



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Vorbereitung von Gravitationsexperimenten im Rahmen des *q*BOUNCE-Experiments

ausgeführt am

Atominstitut der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Phys. Dr.rer.nat. Hartmut Abele

durchgeführt von

Ing. Manuel Heiß, BSc.

e1025927

21.08.2017

.....
Unterschrift Student

.....
Unterschrift Betreuer

Kurzfassung

Diese Masterarbeit soll einen Beitrag zur sogenannten Gravitationsresonanzspektroskopie von Neutronen mit Hilfe von Ramsey's Methode separierter oszillierender Felder liefern. Zur Realisierung dieser Methode wurden Neutronenspiegel, welche die glatte Oberfläche zur Reflexion ultrakalter Neutronen darstellen, mechanisch in Schwingung versetzt. Dabei sollen jene Neutronenspiegel, welche in den Wechselwirkungszonen in Ramsey's Methode platziert sind, möglichst in Phase oszillieren, um eine bestmögliche Frequenz- und somit Energiegenauigkeit zu erreichen. Der Unterbau der Spiegel wurde komplett erneuert um eine höhere mechanische Stabilität zu gewährleisten. Zur Überprüfung der Oszillationen und der Phasendifferenzen der Neutronenspiegel wurde ein neues Laserinterferometer, welches eine höhere Wegauflösung und Stabilität besitzt, charakterisiert und in den Aufbau integriert. Durch die Erzeugung mechanischer Oszillationen zweier Regionen kam es bei ersten Messungen zu Phasenproblemen, welche im Laufe dieser Masterarbeit untersucht und minimiert wurden.

Abstract

The aim of this master thesis is to contribute to the so called gravity resonance spectroscopy of neutrons using Ramsey's-method of separated oscillating fields. In order to obtain the needed frequencies for this method, neutron mirrors were used. Using this method, the neutron-mirrors, which are positioned in the regions of interaction, should oscillate in phase to obtain the best possible resolution of frequency and energy. The regions were renewed completely to guarantee a higher mechanical stability. To examine the oscillation and the phase difference of the neutron-mirrors, a new laser-interferometer, with a higher position resolution and stability, was characterized and integrated into the experimental set-up. Due to the creation of mechanical oscillations of two regions, perturbations appeared in the first measurements. These phase problems and their minimalization are the subject of this thesis.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das qBOUNCE-Experiment	4
2.1	Grundlagen	4
2.1.1	Vorgängerexperimente und Realisierung eines Quantum Bouncers	5
2.2	Gravitationsresonanzspektroskopie	7
2.2.1	Rabi Spektroskopie	8
2.2.2	Ramsey Spektroskopie	9
3	Verwendete Komponenten und Modifikationen am Experimentier- tieraufbau	13
3.1	Allgemeines	14
3.1.1	Ansteuerung	14
3.1.2	Abtasttheorem	14
3.1.3	Datenauswertung	16
3.2	Weiterentwicklung des Neutronenspiegelunterbaus	17
3.2.1	Nanopositioniertische	20
3.3	Weiterentwicklung des Laserinterferometersystems	21
3.3.1	Grundlagen zur Verwendung des Laserinterferometers . .	21
3.3.2	Verwendete Laserinterferometer	22
3.3.3	Änderungen am Aufbau	23
4	Tests zur Erzeugung kontrollierter Oszillationen zweier Neu- tronenspiegel	25
4.1	Oszillationserzeugung mittels Frequenzgenerator	25
4.1.1	Anlegen externer Signale	25
4.1.2	Tests der Frequenzgenauigkeit	27
4.1.3	Optimale Abtastrate und Blocklänge	29
4.2	Zeitgleiche kontrollierte Oszillation zweier Neutronenspiegel . . .	30
4.2.1	Phasenprobleme bei Oszillation zweier Neutronenspiegel	30

4.2.2	Überprüfung aller Komponenten mittels Oszillationsmess- gerät	34
4.2.3	Systematische Fehlersuche	35
4.2.4	Überprüfung mittels externem Laserinterferometer	37
4.2.5	Beschwerung von Komponenten der Laserstrahlführung .	38
4.3	Phasenabgleich der Regionen	42
4.3.1	Referenzmessungen	42
4.3.2	Einstellen der Phase	44
4.3.3	Vorgehensweise für Messungen in Grenoble	46
5	Messungen mit justiertem Gesamtsystem	48
5.1	Stabilitätstests	48
5.2	Ortsabhängige Vibrationsmessungen	52
6	Zusammenfassung	56

1 Einleitung

Das q BOUNCE-Experiment zielt darauf ab das Newton'sche Gravitationsgesetz im Mikrometerbereich zu überprüfen. Innerhalb der Gravitationsresonanzspektroskopie ist dazu eine genaue Vermessung der Eigenenergien der Zustände ultrakalter Neutronen im Gravitationsfeld der Erde notwendig.

Die für das Experiment benötigten Neutronen werden am Institut Laue- Langevin in Grenoble erzeugt, des weltweit stärksten Forschungsreaktors. Die bei der Kernspaltung freigesetzten Neutronen besitzen allerdings eine noch sehr hohe kinetische Energie. Diese werden zuerst an einem Deuteriumbad der sogenannten kalten Quelle mit einer Temperatur von 20 Kelvin gekühlt und über einen gekrümmten Leiter zu einer sogenannten Steyerl-Turbine (Abb. 1.1) geführt, welche die Neutronen mit einer Geschwindigkeit von etwa 40 m/s erreichen. Die Turbine rotiert mit einer Geschwindigkeit von 25 m/s in die Bewegungsrichtung der Neutronen, wodurch sich die Geschwindigkeit der Neutronen durch Dopplerstöße, auf etwa 5 - 8 m/s reduziert und zu vier verschiedenen Experimentieraufbauten weitergeleitet werden. Des Weiteren besitzen ultrakalte Neutronen die Eigenschaft, dass diese an flachen Oberflächen unabhängig ihres Einfallswinkels total reflektiert werden wodurch diese im Gravitationsfeld der Erde gebundene quantenmechanische Zustände einnehmen können [Gol91]. Im q BOUNCE-Experiment werden hierfür Neutronenspiegel aus BK7-Glas verwendet. Weitere wichtige Eigenschaften der Neutronen sind in Tabelle 1 angegeben. Im q BOUNCE-Experiment erfolgt eine weitere Geschwindigkeitsselektion. Diese Zustandsselektion zur Detektion der Neutronen bringt sehr hohe Anforderungen an den Experimentieraufbau und lange Messzeiten mit sich. Die Messung der Eigenenergien der Neutronen erfolgt durch die Bestimmung der Übergangsfrequenzen der Zustände. Dazu wird die Relation $E = h \cdot \nu$ verwendet, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz angibt.

Art der Neutronen	spaltungs	thermische	kalte	ultrakalte
Energie	2 MeV	25 meV	3 meV	<100 neV
Temperatur	10^{10} K	300 K	40 K	~ 1 mK
Geschwindigkeit	10^7 m/s	2200 m/s	800 m/s	$\sim 5 - 8$ m/s
Wellenlänge	~ 40 fm	0,18 nm	0,5 nm	~ 80 nm

Tabelle 1: Physikalische Größen von Neutronen unterschiedlicher Energien.

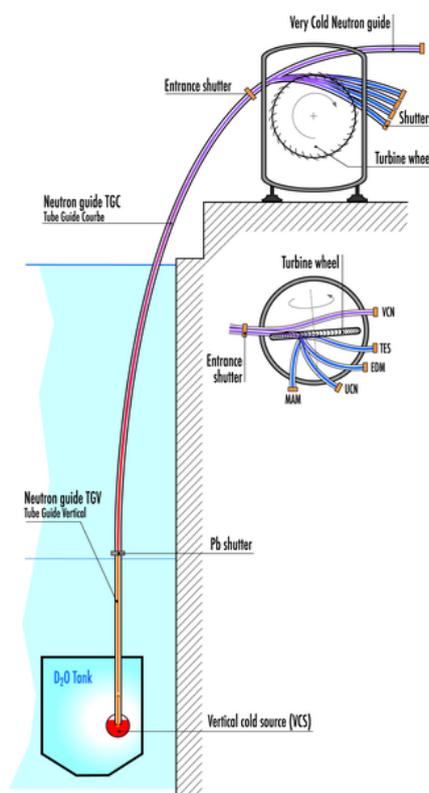


Abbildung 1.1: PF2 Instrument des Institut Laue Langevin in Grenoble.

[<https://www.ill.eu/instruments-support/instruments-groups/instruments/pf2/description/instrument-layout/>]

Zur Überprüfung dieser Frequenz wird ein Laserinterferometer verwendet. Der gesamte Versuchsaufbau befindet sich in einer Vakuumkammer. Der Vakuumkreislauf wurde vollständig automatisiert [Gru16]. Des Weiteren wird das gesamte Experiment durch μ -Metalle abgeschirmt, um Störeinflüsse durch äußere magnetische Felder zu minimieren. Nach der Einführung in Kapitel 1, wid-

met sich Kapitel 2 den Grundlagen und ersten Experimenten von q BOUNCE. Zudem werden Rabi's und Ramsey's Methode zur Messung der Eigenenergien des Systems kurz beschrieben. Auf den theoretischen Teil des q BOUNCE-Experiments soll hier nicht im Detail eingegangen werden, dies wurde bereits in anderen Arbeiten, z.B. [Jen11], [Sch17] und [Lin11] ausführlich erklärt. Der Hauptteil dieser Masterarbeit umfasst die technische Realisierung von Ramsey's Methode separierter oszillierender Felder innerhalb des q BOUNCE-Experiments und dem Phasenabgleich beider Wechselwirkungszonen. Dies erwies sich als schwierig, da es vermehrt zu Problemen in der Stabilität des Neutronenspiegelsystems und der Erzeugung mechanischer Oszillationen kam. In Kapitel 3 wird ausführlich auf die Stabilisierung des Neutronenspiegelaufbaus eingegangen. Des Weiteren kam es zu Störungen, welche durch gleichzeitige Oszillation beider Wechselwirkungsregionen auftraten. Diese Störeinflüsse wurden weiter untersucht und konnten im Laufe dieser Masterarbeit für erste Messungen in Grenoble minimiert werden. Auf die Optimierung des Experimentieraufbaus soll in Kapitel 4 weiter eingegangen werden. Erste Stabilitätstests und ortsabhängige Messungen mit den für Grenoble vorgesehenen Einstellungen werden in Kapitel 5 näher erläutert.

2 Das q BOUNCE-Experiment

2.1 Grundlagen

Das q BOUNCE-Experiment dient zur Vermessung von Eigenzuständen ultrakalter Neutronen im Gravitationsfeld der Erde. Da bei kurzen Abständen die Gravitation viel schwächer als die elektromagnetische Kraft ist, ist das elektrisch neutrale Neutron als Testobjekt optimal geeignet. Die Auswirkungen elektrischer Felder sind bei Neutronen im Vergleich zu Atomen und Molekülen aufgrund ihrer sehr geringen elektrischen Polarisierbarkeit wesentlich geringer. Eine genauere Beschreibung hierzu findet sich in [Sta09]. Die Auswirkungen magnetischer Felder wirken sich über das magnetische Moment des Neutrons zwar aus, können aber gut abgeschirmt werden.

Zur quantenmechanischen Betrachtung eines Neutrons im Gravitationsfeld der Erde ergibt sich die Schrödingergleichung zu:

$$\left\{-\frac{\hbar^2}{2m_N}\Delta + m_Ngz + V \cdot \Theta(-z + A \cdot \sin(\omega t))\right\}\psi(r, t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r, t) \quad . \quad (1)$$

wobei $V \cdot \Theta(-z + A \cdot \sin(\omega t))$ das Fermipotential des mit der Amplitude A und Frequenz ω oszillierenden Neutronenspiegels und der Faktor m_Ngz die Änderung der potentiellen Energie von ultrakalten Neutronen mit einem maximalen Höhenunterschied von wenigen μm angibt. Hier ergibt sich die Erdbeschleunigung g aus der Gravitationskonstante G , der Masse der Erde M und dem Abstand zum Erdmittelpunkt R_E . Die Masse des Neutron beträgt $m_N=939,56 \text{ MeV}/c^2$. Die Lösung dieser Schrödingergleichung führt zu gebundenen, nicht äquidistanten Energieniveaus des Neutrons. Diese sind in Abbildung 2.1 grafisch dargestellt. Eine genauere quantenmechanische Betrachtung von Neutronen im Gravitationsfeld der Erde ist in [Jen08] und [Sau11] zu finden.

n	E_n [peV]	z_n [μm]
1	1,41	13,75
2	2,46	24,04
3	3,32	32,47
4	4,09	39,92
5	4,78	46,73

Tabelle 2: Energien der ersten fünf Zustände von Neutronen [Sau11]

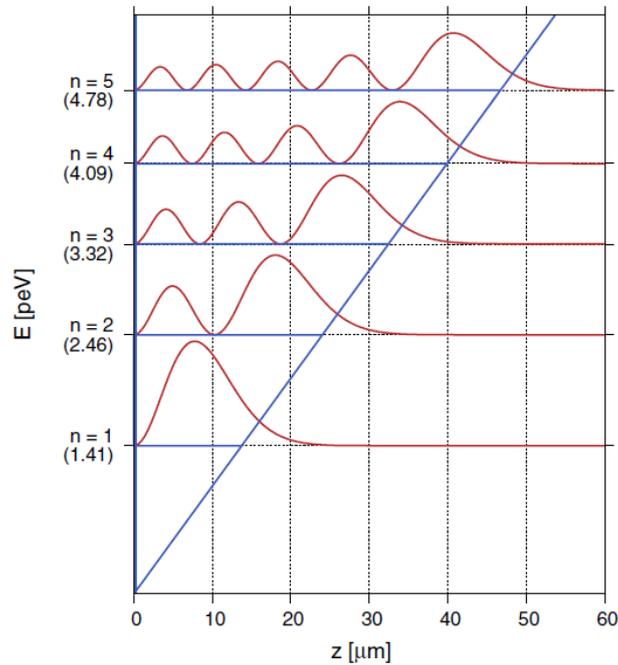


Abbildung 2.1: Darstellung der Eigenfunktionen in Abhängigkeit der Höhendifferenz zwischen oberen und unteren Neutronenspiegel. Die Gerade gibt das freie Gravitationspotential an. [Abe09]

2.1.1 Vorgängerexperimente und Realisierung eines Quantum Bouncers

Erste Experimente von q BOUNCE befassten sich mit der Realisierung eines Absorbersystems zur Zustandsselektion ultrakalter Neutronen. Hierbei wurde die

Transmission der Neutronen in Abhängigkeit des Abstandes im Mikrometerbereich zwischen einem geglätteten Spiegel und einem aufgerauten Spiegel, im Folgenden Absorber genannt, gemessen. Der Aufbau sowie die Messergebnisse sind in Abbildung 2.2 grafisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass für Abstände kleiner $35 \mu\text{m}$ die Messwerte von den klassisch zu erwartenden Werten stark abweichen.

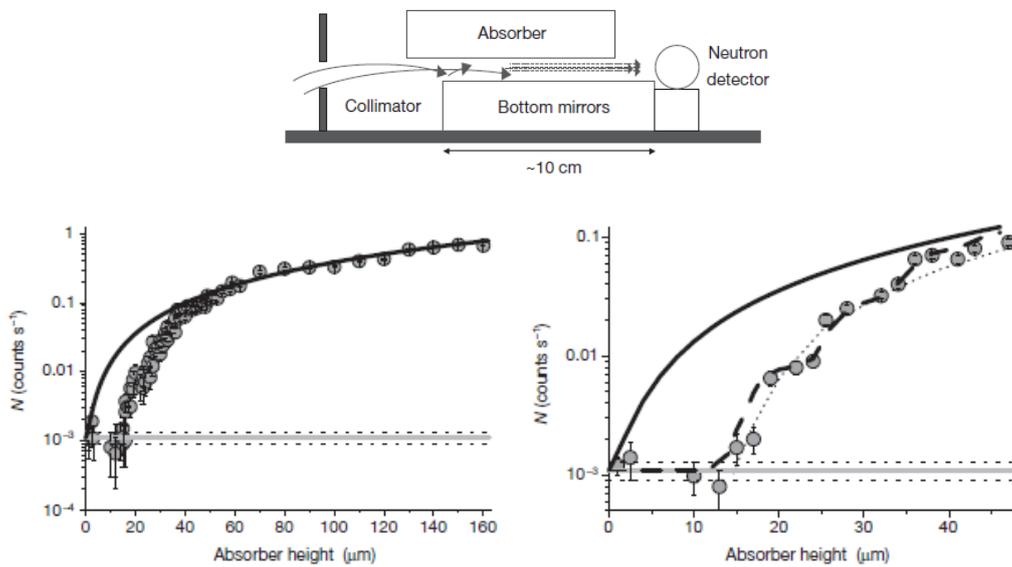


Abbildung 2.2: Versuchsaufbau der ersten Realisierung (Abbildung oben) und die dazugehörigen Messergebnisse zum Nachweis der Existenz gravitativ gebundener quantenmechanischer Zustände ultrakalter Neutronen [Nes02]

Dieses Experiment wurde durch einen ortsabhängigen Detektor erweitert [Jen11]. Dadurch konnte die Zeitentwicklung des Wellenpakets, welches als Quantum Bouncer bezeichnet wird, durch die Messung des Betragsquadrat der Wellenfunktion der Neutronen an verschiedenen Positionen ermittelt werden. Der Aufbau des Systems, sowie die Messergebnisse sind in Abbildung 2.3 gegeben.

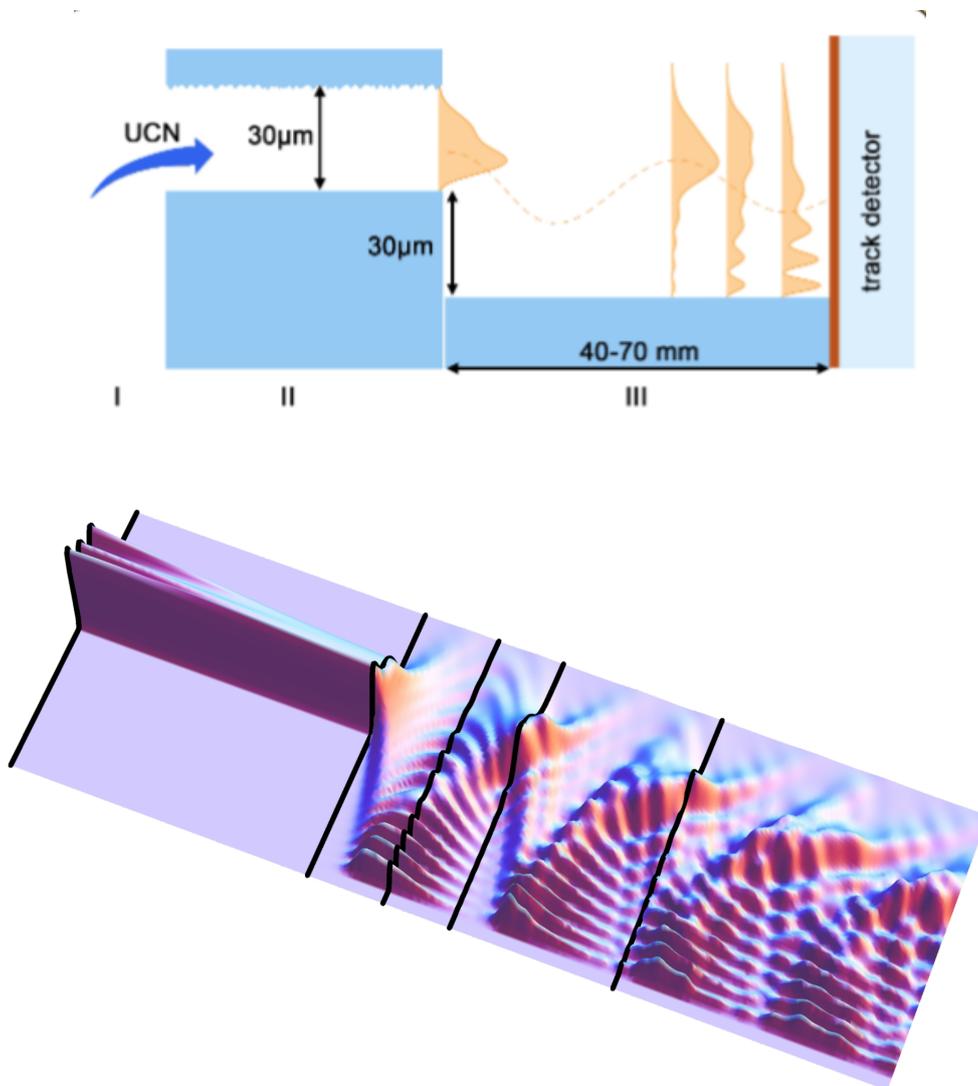


Abbildung 2.3: Realisierung eines Quantum Bouncer und die dazugehörigen Messergebnisse. [Mar16],[Jen11]

2.2 Gravitationsresonanzspektroskopie

Das q BOUNCE-Experiment wurde, basierend auf Vorgängerexperimenten, zu einem spektroskopischen Verfahren weiterentwickelt, mit welchem die Eigenenergien der Zustände eines Quantum Bouncers sehr präzise über eine Frequenzmessung bestimmt werden können. Aufgrund der nicht äquidistanten

Abstände der Zustände können beliebige Übergänge mittels mechanisch getriebener Oszillationen angeregt werden. Die Bestimmung dieser Energie erfolgt über Gleichung 3, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz ist:

$$E = h \cdot \nu. \quad (2)$$

Durch die Anregungen quantenmechanischer Zustände mittels mechanisch getriebener Oszillationen lassen sich Aussagen über die Gravitation im Mikrometerbereich treffen. Dabei werden die von I. Rabi und N. Ramsey entwickelten Methoden oszillierender Felder verwendet. Hauptaugenmerk wird in dieser Arbeit auf Ramsey's Methode separierter oszillierender Felder gelegt, welche eine Weiterentwicklung von Rabi's Methode darstellt. Im Weiteren werden diese beide Methoden kurz beschrieben.

2.2.1 Rabi Spektroskopie

Die Realisierung einer Gravitationsresonanzspektroskopie erfolgte mit Rabi's Methode, welche auf ein quantenmechanisches System übertragen wird, das durch die Gravitationskraft bestimmt und in [Cro15] realisiert wurde. Der Versuchsaufbau mit 3 Regionen ist in Abbildung 2.4 dargestellt:

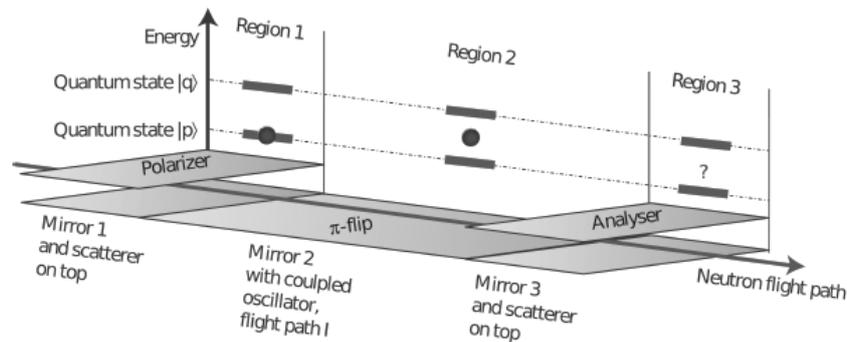


Abbildung 2.4: Versuchsaufbau mit Rabi's Methode. Präparation des Zustandes $|p\rangle$ durch den Polarisator in Region I. Die Anregung des Zustands $|q\rangle$ erfolgt in Region II, welcher in Region III aus dem Experimentieraufbau gestreut wird. [HA11]

Region I stellt ein Absorbersystem dar, welches aus einem glatten Neutronenspiegel und einem aufgerauten Neutronenspiegel, im Folgenden Absorber genannt, in wenigem μm Abstand darüber besteht. Dabei werden ultrakalte Neutronen, welche den Absorber erreichen, aus dem Experiment gestreut, wodurch es möglich ist den Grundzustand $|p\rangle$ zu präparieren.

Region II besteht aus einem glatten Neutronenspiegel. Dieser wird mechanisch in Schwingung versetzt, wodurch es möglich ist den in Region I präparierten Zustand anzuregen. Dadurch wird ein sogenannter π -Flip durchgeführt. Im Idealfall sollten hierbei 100% der Neutronen in den angeregten Zustand $|q\rangle$ überführt werden.

Region III ist der Analysator, welcher ident zu Region I aufgebaut ist. In dieser Region werden Neutronen, welche sich im angeregten Zustand befinden, aus dem Experiment gestreut. Die Anzahl der Neutronen, welche Region III passieren, werden im Detektor am Ende des Experimentieraufbaus gemessen. Dabei wird ein Transmissionseinbruch bei der Übergangsfrequenz zweier Zustände gemessen.

2.2.2 Ramsey Spektroskopie

Ramsey's Methode oszillierender separierter Felder ist die Erweiterung von Rabi's Methode um eine weitere oszillierende Region [Ram13]. Hier werden anstatt eines π -Flips zwei separate $\pi/2$ -Flips durchgeführt. Die Anordnung der einzelnen Regionen ist in Abbildung 2.5 gezeigt. Von besonderer Wichtigkeit sind hierbei die in Phase oszillierenden Regionen II und IV. Die Realisierung dieser Oszillationen wird in Kapitel 4 ausführlich erklärt. Um das Verhalten der Zustände des Neutrons unterschiedlicher Regionen zu veranschaulichen, werden Blochkugeln verwendet. Diese dienen zur grafischen Darstellung von 2-Zustands-Systemen. Die Änderungen der Zustände aufgrund mechanischer Oszillationen der Regionen II und IV sind in den Abbildungen 2.6 - 2.9 anhand des Blochvektors erklärt.

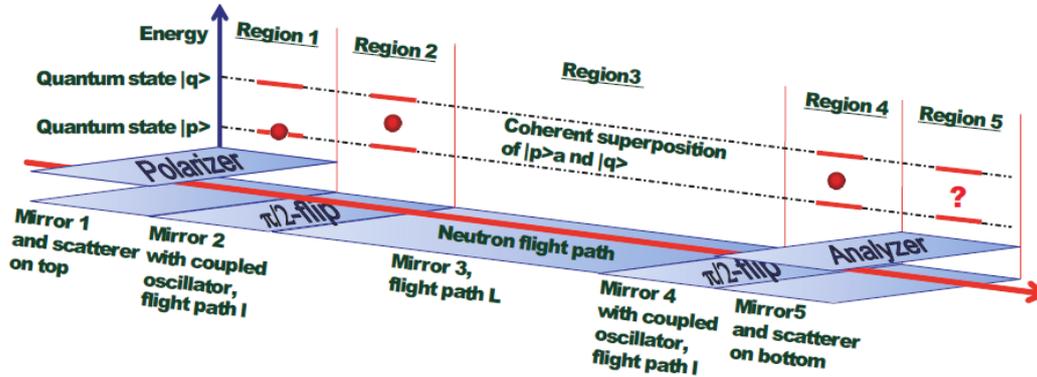


Abbildung 2.5: Versuchsaufbau von Ramsey's Methode separierter oszillierender Felder. Präparation des Zustandes $|p\rangle$ durch den Polarisator in Region I. In Region II und IV werden die $\pi/2$ -Flips induziert. Superposition der Zustände $|p\rangle$ und $|q\rangle$ in Region III. Die Zustände werden in Region V analysiert. [Abe09]

Region I ist der Polarisator und wird zur Präparation von Zustand $|p\rangle$ verwendet. Diese Region ist ident zu Region I aus dem Experimentieraufbau mit Rabi's Methode. Das Neutron befindet sich nun im Grundzustand $|p\rangle$.

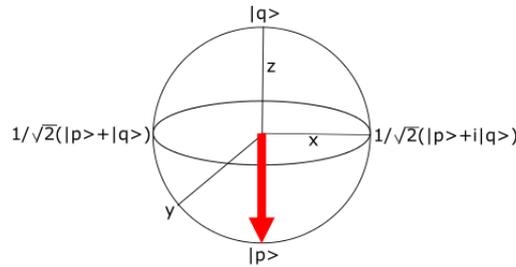


Abbildung 2.6: Blochvektor nach Region I. Induzierung des Zustands $|p\rangle$.

Region II besteht aus einem Neutronenspiegel, an welchem mechanisch getriebene Oszillationen angelegt werden. Die Rabifrequenz ω_R und die Wechselwirkungszeit t werden so gewählt, dass sich ein $\pi/2$ -Puls ergibt.

$$\omega_R \cdot t = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Durch $\pi/2$ -Kippung der Blochvektoren um die y-Achse wird das Neutron in

einen kohärenten Überlagerungszustand geführt, wo es anschließend frei präzidieren kann.

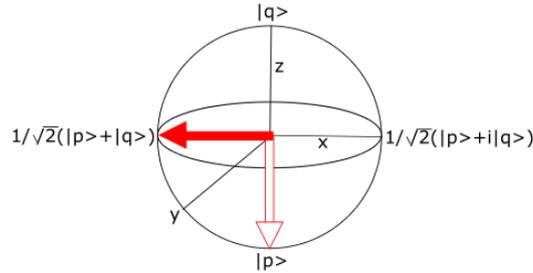


Abbildung 2.7: Der Blochvektor wird in Region II ($\pi/2$ -Flip) um die y-Achse gekippt.

Region III besteht aus einem langen Neutronenspiegel. In dieser Region befindet sich das Teilchen in einer kohärenten Superposition aus Grundzustand und angeregten Zustand dessen Phase sich mit der Zeit entwickelt:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |p\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |q\rangle . \quad (4)$$

In dieser Region rotiert der Blochvektor um die z-Achse um einen Winkel $df \cdot T$. Im folgenden werden die beiden Spezialfälle $df \cdot T = 0$ und $df \cdot T = \pi$ betrachtet, wobei df die Rabinfrequenz ist.

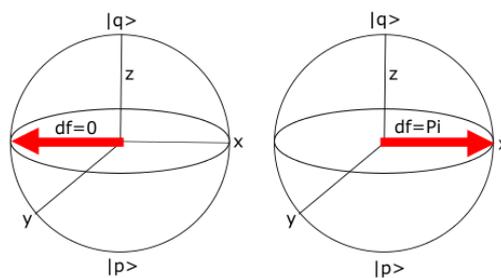


Abbildung 2.8: Rotation des Blochvektor um die z-Achse. In der Abbildung sind die beiden Spezialfälle für $df = 0$ und $df = \pi$ dargestellt.

Region IV ist ident zu Region II aufgebaut. Es findet ein weiterer $\pi/2$ -Flip statt. Der Blochvektor wird erneut um 90° um die y-Achse gekippt. Im

Spezialfall $df \cdot T = 0$ wird das Neutron vollständig angeregt und befindet sich somit im Zustand $|q\rangle$. $df \cdot T = \pi$ führt dazu, dass das Neutron in den Grundzustand $|p\rangle$ überführt wird.

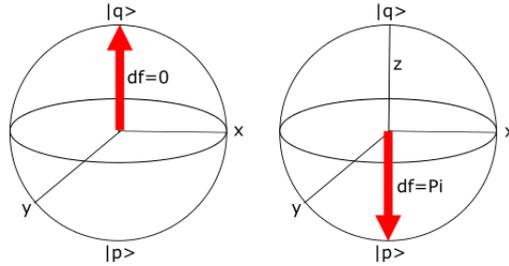


Abbildung 2.9: Es findet, abhängig von der Position des Blochvektors nach Region III, ein Übergang in den Zustand $|p\rangle$ oder $|q\rangle$ statt.

Region V ist der Analysator. In diesem Bereich werden Neutronen welche sich im angeregten Zustand befinden, aus dem Experiment gestreut bevor diese den Detektor erreichen. Diese Region ist ident zu Region I aufgebaut.

Der Vorteil besteht darin, dass sich eine geringe Frequenzabweichung der Oszillationsfrequenz der Neutronenspiegel von der Übergangsfrequenz zweier Zustände in eine große Phasendifferenz entwickelt. Dazu wird folgende Beziehung verwendet:

$$\Delta\phi = (\omega - \omega_L) \cdot T, \quad (5)$$

in welcher ω die angelegte Frequenz, ω_L die Larmorfrequenz und T die Wechselwirkungszeit der Neutronen in Region III angibt [Lin11]. Somit können die Wechselwirkungszone, in welchen die $\pi/2$ -Flips induziert werden, relativ kurz gewählt werden. Der Neutronenspiegel in Region III sollte wesentlich länger gewählt werden, was zu einer höheren Durchflugszeit und höheren Anregungswahrscheinlichkeit der Neutronen führt und somit zu einer höheren Messgenauigkeit beiträgt.

3 Verwendete Komponenten und Modifikationen am Experimentieraufbau

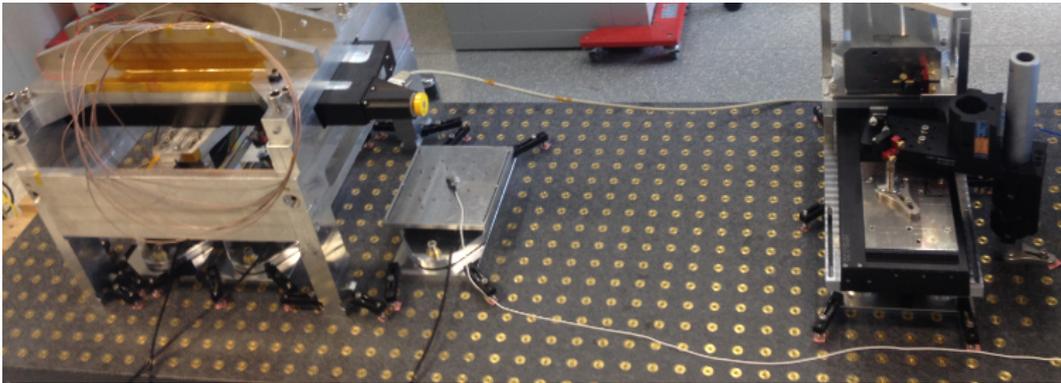


Abbildung 3.1: Testanordnung für das q BOUNCE-Experiment zur Realisierung der in Phase oszillierenden Wechselwirkungszone

In diesem Kapitel wird nach einem kurzen Überblick über den Experimentieraufbau auf die einzelnen verwendeten Komponenten genauer eingegangen. Abbildung 3.1 zeigt den verwendeten Testaufbau für das q BOUNCE-Experiment, bei welchem sich die verwendeten Bauteile auf einer Messtischplatte aus Granit befinden, welche eine Ebenheit $< 2 \mu\text{m}$ aufweist. Am SIOS-Gerüst, wie in Abbildung 3.1 rechts abgebildet, befinden sich ein Laserinterferometer und ein Linearverfahrtisch, mit welchem es möglich ist die Positionen der Laserstrahlen L1 - L3 des Interferometers in y -Richtung zu variieren.

Unterhalb des großen Gerüsts (Abbildung 3.1 links) inkl. Pentaprisma, welches an einem Linearverfahrtisch positioniert ist, sind die beiden Nanopositionierische platziert. Mit diesen können mechanisch getriebene Oszillationen an die Neutronenspiegel angelegt werden. Das Pentaprisma dient dazu, die verwendeten Laserstrahlen L2 und L3 auf die Neutronenspiegel abzulenken, deren Positionen durch den Lineartisch in x -Richtung variiert werden können.

3.1 Allgemeines

3.1.1 Ansteuerung

Für die Ansteuerung verwendeter Geräte wird LabView¹ benutzt. Das bereits vorhandene LabView-Projekt wurde erweitert und das neue Laserinterferometer integriert. Für spätere Tests wurde das LabView-Projekt so umprogrammiert, dass beide Laserinterferometer gleichzeitig angesteuert werden können. Zur Berechnung der Oszillationsfrequenz der Neutronenspiegel wurde die bereits bestehende Software verwendet [Cro15]. Um die gewünschten Einstellungen für Messungen vorzunehmen werden Config-Dateien verwendet [Her14]. Diese wurden für die Datenaufnahme mit dem neuen Laserinterferometer verändert. Mit der neuen Anpassung kann ausgewählt werden welche Laserinterferometer bzw. Laserstrahlen zur Datenaufnahme verwendet werden sollen. Zur Datenaufnahme war eine Visualisierung vorhanden, welche ebenfalls angepasst wurde, sodass beide SIOS-Geräte unterstützt werden. In der Visualisierung werden auch die Phasen der einzelnen Laser angezeigt. Des Weiteren wurde eine Anzeige der Phasendifferenz zwischen den Laserstrahlen jedes Laserinterferometers einprogrammiert.

3.1.2 Abtasttheorem

Dieses Unterkapitel ist an das Buch [Rie04] angelehnt und soll einen kurzen Einblick in die Grundlagen des Abtasttheorems, auch Nyquist-Theorem genannt, liefern und wird zur Rekonstruktion beliebiger analoger Signale verwendet. Es besagt, dass ein Signal vollständig rekonstruierbar ist, wenn die Dichte der Stützpunkte mindestens doppelt so hoch, wie die maximale vorkommende Frequenz des Signals ist:

$$f_{nyquist} = \frac{1}{2} \cdot f_{abtast}. \quad (6)$$

¹National Instruments Ges.m.b.H., Plainbachstraße 12, 5101 Salzburg-Bergheim, Austria, <http://www.ni.com/contact-us/de-at>

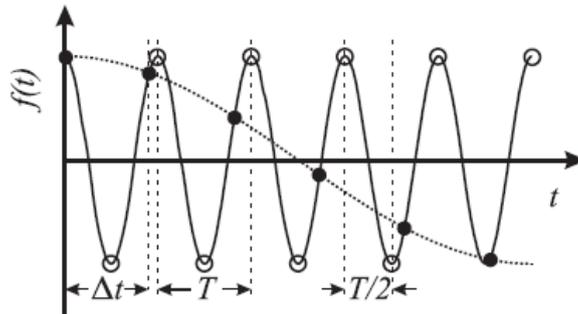


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung eines Signals mit Alias-Effekt und der dadurch entstandenen Abweichung des Originalsignals [Rie04]

Ist das Nyquist-Theorem erfüllt, müssen alle im Signal vorkommenden Frequenzen kleiner sein als die Nyquist-Frequenz ($f_{signal} < f_{nyquist}$), woraus folgt:

$$f_{abast} > 2 \cdot f_{signal}. \quad (7)$$

Wird die Abtastfrequenz zu hoch gewählt spricht man von Oversampling. Dies bedeutet, dass die Dichte der Stützpunkte und somit auch die Genauigkeit erhöht wird. Bei zu geringer Anzahl an Datenpunkte und zu niedriger Signalfrequenz kann es auch dazu führen, dass die Anzahl der für einen Fit notwendigen Sinusperioden zu gering wird und sich die Genauigkeit der Frequenz des rekonstruierten Signals verschlechtert.

Alias-Effekte liegen vor, wenn die Abtastfrequenz unterhalb der doppelt so hohen Maximalfrequenz des Signals liegt. Das gemessene Signal kann nicht mehr richtig rekonstruiert werden und die Frequenz des rekonstruierten Signals weicht von der des Originalsignals ab. Dieser Effekt ist in Abbildung 3.2 gezeigt. In der Praxis liegen die Werte der Grenze für die Abastfrequenz oft über der 2-fachen Maximalfrequenz des Originalsignals. Für Fouriertransformationen wird die Formel folgendermaßen modifiziert:

$$f_{abast} > 2,56 \cdot f_{signal}. \quad (8)$$

Diese Grenze wird auch für alle Messungen im Zuge dieser Arbeit verwendet.

3.1.3 Datenauswertung

Zur Überprüfung und besseren Auswertung der Daten wird das Programm Mathematica² verwendet. Die aufgenommenen SIOS-Daten werden in einer eigenen Datei für die jeweils vergebene Mess-ID gespeichert. Zur Überprüfung, ob die Fouriertransformation in LabView richtig funktioniert, wurde an die gemessenen Datenpunkte ein Sinus gefittet (Abbildung 3.3).

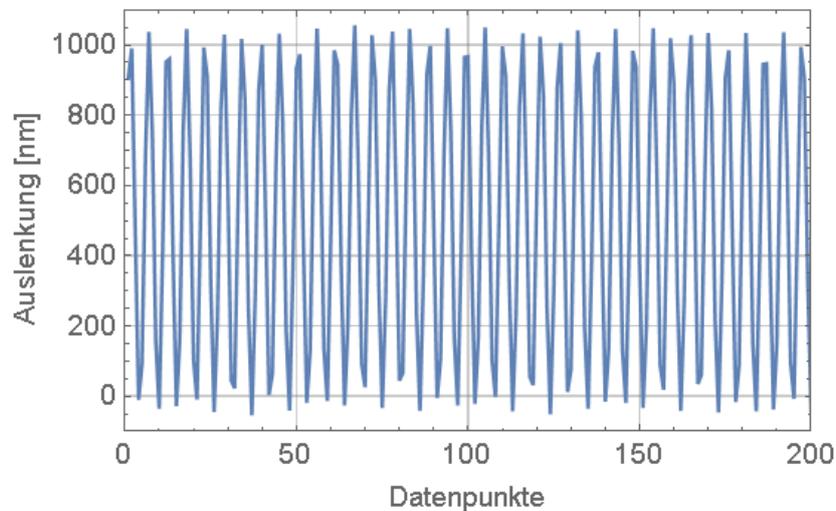


Abbildung 3.3: Datenaufnahme mit dem Laserinterferometer SP 15000-TR.

Aufgrund der großen Datenmenge ist es schwierig einen Fit zu generieren. Es ist wichtig die benötigten Fitparameter genau vorzugeben. Für diese Parameter sind die verwendete Oszillationsfrequenz sowie die verwendete Abtastrate notwendig. Als Frequenzvorgabe für den Sinusfit, welche den wichtigsten Fitparameter darstellt, kann folgende Formel verwendet werden:

$$f_{fit} = \frac{f_{vib} \cdot 2 \cdot \pi}{Abtastrate} = \frac{462,925 \text{ Hz} \cdot 2 \cdot \pi}{2517,133 \text{ Hz}}. \quad (9)$$

Ein Sinusfit bei Oszillation zweier Regionen in Phase ist in Abbildung 3.4 gezeigt. Zur Überprüfung der Schwingungsamplitude ist eine Umrechnung der

²Wolfram Research, Lower Road Long Hanborough, Oxfordshire OX29 8FD, UK, <http://www.wolfram.com/>

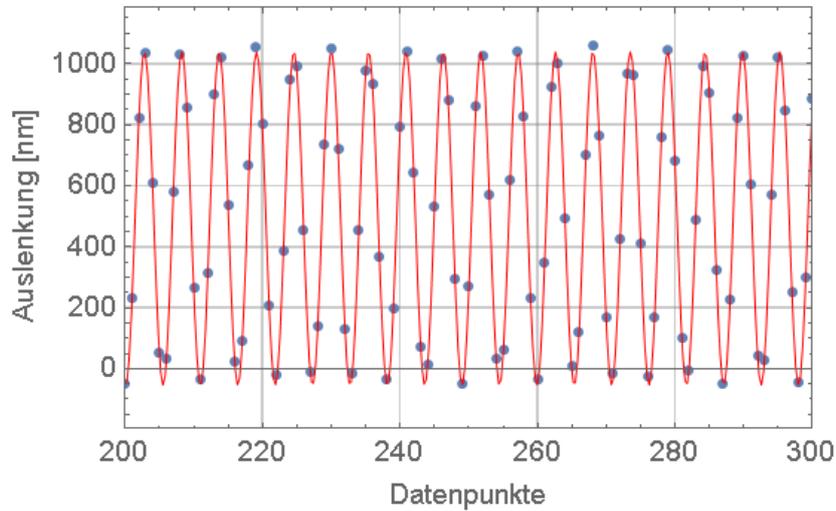


Abbildung 3.4: Sinusfit bei Datenaufnahme mit Laserstrahl 1 des SIOS SP 15000 TR an das Oszillationssignal eines Neutronenspiegels bei Oszillation zweier Regionen in Phase.

Amplitude des Sinusfits notwendig, welche sich wie folgt errechnet:

$$v(\nu) = 2\pi\nu \cdot \frac{z_{max} - z_{min}}{2} = 2\pi \cdot 462,925 \text{ Hz} \cdot 548 \text{ nm} = 1,59 \text{ mm/s}. \quad (10)$$

Die Auslenkung der Neutronenspiegel in z -Richtung wird durch $z_{max} - z_{min}$ angegeben (siehe Abbildung 3.4). Mit Hilfe der Funktion *Fourier* in Mathematica kann mittels Fouriertransformation die Frequenz des Sinus-Fits bestimmt werden. Diese ergibt 462,936 Hz und weicht um etwa 0,01 Hz von der Eingangsfrequenz ab. Diese Differenz ergibt sich aufgrund der Genauigkeit der Fouriertransformation, welche in Kapitel 4.1.3 genauer untersucht wird.

3.2 Weiterentwicklung des Neutronenspiegelunterbaus

Um die Stabilität der Regionen zu erhöhen wurde der bereits vorhandene Unterbau für die Neutronenspiegel durch den in Abbildung 3.5 & 3.6 ersichtlichen Aufbau ausgetauscht. Dabei wurden massivere Platten gewählt, um die Stabilität des Aufbaus zu erhöhen. Des Weiteren wurden wie auch in den



Abbildung 3.6: Neue Grobverstellung für die Nanopositioniertische.

Vorgängerexperimenten Elastomerdruckfedern (E1556, 70 shore A)³ zwischen Grundplatte und Grobverstellung eingefügt, mit welchen eine Grobjustierung der Höhe der Neutronenspiegel auf etwa 10 μm vorgenommen werden kann. Diese Justierung erfolgt an drei Positionen mittels Inbusschrauben an der neuen Grobverstellung (Abbildung 3.6), mit welcher sich die Höhenanpassung aller Regionen erleichtert.

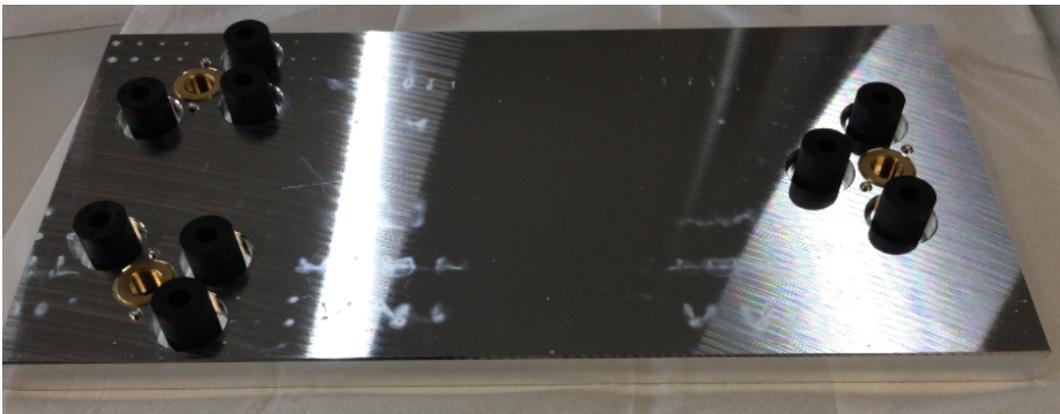


Abbildung 3.5: Unterplatte des Neutronenspiegelaufbaus mit Elastomerfedern

Auf die Grobverstellung wird ein Nanopositioniertisch, welcher im nach-

³Meusburger Georg GmbH & Co KG, Kesselstraße 42, 6960 Wolfurt, Österreich, <http://www.meusburger.com>

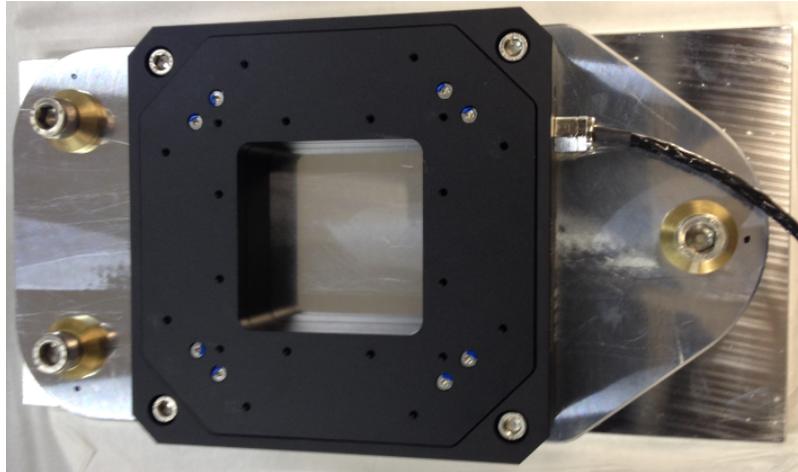


Abbildung 3.7: Neue Grobverstellung mit angebrachtem Nanopositioniertisch.

folgendem Kapitel beschrieben wird, angebracht (Abbildung 3.7). An diesem wird eine Zwischenplatte angebracht, an welcher der Neutronenspiegel befestigt werden kann (Abbildung 3.8). Durch Anlegen eines externen Signals an die Nanopositioniertische können Oszillationen der Spiegel erzeugt werden.

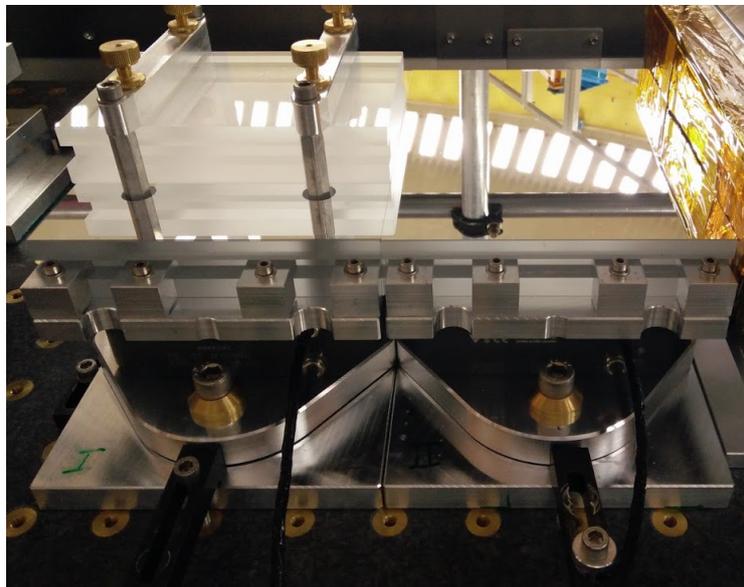


Abbildung 3.8: Kompletter Neutronenspiegelaufbau, links Region I mit Absorber und recht Region II.

3.2.1 Nanopositioniertische

Zur Erzeugung der Oszillationen der Neutronenspiegel werden die Nanopositioniertische E-518 mit der Steuereinheit E-712 der Firma Physik Instrumente GmbH verwendet, welche mittels PI-eigenem Computerprogramm NanoCapture angesteuert werden können. Vor Anlegen der Oszillationen müssen die Positioniertische mit den darauf angebrachten Neutronenspiegel stabilisiert werden, um mögliche Beschädigungen am Nanopositioniertisch zu vermeiden. Ein wichtiges Kriterium dafür ist die Neutronenspiegelposition auf dem Nanopositioniertisch. Das Gewicht der Spiegel sollte möglichst symmetrisch verteilt sein, um unterschiedlich starke Schwankungen der Tischachsen zu vermeiden. Dies könnte zu Beschädigungen des Tisches führen. Nach jedem Neuaufbau der Regionen müssen die Eigenfrequenzen des Systems festgestellt und unterdrückt werden. Dazu wird in der Software der Firma NanoCapture die Funktion *FrequencyResponse(Impulse)* gewählt. Es wird automatisch ein Diagramm mit den Eigenfrequenzen des Nanopositioniertisches und deren Amplituden erstellt. Daraus sind einige Maxima bei bestimmten Frequenzen ersichtlich. Zur Unterdrückung dieser Eigenfrequenzen werden die erhaltenen Werte in der 'Device Parameter Configuration → Servo1 → Notch Frequency 1' eingetragen. Dieser Vorgang muss für jede Achse wiederholt werden. Die Achsen waren jedoch teilweise instabil. Richtiges Ausrichten der Spiegel mittels Grobverstellung parallel zur Granitoberfläche trägt nur teilweise zur Stabilisierung bei. Erst durch die Anpassung der internen PID-Werte (siehe [Phy11]) des Nanopositioniertisches konnten die Regionen vollständig stabilisiert werden. Der I-Wert ist abhängig von der 1. 'Notch filter' Frequenz und wird bei Veränderung dieser Frequenz automatisch eingestellt. Der D-Wert (slew rate) ist abhängig von der Größe der Aktuatoren und bestimmt die maximale Geschwindigkeit, mit welcher die verschiedenen Achsen bewegt werden können. Dieser Wert blieb unverändert. Durch die korrekte Anpassung des P-Wertes für jede Achse konnten die Regionen erstmals stabilisiert werden. In Tabelle 3 sind die Änderungen der P-Werte eines Nanopositioniertisches aufgelistet.

Achse	P-Wert	P-Wert (stabil)
Z	$4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
X	$4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Y	$4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3: Einstellung der P-Werte eines Nanopositioniertisches zur Stabilisierung der X-,Y- und Z-Achse

3.3 Weiterentwicklung des Laserinterferometersystems

Die Interferometrie ist eine viel genutzte Technik in der Physik, welche auf der Überlagerung von Wellen beruht. Interferometer haben aufgrund ihrer hohen Genauigkeit viele Einsatzgebiete wie Längenmessung, Winkelmessung oder Spektroskopie. Ebenso gibt es viele verschiedene Realisierungen, welche für die jeweiligen Einsatzgebiete optimiert sind. Für das *q*BOUNCE-Experiment wird ein Laserinterferometer verwendet, da eine genaue Positionsmessung der verwendeten oszillierenden Neutronenspiegel erforderlich ist.

3.3.1 Grundlagen zur Verwendung des Laserinterferometers

Die für das *q*BOUNCE-Experiment wichtigsten Modi der verwendeten Laserinterferometers sind die Laufzeitmessung, welche für Abstandsmessungen verwendet wird, und die Phasenlagenmessung zur Bestimmung der Phase.

Zur Messung und Überprüfung der Neutronenspiegeloszillationen wird die Funktion *SetToZero* verwendet. Dabei wird der Abstand zwischen Laserinterferometer und Neutronenspiegel ohne Oszillationen gemessen und von den folgenden Oszillationsmessungen subtrahiert, um die Auslenkung der Neutronenspiegel in z-Richtung zu bestimmen. Aufgrund der hohen Genauigkeit dieses Verfahrens ist es möglich, die Oszillationsfrequenz der Nanopositioniertische mittels Fouriertransformation zu bestimmen.

Zur Bestimmung der Phasen wird eine Phasenlagenmessung für alle verwendeten Laserstrahlen des Interferometer durchgeführt. Dabei wird die Zeit zwischen den Nulldurchgängen unterschiedlicher Signale gleicher Periodendauer gemessen und in eine Phasendifferenz umgerechnet.

	SP 2000 TR	SP 15000 TR
Wegmessbereich [m]	2	15
Wegauflösung [nm]	1	0,1
Strahlabstände [mm]	12	50
Laser Wellenlänge [nm]	632,8	632,8
Einlaufzeit [min]	10 - 20	10 - 20

Tabelle 4: Eigenschaften der verwendeten Laserinterferometer SP 2000 TR und SP 15000 TR

3.3.2 Verwendete Laserinterferometer

Verwendet wurden die Laserinterferometer SP 2000 TR und SP 15000 TR der Firma SIOS⁴. Das Laserinterferometer SP 15000 TR wird zur Oszillationsüberwachung am Granit eingesetzt. Das Interferometer SP 2000 TR wird für Testzwecke und zur Überprüfung der Ergebnisse eingesetzt. Die wichtigsten Parameter beider Laserinterferometer sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Die Vorteile des neuen Laserinterferometers liegen in dem erhöhten Wegmessbereich und Wegauflösung. Von besonderer Wichtigkeit ist der Wegmessbereich und die damit verbundene Stabilität der Laserinterferenz, sowie die höhere Signalstärke der Laserstrahlen. Zudem vereinfacht sich die Justage der Laserstrahlen zum Erreichen der Interferenz. Ein weiterer Vorteil des SIOS SP 15000 TR ist der geringe Untergrund durch äußere Störeinflüsse, welcher aufgrund der stabileren Bauweise um etwa eine Größenordnung verringert ist. Bei diesen Messungen wurden beide Laserinterferometer direkt nebeneinander aufgebaut und mit Klemmen am Messgranit befestigt. Die Messergebnisse sind in Abbildung 3.9 abgebildet. Der Betrieb der Laserinterferometer kann im kontinuierlichen Modus sowie im Blockmodus erfolgen. Aufgrund der nötigen Genauigkeit und der dafür hohen Anzahl an Datenpunkten ist es notwendig das Interferometer im Blockmodus zu betreiben.

⁴SIOS Messtechnik GmbH, Am Vogelherd 46, 98693 Ilmenau, Deutschland, <http://www.sios.de/>

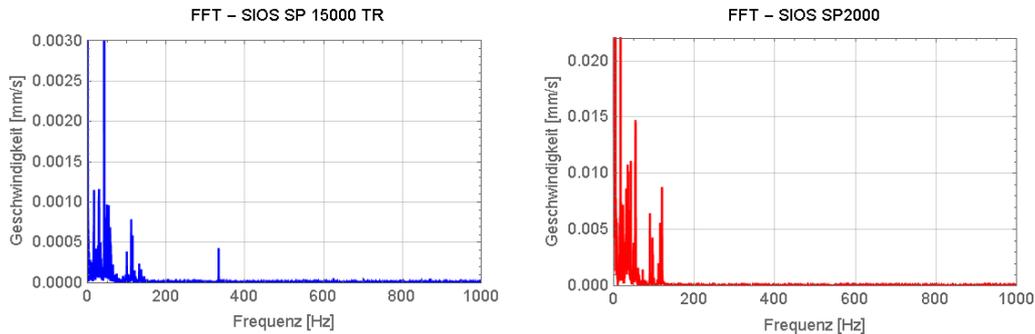


Abbildung 3.9: Darstellung einer Untergrundmessung beider Laserinterferometer am Messgranit. Das Rauschen des neuen Laserinterferometers SP 15000 TR ist um eine Größenordnung verringert.

3.3.3 Änderungen am Aufbau

Aufgrund der größeren Abmessungen des neuen SIOS SP 15000 TR, welches in den Aufbau integriert wurde, waren einige Konstruktionsänderungen notwendig. Es soll das bereits vorhandene Gerüst des bisherigen Rabi-Aufbaus für das neu verwendete SIOS-Laserinterferometer umgebaut werden (siehe Abbildung 3.10). Ein neues Hauptgerüst zur Ablenkung der Laserstrahlen an die verwendeten Neutronenspiegel, mit welchem es möglich sein wird alle 3 Laserstrahlen des SIOS SP 15000 TR zu verwenden, befindet sich zum Zeitpunkt der Messungen bereits in der Endphase der Planung. Insofern soll das neue SIOS-Gerüst direkt an dieses angepasst werden. Durch eine Höhenanpassung ist es möglich, Laserstrahl 2 und Laserstrahl 3 direkt zum großen Prisma am Gerüst umzulenken, wodurch je Laserstrahl ein Prisma zur Laserstrahlableitung entfällt. Ein weiterer Vorteil des neuen Aufbaus ist, dass eine Laserstrahlableitung jeweils um 90° erfolgt, wodurch mögliche Randeffekte der Spiegel und Prismen minimiert werden können. Durch die Optimierung der Strahlengänge des SIOS SP 15000 TR und der dadurch verbundenen Minimierung der Anzahl an verwendeten Prismen bzw. Spiegeln zur Strahlableitung, sollen die Verluste der Signalstärke ebenfalls weitgehend minimiert werden. Für Laserstrahl 1 wurde eine fixe Strahlableitung in das SIOS-Gerüst integriert. Dieser wird zweimal um jeweils 90° abgelenkt, bevor dieser am großen Prisma an den verwendeten Neutronenspiegel gelenkt wird (siehe Spiegelhalter in Abbildung 3.10).

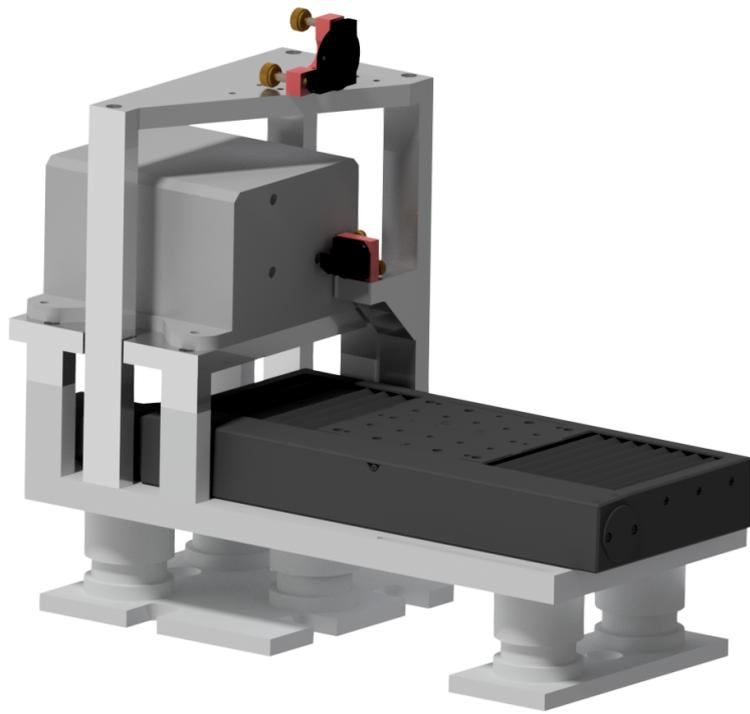


Abbildung 3.10: Testaufbau des SIOS-Gerüsts zur Strahlablenkung.

4 Tests zur Erzeugung kontrollierter Oszillationen zweier Neutronenspiegel

4.1 Oszillationserzeugung mittels Frequenzgenerator

4.1.1 Anlegen externer Signale

In der PI-eigenen Software NanoCapture ist es nicht möglich die Frequenz der Oszillationen auf die für das *q*BOUNCE-Experiment benötigten Genauigkeit und Stabilität einzustellen. Daher muss der AnalogInput der Nanopositionierische verwendet werden, wodurch es möglich ist ein externes Signal einzuspeisen. Vor der Einspeisung des gewünschten Signals muss der AnalogInput richtig konfiguriert werden. Von besonderer Wichtigkeit sind hierbei Gain und Offset zur Skalierung des Inputs. Dazu wurden folgende Berechnungen und Einstellungen für einen Nanopositioniertisch mit 100 μm Verfahrensweg vorgenommen:

	Wert [μm]
Max Scaled Value	100
Min Scaled Value	0
Max Normalized Value	50
Min Normalized Value	-50

Tabelle 5: Wichtige Parameter des 100 μm -Positioniertisches für die Einstellung des Gain und Offset des Analogen Inputs

Die Parameter Scaled Value (gibt den maximalen/minimalen Offset der z-Achse des Nanopositioniertisches an) und Normalized Value (gibt die maximale/minimale Auslenkung der z-Achse des Nanopositioniertisches in Abhängigkeit der angelegten Spannung an) aus Tabelle 5 sind in den jeweiligen Datenblättern zu finden [Phy11]. Für die Berechnung des Gain und des Offset werden folgende Formeln verwendet:

$$Gain = \frac{(MaxScaledValue - MinScaledValue)}{(MaxNormalizedValue - MinNormalizedValue)} \quad (11)$$

Eingestellt wurde dieser auf den Wert $\text{Gain} = 1$.

$$\text{Offset} = \text{MaxScaledValue} - \text{Gain} \cdot \text{MaxNormalizedValue} \quad (12)$$

Dieser Wert wurde auf $\text{Offset} = 50 \mu\text{m}$ eingestellt. Nach abgeschlossener Konfiguration der Nanopositioniertische wurde die Stärke der Tischoszillationen in Abhängigkeit der Eingangsspannung überprüft, um ein mögliches nicht lineares Verhalten der Tischoszillationen auszuschließen. Dazu wird das gewünschte Signal mittels Arbitrary Function Generator 3102⁵, im Folgenden AFG genannt, eingespeist. Dieser weist eine Frequenzgenauigkeit von $1 \mu\text{Hz}$ und eine Phasenauflösung von 0.01° bei Anlegen eines Sinussignals auf. Um das Verhalten der Oszillationen des Nanopositioniertisches zu überprüfen wird die Amplitude des eingespeisten Sinussignals zwischen $0,1 - 2 \text{ Vpp}$ in $0,1 \text{ Vpp}$ Schritten variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1 dargestellt, in welcher eine Abweichung von etwa 10% vom linearen Verlauf und keine Sättigung der Schwingungsamplitude des Nanopositioniertisches bei hoher Eingangsspannung ersichtlich ist. Die Gerade ist durch die Funktion $f(x) = 1.465 \cdot x$, während die Fitfunktion durch $g(x) = 1.497 \cdot x + 0.1 \cdot x^2$ gegeben ist.

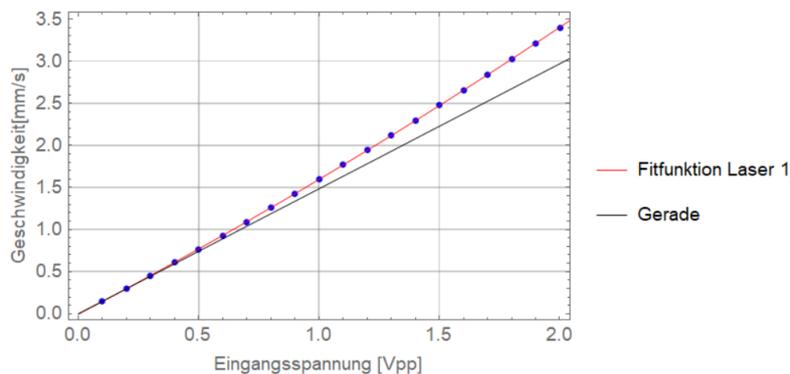


Abbildung 4.1: Grafische Darstellung des Amplitudenverlaufs von Laserstrahl 1 und 2 des SIOS SP 15000 TR bei Oszillation zweier Neutronenspiegel in Abhängigkeit der Eingangsspannung des extern angelegten Signals

⁵Tektronix UK Ltd., One Thames Valley, Wokingham Road, Bracknell, <http://de.tek.com>

4.1.2 Tests der Frequenzgenauigkeit

Die für das *q*BOUNCE-Projekt wichtigsten Frequenzen sind die Übergangsfrequenzen zwischen den ersten Eigenenergien eines Neutrons über einem Neutronenspiegel, welche in Tabelle 6 aufgelistet sind.

Zustand	$ 1\rangle$	$ 2\rangle$	$ 3\rangle$	$ 4\rangle$	$ 5\rangle$
$ 1\rangle$	0	254.54	462.93	647.10	815.46
$ 2\rangle$		0	208.39	392.57	560.93
$ 3\rangle$			0	184.18	352.54
$ 4\rangle$				0	168.36
$ 5\rangle$					0

Tabelle 6: Übergangsfrequenzen [Hz] der ersten Eigenenergien eines Neutrons

In dieser Masterarbeit wurde für erste Tests und zur Stabilisierung des Systems in erster Linie die Übergangsfrequenz ν_{13} zwischen Zustand $|1\rangle$ und $|3\rangle$ betrachtet. Zur Berechnung der minimalen Abtastfrequenz wird die Übergangsfrequenz ν_{14} zwischen Zustand $|1\rangle$ und $|4\rangle$ verwendet, da dies der zweite interessante Übergang für die ersten geplanten Messungen ist:

$$f_{|1\rangle\rightarrow|4\rangle} \cdot 2,56 = 647,101 \text{ Hz} \cdot 2,56 = 1656,32 \text{ Hz}. \quad (13)$$

Zur Feststellung der Änderung der Frequenzgenauigkeit der Fouriertransformation wurden einige Tests in Abhängigkeit der Abtastrate und der Anzahl an Datenpunkten, im Folgenden Blocklänge genannt, durchgeführt. Es wird überprüft, welche Anzahl an Schwingungsperioden notwendig ist, um das Signal mit gewünschter Genauigkeit in Mathematica rekonstruieren zu können. Dabei wurde eine Oszillationsfrequenz = 280 Hz und eine Abtastrate = 3617,133 Hz verwendet, wo bekannt ist, dass es keine Eigenfrequenzen des Tischsystems gibt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Ab etwa 60 Schwingungsperioden änderte sich die Frequenzgenauigkeit nur noch in sehr geringem

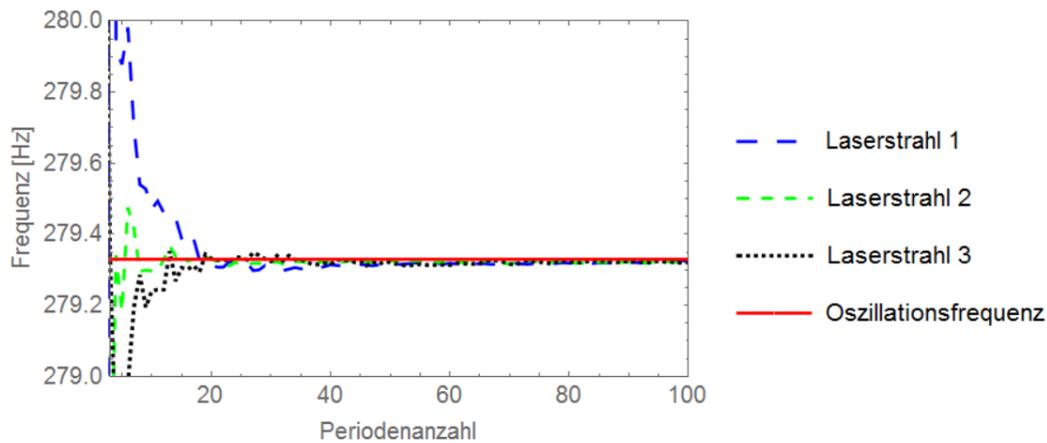


Abbildung 4.2: Frequenzgenauigkeit der FFT bei einer Neutronenspiegelvibration von 279,33 Hz und einer Abtastrate von 3617,133 Hz in Abhängigkeit der Anzahl der Sinusperioden

Ausmaß. Die Anzahl der Datenpunkte je Schwingungsperiode ergibt sich aus:

$$\text{Datenpunkte/Periode} = \frac{\text{SamplingRate}}{\text{Oszillationsfrequenz}} = \frac{3617,133 \text{ Hz}}{279,33 \text{ Hz}} = 12,95. \quad (14)$$

Somit ergibt sich die minimale Blocklänge zu $60 \cdot 12,95 = 777$ Datenpunkten bei einer Abtastrate von 3617,133 Hz. Für weitere Testzwecke wird die Frequenzgenauigkeit in Abhängigkeit der Blocklänge und Abtastrate überprüft. In Abbildung 4.3 ist die Frequenzgenauigkeit in Abhängigkeit der Abtastrate bei einer Vibrationsfrequenz von 612,82 Hz und einer Blocklänge von 512 Datenpunkten grafisch dargestellt. Es ist eine Verschlechterung der Genauigkeit mit steigender Abtastrate erkenntlich. Der Grund dafür ist, dass die Anzahl der Schwingungsperioden für die Fouriertransformation zu gering wird, was zu einer Verschlechterung der Frequenzgenauigkeit führt. Bei diesen Einstellungen ergeben sich bei einer Abtastrate = 9617,133 Hz nur 30 Schwingungsperioden, was unter den oben festgelegten Grenze von 60 Perioden liegt. Um diese Änderung der Frequenz zu korrigieren, wäre es möglich die Blocklänge zu erhöhen. Dabei würden sich die Frequenzgenauigkeit sowie die Aufnahmezeit pro Fouriertransformation erhöhen. Um dies zu veranschaulichen, wird die Blocklänge

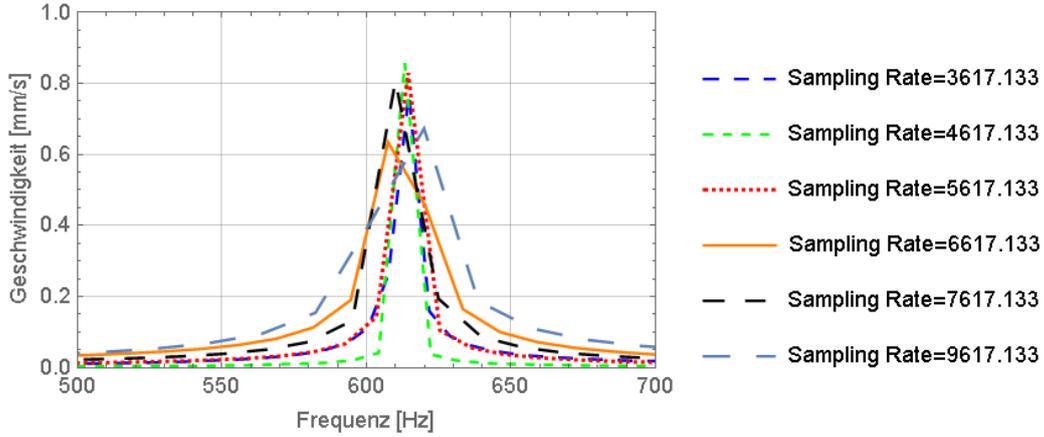


Abbildung 4.3: Darstellung der Frequenzgenauigkeit in Abhängigkeit der Sampling Rate bei konstanter Blocklänge von 512 Datenpunkten

bei konstanter Abtastrate variiert. Für diese Tests wurde eine Abtastrate = 3617,133 Hz und eine Oszillationsfrequenz = 612,823 Hz gewählt. Die Ergebnisse sind in den Abbildung 4.4 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass sich mit steigender Blocklänge auch die Frequenzgenauigkeit der Fouriertransformation erhöht.

4.1.3 Optimale Abtastrate und Blocklänge

Aufgrund der sehr hohen Anforderungen des *q*BOUNCE-Experiments war die Auswahl der optimalen Abtastrate und Blocklänge begrenzt. Es wurde eine Abtastrate = 2517,133 Hz und eine Blocklänge = 29000 Datenpunkte gewählt. Zur Vermeidung von Rundungsfehlern wurde die Abtastrate auf drei Kommastellen Genauigkeit eingestellt. Mit diesen Einstellungen wird eine Frequenzgenauigkeit = 0,09 Hz und eine Aufnahmezeit pro Fouriertransformation von 11,52 Sekunden erreicht:

$$\text{Genauigkeit} = \frac{\text{Abtastrate}}{\text{Blocklänge}} = \frac{2517,133 \text{ Hz}}{29000 \text{ Datenpunkte}} = 0,09 \text{ Hz}, \quad (15)$$

$$\text{Aufnahmezeit} = \frac{\text{Blocklänge}}{\text{Abtastrate}} = \frac{29000 \text{ Datenpunkte}}{2517,133 \text{ Hz}} = 11,52 \text{ Sekunden}. \quad (16)$$

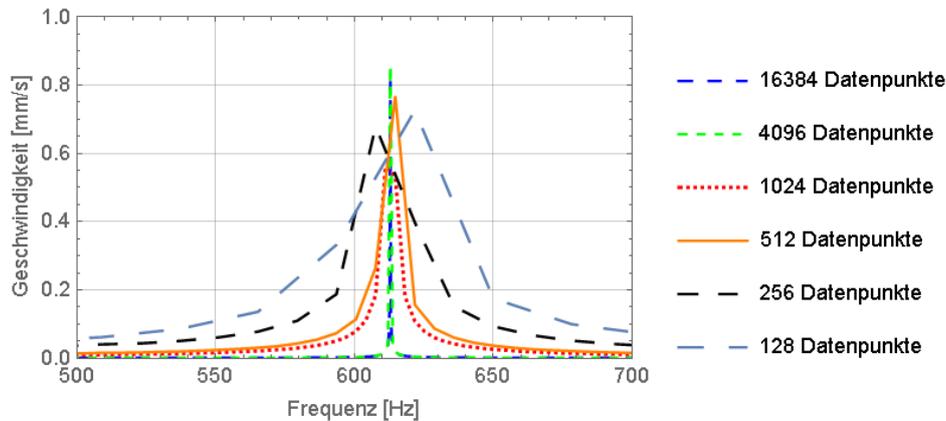


Abbildung 4.4: Darstellung der Frequenzgenauigkeit in Abhängigkeit der Blocklänge bei konstanter Sampling Rate = 3617,133 Hz

Diese Werte können bei sich änderenden Anforderungen natürlich jederzeit geändert werden.

4.2 Zeitgleiche kontrollierte Oszillation zweier Neutronenspiegel

Nach erfolgreicher Stabilisierung der neuen Regionen und der Tischoszillation konnten erste Tests mit den Einstellungen für Grenoble vorgenommen werden. Diese erfolgten problemlos bei Oszillation einer Region bei einer Frequenz $\nu = 462,925$ Hz. Hier konnte durch starkes Klemmen des SIOS-Gerüsts auf den Messgranit eine Phasendifferenz am Neutronenspiegel von unter $0,5^\circ$ erreicht werden. Für Tests mit Ramsey's Methode wurden beide Regionen mittels AFG an einer Frequenz $\nu = 462,925$ Hz in Schwingung versetzt. Dies entspricht der Übergangsfrequenz von Zustand $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ des Neutrons.

4.2.1 Phasenprobleme bei Oszillation zweier Neutronenspiegel

Durch Anlegen des Sinussignals mit einer Amplitude = 1 Vpp konnten Oszillationsamplituden von etwa 1,2 mm/s an zwei nebeneinander aufgebauten Regionen (siehe Abbildung 4.5) erreicht werden. Dabei kam es zu unerklärlich starken Schwankungen in der Phasendifferenz zwischen den verwendeten

Laserstrahlen. Diese erhöhte sich bei identem Messaufbau durch das Einschalten der Oszillationen des zweiten Neutronenspiegels von unter $0,5^\circ$ zu einer Differenz von etwa 12° . Aufgrund dieser hohen Phasenverschiebung, welche die Genauigkeit des Experiments stark beeinflussen würde, wurden viele Tests durchgeführt um die Ursache dieses Effektes zu finden. Dabei wurde auf die verwendeten Neutronenspiegel jeweils ein Laserstrahl des SIOS SP 15000 TR gelenkt. Die Wechselwirkungsregionen zur Erzeugung der Oszillationen wurden in einem Abstand von etwa 1 mm aufgebaut. Zur Erzeugung der Oszillationen an den Neutronenspiegeln werden zwei Nanopositioniertische E-712 verwendet. Der linke Tisch, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, wird im Folgenden Tisch 2, der rechte Tisch 1, genannt. Dieser Aufbau wurde auch für die folgenden Tests 1 bis 4 verwendet. Die durchgeführten Tests werden im Folgenden kurz erläutert.



Abbildung 4.5: Aufbau der Neutronenspiegel für Testzwecke zur Oszillation in Phase

Test 1 In diesem Test wurde der Abstand zwischen den beiden verwendeten Nanopositioniertischen variiert, um mögliche Schwingungsübertragungen zwischen den Tischen auszuschließen. Die Phasendifferenz blieb konstant auf etwa 12° und somit ist dieser Effekt weitgehend unabhängig von der Entfernung der

oszillierenden Regionen.

Test 2 Zur Überprüfung der Frequenzabhängigkeit dieses Effektes wurde die Eingangsfrequenz von Tisch 2 variiert. Dabei ergaben sich folgende Werte für die Phasendifferenzen:

Frequenz Tisch 1 [Hz]	Frequenz Tisch 2 [Hz]	Amplitude [Vpp]	$\Delta\varphi$ [°]
462,925	250	0,5	0,8
462,925	350	0,5	0,5
462,925	400	0,5	0,6
462,925	450	0,5	0,3
462,925	462,2	0,5	0,1
462,925	462,925	0,5	12
462,925	463,5	0,5	0,5

Tabelle 7: Änderung der Phasendifferenz bei Änderung der Tisch 2 Vibrationsfrequenz. Es ergibt sich eine höhere Phasenverschiebung wenn die beiden Tisch mit der gleichen Vibrationsfrequenz schwingen.

Bei Frequenzen bis $\nu = 462,2$ Hz und ab $\nu = 463,5$ Hz ergab sich eine Phasendifferenz kleiner 1° . Zwischen diesen Werten stieg die Phase rapide an. Das Maximum der Phasendifferenz ergab sich durch Oszillationen beider Neutronentische bei $\nu = 462,925$ Hz zu 12° . Es wurden Interferenzen vermutet, welche zu möglichen Vibrationen diverser verwendeter Bauteile oder Prismen führen könnten.

Test 3 Zur Überprüfung der Phasendifferenz an verschiedenen Neutronenspiegelpositionen wurde die Position der Laserstrahlen mit Hilfe der MICOS Lineartische variiert. Es ergab sich eine konstant hohe Phasendifferenz von etwa 12° . Somit konnten etwaige Unebenheiten, ungleichmäßiges Schwingen oder Verkippungen der Neutronenspiegel als Ursache weitgehend ausgeschlossen werden.

Test 4 Zur Überprüfung der Amplitudenabhängigkeit des Effektes wurden die Eingangsamplituden beider Tische variiert. Im ursprünglichen Experimentieraufbau ergeben sich Phasendifferenzen wie in Abbildung 4.6. Hier sind beide verwendete Laserstrahlen an den Tisch justiert, an welchem die Eingangsamplitude konstant gehalten wird. Die Phasendifferenzen im optimierten Zustand sind in Kapitel 4.2.5 zu finden. Aus Tabelle 8 ist erkenntlich, dass die Phasendifferenz bei sinkender Tisch 2-Amplitude ansteigt und umgekehrt. Ursache dafür sind mögliche Ausbreitungen von Schwingungsmoden über den Granit. Ist die Tischamplitude, an welcher der Laserstrahl gerichtet ist erhöht, so werden Störeinflüsse möglicherweise schwächer wahrgenommen und somit verringert sich der gemessene Effekt. In Abbildung 4.6 ist die Phasendifferenz bei Änderung der Amplitude grafisch dargestellt. Es ist ein nahezu linearer Verlauf der Phasendifferenz in Bezug auf die Eingangsamplituden zu erkennen. Bei Vertauschung der Regionen konnten die selben Effekte bei Variation der Eingangsamplitude beobachtet werden, was die verwendeten Regionen, Nanopositioniertische und Neutronenspiegel als Fehlerquelle ausschließt.

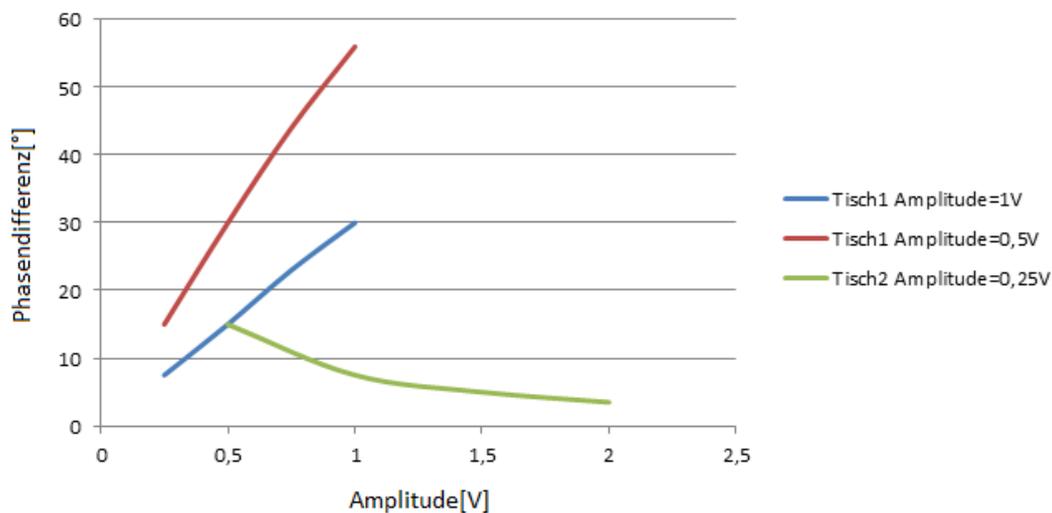


Abbildung 4.6: Grafische Darstellung der Phasendifferenz. Die rote und blaue Kurve zeigt die Änderung der Phasendifferenz zwischen Tisch 1 und Tisch 2 bei konstanter Tisch 1 Amplitude. Die grüne Linie gibt die Änderung bei konstanter Tisch 2 Amplitude und Variation der Tisch 1 Amplitude an.

Amplitude Tisch1 [Vpp]	Amplitude Tisch2 [Vpp]	Phasendifferenz [°]
1	0,25	7,5
1	0,5	15
1	0,75	23
1	1	30
0,5	0,25	15
0,5	0,5	30
0,5	0,75	44
0,5	1	56
1,5	0,25	5
2	0,25	3,7

Tabelle 8: Phasendifferenz zwischen den Neutronenspiegel bei Änderung der angelegten Eingangsspannung

4.2.2 Überprüfung aller Komponenten mittels Oszillationsmessgerät

Zur Überprüfung von Schwingungsübertragungen an andere Bauteile des Experimentieraufbaus wurde mit Hilfe des Vibrationsmessgerätes OROS⁶ an verschiedenen Positionen Frequenzmessungen durchgeführt und deren Amplituden überprüft. Es wurden zwei MICOS-Platten (siehe Abbildung 4.7) neben die beiden oszillierenden Wechselwirkungsregionen aufgebaut.

Messobjekt	Amplitude [nm]
MICOS Platte links	3,77
MICOS Platte rechts	3,81
großes Prisma	0,84
Gerüst	1,35
SIOS-Gerüst	3,63
Spiegelhalter auf MICOS-Platte	1,50
Prismahalter SIOS-Gerüst	7,00

Tabelle 9: OROS-Messergebnisse

⁶OROS GmbH, Hofstraße 272, 56077 Koblenz, Deutschland, <http://www.oros-deutschland.com>

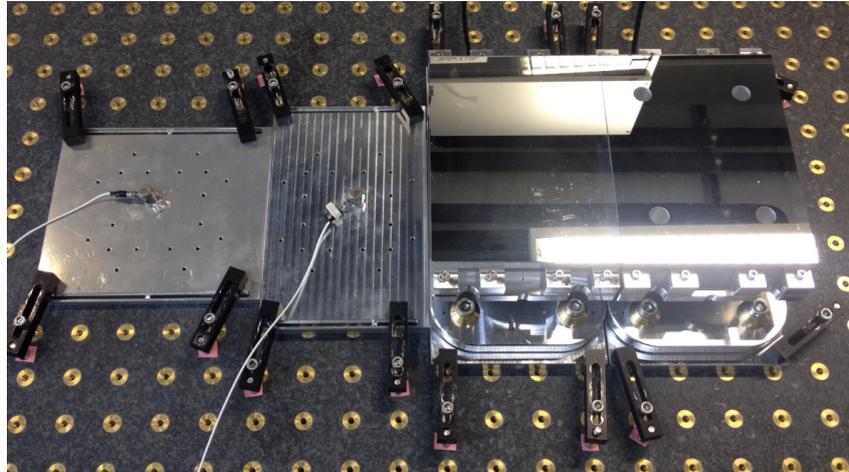


Abbildung 4.7: Testaufbau für Messungen mittels OROS-Messgerät

Mittels AFG wurde an beiden Regionen ein Sinussignal mit einer Frequenz $\nu = 462,925$ Hz und einer Amplitude $A = 1$ Vpp eingespeist. Die Messung der Schwingung bei der angelegten Oszillationsfrequenz erfolgt über Sensoren, welche an die gewünschten Bauteile geklemmt werden können. Zusätzlich wurden die wichtigsten Bauteile des Experimentieraufbaus überprüft. Die Messergebnisse sind in Tabelle 9 aufgelistet. Die gemessenen Schwingungsamplituden sind relativ gering. Einige Tests ergaben, dass auch bei höheren Amplituden die Phasendifferenz sinken kann.

4.2.3 Systematische Fehlersuche

Zur Überprüfung, ob diverse verwendete Bauteile durch die Oszillationen zweier Wechselwirkungsregionen beeinflusst werden, wurde eine systematische Fehlersuche durchgeführt. Dabei wird Laserstrahl 2 des SIOS SP 15000 TR an unterschiedlichen Positionen (siehe Abbildung 4.8) des Experimentieraufbaus unterbrochen und zum Interferometer zurückgeführt, um diese auf unerwünschte Schwingungen zu überprüfen. Zur Strahlableitung von Laserstrahl 2 wird ein Spiegel am SIOS-Gerüst und ein großes Prisma am Gerüst verwendet. Es werden Untergrundmessungen bei Oszillation beider Regionen bei einer Oszillationsfrequenz von 465,925 Hz durchgeführt. Dabei sollte kein Signal messbar sein, wenn der Laserstrahl nicht direkt vom Neutronenspiegel

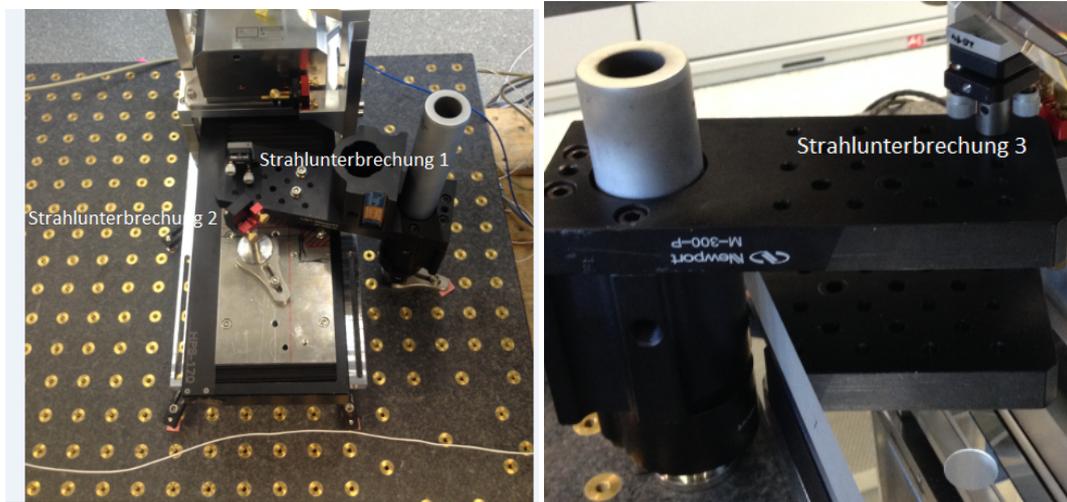


Abbildung 4.8: Experimentieraufbau zur systematischen Fehlersuche. Laserstrahl 2 wird an unterschiedlichen Positionen unterbrochen und eine Untergrundmessung durchgeführt.

zurückgeführt wird. Daher wird für die folgenden Tests Laserstrahl 2 an verschiedenen Positionen des Experimentieraufbaus zurückgeführt. Laserstrahl 1 wird auf Spiegel 1 zur Kontrolle der Oszillationsfrequenz gerichtet. Die Messwerte sind in Tabelle 10 angegeben.

- 1** Laserstrahl 2 wird vor dem ersten Spiegel zur Strahlablenkung ins Interferometer zurückgeführt. Dafür wurde eine neue Halterung aufgebaut um mögliche Schwingungen, welche durch das SIOS-Gerüst verursacht werden könnten, auszuschließen. Es ergab sich keine Störung von Laserstrahl 2.
- 2** Der Strahl wird zwischen dem oszillierenden Neutronenspiegel auf Tisch 2 und dem großen Prisma am Gerüst unterbrochen. Die Strahlrückführung erfolgt nach der ersten Strahlablenkung am Lineartisch am SIOS-Gerüst. Hier ist bereits eine Beeinflussung der Amplitude von Laserstrahl 2 zu sehen.
- 3** Die gemessene Amplitude bei den Untergrundmessungen steigt weiter an und übersteigt sogar die Amplitude bei Messungen direkt am Neutronenspiegel. Die Ursache des störenden Effektes ist weiter nicht bekannt, es wird die

Ausbreitung einer Schwingungsmode über den Granit vermutet.

Strahlunterberchung	Amplitude L1 [mm/s]	Amplitude L2 [mm/s]
1	-	-
2	1,2	0,35
3	1,25	0,95
ohne	1,25	0,81

Tabelle 10: Ergebnisse der Untergrundmessung. Bei Punkt 2 ist bereits eine Beeinflussung von Laserstrahl 2 erkennlich

4.2.4 Überprüfung mittels externem Laserinterferometer

Für weitere Testzwecke wird das Laserinterferometer SP 2000 TR in den Aufbau integriert. Dieses wird außerhalb des Granits auf etwa gleicher Höhe aufgebaut um mögliche Störungen durch den Experimentieraufbau zu vermeiden. Dabei werden die Laserstrahlen dieses externen Laserinterferometers nur durch das große Prisma am Gerüst zu den Neutronenspiegeln gelenkt und zurückgeführt. Alle Laserstrahlen des externen Laserinterferometers werden auf Tisch 1 justiert und anschließend die Amplituden und Phasen gemessen. Die Messergebnisse sind in Tabelle 11 ersichtlich. Die Amplituden der Laserstrahlen des extern aufgebauten Laserinterferometers sind alle ident. Die Phasendifferenz beträgt nur $0,05^\circ$. Daher sind das Gerüst inklusive dem großen Prisma, sowie die Neutronenspiegel selbst nicht für die hohen Phasenverschiebungen verantwortlich. Die Amplitude von Laserstrahl L2 des SIOS SP 15000 TR ist erhöht. Zur Überprüfung der Phasendifferenz zwischen den oszillierenden Regionen werden die Laserpositionen verändert, sodass sich die Laserstrahlen des externen Interferometers an unterschiedlichen Neutronenspiegel befinden (siehe Abbildung 4.9). Es ergibt sich eine Phasenverschiebung zwischen L4 und L6, welche sich an unterschiedlichen Tischen befinden, von $84,5^\circ$. Durch variieren der Phase am AFG verändert sich die Phase der Laserstrahlen des externen Laserinterferometers in gleichem Ausmaß. Die Änderung der Phasen des Interferometers am Granit weicht jedoch von der Phasenänderung am AFG ab. Durch die korrekte Funktionsweise des externen SIOS konnten die Phasen und

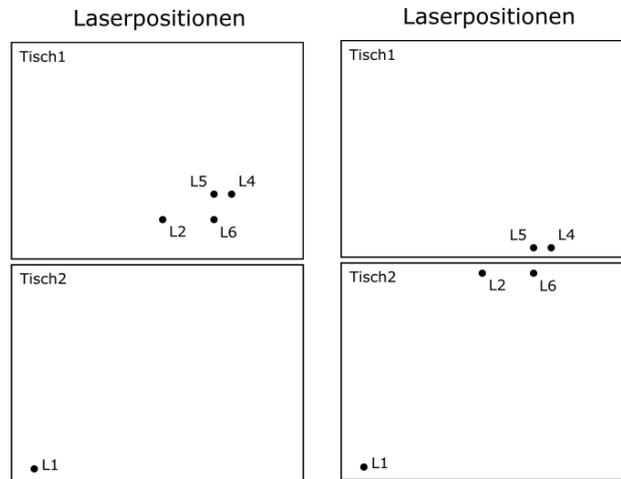


Abbildung 4.9: Laserstrahlpositionen (links: Messung 1, rechts: Messung 2) für Testzwecke mit dem extern aufgebauten Laserinterferometer SP 2000 TR (L4 - L6)

Laserstrahl	Messung 1 Ampl. [mm/s]	Messung 2 Ampl. [mm/s]
Laser1	1,15	1,16
Laser2	0,73	1,44
Laser4 (extern)	1,16	1,17
Laser5 (extern)	1,17	1,18
Laser6 (extern)	1,17	1,26

Tabelle 11: Amplituden der Laserstrahlen beider Laserinterferometer

Amplituden des SIOS am Granit besser überprüft werden. Somit waren weitere Tests zur Stabilisierung des Systems möglich. Da bereits festgestellt wurde, dass das Gerüst nicht Ursache der hohen Phasenverschiebungen ist, werden die weiteren Tests am SIOS-Gerüst durchgeführt.

4.2.5 Beschwerung von Komponenten der Laserstrahlführung

Dieses Unterkapitel widmet sich der Stabilisierung des SIOS-Gerüsts durch Beschweren. Dabei soll die Eigenfrequenz des SIOS-Gerüsts verändert werden, da eine Anregung der Eigenfrequenz durch die Ausbreitung von Schwingungsmoden über den Granit vermutet wird. Durch die Beschwerung mit Aluminiumblöcken änderten sich die gemessenen Phasen und Amplituden und es wurde

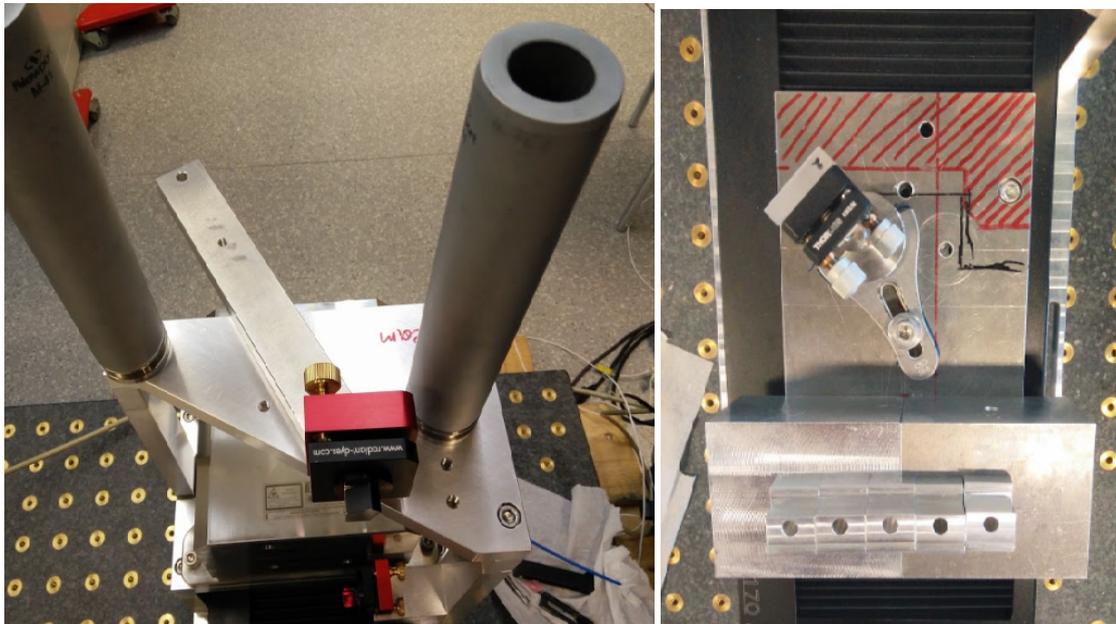


Abbildung 4.10: Anordnung der Beschwerung des SIOS-Gerüst zur Stabilisierung des Systems

versucht das System zu stabilisieren. Dabei sind die Positionen der Aluminiumblöcke äußerst wichtig. Schon bei minimaler Änderung der Position können sich die Phasen und Amplituden stark verändern. Durch die Überprüfung der richtigen Messwerte mittels externem Interferometer konnte das System erstmals bei Oszillationen zweier Regionen weitgehend stabilisiert werden. Die Beschwerung, wie in Abbildung 4.10 rechts abgebildet, zeigt eine weitgehende Stabilisierung, bei welcher sich idente Werte beider verwendeter Laserinterferometer ergeben. Durch Verfahren entlang der y-Achse der Neutronenspiegel wurde jedoch festgestellt, dass sich die Phasendifferenz an verschiedenen Positionen ändert. Durch Neujustierung der Laser und durch Entfernung der Klemmen am SIOS-Gerüst sowie zusätzliche Beschwerungen mittels schweren Optik-Komponenten am SIOS-Aufbau (Abbildung 4.10 links) konnte die Phasendifferenz noch weiter reduziert und stabilisiert werden. Die Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigen die Amplituden und Phasendifferenzen des Laserinterferometers mit und ohne Beschwerung des SIOS-Gerüsts. Ohne zusätzliches Beschweren des Systems weisen die Amplituden von L1 und L2 starke Abwei-

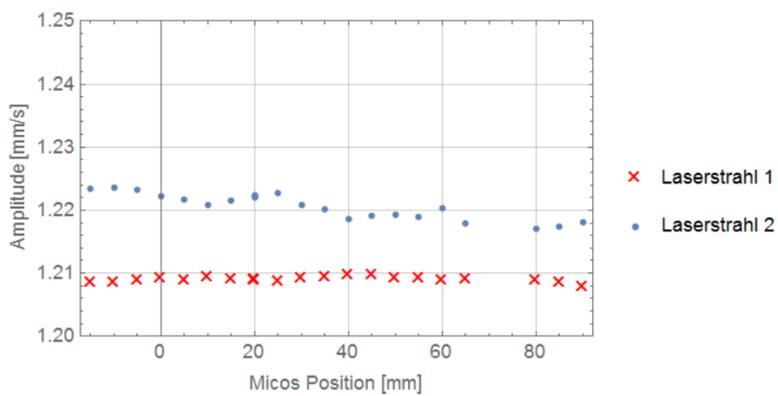
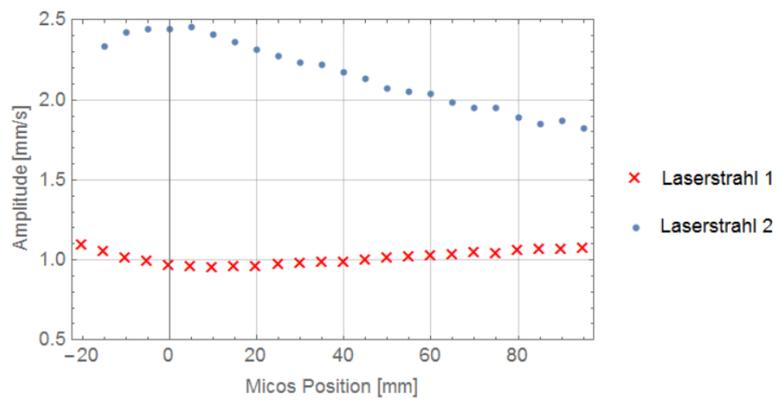


Abbildung 4.11: Messung der Amplitude ohne (oben) und mit (unten) Beschwerung des SIOS-Gerüsts bei Änderung der Laserpositionen.

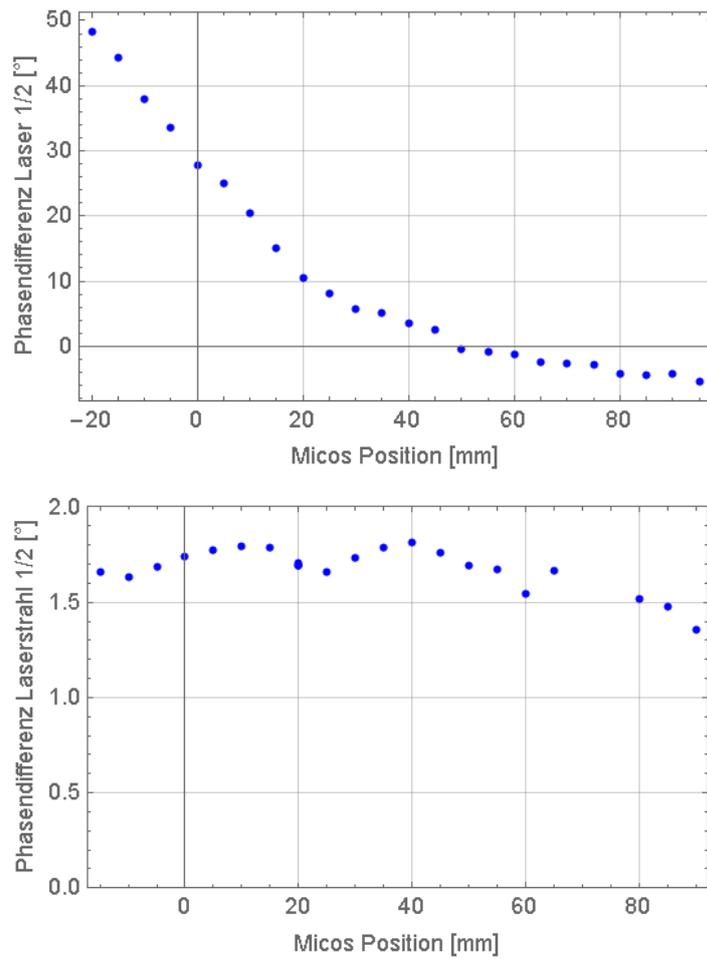


Abbildung 4.12: Messung der Phasendifferenz ohne (oben) und mit (unten) Beschwerung des SIOS-Gerüsts.

chungen auf. Mittels der Beschwerung nähern sich die Amplituden den Werten des extern aufgebauten Laserinterferometers an. Die Phasendifferenz minimiert sich auf unter 2° und schwankt in einem Bereich von weniger als $0,5^\circ$ über den vollen Verfahrweg des Lineartisches in x-Richtung. Diese Schwankung liegt in einem akzeptablen Bereich und wird vorerst nicht weiter untersucht.

Es wird vermutet, dass sich die hohe Phasendifferenz ohne Beschwerung durch die Ausbreitung von Schwingungsmoden über den Granit und das Gerüst ergibt. Dieses Problem konnte auch nicht durch vibrationsdämpfende Matten unter dem SIOS-Gerüst behoben werden. Durch Minimierung dieses Effektes können erstmals Tests für den Phasenabgleich der oszillierenden Regionen durchgeführt werden. Dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

4.3 Phasenabgleich der Regionen

Für die Messgenauigkeit in einem Ramsey-artigen Experimentieraufbau ist es wichtig, dass die Wechselwirkungsregionen zur Erzeugung der $\pi/2$ -Flips in Phase oszillieren. Eine Phasendifferenz würde zu einer Verschiebung der Frequenz, wie in Formel 19 [Rie04] gegeben, führen.

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\phi}{2\pi T} \quad (17)$$

4.3.1 Referenzmessungen

Zur Feststellung der Phasendifferenz wird das externe Laserinterferometer verwendet, da dieses durch die Effekte der Oszillation beider Regionen nicht beeinflusst wird. Zur Überprüfung der Phasendifferenz werden insgesamt 3 Messungen benötigt. Die Laserstrahljustierungen sind in Abbildung 4.13 gegeben. Dabei wird Laserstrahl 2 des SIOS am Granit an die Positionen von L5 und L6 verfahren und anschließend die Phase gemessen. Die Messergebnisse sind in den Tabellen 12 & 13 zu finden. Messung 1 ergibt eine Phasenverschiebung von ca. $116,25^\circ$. Dabei wurden mehrere Messungen an der selben Laserposition durchgeführt, um die Stabilität der Phase zu gewährleisten. Da im derzeitigen Experimentieraufbau nur 2 Laserstrahlen des Laserinterferometers SP 15000 TR zur Verfügung stehen, ist es nicht möglich die Phasendifferenz zwischen

Laserpositionen

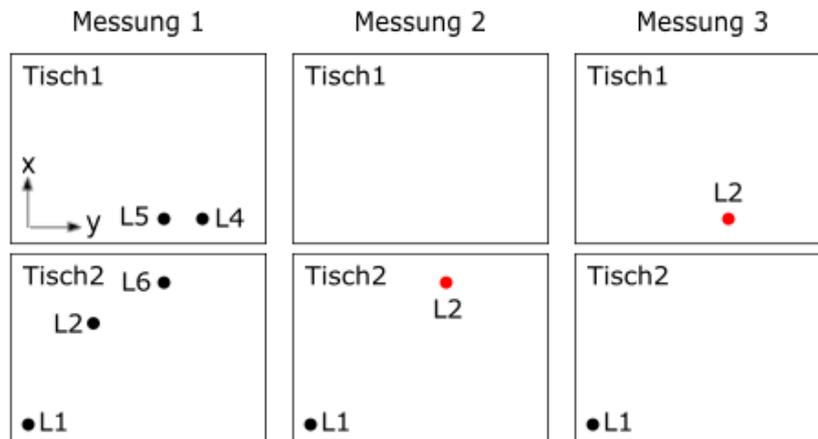


Abbildung 4.13: Laserpositionen zum Abgleich der Phasen der Neutronenspiegel.

den beiden Neutronenspiegeln direkt zu messen. Dazu werden Messung 2 und Messung 3 (siehe Abbildung 4.13) benötigt, deren Messergebnisse in Tabelle 12 gegeben sind. Die Phasendifferenz mit Messung des SIOS SP 15000 TR entspricht etwa $117,27^\circ$ und weicht etwas von den erhaltenen Werte des externen Laserinterferometers ab.

$\Delta\varphi_{4,6}$ [°]	$\Delta\varphi_{5,6}$ [°]	A4 [mm/s]	A5 [mm/s]	A6 [mm/s]
116,27	116,34	1,19	1,20	1,27
116,24	116,32	1,19	1,20	1,27
116,26	116,37	1,19	1,20	1,27
116,22	116,32	1,19	1,20	1,27
116,29	116,36	1,19	1,20	1,27
116,19	116,28	1,19	1,20	1,27

Tabelle 12: Mehrere Messungen der Phasendifferenz und der Amplituden mit Hilfe der externen Laserüberprüfung zur Gewährleistung der Stabilität.

Diese Abweichung kommt durch Störungen der Laserstrahlführung zustande, da diese noch nicht vollständig behoben werden konnten. Laserstrahl 1 hat

eine konstante Amplitude $A1 = 1.23 \text{ mm/s}$, während die Amplitude $A2 = 1.29 \text{ mm/s}$ beträgt. Daraus lässt sich schließen, dass die Messergebnisse durch den Effekt, welcher durch die Oszillationen zweier Regionen verursacht wird, beeinflusst werden. Anhand der gemessenen Phasendifferenz zwischen den Regionen und dem Amplitudenwert des externen SIOS für beide Tische, kann am AFG die Phase so verändert werden, dass beide Regionen in Phase oszillieren.

$\Delta\varphi_{1,2}$ Pos. L6 [°]	A2 Pos. L6 [mm/s]	$\Delta\varphi_{1,2}$ Pos. L5 [°]	A2 Pos. L5 [mm/s]
0,66	1,29	-116,61	1,17
0,65	1,29	-116,61	1,17
0,66	1,29	-116,61	1,17
0,65	1,29	-116,62	1,17
0,66	1,29	-116,61	1,17
0,67	1,29	-116,63	1,17

Tabelle 13: Messung der Phasendifferenz und der Amplitude mit Laserstrahl 2. Eine noch vorhandene Beeinflussung von Laserstrahl 2 ist anhand der Amplitude erkennbar.

4.3.2 Einstellen der Phase

Da das Signal mittels AFG eingespeist wird, ist es auch möglich die Phase der verschiedenen Regionen direkt am AFG zu verändern. Diese wird solange im Bereich der zuvor gemessenen Phasendifferenz variiert, bis die Amplituden der Laserstrahlen L1 und L2 möglichst ident sind. Dazu wird allerdings das externe Laserinterferometer benötigt, da bei Veränderung der Phase am AFG, die gemessene Änderung der Phase mit Hilfe des SIOS am Granit eine geringe Abweichung aufweist. Es wird eine Phase am AFG von $116,2^\circ$ eingestellt. Zur Überprüfung der richtigen Phaseneinstellung wird mit L2 erneut an den Laserpositionen L5 und L6 gemessen. Die Messergebnisse sind in Tabelle 14 aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass sich die Amplituden durch die Phaseneinstellungen verändert haben. Die Phasendifferenz hat sich verringert und liegt nun unter $0,5^\circ$. Die Amplituden der Laserstrahlen des Laserinterferometers am Granit sind innerhalb der Messgenauigkeit und stabil. Es kann davon aus-

gegangen werden, dass sich aufgrund der Oszillationen in Phase, der Effekt, welcher die hohen Phasenverschiebungen verursacht hat, weitgehend eliminiert werden konnte. Durch Verfahren von Laserstrahl 2 auf die Position von Laserstrahl 5 ändert sich die Amplitude auf 1,16 mm/s. Die Messergebnisse sind in Tabelle 15 aufgelistet.

$\Delta\varphi_{1,2}$ [°]	A1 [mm/s]	A2 [mm/s]
0,26	1,24	1,24
0,26	1,24	1,24
0,27	1,24	1,24
0,26	1,24	1,24
0,26	1,24	1,24
0,26	1,24	1,24

Tabelle 14: Messung der Phasendifferenz mittels externen Laserinterferometer. Die Laserstrahlen sind auf den gleichen Neutronenspiegel justiert.

$\Delta\varphi_{1,2}$ [°]	A1 [mm/s]	A2 [mm/s]
0,26	1,24	1,16
0,26	1,24	1,16
0,27	1,24	1,16
0,26	1,24	1,16
0,27	1,24	1,16
0,28	1,24	1,16

Tabelle 15: Messung der Phasendifferenz. Die Laserstrahlen sind an unterschiedliche Neutronenspiegel justiert.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde dieser Test erneut durchgeführt. Die Phasendifferenz zwischen den Regionen lag bei $64,5^\circ$. Nach der Phaseneinstellung mittels AFG ergab sich eine Phasendifferenz von $0,22^\circ$, was im Bereich der letzten Messung liegt. Diese Phasendifferenz ändert sich nur wenn die Spiegel oder Prismen im Experimentieraufbau verändert werden oder die Oszillationsfrequenz der Neutronenspiegel geändert wird. Die Amplituden

der Laserstrahlen waren ebenfalls innerhalb der Messgenauigkeit zu vorheriger Messung. Als Ergebnis konnte eine Phasenkonstanz von unter 2° erreicht werden. Bei Neutronengeschwindigkeiten $v = 8 \text{ m/s}$, einer Spiegellänge $l = 0,34 \text{ m}$ in Region 3 und einer Phasenkonstanz $\Delta\phi = 2^\circ$ kann eine Energiegenauigkeit $\Delta E = 5,4 \cdot 10^{-16} \text{ eV}$ erreicht werden.

4.3.3 Vorgehensweise für Messungen in Grenoble

Die in Kapitel 4.3.2 erklärte Methode zur Einstellung der Phase ist für die Messungen in Grenoble nicht möglich. Aus diesem Grund wurde getestet, ob es bei bekannter Phasendifferenz von etwa $0,5^\circ$ möglich ist die korrekten Einstellungen vorzunehmen, ohne die Phasendifferenz zwischen den Regionen zu kennen.

Es wird die Phase eines Nanopositioniertisches mittels AFG solange variiert bis die erwünschte Phasendifferenz bei Messungen mit SIOS SP 15000 TR am Granit erreicht ist. Die minimale Phasendifferenz zwischen den Regionen ergibt sich zweimal. Allerdings ergeben sich nur einmal die korrekten Amplitudenwerte. Diese weisen minimale Abweichungen zu vorherigen Messungen auf, wobei bei der 2. minimalen Phasendifferenz die Werte der Amplituden stark von den korrekten Werten abweichen.

Mit Hilfe des externen Laserinterferometers müssen somit einmal die Amplituden und Phasendifferenzen bei Oszillationen in Phase ermittelt werden. Danach kann die Vakuumkammer geschlossen werden und mittels Variation der Phase am AFG die korrekten Einstellungen vorgenommen werden. Durch die bekannten Amplituden und genügend viele Messungen bei minimalen Phasenänderungen am AFG, kann die Phasendifferenz der Regionen mit einer Genauigkeit von etwa $0,1^\circ$ eingestellt werden. Somit ist ein Phasenabgleich möglich, ohne die Vakuumkammer bei AFG Neustart öffnen zu müssen.

Mit dem derzeitigen Experimentieraufbau ist es nicht möglich alle Laserstrahlen des SIOS SP 15000 TR auf den Granit abzulenken. Es befindet sich derzeit ein neues Gerüst mit zwei großen Prismen in Planung, wodurch es möglich sein wird Laserstrahl 3 ebenfalls auf den Neutronenspiegel zu justieren. Da zur Bestimmung der Phasendifferenz zwischen den Wechselwirkungsregionen 3 La-

serstrahlen notwendig sind, wird durch das neue Gerüst ein Phasenabgleich auch ohne externem Laserinterferometer möglich sein. Dieses sollte jedoch zur Stabilisierung des Systems und zur Überprüfung der Phase weiterhin verwendet werden.

5 Messungen mit justiertem Gesamtsystem

5.1 Stabilitätstests

Zur Überprüfung der Stabilität des Gesamtsystems wurde die Frequenz, die Amplitude und die Phase der Laserstrahlen von SIOS SP 15000 TR und SIOS SP 2000 TR über einen längeren Zeitraum, mit Konfigurationen ähnlich zu solchen welche später im Experiment verwendet werden sollen, gemessen.

Mittels AFG werden an den Neutronenspiegeln Oszillationen erzeugt. Dazu wird an den Mikropositioniertischen ein Eingangssignal mit einer Frequenz $\nu = 462,925$ Hz und einer Amplitude $A = 1$ Vpp eingespeist. Die Laserinterferometer werden mit der in Abschnitt 4.1.3 festgelegten Abtastrate $f_S = 2517,133$ Hz und Blocklänge $B_L = 29000$ Datenpunkte betrieben. Die Positionen der Laserstrahlen L1- L3 des SIOS SP 15000 TR und der Laserstrahlen L4 - L6 des SIOS SP 2000 TR werden in Abbildung 5.1 gezeigt.

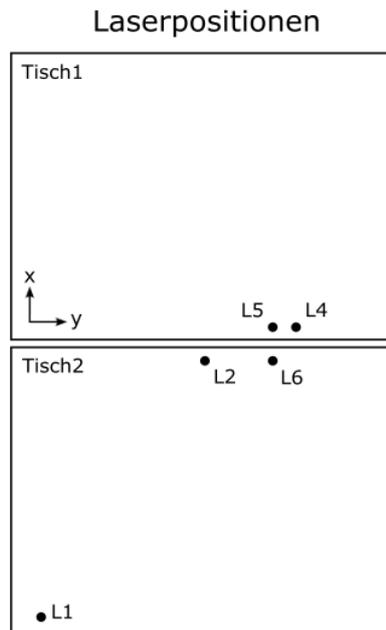


Abbildung 5.1: Laserpositionen für Stabilitätsmessungen bei Vibration mit zwei Neutronenspiegeln bei einer Frequenz = 462,925 Hz.

Für Messungen in Grenoble stehen Neutronen jeweils nur rund 200 Sekun-

den zur Verfügung. Darauf folgt eine Pause deren Länge davon abhängt ob an den umliegenden Experimentierplätzen Messungen stattfinden. Während dieser Pause sollen die Oszillationen der Neutronenspiegel pausiert werden um die Nanopositioniertische zu schonen bzw. um eventuelle Wärmeentwicklungen zu reduzieren. Zu Testzwecken wurde eine Pause von 30 Sekunden angenommen. Für den automatischen Ablauf einer solchen Messung wurde ein Skript programmiert, welches alle benötigten Befehle für den automatischen Ablauf beinhaltet. Für das Anlegen der Oszillationen und den Einschwingvorgang des Mikropositioniertisches zu Beginn jeder Messung sowie für die Durchführung einer FFT wurden jeweils 30 Sekunden eingerechnet, womit es möglich ist während der durchgehenden Oszillation 7 Messungen durchzuführen.

Im Folgenden werden mit den oben festgelegten Einstellungen Langezeitmessungen der Frequenz, Amplitude und Phasen aller verwendeter Laserstrahlen vorgenommen. Die dabei gemessene **Frequenz** ist stabil für beide Laserinterferometer und zeigt keine größeren Abweichungen und liegt im Mittel bei 462.936 Hz, was einer Abweichung von 0.011 Hz von der angelegten Eingangsfrequenz entspricht. Diese Differenz kommt aufgrund der Genauigkeit der Fouriertransformation zustande und ändert sich mit der verwendeten Abtastrate und Blocklänge. Für die Stabilität der **Amplitude** werden die selben Laserkonfigurationen und Einstellungen wie bei vorheriger Messung verwendet. Dabei ergeben sich Schwingungsamplituden der Neutronenspiegel von über 1,5 mm/s. Abbildung 5.2 zeigt die Amplituden der verschiedenen Laserstrahlen, welche etwa $\pm 0,005$ mm/s um den Mittelwert schwankt und somit nahezu konstant ist. Nach Deaktivieren und erneuter Aktivierung der Oszillationen an den Nanopositioniertischen ist ein kleiner Sprung der Amplitude erkennbar, welcher allerdings vernachlässigbar gering ist und nicht weiter untersucht wird. Die Messergebnisse des externen Laserinterferometer sind in Abbildung 5.2 grafisch dargestellt.

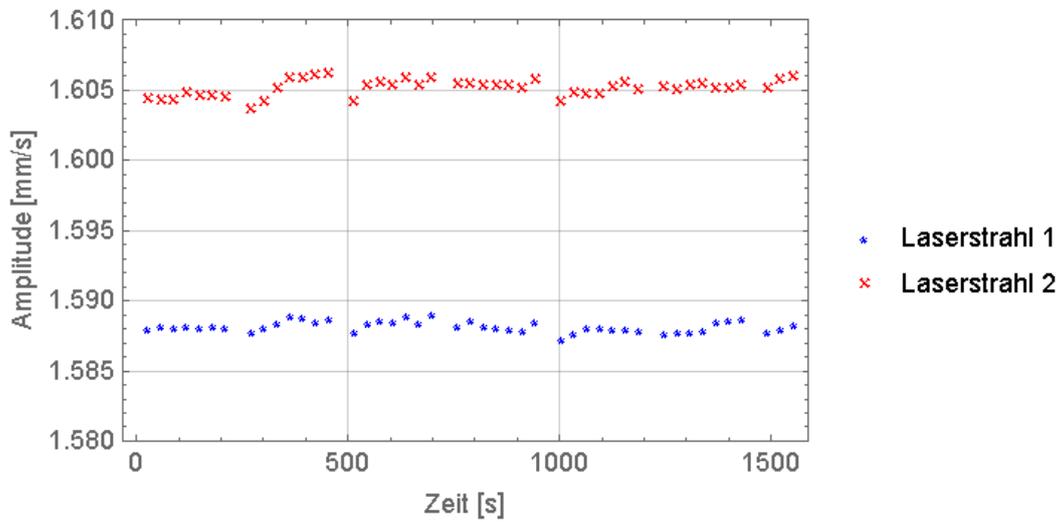


Abbildung 5.2: Stabilitätsmessung der Amplitude bei einer Vibrationsfrequenz = 462,925 Hz, einer Blocklänge = 29000 Datenpunkten und einer Abtastrate = 2517,133 Hz mittels SIOS SP 15000 TR.

Die **Phasendifferenz** zwischen der Laserstrahlen 1 und 2 liegt bei etwa $2,7^\circ$ und schwankt um etwa $0,1^\circ$. Die Messergebnisse des SIOS SP 15000 TR sind in Abbildung 5.3 und des SIOS SP 2000 TR in Abbildung 5.4 grafisch dargestellt. Für die Laserstrahlen des extern aufgebauten SIOS ergeben sich Phasendifferenzen kleiner 1° mit einer Abweichungen von $\pm 0,05^\circ$ um den Mittelwert.

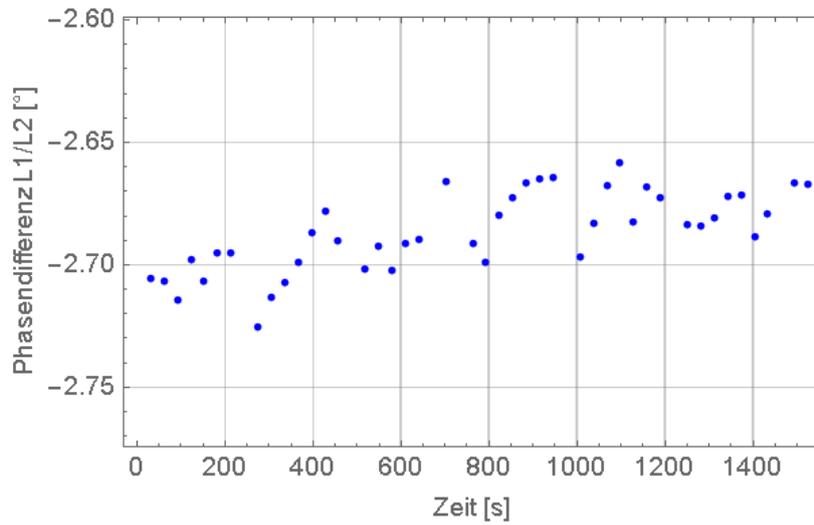


Abbildung 5.3: Messung der Phasendifferenz zwischen den Laserstrahlen 1 und 2 (Laserinterferometer SP 15000 TR am Granit).

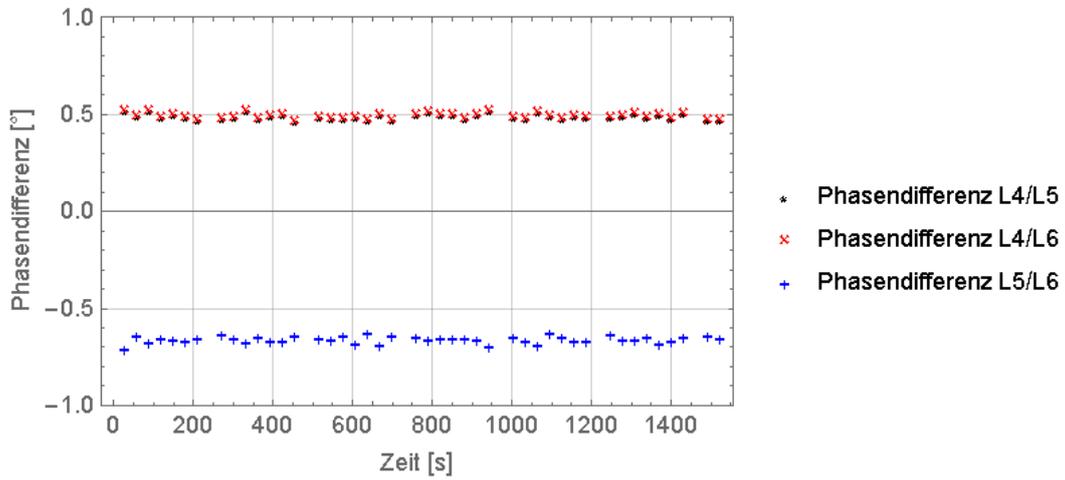


Abbildung 5.4: Messung der Phasendifferenz zwischen den Laserstrahlen 4 und 5 (Laserinterferometer SP 2000 TR extern).

5.2 Ortsabhängige Vibrationsmessungen

Es werden ortsabhängige Messungen mit Laserstrahl 2 des SIOS SP 15000 TR durchgeführt. Dabei wird eine Fläche von $60 \times 80 \text{ mm}^2$ abgetastet, welche durch den Testaufbau beschränkt war. Die Laserstrahlen 4 - 6 des SIOS SP 2000 TR konnten nur in x-Richtung verfahren werden. Abbildung 5.5 zeigt die Anfangspositionen von L4 - L6, L1 und die abgetastete Fläche von L2.

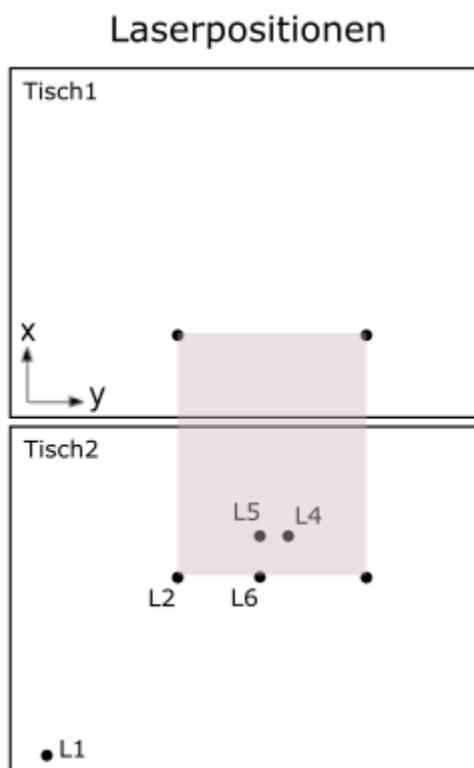


Abbildung 5.5: Laserpositionen für die ortsabhängigen Messungen bei Vibration mit beiden Neutronenspiegeln. Die graue Fläche gibt den Bereich an, welcher mit Laserstrahl 2 abgetastet wird.

Die Werte der gemessenen **Frequenzen** sind in Abbildung 5.6 grafisch dargestellt. Die Frequenzen von Laserstrahl 1 und der ortsabhängigen Messungen L2 - L6 sind stabil auf $\nu = 462,935 \text{ Hz}$. Die **Amplituden** (siehe Abbildungen 5.7 & 5.8) des externen Laserinterferometers sind konstant. Laserstrahl 2

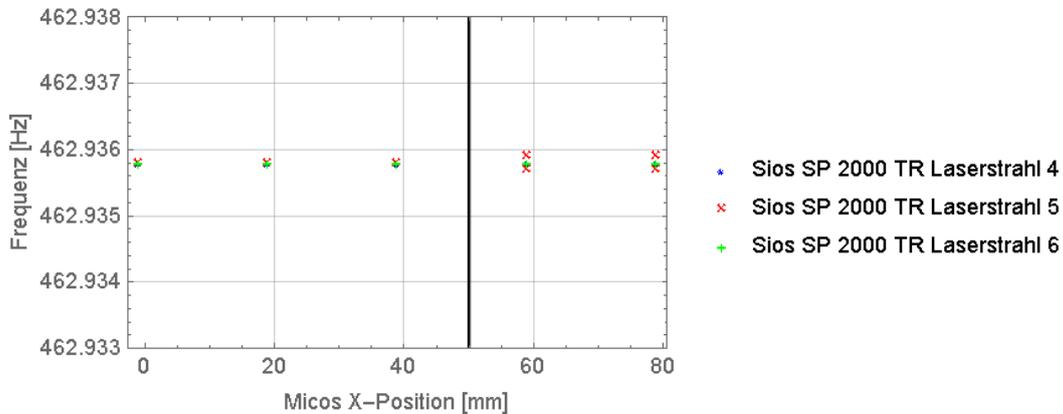


Abbildung 5.6: Ortsabhängige Frequenzmessung mittels externen Laserinterferometers. Die vertikale Linie gibt den Übergang von Tisch 1 (links) auf Tisch 2 (rechts) an.

schwankt zwischen einer Amplitude $A = 1,24 - 1,26$ mm/s durch eine mögliche Beeinflussung der Laserstrahlen aufgrund des Verfahrens des großen Prismas in x-Richtung. Ein höherer Abfall der Amplitude ergibt sich beim Regionenwechsel, welcher durch die vertikale schwarze Linie in den Abbildungen 5.6 gegeben ist. Die **Phasendifferenz** (siehe Abbildungen 5.9 & 5.10) zwischen L1 und L2 des SIOS SP 15000 TR, welches sich am Granit befindet, schwankt zwischen $0-1^\circ$ in y-Richtung. Die weiße Fläche ergibt sich aufgrund eines Fehlers bei der Datenaufnahme bei Position 40/80, wo Laserstrahl 2 durch den Experimentieraufbau verdeckt wurde. Das externe SIOS zeigt ebenfalls stabile Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Laserstrahlen mit Schwankungen kleiner $0,5^\circ$ in x-Richtung. Dabei werden jeweils 5 Messungen pro Position durchgeführt, um deren Stabilität zu gewährleisten. Aus den Messergebnissen ist ersichtlich, dass die Phasendifferenzen auf Tisch 1 etwas geringer sind als auf Tisch 2 und im gewünschten Wertebereich für erste Messungen liegen.

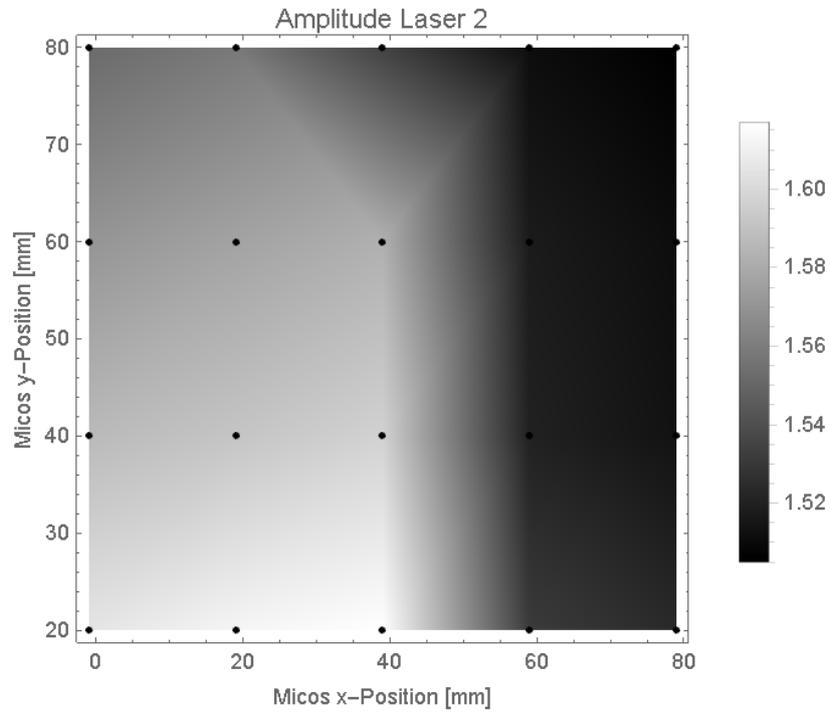


Abbildung 5.7: Ortsabhängige Amplitudenmessung des SIOS SP 15000 TR.

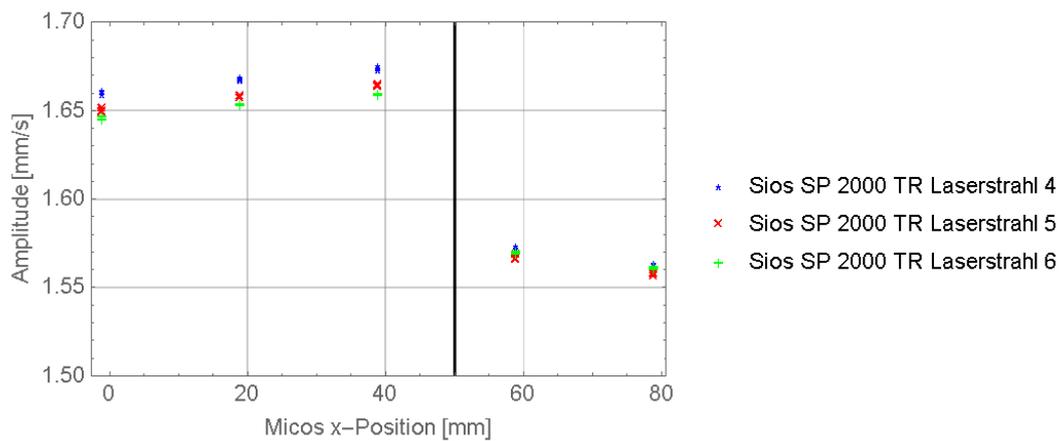


Abbildung 5.8: Ortsabhängige Amplitudenmessung des SIOS SP 2000 TR.

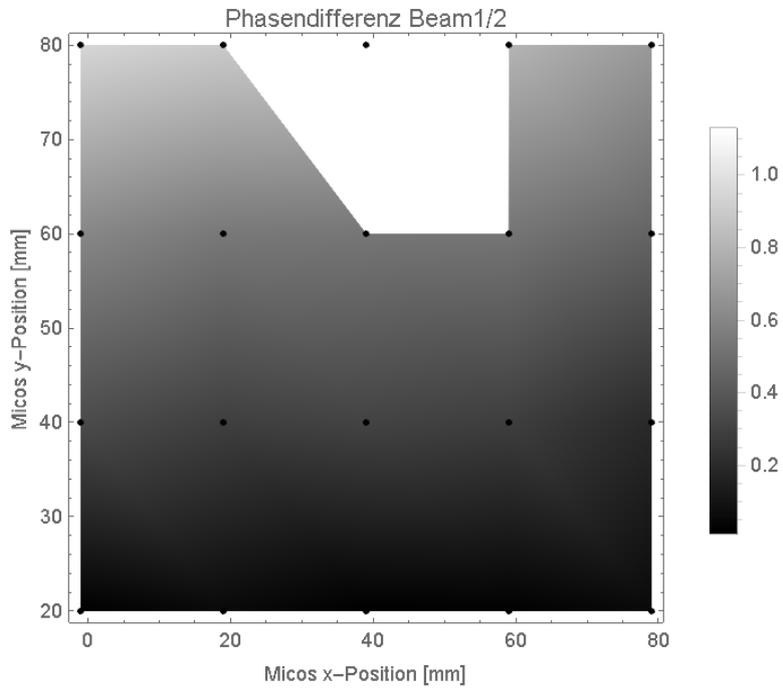


Abbildung 5.9: Ortsabhängige Phasenmessung des SIOS SP 15000 TR.

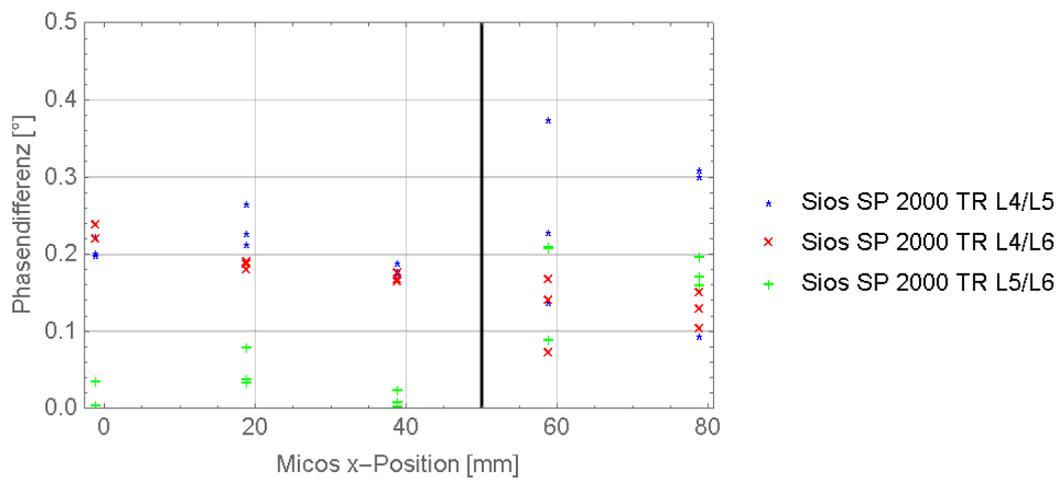


Abbildung 5.10: Ortsabhängige Phasenmessung des SIOS SP 2000 TR.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Beitrag zur Gravitationsresonanzspektroskopie ultrakalter Neutronen mit Hilfe von Ramsey's Methode separierter oszillierender Felder geliefert. Hierfür wurden ein neues Laserinterferometer inklusive Gerüst zur Optimierung des Strahlengangs, sowie ein neuer Neutronenspiegelbau in den Experimentieraufbau integriert. Als problematisch stellte sich die Stabilisierung des neuen Spiegelsystems heraus, welches durch Anpassung der internen PID-Werte der Nanopositioniertische erstmals stabilisiert werden konnten. Hauptaugenmerk in dieser Arbeit wurde auf die Optimierung des Systems, sowie auf die Realisierung der Oszillationen der beiden Wechselwirkungszone in Phase in Ramsey's Methode oszillierender Felder gelegt. In ersten Tests wurde für die Übergangsfrequenz $\nu_{13} = 462,925$ Hz mit Hilfe des Abtasttheorems eine optimale Blocklänge $B_L = 29000$ Datenpunkte und eine Sampling Rate $S_R = 2517,133$ Hz festgelegt. Bei diesen Einstellungen konnte eine Auflösung der Fouriertransformation von $0,09$ Hz erreicht werden, was für das *qBOUNCE*-Experiment im November 2016 ausreichend ist. Bei ersten Tests bei Oszillation beider Wechselwirkungszone kam es zu hohen Schwankungen der Phase. Um die Ursache dieses Störeinflusses zu finden und zur Minimierung dieses Effekts wurden viele Tests durchgeführt, was sich als sehr zeitaufwendig herausstellte. Durch richtiges Beschweren des SIOS-Gerüsts und mit Hilfe eines extern aufgebauten Laserinterferometers, welches nicht durch diese Störungen beeinflusst wurde, sowie durch den Phasenabgleich der Wechselwirkungszone konnte dieser Effekt minimiert werden. Die Amplitude schwankte bei ortsabhängigen Messungen in einem Bereich kleiner als $0,05$ mm/s, während die Phasenschwankungen kleiner $0,5^\circ$ betragen, wodurch erstmals Messungen mit gewünschter Genauigkeit in Grenoble möglich sein sollten.

Im derzeitigen Experimentieraufbau stehen lediglich zwei Laserstrahlen des neuen Laserinterferometers, welches sich am Granit befindet, zur Verfügung. Durch Integration eines neuen Hauptgerüsts, welches bereits fertiggestellt wurde, könnte Laserstrahl 3 ebenfalls verwendet werden. Des Weiteren wäre es vorteilhaft das derzeit extern aufgebaute Laserinterferometer innerhalb der

Vakuumkammer platzieren zu können, um den Phasenabgleich der Wechselwirkungszonen zu vereinfachen und Messungen mittels Laserinterferometer am Granit überprüfen zu können.

Literatur

- [Abe09] ABELE, Hartmut: Ramsey's method of separated oscillating fields and its application to gravitationally induced quantum phase shifts. (2009)
- [Cro15] CRONENBERG, Gunther: *Frequency Measurements to test Newton's Gravity Law within the qBounce experiment*, TU Wien, Diss., 2015
- [Gol91] *Ultra-Cold Neutrons*. R. Golub, D. Richardson, and S.K. Lamoreaux, 1991
- [Gru16] GRUBER, Alexander: *Automation of the qBounce experiments vacuum system*, Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2016
- [HA11] HARTMUT ABELE, Tobias J. Peter Geltenbort G. Peter Geltenbort: Realization of a gravity-resonance-spectroscopy. In: *Nature Physics* 7 (2011)
- [Her14] HERZINGER, Jörg: *Entwicklung einer Instrumentansteuerung für das qBounce-Experiment*, University of Vienna, Diplomarbeit, 2014
- [Jen08] JENKE, Dipl.-Phys. Dr. T.: *Weiterentwicklung eines Experiments zur Realisierung eines Quantum Bouncing Balls und Suche nach Extra-dimensionen der Raumzeit*, University of Heidelberg, Diplomarbeit, 2008
- [Jen11] JENKE, Tobias: *qBounce - Vom Quantum Bouncer zur Gravitationsresonanzspektroskopie*, TU Wien, Diss., 2011
- [Lin11] LINS, Tobias: *Quantenzustände im Gravitationsfeld der Erde*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2011
- [Mar16] MARTIN, Thalhammer: Snapshots of a Quantum Bouncing Ball within the qBounce project. In: *PSI* (2016)
- [Nes02] NESVIZHEVSKY, u.a.: Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field. In: *Nature*, 415:229-297 (2002)

- [Phy11] *PZ195E User Manual - E-711/E-712 Modular Digital*. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG , Auf der Römerstraße 1, 76228 Karlsruhe, Germany, 2011
- [Ram13] RAMSEY, N.F.: The method of successive oscillatory fields. In: *Physics Today*, 66:36-41 (2013)
- [Rie04] RIEHLE, Fritz: *Frequency Standards - Basics and Applications*. 2004
- [Sau11] SAUL, Haiko: *Weiterentwicklung des Detektor und Auslesekonzepts für das Gravitationsexperiment qBounce*, TU Wien, Diplomarbeit, 2011
- [Sch17] SCHMIDT, Dipl.-Phys. P.: *Studien zur Ramsey-Spektroskopie ultrakalter Neutronen im Rahmen des qBounce-Experiments*, Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2017
- [Sta09] STADLER, David: *Dynamik ultrakalter Neutronen im Gravitationsfeld der Erde*, Universität Heidelberg, Diplomarbeit, 2009