $1 \text{ cm}^2$  normiert,  $5,25 \text{ n/s}$ . Damit ergibt sich eine Steigerung von 46 %, was mit den Messungen von C. Both [13] von 53,6 % gut übereinstimmt.

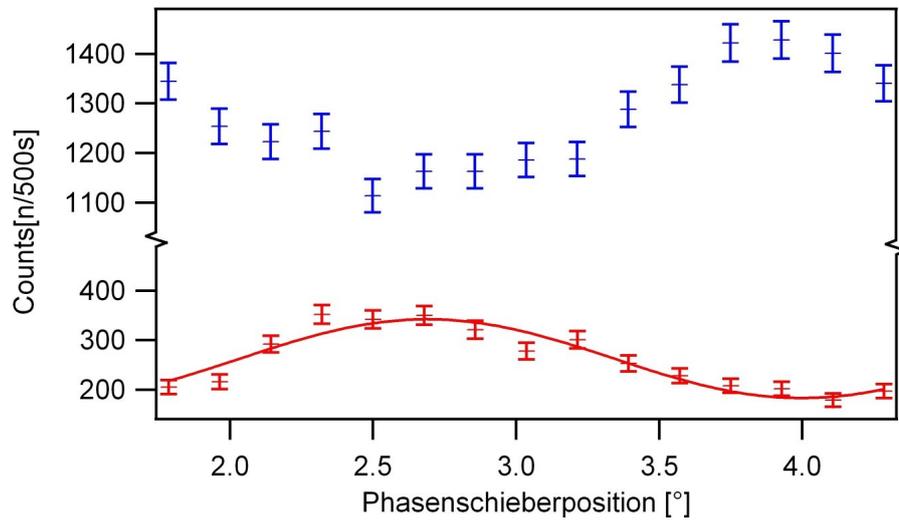


Abbildung 5.4: Interferenz mit 12 Blatt Papier und einer Blendengröße von  $7 \times 7 \text{ mm}^2$ , ergibt einen Kontrast von  $C = 0,427 \pm 0,049$ , was das beste Ergebnis ist.

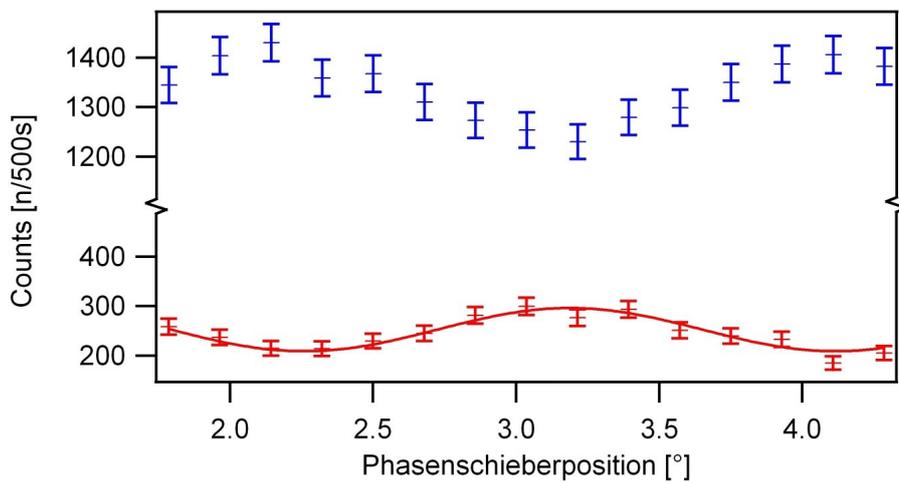


Abbildung 5.5: Interferenz mit 16 Blatt Papier und einer Blendengröße von  $7 \times 7 \text{ mm}^2$ , ergibt einen Kontrast von  $C = 0,248 \pm 0,036$

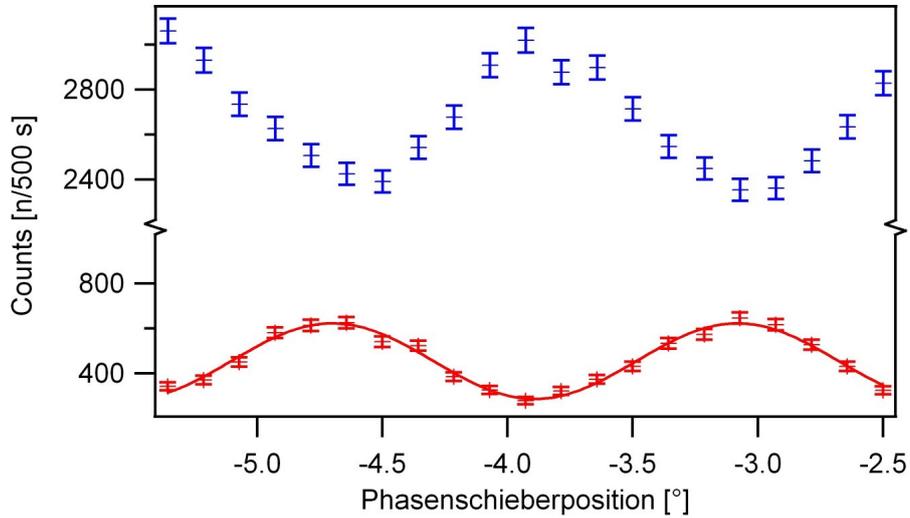


Abbildung 5.6: Interferenzmessung mit der Blende auf  $9 \times 9 \text{ mm}^2$  vergrößert. Es wurde eine Amplitude von  $A = 168,2 \pm 6,9 \text{ n/500s}$  und ein Offset von  $454,8 \pm 5,1 \text{ n/500s}$  gemessen und damit ein Kontrast von  $C = 0,445 \pm 0,021$ . Der H-Strahl zeigte eine Amplitude von  $308,0 \pm 16,2 \text{ n/500s}$  bei einem Offset von  $2679,6 \pm 12,1 \text{ n/500s}$ .

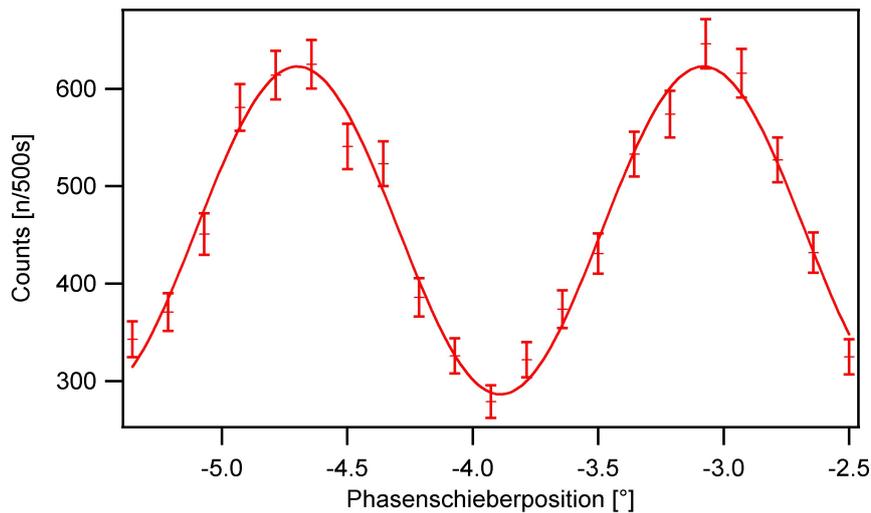


Abbildung 5.7: Der O-Strahl aus der Messung obigen einzeln herausgezeichnet mit Sinusfit.

## 5.2 Gravitationsmessung

Bei der Gravitationsmessung wird die Auswirkung der Gravitation auf die Phasenlage  $\Phi_{COW}$  zwischen Path I und Path II, in Abhängigkeit vom Kippwinkel  $\alpha$  des IFMs gemessen. Ideal ist, wenn die Kippachse mit dem einfallenden Neutronenstrahl identisch ist. Da das IFM in einer Höhe  $h$  über der Kippachse steht, ändert sich der Ort an dem der Neutronenstrahl auf die erste IFM-Platte auftrifft um  $\Delta d$  gemäß  $\Delta d = h \sin(\alpha)$ , bei Verkippung. Durch das Verkippen ändert sich aber auch der Verlauf von O- und H-Strahl. Der O-Strahl verläuft weiterhin parallel zur Erdoberfläche, allerdings um  $\Delta z_O = -\Delta x \sin(\alpha)$  in der Höhe versetzt, dabei ist  $\Delta x$  der Strahlversatz wie in Abbildung 4.5. Der O-Strahl wird um  $\Delta z_O = 0,8 \text{ mm}$  pro Grad Kippwinkel versetzt. Der H-Strahl verläuft nicht mehr parallel zur Erdoberfläche, sondern schließt zu dieser einen Winkel von  $\alpha$  ein. Da der H-Strahl nach der Formel  $\Delta z_H = d \sin(\alpha)$  bei  $d = 1 \text{ m}$  pro Grad Kippwinkel um  $17 \text{ mm}$  vertikal versetzt wird, wird er schnell den vom H-Detektor gemessenen Bereich verlassen. Um die Kippachse möglichst nahe an den einfallenden Neutronenstrahl zu bringen, wurde der Kippmotor als oberster Stellmotor montiert. Der Drehmotor der das IFM bei der Messung einer Rockingkurve dreht, dreht auch die Kippachse gegen die Richtung des einfallenden Strahls. Fehler durch diesen Effekt können durch das Verdrehen des IFMs auf der Unterlage minimiert werden, um die Kipp- und die Strahlachse parallel auszurichten.

Bei der ersten Messung wurde das IFM in  $10.000 \text{ steps}$ -Schritten ( $\cong 0,141^\circ$ ) verkippert und zu jeder Position ein Interferogramm gemessen. Aus der Theorie ergibt sich ein durch die Gravitation induzierter Phasenschub der durch die Formel

$$\Delta\Phi_{COW} = -2\pi\lambda \frac{m^2}{h^2} g A_0 \sin(\alpha) \quad (5.4)$$

beschrieben wird. Mit der Wellenlänge  $\lambda = 1,92 \text{ \AA}$  und der Masse  $m = 1,67510^{-27} \text{ kg}$  der Neutronen und der von den Neutronen zwischen Path I und Path II umschlossenen Fläche  $A_0 = 3240 \text{ mm}^2$ , ergibt sich ein Phasenschub von  $\Phi_{COW} = 258,6^\circ$  bei einem Kippwinkel von  $\alpha = 1^\circ$ . Umgekehrt erhält man einen Phasenschub von  $\pi$  bei einem Kippwinkel von  $\alpha = 0,69^\circ$ . Die Interferenzmuster wurden mit einem Inkrement  $5000 \text{ steps} = 0,179^\circ$ , Messzeit  $200 \text{ s}$ , von  $-5,4^\circ$  bis  $-2,5^\circ$  Phasenschieberstellung gemessen. Die Ergebnisse sind in Graph 5.8 abgebildet.

Die Messpunkte zu den verschiedenen Kippwinkeln wurden mit einem Sinusfunktion gefittet und aus diesem Fit der Phasenschub entnommen. In der Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse aus der Messung eingetragen. Die Abbildung 5.9 ist der Phasenschub der einzelnen Messungen gegen die Verkippung des IFM aufgetragen und ein Linienfit der aus den Messergebnissen erstellt

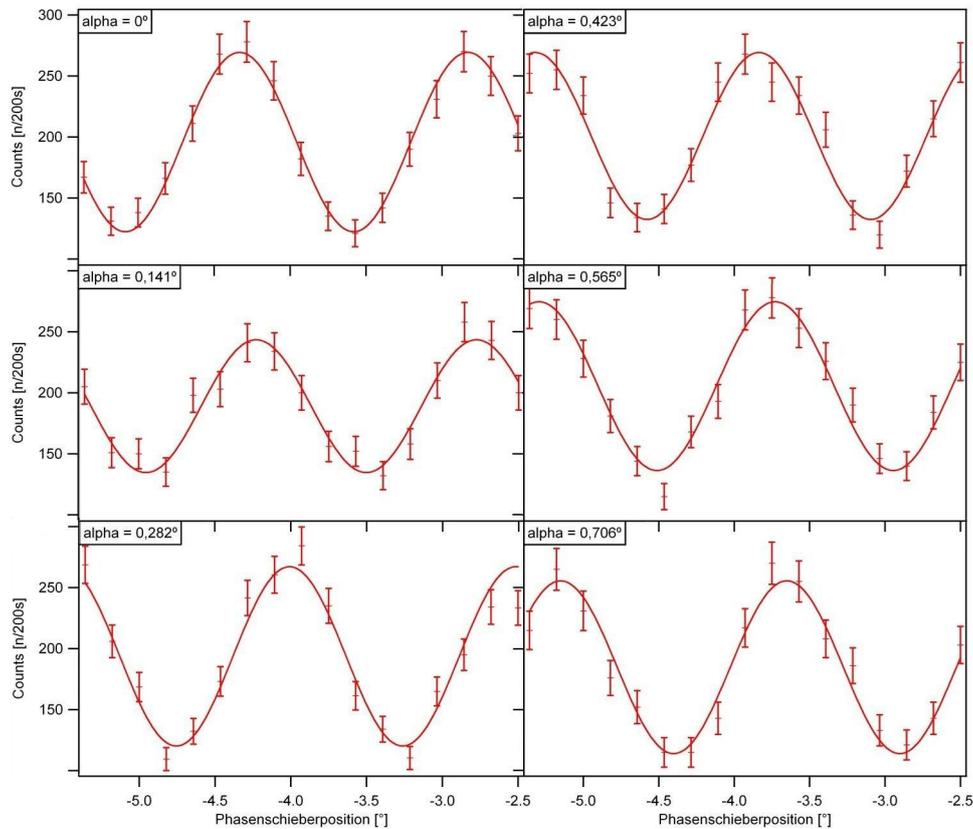


Abbildung 5.8: Interferenzmessungen zu verschiedenen Kippwinkeln; Paarweise zusammengefasst sind Kippwinkel  $\alpha$  und Phasenschub  $\Phi_{COW}$ :  $\alpha = 0^\circ$   $\Phi_{COW} = 0,0 \pm 3,8^\circ$ ;  $\alpha = 0,141^\circ$   $\Phi_{COW} = 22,6 \pm 9,6^\circ$ ;  $\alpha = 0,282^\circ$   $\Phi_{COW} = 77,7 \pm 8,42^\circ$ ;  $\alpha = 0,424^\circ$   $\Phi_{COW} = 118,8 \pm 8,0^\circ$ ;  $\alpha = 0,565^\circ$   $\Phi_{COW} = 143,9 \pm 7,7^\circ$ ;  $\alpha = 0,706^\circ$   $\Phi_{COW} = 163,3 \pm 7,4^\circ$

wurde. Das Ergebnis der Messung von  $260 \pm 10^\circ$  Phasenschub bei einem Kippwinkel von einem Grad stimmt gut mit der theoretischen Vorhersage von  $258,6^\circ$  überein.

Bei einer weiteren Messung wurde der Phasenschieber aus dem IFM entfernt, um den Phasenschub durch die Verkippung direkt zu messen. Bei dieser Interferenzmessung wurde nur der Kippwinkel geändert und zwar in Schritten von  $0,171^\circ = 10.000 \text{ steps}$  von  $-1,27^\circ$  bis  $0,85^\circ$ . Pro Punkt wurde 200s gemessen. In die Messpunkte wurde ein Sinusfit gelegt, dabei ergab sich eine Periode von  $1,60^\circ$ , was eine gute Übereinstimmung mit dem Theoriewert von  $1,56^\circ$  bedeutet. Der Kontrast ergibt sich aus dem Offset  $y_0 = 192,1 \pm 2,7n/200s$  und der Amplitude  $A = 82,8 \pm 3,8n/200s$  zu  $0,513 \pm 0,044\%$ . Das Messergebnis ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

Position [steps]	Position $\alpha$ [°]	Phasenschub $\Phi_{COW}$ [°]
0	0	$0 \pm 3,8$
10000	0,141	$22,4 \pm 9,6$
20000	0,282	$77,4 \pm 8,4$
30000	0,424	$118,7 \pm 8,0$
40000	0,565	$144,6 \pm 7,7$
50000	0,706	$163,5 \pm 7,4$

Tabelle 5.2: Der durch die Gravitation induzierte Phasenschub in Abhängigkeit vom Kippwinkel.

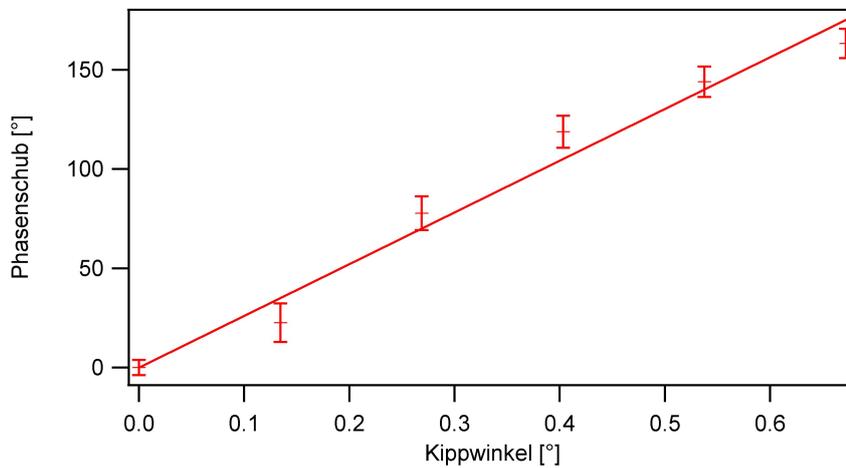


Abbildung 5.9: Die Messergebnisse zu den verschiedenen Kippwinkeln und der zugehörige Linienfit. Der Fit ergibt einen Phasenschub von  $259 \pm 9,2^\circ$  bei einem Kippwinkel von einem Grad.

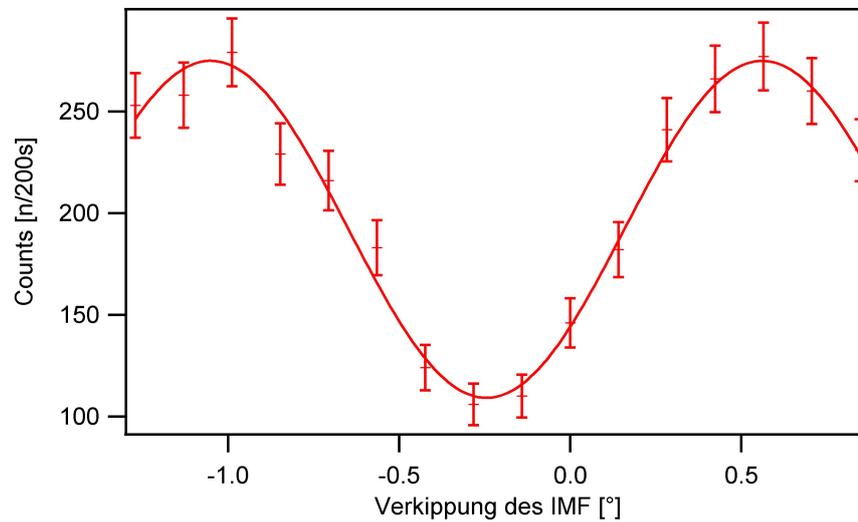


Abbildung 5.10: Interferenzmuster durch das Verkippen des IFMs ohne das sich ein Phasenschieber im Strahlengang befindet. Dabei wurde eine Amplitude von  $A = 82,8 \pm 3,8 n/200s$ , bei einem Offset von  $y_0 = 192,1 \pm 2,7 n/200s$ , das ergibt einen Kontrast von  $C = 0,513 \pm 0,044$ .

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine Neutroneninterferometerstation entstanden. Ein IFM wurde durch Fräsen und Ätzen präpariert und anschließend am ILL in Grenoble getestet. Durch die Messungen in Grenoble konnte gezeigt werden, dass der erreichbare Kontrast von 20% auf 90% erhöht wurde. Es wurde ein IMF-Haus geplant und gebaut. Die thermische Stabilität der Versuchsanordnung liegt im Lauf eines Tages bei  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ . Dies wurde dank kompakter Bauweise des IFM-Hauses, dem großen Wärmespeicher in Form eines im Haus befindlichen Betonblocks von 800 kg, und die gute Isolierung mit 100 mm Polystyrol erreicht. Weiters wurden zwei Detektortische konstruiert und gebaut. Die flexible Lagerung der Detektoren ermöglicht ein schnelles und reproduzierbares Einstellen der Detektorpositionen auf verschiedene IFM-Größen und Versuchsanordnungen. Mit Hilfe von LabVIEW wurden alle Programme zur Messung und Steuerung der Versuchsanordnung entwickelt. Damit ist eine einfache externe Computersteuerung über PXI-Interface wird ermöglicht. Der Anspruch auf Vibrationsfreiheit ist durch einen gut justierten Antivibrationstisch gewährleistet. Die Steuerelemente für das IFM sind auf einer Aluminiumplatte mit einem Raster aus Löchern mit M6-Gewinden auf dem Antivibrationstisch montiert, was erlaubt einen flexiblen Umbau der Versuchsanordnung.

Die Einstellung der Detektoren wurde so optimiert, dass das elektronische Rauschen von  $30\text{ n}/100\text{ s}$  auf  $3,08\text{ n}/100\text{ s} \pm 0,08$  im O-Detektor und auf  $5,56 \pm 0,11\text{ n}/100\text{ s}$  im H-Detektor gesenkt werden konnte. Durch bessere Abschirmung der Versuchsanordnung gegen Hintergrundneutronen wurde der Untergrund, bestehend aus physikalischem und elektronischen Untergrund, von  $51,9 \pm 2,2\text{ n}/100\text{ s}$  auf  $15,4 \pm 2,6\text{ n}/100\text{ s}$  im O-Detektor und von  $36,2 \pm 1,9\text{ n}/100\text{ s}$  auf  $33,6 \pm 2,8\text{ n}/100\text{ s}$  im H-Detektor reduziert. Die Lagerung des IFMs und die Einstellung der Eingangsblende wurden verbessert, dadurch wurde der Kontrast weiter erhöht.

Interferenzmessungen wurden durchgeführt, bei denen ein Kontrast von  $0,445 \pm 0,021$  erreicht wurde, bei einer Intensität von  $7,7 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ . Zum Abschluss wurde der bei Verkippung durch Gravitation induzierte Phasenschub gemessen. Das Ergebnis von  $260 \pm 10^\circ$  bei einer Verkippung um ein Grad deckt sich gut mit dem theoretisch errechneten Wert von  $258,6^\circ$ .

## Ausblick

An der Interferometerstation können Experimente durchgeführt werden, die Studenten im Rahmen von Projektarbeiten und Praktika Einblick in die Neutronenoptik erlauben und Interesse für Quantenphysik wecken. Weiters können Elemente, wie Spulen oder Probenhalter, die für Experimente am ILL in Grenoble verwendet werden sollen, in Wien getestet und deren Auswirkung auf das IFM abgeschätzt werden.

Die Versuchsanordnung bietet noch Verbesserungspotential. So könnte der Untergrund durch bessere Abschirmung des IFMs noch gesenkt werden. Es wäre möglich Stabilität durch die Unterbindung von Konvektionsströmungen noch weiter verbessert werden. Zu diesem Zweck könnte das IFM, ähnlich wie in der Versuchsanordnung in Grenoble, durch Acrylglas und Aluminium von Konvektionen im IFM-Haus abgeschirmt werden. Auch Unterlage des IFMs hat großen Einfluss auf den Kontrast und bietet noch Potential zur Verbesserung. Mit einer neuen Detektorelektronik könnte der Untergrund durch elektronisches Rauschen weiter reduziert werden. Die Auswirkung des Phasenschiebers auf den Kontrast wurde nicht untersucht, es wird daher auch hier Verbesserungspotential vermutet.

# Kapitel 7

## Anhang

# Tabellenverzeichnis

4.1	Werte zur Bestimmung der Eichkurve. . . . .	41
4.2	Umrechnung zwischen Motoreinheiten in Grad bzw. Millimeter. Translationsmotoren wurden für die Steuerung der Blenden verwendet, Rotationsmotoren für die Steuerung des Phasen- schibers und zum Drehen des IFM bei Rockingkurven, und ein Kippmotor wurde eingesetzt bei den Messungen des Gra- vitationsphasenschubs. . . . .	48
4.3	<b>1.)</b> Erste Translationsmessung, <b>2.)</b> Rotationsmessung, <b>3.)</b> Zwei- te Translationsmessung. . . . .	58
4.4	<b>1.)</b> Positionsbestimmung des H-Detektors im direkten Strahl, <b>2.)</b> Rotationsmessung des H-Detektors im direkten Strahl, <b>3.)</b> Translationsmessung des H-Detektors im versetzten Strahl. . .	60
4.5	Abhängigkeit des Untergrund von den getroffenen Abschir- mungsmaßnahmen. . . . .	68
5.1	Der Kontrast in abhängigkeit von der Unterlage. . . . .	71
5.2	Der durch die Gravitation induzierte Phasenschub in Abhängig- keit vom Kippwinkel. . . . .	77

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Versuchsanordnung vor dem Umbau. . . . .	10
2.2	Verschiedene Perfekt-Kristall-IFM. . . . .	14
2.3	Strahlengang durch das LLL/IFM. . . . .	16
2.4	Strahlengang bei der Messung des Gravitationsphasenschub mit der Achse um die das IFM gekippt wird. . . . .	19
2.5	Plazierung der Absorber im Strahlengang. links stochastische Absorbtion mittels Goldfolie; Mitte deterministische Absorption durch einen Chopper; rechts deterministische Absorption mittels Gitter. . . . .	20
2.6	Vergleich der Theoriekurven von stochastischer (rot) und deterministischer (blau) Absorption. . . . .	21
3.1	Ätzplatz unter dem Luftabzug mit Ätzwanne, Messbehältern, Aceton- und Dest.-Wasserbad. . . . .	25
3.2	Trocknen und Wägen des IFM. . . . .	26
3.3	Das IFM während des Ätzens. . . . .	27
3.4	Das IFM nach dem Schleifen noch aufgeklebt auf die Unterlage. . . . .	30
3.5	Die Abplatzungen an der ersten Platte. . . . .	31
3.6	Die Beschädigung an der Zweiten Platte vor dem dritten Ätzen. . . . .	32
3.7	Partielles Ätzen mit starkem Säuregemisch. . . . .	33
3.8	Man sieht deutlich die Spuren des partiellen Ätzens an den Oberkanten der Platten und links. . . . .	33
3.9	Abplatzung an der ersten Platte nach dem partiellen Ätzen. . . . .	34
3.10	Deutlich erkennbarer ausgeätzter Riss in der zweiten Platte. . . . .	34
3.11	Kontrast und Phasenschub nach dem dritten Ätzen an verschiedenen Positionen. . . . .	36

4.1	Grundriss des Versuchsaufbau: 1 weißer Neutronenstrahl vom Reaktor; 2 Polygraphitmonochromator; 3 Schwerbetonabschirmungen; 4 Kollimatoren aus boriiertem Paraffin; 5 Monochromatischer Neutronenstrahl; 6 Blende aus Kadmium; 7 IFM; 8 Isolierung aus Polystyrol; 9 Tür; 10 Detektorabschirmungen aus boriiertem Paraffin; 11 O-Detektor; 12 H-Detektor; 13 Strahldurchlässe aus Aluminium; 14 Rack mit Steuer und Zähleinheiten. . . . .	38
4.2	Schnitt des Versuchsaufbau: 1 monochromatischer Strahl; 2 Blende; 3 IFM; 4 Kollimator; 5 Anrivibrationstisch; 6 Betonblock; 7 Aluminiumplatten; 8 Isolierung. . . . .	39
4.3	Temperaturverlauf im IFM-Haus am 19.9.'11. . . . .	41
4.4	Temperaturänderung durch öffnen der Türe. . . . .	42
4.5	Detektortisch mit Abschirmung, Detektor und Vorverstärker. . . . .	43
4.6	Skalen zur Positionierung der Detektoren. . . . .	43
4.7	NIM-Rack mit Spannungsquellen. . . . .	45
4.8	PXI Chassis und Motion I/O Interfaces. . . . .	45
4.9	Schematische Darstellung der Verbindung des PC, über das PXI-Chassis, mit den Detektoren, der Motorsteuerung und der Temperaturmessung. . . . .	45
4.10	Innenleben des IFM-Hauses. ganz unten ist der Betonblock zu sehen, darauf eine nivellierte Alluminiumplatte, auf der der Antivibrationstisch steht. auf dem Tisch sind die Steuermotoren für das IFM, die Blende und der Phasenschieber montiert. Auf der rechten Seite befinden sich Paraffinziegel zur Abschirmung von Untergrund. . . . .	47
4.11	IFM mit Stellmotoren. Im Vordergrund ist der Drehmotor für den Phasenschieber zu sehen, im Hintergrund die Steuereinheit für das IFM. . . . .	47
4.12	Schematische Zeichnung der Lagerung des IFM mit der Möglichkeit das IFM parallel zum Strahl zu fahren, um die Höhenachse zu rotieren und parallel zur Strahlrichtung zu Kippen. . . . .	48
4.13	LabVIEW-Programm Monitor+Counter_1_Continouse.vi. . . . .	50
4.14	Programm zum Steuern der Motoren und Speichern der Limits. . . . .	51
4.15	Programm zum Steuern der Blende. . . . .	51
4.16	Rocking_1.vi . . . . .	52
4.17	Rocking_1.vi . . . . .	53
4.18	Strahlengang Durch das IMF, $\Delta x$ ist der Strahlversatz, der für O- und H-Detektor gleich ist . . . . .	55
4.19	Ergebnis der ersten Strahlvermessung in horizontaler Richtung, mit der höchsten Intensität bei $11,7\text{ mm}$ . . . . .	56

4.20	Vermessung des Strahls in vertikaler Richtung. Der Ort des höchsten Neutronenflusses liegt bei $x_0 = 25 \text{ mm}$ . . . . .	56
4.21	Zweite Messung der horizontalen Richtung. Abermals liegt der Ort der höchsten Intensität bei $11,7 \text{ mm}$ . . . . .	57
4.22	Ergebnis des ersten Rockings im O-Strahl. Die Höhe des Peaks ist $P = 38,8 \text{ n}/100\text{s}$ und der Untergrund beträgt $U = 51,9 \text{ n}/100\text{s}$	59
4.23	Rockingkurve nach der Positionsbestimmung der Detektoren. Der O-Strahl ist rot eingezeichnet, der H-Strahl blau. Die Höhe des Peaks ist $P = 38,8 \text{ n}/100\text{s}$ und der Untergrund beträgt $U = 51,9 \text{ n}/100\text{s}$ . . . . .	60
4.24	Abhängigkeit des Plateaus von der Diskriminatorstellung. Dabei ist die Diskriminatorstellung bei blau 1, grün 2, gelb 4, rot 9 und bei braun 11. . . . .	62
4.25	Diskriminatorvermessung des O-Detektors. Wobei der diskriminator in Schritten von $45^\circ$ weitergedreht wurde. . . . .	63
4.26	Diskriminatorvermessung des H-Detektors. Wobei der diskriminator in Schritten von $45^\circ$ weitergedreht wurde. . . . .	63
4.27	Messung zur Bestimmung der Versorgungsspannung; rot O-Detektor; blau H-Detektor. Man sieht beim O-Detektor ein Plateau von $3000 \text{ V}$ bis $3500 \text{ V}$ und beim H-Detektor eines von $2800 \text{ V}$ bis $3300 \text{ V}$ . . . . .	64
4.28	Rockingkurve nach der Installation der Abschirmung am IFM-Haus und dem Aufstellen der Paraffinziegel im IFM-Haus. Rot eingezeichnet der O-Strahl, blau der H-Strahl. Die Höhe des O-Peaks ist $P = 45,7 \text{ n}/100\text{s}$ und der Untergrund beträgt $U = 48,4 \text{ n}/100\text{s}$ , damit wurde der Untergrund um $3,5 \text{ n}/100\text{s}$ reduziert. . . . .	66
4.29	Rockingkurve nach der Platzierung der Kollimatoren. Im O-Strahl (blau) wurde ein Untergrund $U = 18,4 \text{ n}/100\text{s}$ , was einer weiteren Reduktion um $30 \text{ n}/100\text{s}$ entspricht, und ein Peak $P = 51,7 \text{ n}/100\text{s}$ gemessen. Der H-Strahl ist blau eingezeichnet.	66
4.30	Rockingkurve mit vergrößerter Blende ( $9 \times 9 \text{ mm}$ ) und zusätzlichen Paraffinziegeln. Der Untergrund bei dieser Messung ergab im O-Strahl (rot) $U = 15,4 \pm 2,6 \text{ n}/100\text{s}$ und eine Peakhöhe von $102,8 \pm 5,4 \text{ n}/100\text{s}$ . Damit wurde der Untergrund um weitere $3,5 \text{ n}/100\text{s}$ gesenkt. . . . .	67
4.31	Schematische Darstellung des Strahlengangs. 1: einfallender Neutronenstrahl, 2: Blende aus Cadmium, 3: IFM, 4: Paraffinziegel mit Cadmium beklebt, 5: Kollimatoren, 6: Abschirmung vor dem IFM, 7: O-Detektor, 8: Detektorabschirmung. . . . .	67

5.1	Detailansicht des Antivibrationstisch. . . . .	70
5.2	Bei der Interferenzmessung mit ungedämpftem IFM ist kein Kontrast zu messbar. . . . .	71
5.3	Interferenz mit 8 Blatt Papier und einer Blendengröße von $7 \times 7 \text{ mm}^2$ , ergibt einen Kontrast von $C = 0,337 \pm 0,029$ . . . .	72
5.4	Interferenz mit 12 Blatt Papier und einer Blendengröße von $7 \times 7 \text{ mm}^2$ , ergibt einen Kontrast von $C = 0,427 \pm 0,049$ , was das beste Ergebnis ist. . . . .	73
5.5	Interferenz mit 16 Blatt Papier und einer Blendengröße von $7 \times 7 \text{ mm}^2$ , ergibt einen Kontrast von $C = 0,248 \pm 0,036$ . . . .	73
5.6	Interferenzmessung mit der Blende auf $9 \times 9 \text{ mm}^2$ vergrößert. Es wurde eine Amplitude von $A = 168,2 \pm 6,9 \text{ n}/500\text{s}$ und ein Offset von $454,8 \pm 5,1 \text{ n}/500\text{s}$ gemessen und damit ein Kontrast von $C = 0,445 \pm 0,021$ . Der H-Strahl zeigte eine Amplitude von $308,0 \pm 16,2 \text{ n}/500\text{s}$ bei einem Offset von $2679.6 \pm 12,1 \text{ n}/500\text{s}$ . . . . .	74
5.7	Der O-Strahl aus der Messung obigen einzeln herausgezeichnet mit Sinusfit. . . . .	74
5.8	Interferenzmessungen zu verschiedenen Kippwinkeln; Paarweise zusammengefasst sind Kippwinkel $\alpha$ und Phasenschub $\Phi_{COW}$ : $\alpha = 0^\circ \Phi_{COW} = 0,0 \pm 3,8^\circ$ ; $\alpha = 0,141^\circ \Phi_{COW} = 22,6 \pm 9,6^\circ$ ; $\alpha = 0,282^\circ \Phi_{COW} = 77,7 \pm 8,42^\circ$ ; $\alpha = 0,424^\circ \Phi_{COW} = 118,8 \pm 8,0^\circ$ ; $\alpha = 0,565^\circ \Phi_{COW} = 143,9 \pm 7,7^\circ$ ; $\alpha = 0,706^\circ \Phi_{COW} = 163,3 \pm 7,4^\circ$ . . . . .	76
5.9	Die Messergebnisse zu den verschiedenen Kippwinkeln und der zugehörige Linienfit. Der Fit ergibt einen Phasenschub von $259 \pm 9,2^\circ$ bei einem Kippwinkel von einem Grad. . . . .	77
5.10	Interferenzmuster durch das Verkippen des IFMs ohne das sich ein Phasenschieber im Strahlengang befindet. Dabei wurde eine Amplitude von $A = 82,8 \pm 3,8 \text{ n}/200\text{s}$ , bei einem Offset von $y_0 = 192,1 \pm 2,7 \text{ n}/200\text{s}$ , das ergibt einen Kontrast von $C = 0,513 \pm 0,044$ . . . . .	78

# Literaturverzeichnis

- [1] H. Rauch, W. Treimer, and U. Bonse, . *Test of a single crystal neutron interferometer*. Phys. Lett. **A47** (1974) 369.
- [2] H.Lemmel, *Confinement Induced Neutron Phase*, Ph.D. Thesis, TU Wien (2006).
- [3] Y. Hasegawa and H. Rauch, *New J. Phys.* **13** (2011) 115010.
- [4] Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, K. Durstberger-Rennhofer, S. Spönar, and H. Rauch, *Engineering of triply entangled states in a single-neutron system* Phys. Rev. **A81** (2010) 032121-1-6.
- [5] H. Rauch and S.A. Werner, *Neutron Interferometry - Lessons in Experimental Quantum Mechanics*, Oxford Uni. Press, (2000).
- [6] H.Rauch, D. Petrascheck, *Grundlagen für ein Laue-Neutroneninterferometer, Teil 1: Dynamische Beugung*, ATI:AIAU 74405 (1976).
- [7] H.Rauch, D. Petrascheck, *Grundlagen für ein Laue-Neutroneninterferometer, Teil 2: Theorie des Interferometers*, ATI:AIAU 74405 (1976).
- [8] S.A. Werner, H. Kaiser, M. Arif, R. Clothier *Neutron interference induced by gravity* Physica **B151** (1988) 22.
- [9] K. C. Littrell, B. E. Allman, and S. A. Werner *Two-wavelength-difference measurement of gravitationally induced quantum interference phases* (1997) Phys. Rev. *A56* 1767
- [10] H. Rauch, *Test of quantum mechanics by neutron interferometry* Open Questions in Quantum Physics G. Tarozzi and A. v.d.Merwe, Eds.; Reidel Publ. Corp., Dordrecht (1985) 345.

- 
- [11] M. Zawisky, J. Springer, R. Farthofer, U. Kuetgens *A large-area perfect crystal neutron interferometer optimized for coherent beam-deflection experiments: Preparation and performance* Nucl. Instr. Meth. **A1** (2009).
- [12] E. Jericha *Vorlesungsskriptum Neutronen und Kernphysik* (2005), TU Wien.
- [13] M.C.Both *Justierung eines fokussierenden Polygraphit-Monochromators*, Dipl. Arb. TU Wien (2010).
- [14] M. Hafner *Untersuchungen zur wechselwirkungsfreien Messung im Neutroneninterferometer*, Dipl. Arb. TU Wien (1996).

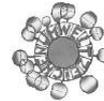
# Kapitel 8

## Spezifikationen

## Austrotherm Produktdatenblatt

Austrotherm XPS<sup>®</sup>TOP 30

<b>Anwendung:</b>	Wärmedämmung unter und über Bodenplatte, Feuchtraum, Industrieböden, Perimeterdämmung, Umkehrdächer, Duodach, Sporthallenbau	
nach DIN 4108-10	<b>DAD, DAA, DUK, DI, DEO, WAB, WZ, WI, PW, PB,</b> Druckbelastbarkeit: <b>dh</b>	
<b>Lieferform:</b>	Plattenabmessungen :	1265 x 615 mm
	Nutzmaß :	1250 x 600 mm
	Lieferticken :	<b>30 -200mm</b>
	Kantenausbildung:	Stufenfalz (SF), gerade Kante (GK) Nut + Feder (NF)
	Oberfläche:	Glatt
<b>Produktart:</b>	Extrudierter Polystyrol Hartschaum nach Ö-Norm EN 13164	XPS
	nach Ö-Norm B 6000	XPS-G 30
<b>Bezeichnungs- Schlüssel:</b>	XPS-EN13164-T1-DS(TH)-CS(10/Y)300-DLT(2)5-CC(2/1,5/50)130- WD(V)3-FT2-WL(T)0,7	
<b>Qualität:</b>	Zulassung des DIBt.: Z-23.15-1416 Zulassung des DIBt.: Z-23.31-1292 Zulassung des DIBt.: Z-23.31-1293 Zulassung des DIBt.: Z-23.34-1552 Fremdüberwacht durch das FIW München	
<b>Techn. Daten:</b>	Belastbarkeitsgruppe:	BG 30
	Wärmeleitfähigkeit :	<b>0,035 W/mK (30-60mm)</b> <b>0,036 W/mK (70-120mm)</b> <b>0,038 W/mK (130-200mm)</b>
	Mindestrohddichte:	≥ 30 kg/m <sup>3</sup>
	Druckspannung bei 10% :	CS(10/Y) 300 kPa = 30 t/m <sup>2</sup>
	Kriechverhalten: (Gem. EN 1606 entspricht zul. Dauerdruckfestigkeit auf 50 Jahre)	CC(2/1,5/50)130 kPa = 13 t/m <sup>2</sup>
	Geschlossenzelligkeit :	≥ 95 %
	Elastizitätsmodul :	12 N/mm <sup>2</sup> = 12000 kPa
	Wasseraufnahme Kapillar:	0
	Wasseraufnahme durch Diffusion:	WD(V)3 Vol. %
	Frost-Tau-Wechselbeständigkeit:	FT 2
	Brennbarkeitsklasse:	B1
	Qualmbildungsklasse:	Q3
	Tropfenbildungsklasse:	TR1
	Brandverhalten EN 13501-1:	E
<b>Verarbeitung:</b>	Max. Anwendungsgrenztemperatur:	70 °C



Austrotherm XPS<sup>®</sup>TOP 30 enthält keine Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs), HFCKWs bzw. HFKWs.

Entwicklung und Anwendungstechnik  
Bearbeitung : 01/2011

Unsere anwendungstechnischen Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers/Verarbeiters aufgrund unserer Erfahrungen, entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand in Wissenschaft und Praxis geben, sind unverbindlich und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine Nebenverpflichtungen aus dem Kaufvertrag. Sie entbinden den Käufer nicht davon, unsere Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck selbst zu prüfen.

**Austrotherm GmbH,**  
A-2754 Wopfing, Friedrich Schmid-Straße 165,  
Tel.: 02633/401-0, Fax: 02633/401-270  
e-mail: info@austrotherm.at, [www.austrotherm.com](http://www.austrotherm.com)

**AUSTROTHERM**  
Dämmstoffe







## BM-4 Bench Top Vibration Isolation Platform

Weight: Approximately 60 lb (27 kg)	
Dimensions: 16.8" W x 16.8" D x 8.5" H (427mm W x 427mm D x 216mm H)	
Approximate payload weight range:	
Model	Payload Range
25BM-4	0 - 25 lb (0 - 11 kg)
50BM-4	20 - 55 lb (9 - 25 kg)
100BM-4	50 - 105 lb (23 - 48 kg)
<b>Performance</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Vertical natural frequency of 1/2 Hz or less can be achieved over the entire load range.</li> <li>Horizontal natural frequency is load dependent. 1/2 Hz or less can be achieved at or near the upper limits of the payload range.</li> </ul>	
<b>Simple Set-Up and Adjustment</b>	

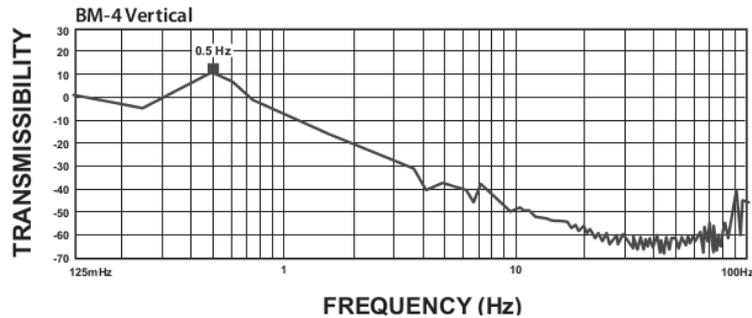


The most cost effective bench top platform capable of 1/2 Hz performance vertical and horizontal.

For more information contact us at: 310-348-9656 or sales@minusk.com

The curve below shows the typical vertical 1/2 Hz performance of the BM-4. It offers 10-100 times better performance than typical high-performance air tables.

Typical Performance Curve:



3/07

## PXI Chassis with Integrated MXI-Express Remote Controller

### NI PXI-1033 Series

- Low-cost chassis for remote control applications
- Controlled from either a PCI Express desktop host or an ExpressCard laptop host
- MXI-Express remote controller achieves up to 110 MB/s sustained throughput
- Rugged, compact package accepts up to 5 peripheral modules
- Acoustic noise as low as 38 dBA
- Accepts both 3U PXI and CompactPCI modules

#### Options

- Compatible with all PXI-103x family accessories
  - Rack-mount kit
  - Handle and feet kit



### Overview

The National Instruments PXI-1033 Series chassis kits consist of a low-cost chassis designed with an integrated controller for remote control applications, either a host PCI Express board for desktops or a host ExpressCard for laptops, and a cable. The NI PXI-1033 Series reduces the already low entry cost of a PXI system by 50 percent when compared to a PXI-1031 4-slot chassis and MXI-Express controller. With an integrated MXI-Express controller in the chassis, the PXI-1033 provides a transparent, remote link with up to 110 MB/s sustained throughput. It offers five peripheral slots for I/O modules and features compact, rugged packaging as well as quiet operation, which makes it ideal for both portable and desktop ATE systems. The low cost and high performance of the PXI-1033 Series meet application needs in a variety of industries including automotive, ATE, and electronics.

### Low-Cost PXI Remote Control System

A PXI-1033 chassis kit lowers the PXI setup cost by 50 percent when compared to 4-slot PXI-1031 chassis with a MXI-4 Express kit. With this low-cost PXI entry point, engineers can control up to five PXI/CompactPCI modules across a remote link that offers 110 MB/s of sustained bandwidth—more than a 40 percent increase compared to MXI-4 PCI remote control of PXI.

### Lightweight, Portable System

The PXI-1033 chassis includes an integrated remote controller and five peripheral slots. The compact, rugged, and portable chassis weighs less than 12 lb and is small for portability. It features an operating temperature range of 0 to 50 °C.

### Quiet Acoustic Emissions for Improved Development Environment

The PXI-1033 chassis offers an AUTO/HIGH fan-speed selector that provides a HIGH fan setting to maximize cooling and AUTO fan setting to minimize acoustic emissions. When set in AUTO, the PXI-1033 chassis monitors air intake temperature and adjusts fan speed accordingly. Table 1 shows PXI-1033 acoustic emissions.

Sound Pressure Level <sup>1</sup> (dBA) (measured at operator interface)	
Auto Fan (25 °C ambient)	37.4
High Fan	51.5

<sup>1</sup>Tested in accordance with ISO 7719

Table 1. PXI-1033 Acoustic Emissions

## Counter/Timer Accessories

### SCB-68 Shielded I/O Connector Block (See Figure 3)

Shielded I/O connector block for easy connection of I/O signals to the counter/timer devices. The screw terminals are housed in a metal enclosure for protection from noise corruption. Combined with a shielded cable, the SCB-68 provides rugged, very low-noise signal termination. The SCB-68 also includes two general-purpose breadboard areas.

SCB-68 .....776844-01  
 Dimensions – 19.5 by 15.2 by 4.5 cm (7.7 by 6.0 by 1.8 in.)



Figure 3. SCB-68 Shielded I/O Connector Block

### TB-2715 Terminal Block (See Figure 4)

With the TB-2715 terminal block for PXI/CompactPCI counter/timer devices, you can connect signals directly without additional cables. Screw terminals provide easy connection of I/O signals. The TB-2715 latches to the front of your PXI module with locking screws and provides strain relief.

TB-2715 .....778242-01  
 Dimensions – 8.43 by 10.41 by 2.03 cm (3.32 by 4.1 by 0.8 in.)



Figure 4. TB-2715 I/O Connector Block

### TBX-68 I/O Connector Block with DIN-Rail Mounting (See Figure 5)

Termination accessory with 68 screw terminals for easy connection of field I/O signals to the counter/timer devices. The TBX-68 is mounted in a protective plastic base with hardware for mounting on a standard DIN rail.

TBX-68 .....777141-01  
 Dimensions – 12.50 by 10.74 cm (4.92 by 4.23 in.)



Figure 5. TBX-68 I/O Connector Block

### CB-68LP and CB-68LPR I/O Connector Blocks (See Figure 6)

Low-cost termination accessories with 68 screw terminals for easy connection of field I/O signals to the counter/timer devices. The connector blocks include standoffs for use on a desktop or mounting in a custom panel. The CB-68LP has a vertically mounted 68-pin connector. The CB-68LPR has a right-angle mounted connector for use with the CA-1000.

CB-68LP .....777145-01  
 Dimensions – 14.35 by 10.74 cm (5.65 by 4.23 in.)  
 CB-68LPR .....777145-02  
 Dimensions – 7.62 by 16.19 cm (3.00 by 6.36 in.)

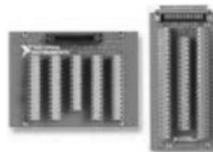


Figure 6. CB-68LP and CB-68LPR I/O Connector Blocks

Counter/Timer Accessories

Measurements

## High-Performance GPIB Interfaces for PCI and PXI

### NI PCI-GPIB, NI PXI-GPIB, NI PCI-GPIB/Low-Profile (LP), NI PCI-GPIB+, NI PCI-8232, NI PXI-8232

- Complete IEEE 488.2 compatibility
- FIFO buffers to decouple GPIB transfers from PCI transfers
- Maximum GPIB transfer rates
  - More than 1.5 MB/s (IEEE 488.1)
  - More than 7.7 MB/s (HS488)
- Universal PCI/PXI connector for operation in 3.3 and 5 V slots
- PCI-GPIB+ that adds GPIB analyzer functionality
- PCI-8232, PXI-8232 that add Gigabit Ethernet controller functionality

#### Operating Systems

- Windows Vista (32- and 64-bit)/XP/2000/Me/9x/NT
- Mac OS X/Classic
- Solaris (SPARC), Solaris x86, and Linux\*

#### Recommended Software

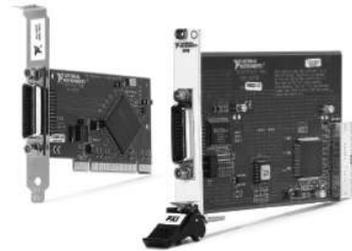
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio

#### Driver Software (included)

- NI-488.2
- GPIB analyzer software (Windows only)

#### Driver Development Kit

- NI-488DDK
  - For any OS
  - Examples included for DOS, Tru64 UNIX (Digital UNIX), HP-UX, IRIX, VxWorks



### Overview

The NI GPIB controllers for PCI and PXI combine high-performance hardware with a complete suite of development tools to get your applications up and running fast.

The National Instruments PCI-MITE and TNT family ASICs make the NI PCI-GPIB a maximum-performance IEEE 488.2 interface for the PCI bus. The PCI-MITE, a complete PCI interface, is compliant with PCI Specification 2.1. The hardware is completely software-configurable and compatible with the plug-and-play standard for easy hardware installation. The TNT chip performs the basic IEEE 488 taker, listener, and controller functions required by all versions of IEEE 488, including

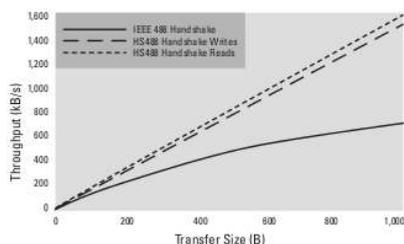


Figure 1. NI PCI/PXI GPIB Controller Data Transfer Benchmarks (Small Data Blocks)

IEEE 488.2. The PCI-GPIB can sustain data transfer rates of more than 1.5 MB/s using the IEEE 488.1 three-wire interlocked handshake. It also implements the high-speed IEEE 488.1 noninterlocked handshake (HS488) for benchmarked data transfers at more than 7.7 MB/s.

The NI PCI-GPIB/LP is a low-profile IEEE 488 interface for computers that accept boards of this size. The PCI-GPIB/LP is functionally equivalent to the high-performance PCI-GPIB and maintains compatibility for both 3.3 and 5 V PCI slots.

The NI PXI-GPIB is a low-cost, high-performance IEEE 488 interface for PXI, the standard for PCI-based modular instrumentation that uses the PCI bus in a rugged Eurocard configuration.

Because PXI is electrically a superset of desktop PCI with a different physical configuration, the PXI-GPIB module has the same functionality and performance as a PCI-GPIB board. The PXI-GPIB is available with NI-488.2 for Windows Vista (32- and 64-bit)/XP/2000/NT/Me/9x, Solaris (SPARC), and Solaris x86.

The NI PCI-GPIB+ interface combines the PCI-GPIB with a GPIB protocol analyzer. The NI PCI-8232 and PXI-8232 interfaces include PCI-GPIB functionality as well as an Intel 10/100/1000BASE-T Ethernet port. These combination devices save slots in your system while providing the full performance and functionality of their individual components.





## C-809.40

### 4-Channel Servo-Amplifier / Motion I/O Interface for NI Motor Controllers

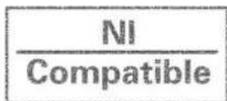


**Ordering Information**  
**C-809.40**  
 4-Channel Servo-Amplifier /  
 Interface for NI Motor Controllers

In addition to linear amplifiers, the unit includes analog to PWM converters and circuitry to adapt PI's differential encoder signals to the single-ended signals required by NI controller.

The automatic analog to PWM conversion makes it possible to operate micropositioning systems with integrated PWM amplifiers. To facilitate neat and professional installation, all encoder, motor control, limit and reference switch signals are available on individual 15-conductor sockets on the front panel. Convenient fan-out of auxiliary and I/O lines from the NI 7344 is also provided via another front-panel sub-D connector.

- Compatible with National Instruments Controllers
- Integrated Analog and PWM Amplifiers for 4 Channels
- Plug & Play Operation
- Uses Standard 68 Pin NI Connection Cable
- 37-Pin Interface for Auxiliary and I/O Lines



Many users of National Instruments (NI) motor controllers

use PI micropositioning systems. To simplify setup and operation of such systems, PI has developed the C-809.40 amplifier, which permits interconnection of up to four PI micropositioning systems and an NI controller such as the 7344.

- Application Examples**
- Quality control
  - Test equipment
  - Micromachining
  - Biotechnology
  - Micromanipulation
  - Microscopy
  - Photonics packaging
  - Fiber alignment
  - Metrology

**Technical Data**

Models	C-809.40
Function	Amplifier / Interface for NI Motor Controllers
Channels	4
Output power	Analog 6 W/Channel, PWM **: Power for ActiveDrive™ motors is via separate power supplies or sockets on front panel***
Max. power	110-120 W / 24 V, for ActiveDrive™ motors
Current limits	1 A per channel for analog DC motors (short-circuit proof)
* Motor connections	Four 15-pin (f) sub-D sockets
I/O lines	37-pin (f) sub-D socket
Connections on NI controller	68-pin VHDCI motion I/O socket (SCSI-4 type) for NI cable SHC68-C68-S
Dimensions	450 x 105 x 390 mm
Power supply	Wide-range power supply, 90 to 240 VAC, 50 to 60 Hz

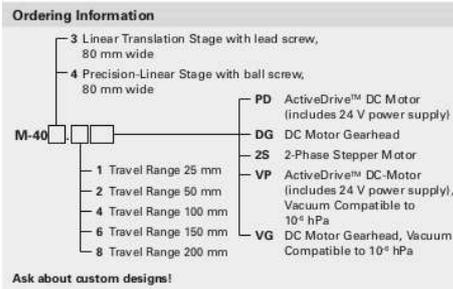
\* For standard PI linear and rotation stages with DB-15 connectors and DC motors. Motor brake signals are not supported. Ask about compatibility with PILIn® piezomotor stages.  
 \*\* The C-809 can be modified to accept PWM signals (instead of analog signals) from NI controllers.  
 \*\*\* The 24 VDC supply sockets can be used to supply PI micropositioning stages with integrated PWM amplifiers.

© PI 1998-2005. Subject to change without notice. Cat. 138 05/05.17



## 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

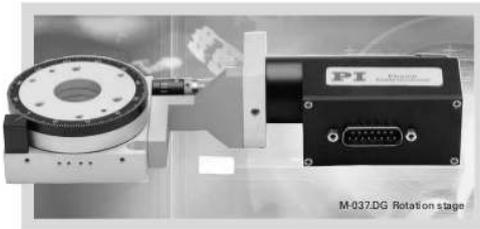
The M-403/M-413 and M-404/M-414 series of linear stages form a modular system. The M-403 is the basic family, providing travel ranges from 25 to 200 mm. M-413 is designed for higher loads with travel ranges from 100 to 300 mm. The M-404 and M-414 stages have the same travel ranges and load capacities,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

© Piezo & Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2008. 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. PZ 09/12/07.0



## M-037 Compact Precision Rotation Stage

### Unlimited Travel Range, Vacuum-Compatible Versions



- Ultra-High Resolution
- Compact Design
- Continuous Rotation Range
- Preloaded Worm Drive for Zero Backlash
- ActiveDrive™ Manual, DC-Servo and Stepper-Motor Drives
- Clear Aperture Ø 20 mm
- Vacuum-Compatible Versions Available to 10<sup>-4</sup> hPa

Coarse position can be read from an adjustable scale ring on the outer edge of the turntable graduated in 2 degree increments.

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

**Notes**

For adapters, bracket, etc. see page 4-90 ff.

**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

**M-037.VG**  
Vacuum Compatible to 10<sup>-4</sup> hPa of M-037.DG

**M-037.PD**  
Rotation Stage, Ø 60 mm, 360°, ActiveDrive™ DC Motor (includes 24 V power supply)

**M-037.VP**  
Vacuum Compatible to 10<sup>-4</sup> hPa of M-037.PD

**M-037.2S**  
Rotation Stage, Ø 60 mm, 360°, 2-Phase Stepper Motor

**Ask about custom designs!**

© Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2008. Subject to change without notice. All data are superseded by any new releases. The newest release for data sheets is available for download at www.pi.ws. Call 120E Inspiration 2009 06/10/18

M-037 rotation stages are equipped with ultra-precise worm gear drives allowing unlimited rotation in either direction. An integrated spring preload eliminates backlash. Double-row ball bearings allow zero backlash, high load capacity and extremely low wobble.

The worm gear ratio is 180:1, which allows an extraordinary position resolution of the turntable.

**DC-Motor and Stepper Motor Drives**

A variety of servo and stepper motors are available, besides the manual version.

Model M-037.DG is closed-loop DC motors with shaft-mounted position encoders and precision gearheads providing 3.5 µrad at a design resolution of 0.6 µrad.

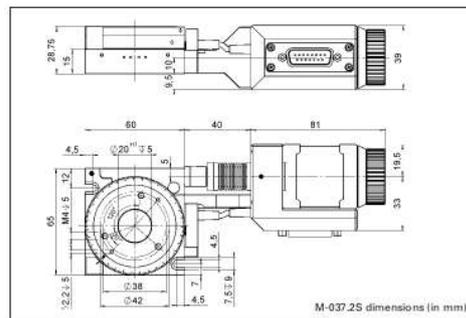
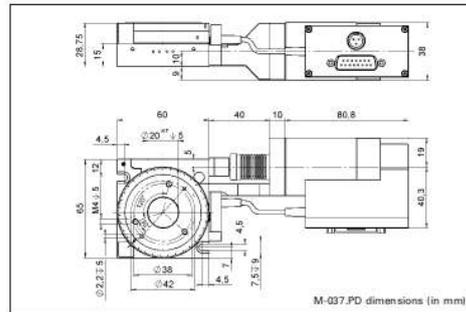
Model M-037.2S models feature a cost-effective direct-drive, 2-phase stepper motor,

providing very smooth operation and a resolution of 5.45 µrad at a minimum incremental motion of 21 µm.

**ActiveDrive™**

Model M-037.PD is equipped with the high efficient Active Drive™ direct drive and provides velocities up to 45°/s. 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-227 DC-Mike High-Resolution Linear Actuator Non-Rotating Tip, Long Stroke to 50 mm



### Ordering Information

- M-227.10**  
High-Resolution DC-Mike Linear Actuator, 10 mm
- M-227.25**  
High-Resolution DC-Mike Linear Actuator, 25 mm
- M-227.50**  
High-Resolution DC-Mike Linear Actuator, 50 mm
- M-219.10**  
Ball Tip
- P-855.20**  
Piezo Actuator for Micrometer Drive

M-227.10 (w/ piezo tip), M-227.25, M-227.50 (w/ ball tip), high-resolution DC-Mike actuators and several tip options

- Travel Ranges 10, 25 and 50 mm
- Min. Incremental Motion to 0.05  $\mu\text{m}$
- Non-Rotating Tip
- Closed-Loop DC-Motors
- Sub-nm Resolution with Optional PZT Drive
- MTBF >5,000 h

M-230 (see p. 1-46 ff), M-235 (see p. 1-50 ff) and M-238.

© Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2008. Subject to change without notice. All data are superseded by any new releases. The newest release for data sheets is available for download at www.pi.ws. Cat120E-Ins010108/08/10/18

M-227 are ultra-high-resolution linear actuators providing linear motion up to 50 mm with sub-micron resolution in a compact package. They consist of a micrometer with non-rotating tip, driven by a closed-loop DC-motor/gearhead combination with motor-shaft-mounted high-resolution encoder. The combination of an extremely low stiction/friction construction and high-resolution encoder allows for a minimum incremental motion of 50 nanometers at speeds up to 1 mm/sec.

### Compact, High-Precision, Cost-Effective

M-227 actuators provide a cost-effective solution for industrial and OEM environments.

### Integrated Line Drivers

All actuators include an integral 0.5 m cable with 15-pin sub-D connector and come with a 3 m extension cable. On the DC servo versions, the connector features integrated line drivers for cable lengths up to 10 meters between actuator and controller.

### Non-Rotating Tip

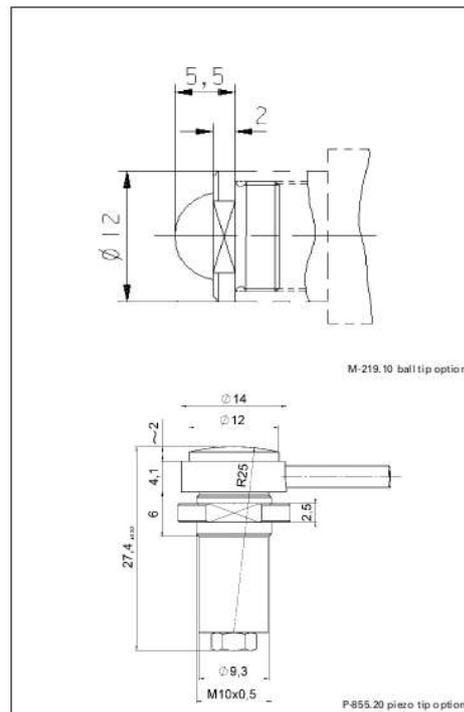
Compared to conventional rotating-tip micrometer drives, the non-rotating-tip design offers several advantages:

- Elimination of torque-induced positioning errors
- Elimination of sinusoidal motion errors
- Elimination of wear at the contact point
- Elimination of tip-angle-dependent wobble

### High-Resolution Piezo Option

All models come with standard flat tips. A variety of other tips are also available, such as a piezoelectric tip featuring 20  $\mu\text{m}$  travel with sub-nanometer resolution for dynamic scanning and tracking see p. 1-73 and 1-58.

For higher loads and integrated limit switches refer to the



## M-041 – M-044 Präzisionskipptisch Nanometergenau durch optionalen Piezoantrieb



M-044.D01 Kipptisch

- Ein bzw. zwei Kippachsen
- Umkehrspielfrei
- Sub- $\mu$ rad-Auflösung
- Manuelle- und DC-Motorantriebe
- Optionaler Piezoantrieb für Tracking- und Scanninganwendungen

Die kompakten Ein- und Zweiaxiskipptische der Serie M-041 bis M-044 sind spielfrei vorge-spannte Präzisionsstellsysteme, die bessere Auflösungen und Wiederholbarkeiten erreichen als konventionelle Goniometer (s. S. 2-79 ff.).

### Manuelle und DC-Motorantriebe

In der Grundausführung treibt eine Mikrometerschraube über eine spielfreie Magnetkoppelung den Tisch an. Die kleinste Schrittweite liegt bei 65 bzw. 80  $\mu$ rad.

Die M-04x.D01 Modelle sind mit dem M-227.10 (s. S. 1-42) DC-Motorantrieb ausgerüstet und ermöglichen kleinste Schrittweiten von 12 bzw. 15  $\mu$ rad. Integrierte Endschalter schützen die Mechanik vor Schäden.

### Hochauflösende Piezoantriebe

Mit den optionalen Piezoantrieben P-840 und P-841 (s. S. 1-74) erreichen die Versteller Sub- $\mu$ rad-Auflösungen und können auch für Scanning- oder Trackinganwendungen mittlerer Dynamik eingesetzt werden. Das modulare Konzept der M-04x Tische erlaubt die Nachrüstung mit Piezoaktoren, die für höhere Wiederholbarkeit auch mit Positionssensoren verfügbar sind.

PI bietet darüber hinaus eine Reihe piezogetriebener Kippspiegelsysteme für hochdynamische Scanning- und Trackinganwendungen an (s. Kapitel „Schnelle Kippspiegel/Schnelle Scantische, S. 2-81 ff.“).

### Hinweise

Adapterplatten, -winkel und Zubehör auf Seite 4-90 ff.

### Bestellinformation

- M-041.00**  
Präzisionskipptisch, Mikrometerantrieb
- M-041.D01**  
Präzisionskipptisch, DC-Motorantrieb
- M-042.00**  
Präzisionskipptisch, 2 Achsen, Mikrometerantrieb
- M-042.D01**  
Präzisionskipptisch, 2 Achsen, DC-Motorantrieb
- M-043.00**  
Präzisionskipptisch, Mikrometerantrieb
- M-043.D01**  
Präzisionskipptisch, DC-Motorantrieb
- M-044.00**  
Präzisionskipptisch, 2 Achsen, Mikrometerantrieb
- M-044.D01**  
Präzisionskipptisch, 2 Achsen, DC-Motorantrieb

### Nachrüstätze

- M-041.U0**  
Nachrüstatz m. unregelmäßigem Piezoantrieb für M-041 Präzisionskipptische
  - M-041.US**  
Nachrüstatz m. regeltem Piezoantrieb für M-041 Präzisionskipptische
  - M-042.U0**  
Nachrüstatz m. unregelmäßigem Piezoantrieb für M-042 Präzisionskipptische
  - M-042.US**  
Nachrüstatz m. regeltem Piezoantrieb für M-042 Präzisionskipptische
  - M-043.U0**  
Nachrüstatz m. unregelmäßigem Piezoantrieb für M-043 Präzisionskipptische
  - M-043.US**  
Nachrüstatz m. regeltem Piezoantrieb für M-043 Präzisionskipptische
  - M-044.U0**  
Nachrüstatz m. unregelmäßigem Piezoantrieb für M-044 Präzisionskipptische
  - M-044.US**  
Nachrüstatz m. regeltem Piezoantrieb für M-044 Präzisionskipptische
- Sonderausführungen auf Anfrage!**

### Linearantriebe & Aktoren

Nanostechnik / Piezoelektronik

Nanomesstechnik

### Mikrostechnik

Hexapoden, Parallelkinematiken

Linearversteller

Horizontalschwenk (X)

Vertikalschwenk (Z)

Miettraching

### Rotations- u. Kippversteller

Zubehör

Servo- & Schrittmotorsteuerungen

Einkanalig

Hybrid

Mehrkanalig

Grundlagen der Mikrostechnik

Index

© Physik-Instrumente (PI) GmbH & Co. KG 2016. Änderungen vorbehalten. Dieses Datenblatt verliert seine Gültigkeit mit Erscheinen einer neuen Revision. Die jeweils aktuelle Revision ist unter [www.pi.ws](http://www.pi.ws) zum Herunterladen verfügbar. Cat120D/Inspiration2009/09/02/10