

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von

Jochen Krempel

aus Heidelberg

August 2004

Optimierung und Durchführung einer β -Asymmetriemessung im Zerfall polarisierter Neutronen



Die Diplomarbeit wurde von

JOCHEN KREMPEL

ausgeführt am

Physikalischen Institut der Universität Heidelberg

unter der Betreuung von

PRIV.-DOZ. DR. HARTMUT ABELE.

August 2004

2. Auflage

Zusammenfassung

Optimierung und Durchführung einer β -Asymmetrie- messung im Zerfall polarisierter Neutronen

In dieser Arbeit wird der Aufbau und die Durchführung eines Experiments zur Bestimmung der β -Asymmetrie A beschrieben. Dabei wird der 1 T Magnet *PERKEO II* verwendet, um den Zerfall polarisierter, kalter Neutronen zu untersuchen. Das Experiment wurde am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble durchgeführt.

Nach einer Verbesserung des Polarisationsgrades der Neutronen stellt der Untergrund den größten Beitrag zum Fehler der Asymmetrie A dar. Um die Präzision des Experiments zu erhöhen, wurde insbesondere der Untergrund optimiert. Deshalb wurden beträchtliche Anstrengungen unternommen und Tests durchgeführt, um die Untergrundquellen effektiv abzuschirmen. Im Fall schneller Neutronen, die im Kollimationssystem und am Beamstop entstehen, wurden diese Untersuchungen erstmals quantitativ durchgeführt.

Weiterhin werden einige Punkte ausführlich dargestellt, die die Vorbereitung und Durchführung der Messung erheblich erleichtern: Die Methode der Kupferfolien-Aktivierung zur Bestimmung von Neutronenstrahlprofilen wurde erstmals explizit untersucht. Außerdem werden Messungen zur Detektorfunktion vorgestellt und Anleitungen zur Herstellung von ${}^6\text{LiF}$ -Kacheln und zur Steuerung des Experiments gegeben.

Abstract

Optimization and Execution of a Measurement of the β -Asymmetry in Polarized Neutron Decay

This work describes the setup and measurement of the β -asymmetry A . The 1 T magnet *PERKEO II* is used to examine the decay of polarized, cold neutrons. The experiment was done at the Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble.

Especially the background was optimized to increase the precision of the experiment, since this is the main contribution to the error of the asymmetry A after a considerable improvement of the polarization degree. Therefore tests were performed to find the background sources and to shield them effectively. Concerning fast neutrons, which are generated in the collimation system and the beamstop, quantitative measurements are presented for the first time.

Some topics concerning the preparation and execution of the measurement are discussed: The copper activation method to obtain the profile of a neutron beam was examined in detail. Furthermore measurements on the detector function are presented and manuals to produce ${}^6\text{LiF}$ -tiles and to control the instrument are given.

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick	3
1.1	Standardmodell	3
1.1.1	Elektroschwache Wechselwirkung und Zerfall des Neutrons	3
1.1.2	Unitarität der CKM-Matrix	5
1.2	Messprinzip	5
1.3	Experimenteller Aufbau	7
2	B-n-Scans	9
2.1	Physikalische Motivation	9
2.2	Kupferfolien-Aktivierung	10
2.2.1	Experimentelle Vorgehensweise	10
2.2.2	Linearität und Homogenität des Verfahrens	11
2.2.3	Profil und Position des Neutronenstrahls	13
2.3	Vermessen des Magnetfeldes	13
2.4	Ergebnis	14
3	Untergrundoptimierung	17
3.1	Primäre Untergrundquellen	17
3.2	Prinzip der Untergrundmessung	18
3.3	Materialien zum Neutroneneinfang	18
3.4	Streuneutronen	19
3.5	Schnelle Neutronen	20
3.5.1	Abschirmbarkeit	21
3.5.2	Aufbau in PERKEO	23
3.5.3	Abschirmwirkung	23
3.6	Gammastrahlung	24

3.6.1	Herkunft	24
3.6.2	Abschirmung in PERKEO	25
3.7	Untergrundmessungen	25
3.8	Fazit	27
4	Detektorfunktion	28
4.1	Aufbau	28
4.2	Ortsabhängigkeit	28
5	Zusammenfassung	30
A	Lithiumfluorid Kacheln	34
A.1	Zweck/Zielsetzung	34
A.2	Dicke	34
A.3	Die Idee zur Herstellung	35
A.4	Hilfsmittel	35
A.5	Herstellungsprozess	38
A.6	Verarbeitung	40
A.7	Alternative Ideen	40
A.8	Hinweise	42
A.9	Fazit	42
B	Motorsteuerung	43
B.1	Programm-Philosophie	43
B.2	isel-Schrittmotoren	43
B.3	Messcontroller	44
B.4	Steuerprogramm	44
B.5	Karussell	50
B.6	Shutter-UP	51
B.7	Shutter-DOWN/-BS	52
B.8	Stromausfall	52
B.9	Bug Liste	53
	Literaturverzeichnis	54
	Danksagung	57

Kapitel 1

Überblick

Mit dem hier vorgestellten *PERKEO II*-Experiment wird im Zerfall des freien Neutrons die Winkelkorrelation zwischen dem Spin des Neutrons und dem Impuls des entstehenden Elektrons gemessen. Bei einem früher durchgeführten Experiment ([Rei99]) war eine $2,7\sigma$ Abweichung vom Standardmodell festgestellt worden. Jetzt soll mit kleinerem Fehler diese Abweichung bestätigt oder widerlegt werden.

Da die theoretischen Aspekte bereits in früheren Arbeiten (unter anderem [Schu04]) mehr oder minder ausführlich dargestellt wurden, gibt dieses Kapitel nur einen kurzen Überblick darüber. Die Bedeutung der β -Asymmetrie wird erläutert und der experimentelle Aufbau vorgestellt.

In Kapitel 2 wird die Ausrichtung des *PERKEO II*-Magnetfeldes am Neutronenstrahl beschrieben und die dafür benutzte neue Methode charakterisiert. Kapitel 3 stellt detailliert die Anstrengungen dar, die unternommen wurden, um den Untergrund zu reduzieren, da dieser der größte Fehlereinfluss auf das Messergebnis ist. Über die Ortsabhängigkeit des Detektors wird in Kapitel 4 berichtet. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen.

In Anhang A wird eine Anleitung zur Herstellung von LiF-Kacheln gegeben, die für die Untergrundoptimierung des Experiments unabdingbar sind. Ein Programm zur automatisierten Motorsteuerung wird in Anhang B erläutert.

1.1 Standardmodell

1.1.1 Elektroschwache Wechselwirkung und Zerfall des Neutrons

Die elektroschwache Vereinheitlichung geht auf Glashow [Gla61], Weinberg [Wei67] und Salam [Sal68] zurück. In dieser Eichtheorie werden die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung aus der Gruppe $SU(2) \times U(1)$ mit vier Eichbosonen (W^+ , W^- , Z^0 und γ) und zwei Kopplungskonstanten (e , g) hergeleitet.

Die rechtshändigen $SU(2)$ -Singulets wechselwirken nicht schwach miteinander. Die $SU(2)$ -Dubletts sind linkshändige Fermionen und existieren in drei Generationen als Leptonen und Quarks:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

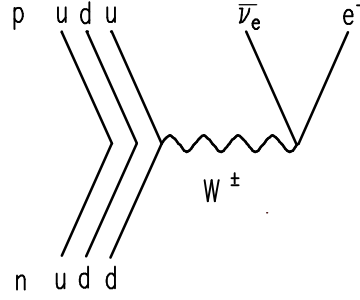


Abbildung 1.1: Feynmandiagramm für den Neutron- β -Zerfall.

Ein Teilchen kann unter Emission eines W^\pm -Bosons in seinen Dublett-Partner übergehen. Um Übergänge zwischen den verschiedenen Quarkgenerationen zu erklären, wird jeder der „unteren“ (d , s und b) Dublett-Partner als Linearkombination aller unteren aufgefasst. Diese Transformation wird durch die unitäre Cabibbo-Kobayashi-Maskawa- oder CKM-Matrix beschrieben:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

Der β -Zerfall des Neutrons: Das freie Neutron besteht aus der Quarkkombination udd und zerfällt nach $\tau = 885,7 \pm 0,8$ Sekunden [PDG04] in Proton (uud), Elektron und Antineutrino. Der elementare Prozess ist dabei der Übergang eines d zum u Quark, wie in Abbildung 1.1 dargestellt.

Die zugehörige Lagrangefunktion lautet¹:

$$\mathcal{L} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ud} \left(\bar{\mathbf{p}} \gamma^\mu (1 + \lambda \gamma_5) \mathbf{n} \right) \left(\bar{e} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu_e \right), \quad (1.3)$$

wobei G_F die Fermikonstante ist, V_{ud} das erste Element der CKM-Matrix. \mathbf{n} und ν_e sind Dirac-Spinoren für Neutron und Antineutrino, $\bar{\mathbf{p}}$ und \bar{e} adjungierte Spinoren für Proton und Elektron. Schwacher Magnetismus und Strahlungskorrekturen werden hier berücksichtigt.

$1 \pm \gamma_5$ beschreibt die Paritätsverletzung, wie sie bei der schwachen Wechselwirkung auftritt. Der Faktor $\lambda \equiv \frac{g_A}{g_V}$ ist der Quotient aus Axialvektor- und Vektor-Kopplungskonstante. Er trägt der inneren Struktur des Neutrons Rechnung.

Da G_F aus der Lebensdauer des Myons bekannt ist, wird der Neutronenzerfall im Standardmodell durch die zwei Parameter V_{ud} und λ vollständig beschrieben.

Für polarisierte Neutronen erhält man aus der Lagrangefunktion die differentielle Zerfallswahrscheinlichkeit² [Jac57]:

$$d\omega \propto G_F^2 |V_{ud}|^2 f(E_e) (g_V^2 + 3g_A^2) dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu \left(1 + \langle \mathbf{s}_n \rangle \left[A \frac{\mathbf{p}_e}{E_e} + B \frac{\mathbf{p}_\nu}{E_\nu} \right] + \dots \right). \quad (1.4)$$

¹Gilt nur unter der für den Neutronenzerfall zutreffenden Annahme, dass der Impulsübertrag klein gegenüber der W -Boson-Masse ist.

²In dieser Kurzfassung sind nur die mit *PERKEO II* gemessenen Observablen berücksichtigt.

E_e und E_ν sind die Energien von Elektron und Antineutrino. A ist der Winkelkorrelationskoeffizient zwischen Neutronspin $\langle \mathbf{s}_n \rangle$ und Elektronimpuls \mathbf{p}_e (auch Elektronen- oder β -Asymmetrie genannt), B zwischen $\langle \mathbf{s}_n \rangle$ und Neutrinoimpuls \mathbf{p}_ν (Neutrinoasymmetrie). $f(E_e) \approx \mathbf{p}_e E_e (E_0 - E_e)^2$ ist das Elektron-Energiespektrum, das durch den Phasenraum bestimmt ist und mit Rückstoß sowie Strahlungs-Korrekturen ergänzt wird. $E_0 = 781,57$ keV ist dabei die maximale kinetische Energie des Elektrons. Weitere Koeffizienten sind hier nicht aufgeführt, da sie bei der verwendeten Konfiguration keinen Einfluss haben.

Im Standardmodell gelten zwischen den Korrelationskoeffizienten und λ folgende Beziehungen:

$$A = -2 \frac{|\lambda|^2 + \operatorname{Re}(\lambda)}{1 + 3|\lambda|^2} \quad (1.5)$$

$$B = 2 \frac{|\lambda|^2 - \operatorname{Re}(\lambda)}{1 + 3|\lambda|^2}. \quad (1.6)$$

Die Bestimmung von λ geschieht in diesem Experiment über die Messung der (Elektronen-) β -Asymmetrie A .

1.1.2 Unitarität der CKM-Matrix

Im Standardmodell muss die CKM-Matrix unitär sein. Von verschiedenen Unitaritätsbedingungen ist derzeit die Summe der ersten Zeile von besonderem Interesse [CKM03]:

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1. \quad (1.7)$$

Die absoluten Fehler der drei V_{ij} dieser ersten Zeile sind im Vergleich zu anderen relativ klein. Daher konnte die letzte *PERKEO II*-Messung unter Verwendung des Weltmittelwertes der Neutronenlebensdauer sowie Messungen von V_{us} und V_{ub} aus Kaon-, Hyperon- bzw. B-Zerfällen hier eine Abweichung von $2,7\sigma$ von der Unitarität feststellen [Abe02].

1.2 Messprinzip

Ein Strahl polarisierter Neutronen wird durch ein transversales Magnetfeld (1 Tesla) geleitet. In diesem zerfallen aufgrund ihrer endlichen Lebensdauer einige Neutronen (ca. 300s^{-1}). Die entstehenden geladenen Zerfallsprodukte (Elektronen und Protonen) können sich nur entlang der Magnetfeldlinien bewegen (maximaler Gyrationradius ca. 4 mm). Dies hat den Vorteil, dass alle Elektronen³ zu den Detektoren gelangen, die sich seitlich vom Strahl befinden. Außerdem ergibt sich eine klare Trennung der Halbräume: parallel und antiparallel zum Neutronenspin. Daher sind keine komplizierten Raumwinkelkorrekturen erforderlich. Abbildung 1.2 verdeutlicht den Aufbau.

Der Neutronenstrahl wird mit Hilfe zweier Superspiegel-Polarisatoren in gekreuzter Geometrie polarisiert [Pet02]. Ein Radiofrequenz-Spinflipper ermöglicht es, den Spin umzukehren. Damit kann, durch Vergleich der Elektronenzählrate eines Detektors mit und ohne Spinflipper, die

³Die Protonen erreichen ebenfalls den Detektor, haben aber eine kleine kinetische Energie und können daher wegen der hohen Detektor-Energieschwelle mit dieser Konfiguration nicht erfasst werden (Vergleiche [Rei99]).

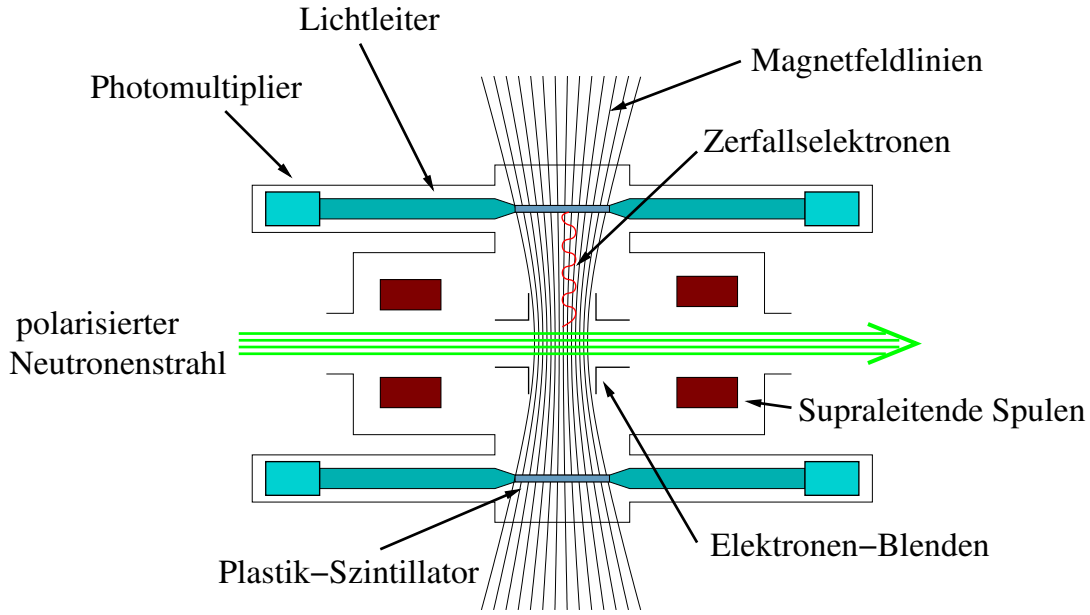


Abbildung 1.2: Schemazeichnung des *PERKEO II*-Spektrometers. Der Gyrationradius ist übertrieben dargestellt. Die Elektronen-Blenden definieren die Länge des Zerfallsvolumens.

Asymmetrie bestimmt werden. Es werden Detektoren auf beiden Seiten verwendet, um die Statistik zu verdoppeln, um rückgestreute Elektronen zu erfassen und um allgemein die Systematik der Messung zu verbessern.

Aus der Zählrate eines Detektors erhält man direkt die experimentelle Elektronenasymmetrie:

$$A_{\text{exp}} = \frac{N^{\uparrow} - N^{\downarrow}}{N^{\uparrow} + N^{\downarrow}}, \quad (1.8)$$

wobei die Pfeile den unterschiedlichen Spinflipperstatus symbolisieren. Der experimentelle Wert muss noch mit der Polarisation $P = \langle \mathbf{s}_n \rangle$ des Neutronenstrahls und der Effizienz \mathcal{F} des Spinflippers korrigiert werden, um die tatsächliche Asymmetrie zu erhalten:

$$A_{\text{exp}} = \frac{1}{2} \frac{v_e}{c} A P \mathcal{F}. \quad (1.9)$$

Verschiedene 1%-Korrekturen wie Proton-Rückstoß, schwacher Magnetismus, magnetischer Spiegeleffekt und einige Interferenzterme müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

Beim Messen der Asymmetrie A wird über alle Neutrinoimpulse gemittelt, daher ergibt sich die Winkel und Energieverteilung des Elektrons zu:

$$d\omega \propto f(E_e) \left(1 + A \frac{v_e}{c} \cos \theta_e \right) dE_e d\Omega_e, \quad (1.10)$$

wobei θ_e der Emissionswinkel des Elektrons bezüglich der Polarisationsrichtung der Neutronen ist. Die Integration über den jeweiligen gesamten Halbraum nach $d\Omega_e$ liefert einen Faktor $\langle \cos \theta \rangle = \frac{1}{2}$. Dies ist die einzige Raumwinkelkorrektur, die bei *PERKEO II* notwendig ist!

Die Lebensdauer τ des Neutrons ist nach Integration der Zerfallswahrscheinlichkeit für unpolarisierte Neutronen gegeben durch

$$\omega = \frac{1}{\tau} = C |V_{ud}|^2 (1 + 3\lambda^2) (1 + \Delta_R) f^R, \quad (1.11)$$

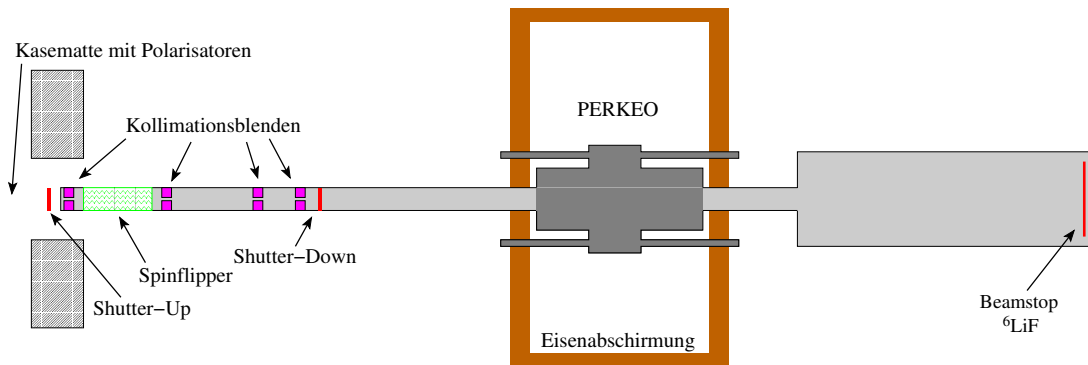


Abbildung 1.3: PERKEO II 2004 - schematischer Gesamtaufbau

wobei Δ_R eine innere Strahlungskorrektur ist. f^R ist das integrierte Energiespektrum mit Rückstoß- und äußeren Strahlungskorrekturen. Da in C nur Naturkonstanten zusammengefasst sind und λ mit Hilfe von Gleichung 1.5 aus A berechnet werden kann, benötigt man außer A nur die Lebensdauer τ , um V_{ud} anzugeben (nach [Abe03]):

$$|V_{ud}|^2 = \frac{4908 \pm 4s}{(1 + 3\lambda^2) \tau}. \quad (1.12)$$

1.3 Experimenteller Aufbau

Die Neutronen werden polarisiert, nachdem der Strahl den vom Reaktor kommenden Neutronenleiter verlassen hat. Dies geschieht mit zwei Super-Spiegel-Polarisatoren, die sich wegen der dabei entstehenden Strahlung in der Kasematte – einem besonders stark abgeschirmten Raum – befinden. Sie werden, um Luftstreuung zu reduzieren, permanent mit Helium gespült. Der weitere Aufbau ist in Abbildung 1.3 dargestellt: Nach Passieren des Shutter-UP, einem Strahlunterbrecher der zur Untergrundmessung dient, treten die Neutronen in das Vakuumsystem ein (zur Vermeidung von Streuung an Luft; Druck $< 10^{-5}$ mbar). Die Kollimationsblenden allein definieren die spätere Höhe und Breite des Zerfallsvolumens. Hinter der ersten Blende befindet sich der Spinflipper. Der Shutter-Down, ein weiterer Strahlunterbrecher, dient der systematischen Untersuchung des Untergrundes, der durch das Kollimationssystem erzeugt wird. Dann folgt der eigentliche PERKEO II-Aufbau, die supraleitenden Magnetfeldspulen und das Detektorsystem, wie in Abbildung 1.2 verdeutlicht. Die in 1.3 dargestellte Eisenabschirmung⁴ ist zur Magnetfeld-Rückführung notwendig.

Der Beamstop ist so weit hinten wie möglich aufgebaut, um als unvermeidliche Untergrundquelle eine maximale Distanz zu den Detektoren zu haben. Hinter dem Beamstop dient ein weiterer Polarisator⁵ und ein Neutronendetektor zur Dokumentation der konstanten Polarisation während der gesamten Strahlzeit. Entlang der gesamten Beamline befinden sich Magneten, die mit einem Mindestführungsfeld von 0,7 mT die Depolarisation des Strahls verhindern. Lediglich im Bereich

⁴Weicheisen wäre für den Zweck geeignet, tatsächlich wurde aus statischen Gründen Baustahl verwendet.

⁵Ein Loch im Beamstop, dass mit dem Shutter-BS verschlossen werden kann, ermöglicht es, täglich die Polarisation zu messen, ohne während den A-Messungen durch den Untergrund des Polarisators gestört zu werden.

um *PERKEO II* kann darauf verzichtet werden: Trotz Eisenabschirmung beträgt das Feld in 1,5 m Entfernung noch 1 mT.

Innerhalb von *PERKEO II* befindet sich auf der einen Seite des Zerfallsvolumens ein Eichkarrussell mit mehreren radioaktiven β -Quellen. Es dient zur Energiekalibrierung der Detektoren. Weiter Informationen befinden sich im Anhang B. Auf der anderen Seite befindet sich ein YZ-Scanner zum Vermessen der Ortsabhängigkeit der Detektoren – näheres dazu in Kapitel 4.

Im Beamstop und um den gesamten Aufbau befindet sich sehr viel Polyethylen, Bor und Blei. Damit wird der selbstproduzierte Untergrund reduziert, aber auch der von Nachbarexperimenten. In Kapitel 3 wird darauf explizit eingegangen.

Die Messung fand am Strahplatz PF1b des Instituts Laue-Langevin (ILL) in Grenoble, Frankreich, statt. Die Polarisatoren und das Kollimationssystem wurden im Oktober und November 2003 eingerichtet [Schu04]. Die Ausrichtung des Magneten, eine detaillierte Polarisationsmessung und erste Untergrundabschirmungen wurden im ersten Reaktorzyklus 2004 (Februar bis April) durchgeführt. Die endgültige Untergrundoptimierung und Datennahme erfolgte im zweiten Zyklus 2004 (April bis Juni). Im dritten Reaktorzyklus (Juni bis August) wird mit einer geänderten Detektoranordnung (ähnlich zu [Krz04]) die Neutrinoasymmetrie B gemessen.

Kapitel 2

B-n-Scans

Dieses Kapitel beschreibt die Ausrichtung des *PERKEO II*-Magnetfeldes \mathbf{B} an den Neutronenstrahl \mathbf{n} . Dabei wird das Strahlprofil per Kupferfolienaktivierung vermessen, die Magnetfeldposition mit einer Hallsonde.

2.1 Physikalische Motivation

Das *PERKEO II*-Magnetfeld wird von zwei supraleitenden Spulen erzeugt. Seine Hauptkomponente B_x ¹ verläuft horizontal und steht senkrecht zum Neutronenstrahl. Die Spulen stehen parallel wie in einer Helmholtz-Anordnung, haben verglichen dazu jedoch einen geringeren Abstand. Dadurch erhält das Feld in seiner Hauptkomponente $B_x(x)$ ein leichtes Maximum, das verhindert, dass geladene Teilchen (insbesondere Elektronen) zu lange im Zerfallsvolumen verbleiben. Allerdings können niederenergetische Zerfallselektronen, die neben dem Maximum entstehen, eventuell nicht mehr das Magnetfeldpotential überqueren und werden reflektiert (magnetischer Spiegeleffekt [Bae96]). Daraus resultiert eine Korrektur auf den A -Wert. Um so wichtiger ist es, das Magnetfeld, welches raumfest zu den *PERKEO II*-Spulen und damit auch zur Eisenabschirmung steht, exakt symmetrisch zum Zerfallsvolumen, das in Breite und Höhe durch das Kollimationssystem definiert wird, auszurichten. Dies erfordert einen großen Aufwand, da die Spulen samt Eisenabschirmung eine Masse von etwa 20 t haben und nur mit Hilfe von Luftkissen bewegt werden können.

Zuvor muss die räumliche Neutronenverteilung im Bereich des Zerfallsvolumens gemessen werden, ebenso das dortige Magnetfeld.

Begonnen wird mit einer Vorjustierung an einem Laser, der bereits vor Installation des Kollimationssystems auf den Neutronenstrahl ausgerichtet wurde (siehe [Schu04, Kap 6.2.1]). Da auch die Kollimationsblenden an diesem Laser ausgerichtet sind, repräsentiert er sehr gut die tatsächliche Strahlmitte. Mit diesem Laserstrahl wird die Position einer in drei Raumrichtungen verfahrbaren Magnetfeldsonde geeicht. Eine ebenfalls mit dem Laser senkrecht zum Neutronenstrahl positionierte Kupferfolie wird von den Neutronen aktiviert und danach mit Hilfe eines

¹Im *PERKEO II* Koordinatensystem entspricht die z -Achse der Neutronenflugrichtung. Die y -Achse zeigt nach oben. Um das rechtshändige System zu vervollständigen, zeigt die x -Achse aus Neutronensicht nach links (entspricht „Vercors“ in der Experimentierzone).

Imageplates digital ausgelesen. So lässt sich das Strahlprofil relativ zum Magnetfeld ermitteln. Die Magnetfeld-Messungen werden in Abschnitt 2.3 näher erläutert.

2.2 Kupferfolien-Aktivierung

Natürliches Kupfer besteht aus den Isopen ^{63}Cu (69,2 %) und ^{65}Cu (30,8 %). Unter Neutronenbeschuss entstehen durch Aktivierung die Isotope ^{64}Cu und ^{66}Cu mit einer Lebensdauer von $\tau_{\text{Cu}} = 18,3$ Stunden beziehungsweise $\tau_{\text{Cu}}^* = 7,39$ Minuten. Die Strahlung einer aktivierten Kupferfolie kann mit einem Imageplate ortsauflösend aufgezeichnet werden.

Das Imageplate ist ähnlich einem Röntgenfilm eine strahlungssensitive Platte, die jedoch digital ausgelesen² werden kann. Außerdem kann das Imageplate durch Beleuchtung mit intensivem Licht „gelöscht“ werden und ist somit wiederverwendbar.

Wie in Abschnitt 2.2.2 gezeigt wird, ist somit eine quantitative Bestimmung des Strahlprofils möglich.

2.2.1 Experimentelle Vorgehensweise

Beim Einbau der Kupferfolie ist darauf zu achten, dass sie senkrecht zum Strahl steht und faltenfrei sowie plan bleibt, um eine homogene effektive Dicke der Folie zu erhalten. Für einen Referenzpunkt auf der Folie (beispielsweise zu einem Laser) muss die Folie mit einem Loch markiert werden, das innerhalb des Strahlprofils liegt. Dieses Loch wird später keine Zerfallstrahlung abgeben und ist somit nach dem Auslesen deutlich erkennbar. Ist die Ausrichtung der Folie von Interesse und nicht bereits anders kenntlich (z.B. Blenden), muss ein zweites Loch verwendet werden. Es ist möglich, die Stellen anders zu markieren, und die Löcher erst nach dem Aktivieren zu stanzen. Vor dem Aktivieren kann die Beamline evakuiert werden, wenn eine Veränderung des Profils durch Luftstreuung vermieden werden soll, oder wenn dies bei einem starken Strahl aus Strahlenschutzgründen erforderlich ist.

Nach dem Aktivieren (in der verwendeten Konfiguration lieferten 40 Minuten gute Ergebnisse) wird die Kupferfolie ausgebaut und in einem verdunkelten Raum mit ihr ein frisch gelöscht Imageplate belichtet. Nur eine Seite (die weiße) des Imageplates ist lichtempfindlich³, daher empfiehlt sich die Reihenfolge Unterlage–Kupferfolie–Imageplate (weiße Seite nach unten), so wird ein versehentliches Löschen des Imageplates während des Belichtens vermieden.

Nach dem Belichten wird das Imageplate lichtgeschützt zum Scanner transportiert und dort sofort ausgelesen. Die Daten können digital weiterverarbeitet werden. Durch das Auslesen wird das Imageplate bereits teilweise gelöscht, daher ist mehrfaches Auslesen zwar möglich, die Daten sind jedoch verfälscht.

²Scanner „STORM 820“ von „molecular dynamics“; verwendete Auflösung: 0,2 mm.

³Die einseitige Lichtempfindlichkeit bezieht sich nur auf den Löschvorgang mit UV-/sichtbarem Licht. Gamma- und Beta-Strahlung können das Imageplate durchdringen, daher wäre auch ein Belichten von der Rückseite möglich.

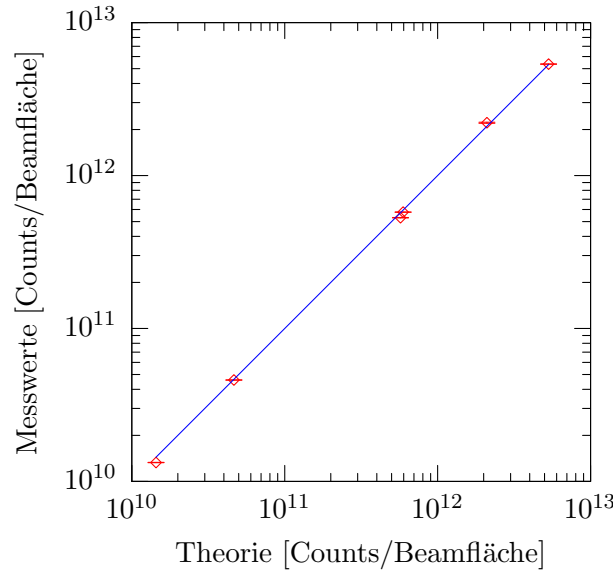


Abbildung 2.1: Linearitätstest: Aufgetragen sind die realen Messwerte gegen ihren erwarteten Wert. Die Fehler sind zu klein, um sichtbar zu sein. Für die Messungen wurde über den gesamten Strahlquerschnitt summiert. Die Linearität ist ausreichend, die maximale Abweichung vom jeweils erwarteten Wert beträgt 9 %.

2.2.2 Linearität und Homogenität des Verfahrens

Da diese Methode erstmalig von der *PERKEO II*-Gruppe angewandt wurde und auch am ILL noch nie ein Linearitätstest bei vergleichbarem Neutronenfluss ($5 \cdot 10^8 \frac{\text{Neutronen}}{\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}}$) stattfand, wurde dieser im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt. Die Aktivität der Kupferfolie⁴ sollte nach der Neutronenbestrahlung proportional zu Foliendicke und -dichte sein, ebenso zur Zahl der absorbierten Neutronen und somit bei zeitlich konstantem Fluss zur Bestrahlungszeit t_A .

Nach der Aktivierung des Kupfers klingt dessen Strahlung exponentiell ab. Während der Belichtungszeit t_L integriert das Imageplate über diese Strahlung. Die Abklingzeit t_K vor dem Belichten wird bewusst groß gewählt, so dass die kurzlebige Komponente (^{66}Cu) nicht mehr vorhanden ist. Dies geschieht, um den Einfluss der Ungenauigkeit der Belichtungszeit ($\Delta t_L \approx 5 \text{ s}$) auf den Fehler der Gesamtintensität gering zu halten.

Die Gesamtintensität I des Imageplate ist:

$$\begin{aligned} I &= N_{\text{Bg}} t_L + \int_{t_K}^{t_K+t_L} C t_A e^{-t/\tau_{\text{Cu}}} dt \\ &= N_{\text{Bg}} t_L + C \frac{t_A}{\tau_{\text{Cu}}} \left(-e^{-(t_K+t_L)/\tau_{\text{Cu}}} + e^{-t_K/\tau_{\text{Cu}}} \right), \end{aligned} \quad (2.1)$$

wobei N_{Bg} der Strahlungsuntergrund pro Zeit und Imageplatefläche ist. Dass dieser Untergrund schon innerhalb von fünf Minuten nach Löschen des Imageplates ohne jede Belichtung messbar ist, verdeutlicht die Sensitivität des Imageplates und des Scanners. In einer 24-Stunden-Messung wurde

$$N_{\text{Bg}} = (8,212 \pm 0,03) \frac{\text{Counts}}{\text{Pixel Sekunde}} = (2268600 \pm 9200) \frac{\text{Counts}}{\text{Beamfläche Sekunde}}$$

⁴„Kupferfolie CU000550“ von „Goodfellow“ Dicke: $75 \mu\text{m} \pm 10\%$, Reinheit $> 99,99\%$; www.goodfellow.com.

bestimmt. Der Skalierungsfaktor C hängt von Imageplate, Scanner, Folie und Neutronenfluss ab. Abgesehen vom Untergrund ist die Gesamtintensität also proportional zum Gesamtfluss der Neutronen in Strahl.

Zur Verifikation, dass die Kupferfolien, das Imageplate und der Auslesemechanismus dieser Theorie entsprechen, wurden mehrere Kupferfolien verschieden lang aktiviert (10–40 Minuten). Nach unterschiedlichen Abklingzeiten (1,2–120 Stunden) wurde das Imageplate verschieden lang belichtet (10–70 Minuten) und sofort ausgelesen. Unmittelbar vor dem Belichten war es jeweils 10 Minuten gelöscht worden.

Von den erhaltenen Datensätzen wurde immer eine Fläche von 641×431 Pixeln (entspricht $128,2 \times 86,2 \text{ mm}^2$) betrachtet, die den Neutronenstrahl vollständig umfasste. Die Counts aller Pixel wurden aufsummiert und mit der Erwartung aus Gleichung (2.1) verglichen. Der Skalierungsfaktor $C = (6.68 \pm 0,12) \cdot 10^{15} \frac{\text{Counts}}{\text{Beamfläche}}$ wurde per Least-Squares-Fit ermittelt. Das Resultat ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die maximale Abweichung eines Messpunktes vom erwarteten Wert beträgt 9% über 3 Größenordnungen. Damit ist das Gesamtsystem Folie-Imageplate-Scanner ausreichend linear.

Bei den Messungen wurde immer das gleiche Imageplate benutzt. Ob der Skalierungsfaktor auch für andere Imageplates gilt oder stets neu berechnet werden muss, wurde nicht geprüft. Ein Abnutzungseffekt des Imageplates, etwa ein Ausbleichen durch die Löschvorgänge, konnte nicht beobachtet werden.

Die Homogenität der Dicke und Dichte der verwendeten Folien konnte durch verschiedene Orientierungen der verwendeten Kupferfolien bei stets gleichem Messergebnis im Rahmen der gegebenen Linearität nachgewiesen werden.

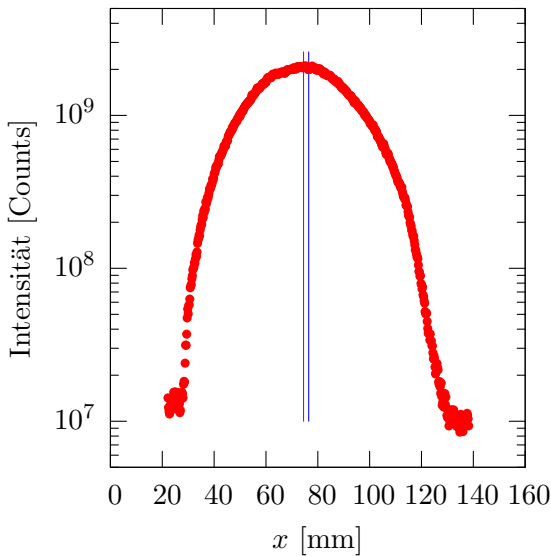


Abbildung 2.2: Horizontales Strahlprofil im Zerfallsvolumen. Zur Berechnung wurde über die gesamte Strahlhöhe summiert. Die rote Gerade markiert den Schwerpunkt des Strahls, die blaue die Position des Lasers.

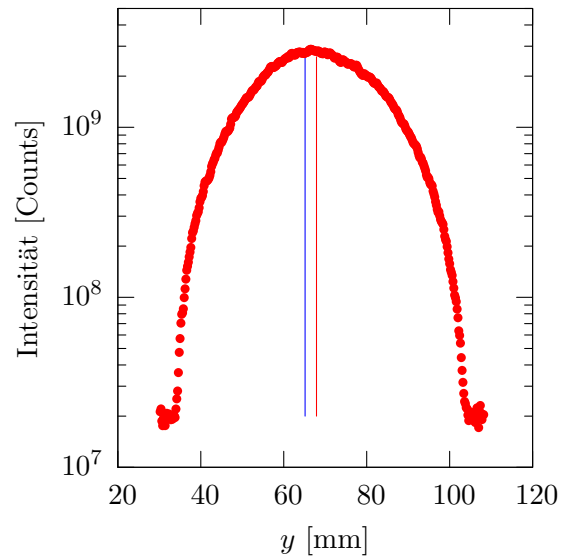


Abbildung 2.3: Vertikales Strahlprofil im Zerfallsvolumen. Zur Berechnung wurde über die gesamte Strahlbreite summiert. Die rote Gerade markiert den Schwerpunkt des Strahls, die blaue die Position des Lasers.

2.2.3 Profil und Position des Neutronenstrahls

Wichtiger als das exakte Profil des Strahles ist seine Symmetrie beziehungsweise die horizontale Position des Schwerpunktes. Für dessen Ermittlung wurde über die gesamte Höhe des Strahls summiert und anhand dieses Profils (Abbildung 2.2) der Schwerpunkt errechnet.

Um einen Referenzpunkt zu haben, wurde ein Loch mit etwa 0,5 mm Durchmesser in die Folie gestanzt. Mit diesem wurde die Folie an einem Laser ausgerichtet. Da an dieser Stelle das Imageplate nicht belichtet wird, ist das Loch im gemessenen Strahlprofil deutlich erkennbar. Es befand sich $(-1,5 \pm 0,3)$ mm rechts (aus Neutronensicht) vom Strahlschwerpunkt. Analog wurde der vertikale Strahlschwerpunkt $(2,8 \pm 0,6)$ mm oberhalb des Lasers gefunden (siehe Abbildung 2.3).

2.3 Vermessen des Magnetfeldes

Das *PERKEO II*-Magnetfeld wird von zwei 54 mm breiten, supraleitenden Spulen mit 1010 mm Außen- und 890 mm Innendurchmesser im Abstand (Mitte zu Mitte) von 364 mm erzeugt. Im Zentrum des Zerfallsvolumen besitzt das Feld einen Sattelpunkt: Entlang der Feldhauptkomponente (orthogonal zum Strahl) ein Maximum, in Strahlrichtung und in der Vertikalen jeweils Minima.

Entscheidend ist, die x -Position des Maximums zu finden und mit dem Strahlschwerpunkt zu synchronisieren.

Für die Messung wurde eine dreidimensionale Hallsonde⁵ verwendet, die mit Schrittmotoren in alle drei Raumrichtungen verfahren werden konnte, um das Feld abzurastern.

Zur Charakterisierung des Feldes wurde jeweils eine Parabel an die Daten einer zur x -Achse parallelen Geraden gefittet (Abbildung 2.4). Die Maximumpositionen dieser Parabeln wurden für alle jeweiligen y -Werte gemittelt und gegen die x -Position aufgetragen (Abbildung 2.5).

Der Magnet wurde so lange gedreht und verschoben, bis die Maxima für alle y -Positionen mit dem Neutronenschwerpunkt übereinstimmten.

Die Magnetfeldsonde wurde dabei an dem bereits für die Kupferfolienaktivierung verwendeten Laser ausgerichtet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass in der Sonde das für die Messung relevante Hallplättchen asymmetrisch zum Gehäuse sitzt. Daher wurde eine Vergleichsmessung aufgenommen, bei der die Sonde um 180° gedreht war (siehe Abbildung 2.5). Dadurch ließen sich auch eventuelle Einflüsse auf die Maximumbestimmung durch eine Verkippung der Sonde ausschließen. Laut Datenblatt befindet sich das Hallplättchen 1,83 mm vom Symmetriepunkt entfernt, ein Wert, der mit unseren Messungen sehr gut verträglich ist:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (x_{\max, \text{aufrecht}} - x_{\max, \text{gedreht}}) &= \frac{1}{2} \left[(0,91 \pm 0,5) \text{ mm} - (-2,94 \pm 0,5) \text{ mm} \right] \\ &= 1,93 \pm 0,35 \text{ mm} . \end{aligned} \quad (2.2)$$

Der Versatz des Magnetfeldes relativ zum Laser (mit dem die Sondenmitte geeicht war) ist

$$\frac{1}{2} (x_{\max, \text{aufrecht}} + x_{\max, \text{gedreht}}) = (-1,02 \pm 0,35) \text{ mm} . \quad (2.3)$$

⁵„Gaussmeter 9900 Series“ von „F.W. Bell“; www.fwbell.com.

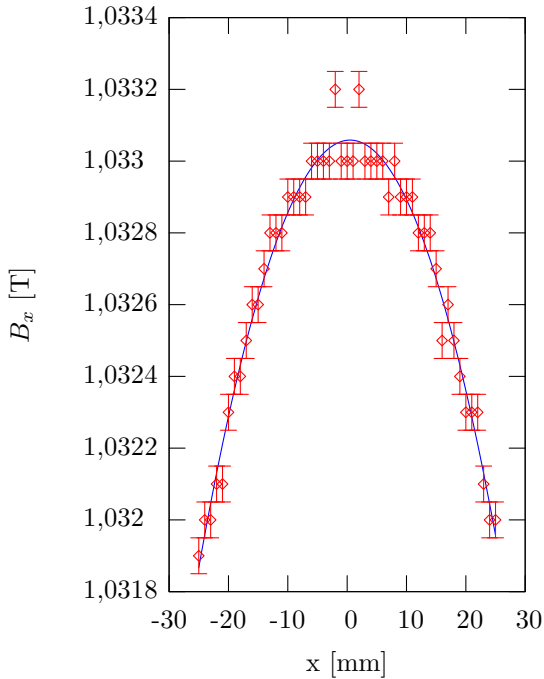


Abbildung 2.4: Das Magnetfeld bei $y=0$ und $z=0$ und eine angefitzte Parabel. Die grobe Auflösung der Hallsonde ist erkennbar.

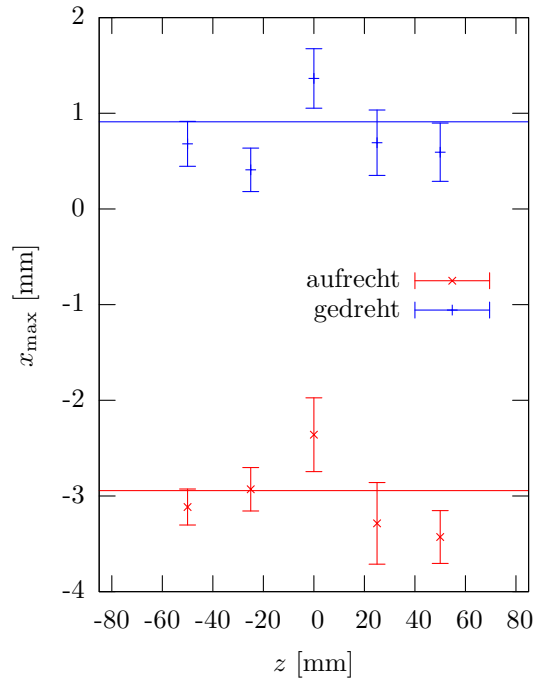


Abbildung 2.5: Per Parabel-Fit ermittelte Maxima des Magnetfeldes in x -Richtung. Über die y -Richtung wird gemittelt.

Das Gaussmeter hat eine Auflösung 5 Bit. Dies ist ausreichend, um das Feldmaximum zu finden. Aber wie Abbildung 2.4 verdeutlicht, kann keine höhere Genauigkeit bei der Ortsauflösung erreicht werden. Die oben erwähnte Verkippung der Sonde war tatsächlich vorhanden, lieferte jedoch nur einen konstanten Offset und ist daher unbedeutend.

2.4 Ergebnis

Sowohl bei der Ausrichtung der Kupferfolien als auch der Hallsonde auf den Laser muss jeweils eine Unsicherheit von 1 mm angenommen werden. Insgesamt ist der Neutronenstrahlschwerpunkt gegenüber dem Magnetfeldmaximum um

$$(+2,5 \pm 1,5) \text{ mm}$$

Richtung „Vercors“ verschoben. Dies muss bei der Berechnung des Spiegeleffekts berücksichtigt werden.

Soll diese Messung mit höherer Präzision ausgeführt werden, so muss eine neue Methode der Ausrichtung von Magnetfeldsonde auf Kupferfolie erdacht beziehungsweise der vorhandene Laser wesentlich verbessert werden. Wird bei gleicher Feldstärke dieselbe Sonde verwendet, muss eine größerer Feldbereich ausgemessen werden, um das Maximum genauer finden zu können. In einem schwächeren Feld (bis 300 mT) würde die Sonde allerdings in einem kleineren Auflösungsbereich arbeiten (Faktor 10), daher wäre ihre absolute Auflösung besser und bereits für die hier verwendeten räumlichen Dimensionen optimal.

Prinzipiell ist es möglich, mehrere Kupferfolien, an verschiedenen Stellen hintereinander im Strahl platziert, gleichzeitig zu aktivieren. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass jede Folie Neutronen streut und daher das Strahlprofil verändern kann.

Mit der Kupferfolienaktivierung existiert eine verlässliche Methode, ein Neutronenstrahlprofil schnell und vollständig zu vermessen. Gegenüber anderen Methoden, wie etwa das Abrastern des Strahls mit Lochblende und Heliumzählrohr, zeichnet sich die Kupferfolie durch eine kurze Messzeit (45 Minuten Aktivierungsdauer plus 3 Stunden für Abklingen, Belichten und Auslesen) bei gleichzeitig sehr hoher Auflösung (0,1 mm) aus. Die Daten liegen sofort in digitaler Form vor. Zusätzlich ist das Verfahren magnetfeld- und vakuumtauglich. Insbesondere letzteres ermöglicht es, den Strahl ohne Abschwächer zu messen; man erhält also das unverfälschte Strahlprofil (bereits mit $\frac{1}{v}$ gewichtet, wie für Zerfallswahrscheinlichkeiten benötigt).

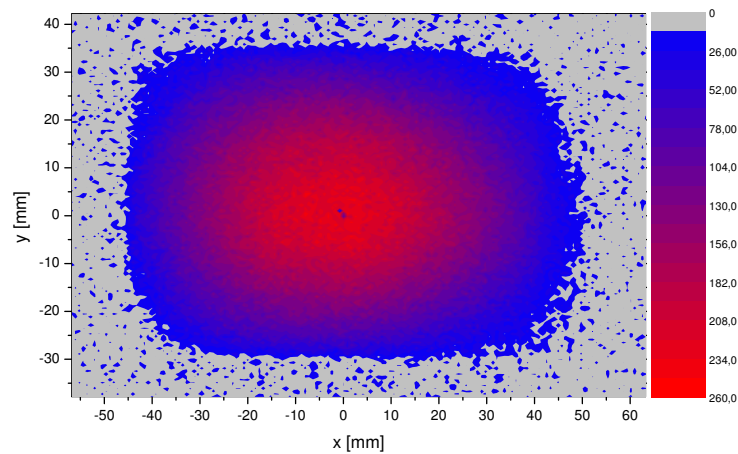


Abbildung 2.6: Strahlprofil am Beginn des Zerfallsvolumens.

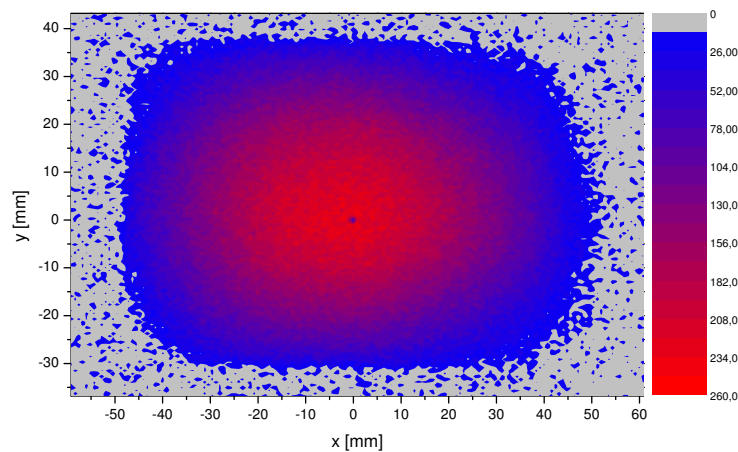


Abbildung 2.7: Strahlprofil in der Mitte des Zerfallsvolumens.

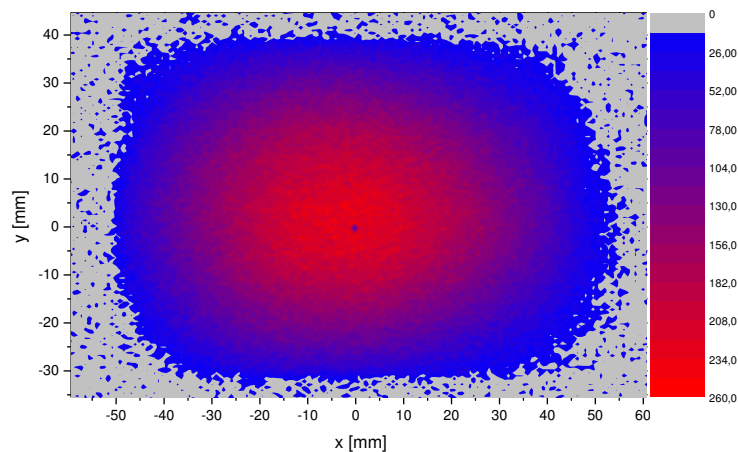


Abbildung 2.8: Strahlprofil am Ende des Zerfallsvolumens.

Bei allen drei Abbildungen hat die x -Achse ein vertauschtes Vorzeichen gegenüber der üblichen Konvention in dieser Arbeit. Das Profil ist aus Sicht eines fliegenden Neutrons dargestellt, „Vercors“ ist links. Die Intensitätseinheiten sind für jede Grafik linear gewählt. Die Profile wurden mit drei gleichzeitig aktivierten Kupferfolien ermittelt.

Kapitel 3

Untergrundoptimierung

Die experimentelle Asymmetrie A_{exp} lässt sich allein aus den Elektronen-Zählraten der Detektoren nach Gleichung 1.9 bestimmen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die gemessenen Zählraten N^\uparrow und N^\downarrow zusätzlich zu der realen Zerfallsrate N'^\uparrow und N'^\downarrow noch eine Untergrundrate U enthält. Diese kann als identisch für beide Spinrichtungen angenommen werden (siehe Abschnitt 3.2). Daher lässt sich A_{exp} schreiben als:

$$A_{\text{exp}} = \frac{N^\uparrow - N^\downarrow}{N^\uparrow + N^\downarrow} = \frac{N'^\uparrow + U - (N'^\downarrow + U)}{N'^\uparrow + U + N'^\downarrow + U} = \frac{N'^\uparrow - N'^\downarrow}{N'^\uparrow + N'^\downarrow + 2U}. \quad (3.1)$$

Diese Untergrundrate ist teilweise nicht messbar (siehe Abschnitt 3.7) und damit eine der größten Fehlerquellen auf das Ergebnis der Messung. Dieses Kapitel beschreibt die Anstrengungen, die unternommen wurden, um diesen Untergrund so gering wie möglich zu halten, bzw. ein Abschätzung seiner Größe zu bekommen.

3.1 Primäre Untergrundquellen

Da die Kollision von Neutronen mit jedem Material Untergrund produziert, sollte der Strahl so geführt werden, dass er wenig Materie trifft. Das zwangsläufig getroffene Material sollte sich möglichst weit vom Detektor entfernt befinden, und von einer Art sein, die wenig Untergrund produziert (siehe Abschnitt 3.3).

Der Neutronenstrahl hat nach Verlassen des Polarisatoren eine endliche Ausdehnung und eine gewisse Divergenz. Mit den Kollimationsblenden wird der Strahl auf eine maximale Größe reduziert, so dass er noch *PERKEO II* ohne „Berührung“ durchfliegen kann. Wie in [Schu04] beschrieben, wurden Größe und Position der Blenden so optimiert, dass der unvermeidliche Untergrund möglichst weit von den Detektoren entfernt entsteht. Dadurch ist der Raumwinkel minimal und viel Platz für Abschirmung vorhanden – Voraussetzung für eine geringe Untergrundzählrate. Der Beamstop am Ende des Vakuumsystems wurde aus dem gleichen Grund so entfernt wie möglich platziert und hat wegen der Divergenz des Strahles mit 800 mm einen größeren Innendurchmesser als das sonstige Vakuumsystem (160 mm und 250 mm).

Außer Blenden und Beamstop erzeugen die Polarisatoren selbst den meisten Untergrund. In Abschnitt 3.6.1 wird darauf näher eingegangen.

3.2 Prinzip der Untergrundmessung

Im *PERKEO II*-Experiment werden zwei untergrundbehaftete Neutronenzerfall-Zählraten miteinander verglichen. Die einfachste und effektivste Art der Untergrundeliminierung ist eine Nullmessung, bei der keine Neutronen zerfallen.

Dies wird durch Schließen des Shutter-UP simuliert. Mit der jetzt erhaltenen Zählrate kann die gemessene Elektronenzählrate korrigiert werden. Jedoch hat die Methode zwei Mängel:

Erstens produziert der Shutter selbst Untergrund, der bei der tatsächlichen Messung nicht vorhanden ist, es wird *überkorrigiert*. Dies kann durch eine gute Abschirmung des Shutters minimiert werden.

Zweitens wird durch den Shutter nicht genügend angezogen, denn der Untergrund, der an Blenden und Beamstop während der tatsächlichen Messung entsteht, fehlt bei der Nullmessung. Dieser *strahlabhängige* Untergrund muss minimiert werden.

Der an den Blenden erzeugte Untergrund kann mit Hilfe des Shutter-DOWN nach dem gleichen Prinzip abgezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass der Shutter-DOWN aufgrund seiner Nähe zu den Detektoren weniger gut abgeschirmt werden kann. Der Effekt des Überkorrigierens ist größer als bei Shutter-UP.

Da die Messungen mit offenem und geschlossenen Shutter nicht gleichzeitig ausgeführt werden können, muss noch die zeitliche Schwankung des externen Untergrunds berücksichtigt werden. Die verschiedenen Shutterzustände werden jeweils zwei Minuten lang gemessen. Dabei wechselt der Zustand des Spinflippers alle 8 Sekunden, um die Elektronenasymmetrie zu messen. Diese Untereinteilung der Shutterzustände kann benutzt werden, um Änderungen des externen Untergrunds mit der gleichen Periode zu identifizieren. Periodische Änderungen mit anderer Zeitkonstante müssen nicht beachtet werden, da sie durch Mittelung entfallen.

Nichtperiodische Änderungen mit größerer Zeitkonstante als die zwei Minuten werden bis zur quadratischen Ordnung durch die Verwendung des Musters „AN–AUS–AUS–AN–AUS–AN–AN–AUS“ gemittelt. Das Muster wird sowohl bei Spinflipper als auch bei den Shuttern verwendet.

Stufenweise Änderungen des Untergrundes können mit Hilfe von „Untergrundmonitoren“ ermittelt werden. Diese dem Detektor ähnlichen Systeme (Szintillator mit Photomultiplier) sind so platziert, dass sie nicht von den asymmetrisch zerfallenden Neutronen beeinflusst werden, aber sehr sensitiv zu den Nachbarexperimenten sind.

3.3 Materialien zum Neutroneneinfang

Um den Strahl zu kollimieren und am Ende zu stoppen ist die Kollision mit Materie notwendig. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die verwendeten Materialien.

Materialien mit großem Einfangsquerschnitt für Neutronen gibt es einige: ^3He (5328 b), ^6Li (940,3 b), ^{10}B (3837 b), ^{113}Cd (20600 b), ^{157}Gd (254000 b) und andere. Aber außer bei He, Li und B entsteht immer schwer abschirmbare Gammastrahlung (mehr als 99% des jeweiligen Gesamtwirkungsquerschnittes). Da Helium nur als Gas vorliegt, ist es kaum als Beamstop oder gar als Blende einsetzbar.

Beim *PERKEO II*-Aufbau wird hauptsächlich ^6Li eingesetzt. Aufgrund dessen großer chemischer Aktivität wird es in der ionischen Verbindung Lithiumfluorid (LiF) verwendet. Der elastische Streuquerschnitt von Fluor ist mit 3,64 b noch akzeptabel, der Wirkungsquerschnitt zur Erzeugung von Gamma-Strahlung mit $7,5 \cdot 10^{-4}$ b verschwindend gering. ^6LiF lässt sich zu Kacheln gepresst sehr gut verarbeiten und ist somit als Blenden- und Beamstopmaterial geeignet. Eine Anleitung zu Herstellung von LiF -Kacheln findet sich in Anhang A. An einigen Stellen, die ein flexibles Material benötigen, wird Lithiumgummi verwendet. Obwohl ebenfalls mit ^6Li versehen ist seine Absorption jedoch schon aufgrund der geringen Dicke nicht so gut wie die der ^6LiF -Kacheln.

An großen Flächen mit wenigen Neutronen wird ^{10}B verwendet. In Form von boriiertem Glas und Boral (Bor-Aluminium Legierung) absorbiert es alle dortigen Neutronen bei schwacher Gammastrahlungsproduktion (siehe Abschnitt 3.8). Außerhalb des Vakuums werden auch B_4C -Gummimatten verwendet. Tabelle 3.1 zeigt das Absorptionsverhalten einiger Materialien.

Material	Dicke	Transmission
Fensterglas	6 mm	$0,872 \pm 0,4 \%$
boriiertes Glas	6 mm	$4,11 \cdot 10^{-3} \pm 0,9 \%$
boriiertes Glas mit Nickelschicht	8 mm	$1,60 \cdot 10^{-3} \pm 1,4 \%$
boriiertes Glas mit Nickelschicht	14 mm	$4,0 \cdot 10^{-5} \pm 9 \%$
Boral	4,5 mm	$< 10^{-5}$
Li-F Kachel	120 g (= 6 mm)	$< 10^{-8}$

Tabelle 3.1: Vergleich einiger zum Abschirmen verwendeter Materialien. Gemessen mit dem kalten, polarisierten und unabgeschwächten Neutronenstrahl am PF1b ($10^8 \frac{\text{Neutronen}}{\text{cm s}}$).

3.4 Streuneutronen

Neben der absorbierenden Wirkung des ^6Li , werden die Neutronen an den LiF -Kacheln auch gestreut. Hauptursache¹ ist das Fluor, jedoch auch Reste des angereicherten ^7Li und Wasserstoff von alten Kleberresten (siehe Abschnitt A.5.1) tragen bei.

Die Kollimationsblenden bestehen aus 6 mm dicken ^6LiF -Kacheln, die auf 48 mm Blei (zur Abschirmung von Gammastrahlen, siehe Abschnitt 3.6) aufgeklebt sind. Damit das Blei von keinen (rück-) gestreuten Neutronen getroffen wird, ist seine gesamte Oberfläche mit Li-Gummi beklebt.

Da im Kollimationssystem sehr viele Neutronen auf Material treffen, werden hier viele gestreut. Daher wurden alle Wände des Vakuumgefäßes, die direkter Sicht auf die Blenden haben, mit Duranglas geschützt (siehe Abbildung 3.1).

Die Innenkanten der Blenden müssen besonders beachtet werden, denn von hier können Neutronen in Richtung des Detektors streuen und dort ohne wesentliche Raumwinkelunterdrückung Untergrund produzieren. Um dieses Problem zu vermindern, wurde das Konzept der Haloblenden verwendet: Insgesamt sechs Haloblenden befinden sich zwischen der letzten Blende und dem Beamstop – drei vor dem Zerfallsvolumen, drei dahinter. Sie berühren nicht den Strahl, aber

¹Streuquerschnitte verschiedener Materialien für Neutronen mit 0,025 eV: ^{19}F : 3,64 b; ^7Li : 0,97 b; ^1H : 20,47 b

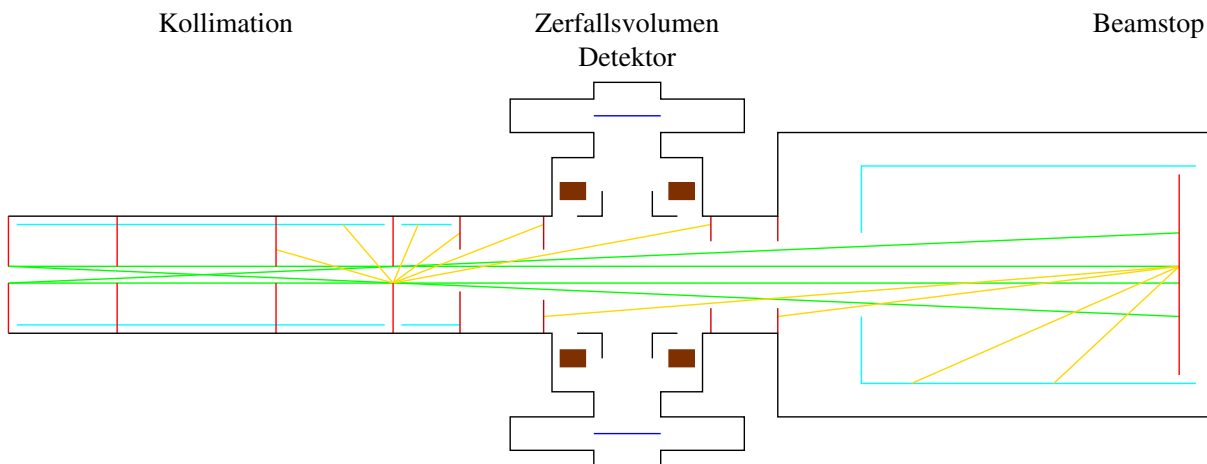


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Abschirmung gestreuter Neutronen mit Haloblenden, Aquarium und Bor-Glas. Die Kollimationsblenden (rot) definieren den direkten, von links kommenden Strahl (grün). Bereits hier wird mit Borglas (cyan) die Vakuumgefäßwand abgeschirmt. Im weiteren Verlauf verhindern die Haloblenden (dunkelrot), dass gestreute Neutronen (gelb) unerwünschtes Material treffen. In der Beamstop-Röhre sorgt das Aquarium (cyan) für den Einfang der vom Beamstop (rot) gestreuten Neutronen. Alle Blenden wurden so positioniert, dass möglichst wenig Untergrund den Detektor (blau) erreicht.

verwehren die direkte Sicht von der vierten und letzten Kollimationsblende (und damit auch von jeder anderen) zu allen Seitenwänden dahinter sowie die direkte Sicht vom Beamstop. Damit verhindern sie, dass gestreute Neutronen anderes als dafür vorgesehenes Material treffen.

Ähnliches gilt für den Beamstop, wo 5,4 % aller Neutronen auftreffen. Um die zurückgestreuten Neutronen abzufangen, wurde das „Aquarium“ eingebaut, eine käfigartige Konstruktion, mit einer Öffnung durch die der Strahl eintritt. Die Seitenwände bestehen aus Boral, die Vorderwand aus boriiertem Glas². Die Rückseite wird durch den LiF-Beamstop gebildet.

Insgesamt konnte so gewährleistet werden, dass kein Neutron ungeschütztes Material treffen kann, außer durch mehrfach- oder Restgas-Streuung.

3.5 Schnelle Neutronen

Neutronen werden abhängig von ihrer kinetischen Energie in verschiedene Gruppen eingeteilt:

Schnelle Neutronen haben Energien über 1 MeV. Ihr Wechselwirkungsquerschnitt mit Materie ist klein. Sie können jedoch durch Stöße mit leichten Kernen (insbesondere Wasserstoff und Deuterium) abgebremst werden.

Thermische Neutronen stehen im thermischen Gleichgewicht bei 300K und haben eine Energie von ca. 25 meV.

Kalte Neutronen entstehen an einem Moderator bei 25 K, gegenüber thermischen haben sie einen größeren Wirkungsquerschnitt mit Materie.

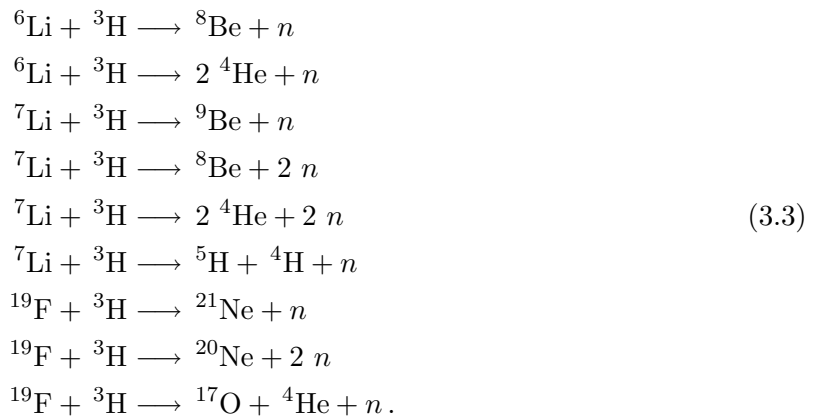
²Es soll hier explizit darauf hingewiesen sein, dass Fensterglas *kein* Bor enthält und somit Neutronen nicht wesentlich absorbiert (siehe Tabelle 3.1).

Daneben gibt es noch **epithermische** Neutronen mit Energien zwischen 0,4 eV und 1 MeV, sowie **sehr kalte** (0,3–50 μeV) und **ultrakalte** (weniger als 300 neV) Neutronen, die hier jedoch nicht von Bedeutung sind.

Der Neutroneneinfang mit ${}^6\text{Li}$ geschieht hauptsächlich in der Reaktion:



Dabei kann das entstehende Tritium ${}^3\text{H}$ mit dem umgebenden Material reagieren und nach [Lon80] schnelle Neutronen mit bis zu 16 MeV kinetischer Energie erzeugen. Dies geschieht unter anderem in folgenden Reaktionen:



Pro 10^6 eingefangenen thermischen (oder kalten) Neutronen entstehen dabei 93 schnelle Neutronen. Bei einem Fluss von $5 \cdot 10^8 \frac{\text{Neutronen}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$ am Polarisatorausgang auf einer Fläche von $58 \times 37,5 \text{ mm}^2$ entstehen damit insgesamt ca. 10^6 schnelle Neutronen pro Sekunde.

Aufgrund der geringen Einfangsquerschnitte für schnelle Neutronen³ durchdringen diese fast alle Materialien ungehindert, und es gibt kaum eine Möglichkeit sie direkt abzuschirmen. Erst nach Moderation mit leichten Elementen (Wasserstoff, Deuterium, Helium, etc.) zu thermischen Neutronen, können diese eingefangen werden.

Ein Plastik-Szintillator, wie er bei *PERKEO II* verwendet wird, enthält viel Wasserstoff. Dieser ist ein guter Stoßpartner für schnelle Neutronen. Bei einem solchen Stoß würde das schnelle Neutron Energie an den Wasserstoff abgeben, diese könnte dann als Photon detektiert werden. Somit stellen schnelle Neutronen eine potentielle direkte Untergrundquelle dar. Abgesehen davon, dass sie nach Moderation zu thermischen Neutronen durch Materialkollision „herkömmlichen“ Untergrund produzieren können.

3.5.1 Abschirmbarkeit

Um die Wirkung schneller Neutronen auf die *PERKEO II*-Szintillatoren⁴ zu untersuchen und gleichzeitig Möglichkeiten der Abschirmung abzuschätzen, wurde ein Teststand aufgebaut (Abbildung 3.2):

Der Shutter-DOWN, eine LiF-Kachel, die direkt hinter der letzten Kollimationsblende in den

³Abgesehen von Resonanzen (meist im keV- bis MeV-Bereich), sind Neutronenwirkungsquerschnitte proportional zu $\frac{1}{v}$.

⁴BICRON 404.

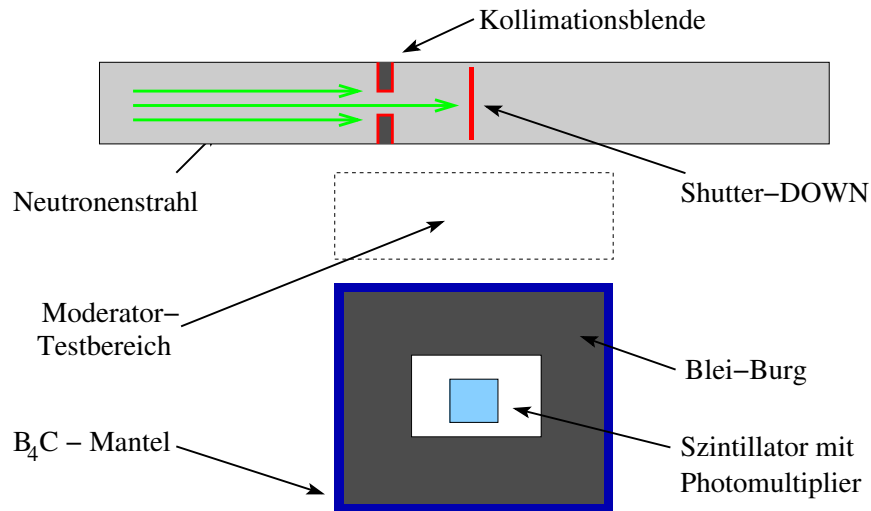


Abbildung 3.2: Teststand zur Wirkung und Abschirmbarkeit schneller Neutronen: Die LiF-Kachel des Shutter-DOWN dient als Quelle schneller Neutronen. B₄C und 10 cm Blei sorgen dafür, dass nur schnelle Neutronen an Plastiksintillator und Photomultiplier ankommen. Dessen Abstand vom Strahl beträgt 50 cm. Dazwischen werden verschiedene Wandstärken Moderator material getestet.

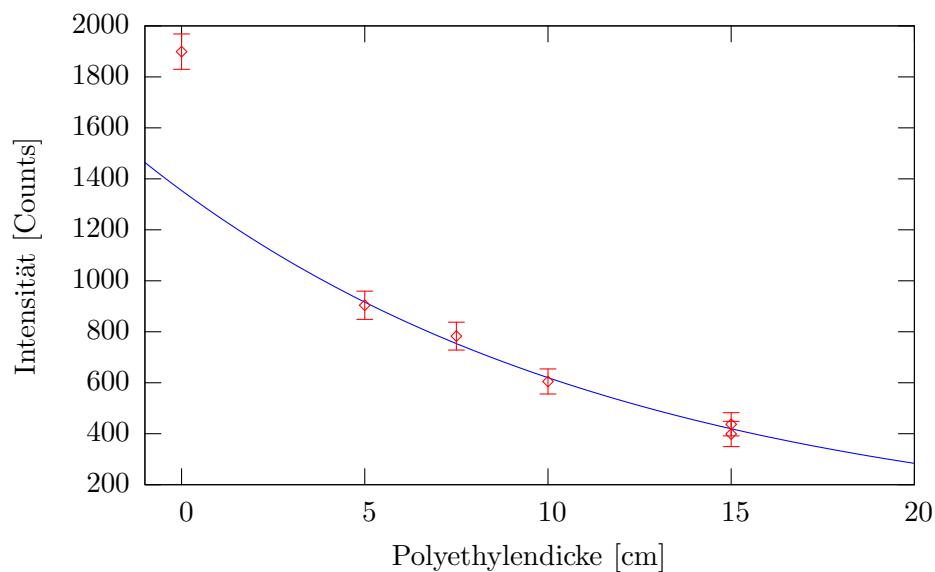


Abbildung 3.3: Absorption schneller Neutronen: Die mit vier verschiedenen Polyethylen-Schichtstärken gemessenen Zählraten schneller Neutron (von Untergrund befreit) lassen sich durch exponentiellen Abfall gut fitten.

Strahl gefahren werden kann, wird als annähernd punktförmige Quelle schneller Neutronen verwendet. In 50 cm Entfernung von Strahl und Kachel ist ein Plastiksintillator mit einem Photomultiplier platziert, um den eine Abschirmung aus 10 cm Blei- und B₄C aufgebaut ist. Das B₄C soll alle thermischen Neutronen einfangen, das Blei die dabei entstehende Gammastrahlung. Somit können nur noch schnelle Neutronen den Detektor erreichen.

Durch eine Referenzmessung mit offenem Shutter (Kachel wird nicht vom Strahl getroffen),

können die schnellen Neutronen der Blenden (insbesondere der nahen vierten Kollimationsblende) subtrahiert werden. Schnelle Neutronen vom Beamstop werden durch den kleinen Raumwinkel unterdrückt.

Als Moderator wurde boriertes Polyethylen getestet, in dem moderierte Neutronen sofort absorbiert werden. Zwischen den zwei verwendeten Typen (weiße Verzahnbausteine und schwarze Quader) findet sich kein Unterschied: Ein exponentielle Abfall mit einer Abschwäch-Länge von $(12,8 \pm 0,8)$ cm beschreibt die Daten sehr gut, wie Graphik 3.3 zeigt. Der hohe Wert ohne Polyethylen (in der Grafik bei 0 cm) geht nicht mit in den Fit ein. Er könnte durch die fehlende B_4C -Abschirmung auf der Unterseite des Teststands erklärt werden.

Dabei muss jedoch erwähnt werden, dass die vorhandenen Daten auch andere Modelle als den exponentiellen Abfall zulassen. Insbesondere wurde nicht geprüft, wie der Verlauf bei großen Moderatorsticken ist. Aufgrund der zugrundeliegenden physikalischen Modellvorstellung der Vielfachstreuung, könnte ein anderes Verhalten vorliegen.

Fazit: Die Messung hat eindeutig gezeigt, dass schnelle Neutronen ein deutliches Signal auf einem Szintillator-Photomultiplier-System erzeugen. Dies muss bei der Abschirmung für die A -Messung berücksichtigt werden.

Andererseits reicht die Messung nicht aus, um eine exponentielle Abnahme zu beweisen. Jedoch kann mit einigen Dezimetern Polyethylen bereits eine deutliche Abschirmwirkung erzielt werden. Weitere qualitative Messungen deuten darauf hin, dass die schnellen Neutronen von dem umgebenden Beton reflektiert werden. Dies würde bedeuten, dass eine diffuse Verteilung schneller Neutronen auftritt, die eine 4π Abschirmung erforderlich macht.

3.5.2 Aufbau in PERKEO

Für den Abschirmung von *PERKEO II* wurde aufgrund der Erkenntnisse des letzten Abschnitts erstmals eine Abschirmung für schnelle Neutronen innerhalb des Vakuums errichtet. 30 cm Plexiglas (Polyethylen ist nicht vakuumtauglich) moderieren innerhalb der Beamstopröhre die schnellen Neutronen, die am ${}^6\text{LiF}$ -Beamstop entstehen. Das Plexiglas ist auf allen Seiten von boriertem Glas umgeben, zu einen um die moderierten Neutronen sofort zu absorbieren, zum anderen um das Plexiglas vor den vom LiF-Beamstop zurückgestreuten Neutronen zu schützen. Insgesamt 40 cm Blei schirmen die beim Neutroneneinfang entstehende Gammastrahlung ab.

Die Befürchtung, dass das viele und zerklüftet Material im Beamstop das Vakuum beeinträchtigen würde, konnte größtenteils widerlegt werden: Das erste Evakuieren dauert zwar deutlich länger, der Enddruck⁵ von $4 \cdot 10^{-6}$ mbar in der Beamstopröhre wird aber auch mit der eingebauten Abschirmung erreicht.

3.5.3 Abschirmwirkung

Um die Wirkung der Abschirmung zu testen bzw. um den verbleibenden Untergrund durch schnelle Neutronen abzuschätzen, wurde eine Testmessung mit einer künstlichen Quelle schneller Neutronen durchgeführt. Eine AmBe Quelle wurde hinter dem Beamstop platziert, und das Signal auf den *PERKEO II-A*-Photomultipliern untersucht. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.9 zu sehen.

⁵Nach 48 Stunden mit zwei Turbopumpen.

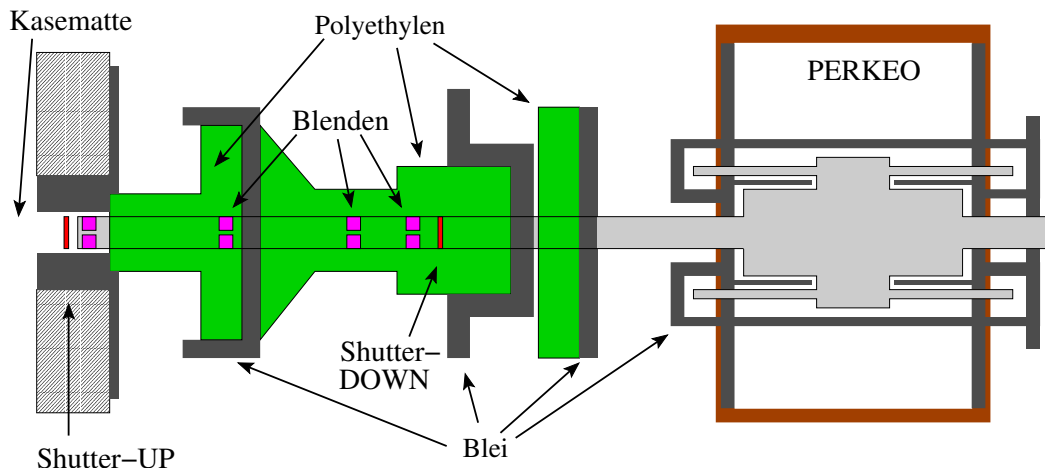


Abbildung 3.4: Darstellung der Blei und Polyethylenabschirmung im Bereich vor *PERKEO II*. Um die Blenden und die Shutter ist die Abschirmung besonders stark.

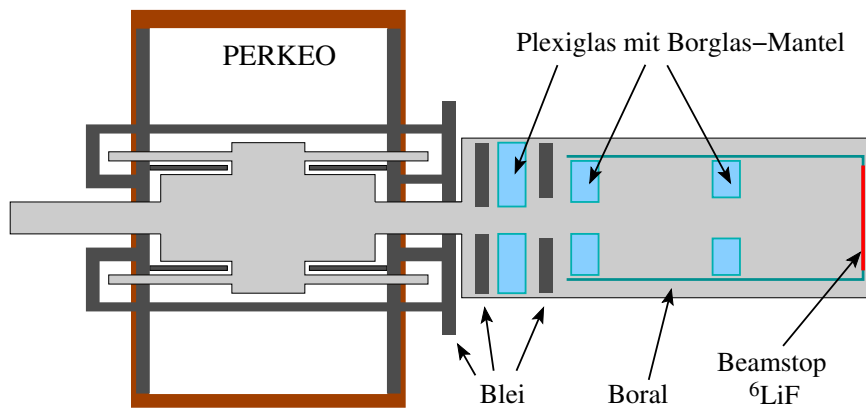


Abbildung 3.5: Schema der Abschirmung im Beamstop. Das Plexiglas dient der Moderation schneller Neutronen und ist komplett mit borisiertem Glas eingehüllt, zum einen um die moderierten Neutronen einzufangen, zum anderen um das Plexiglas vor den vom Beamstop gestreuten Neutronen zu schützen.

3.6 Gammastrahlung

Neben Neutronen ist Gammastrahlung die einzige⁶ weitere Untergrundquelle. Die verwendeten *BICRON 404* Plastik-Szintillatoren weisen zwar eine geringe Photonen-Effizienz auf, für die gewünschte Präzision muss aber auch dieser Untergrund abgeschirmt werden.

3.6.1 Herkunft

Die Polarisatoren basieren auf dem Prinzip, dass sie Neutronen mit der gewünschten Spinrichtung passieren lassen, Neutronen mit der unerwünschten Spinrichtung jedoch absorbieren. Da der Neutronenfluss an dieser Stelle $10^{10} \frac{\text{Neutronen}}{\text{s cm}^2}$ beträgt und mehr als die Hälfte der Neutronen

⁶Das 1 Tesla starke Feld schirmt den Detektor vor geladener Untergrundstrahlung (α und β) ab. Nur hochenergetische Höhenstrahlung könnte das Feld durchdringen. Diese kann aber als zeitlich konstanter, externer Untergrund abgezogen werden.

absorbiert werden, sind die Polarisatoren die stärkste Quelle von Gammastrahlung im Experiment. Bereits aus Strahlenschutzgründen sind sie in der Kasematte untergebracht, also durch 60 cm Beton abgeschirmt. Dazu kommt noch ein Bleikanal von 10 cm Stärke um die Polarisatoren, sowie eine 5 cm dicke Bleiwand direkt außen an der Kasematte. Die in Abbildung 3.4 dargestellten Bleiwände schirmen zusätzlich ab.

Die Neutronen treten durch ein 200 μm dickes Aluminiumfenster in das Vakuumsystem ein, dabei entsteht ebenfalls Gammastrahlung.

Auf die Kollimationsblenden treffen 40 % der Neutronen. Da LiF allerdings nicht nur auf die oben angeführte Weise mit Neutronen reagiert, sondern es auch eine mit $5 \cdot 10^{-5}$ unterdrückte Reaktion mit Photonenemission gibt, entsteht also auch hier ein nicht unwesentlicher Teil der Gammastrahlung. Das gleiche geschieht am Beamstop.

Außerdem müssen die sekundären Quellen beachtet werden. Sowohl die oben genannten gestreuten als auch moderierte Neutronen, verursachen bei der Kollision mit Bor weiteren Gammastrahlungs-Untergrund. Ebenso mehrfach- oder Restgas-gestreute Neutronen, die beliebiges Material treffen können.

Als externe Quellen sind Nachbarexperimente zu nennen. Da diese nicht strahlabhängig sind, können sie mithilfe der Shutter subtrahiert werden. Meist sind sie jedoch nicht zeitlich konstant, daher ist eine lange Mittelung notwendig.

3.6.2 Abschirmung in PERKEO

Um die Gammastrahlung möglichst effizient abzuschirmen, werden zwei Stellen bevorzugt: direkt an der Quelle und direkt am Detektor. Die Abbildungen 3.4 und 3.5 verdeutlichen den Aufbau: Potentielle Untergrundquellen und Detektor sehen dabei keine gemeinsame Fläche, das bedeutet, kein Photon kann zum Detektor gelangen, ohne nicht mindestens zweimal zu streuen oder 30 cm Blei zu durchqueren. Der Absorptionsfaktor für typische Photonenenergien ist dabei größer als 10^5 .

3.7 Untergrundmessungen

Neben den in Abschnitt 3.2 erläuterten Methoden der Untergrundsubtraktion, die in den Abbildungen 3.6 und 3.7 dargestellt sind, wurden auch noch direkte Messungen durchgeführt, um die Abschirmwirkung auf bekannte Untergrundquellen abzuschätzen.

Dabei wurden verschiedene künstliche Quellen an potentiell untergrunderzeugenden Stellen angebracht und die Zählrate gemessen. Um schnelle Neutronen zu simulieren, wurde eine AmBe-Quelle verwendet; Gammastrahlung wurde mit einer ^{60}Co -Quelle erzeugt. Diese Tests wurden während des Reaktorstillstands durchgeführt, um störende externe (zeitlich variable) Untergrundquellen zu minimieren. Die Abbildungen 3.8 und 3.9 zeigen das Ergebnis.

In einem weiteren Test, noch während des Reaktorzykluses, wurde eine sehr intensive Gamma-Quelle am Beamstop künstlich erzeugt. Dazu wurde vor den LiF-Kacheln ein Cadmium-Blech angebracht und die beim Neutronen-Beschuss entstehende prompte Gammastrahlung gemessen. Die Messungen mit diesem Blech (Größe $2,5 \times 4 \text{ cm}^2$) sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Es zeigt sich, dass der zusätzliche Untergrund hauptsächlich im niederenergetischen Bereich auftritt,

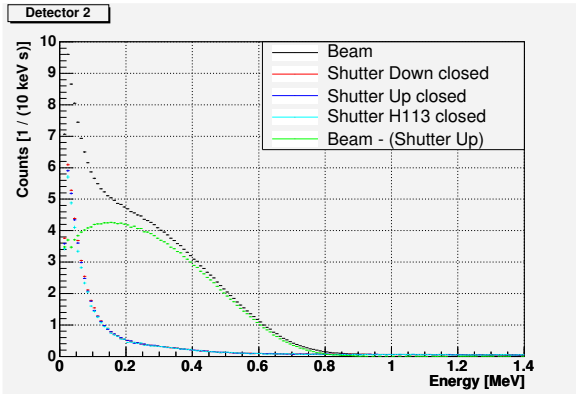


Abbildung 3.6: Prinzip der Untergrundbestimmung: Dargestellt sind die auf 10 keV rebinnten, unkorrigierten Spektren des Neutronenstrahls, sowie der verschiedenen Shutter. Die Differenz von Strahl und Shutter-UP ist dem realen Neutronenzerfalls-Spektrum bereits sehr ähnlich.

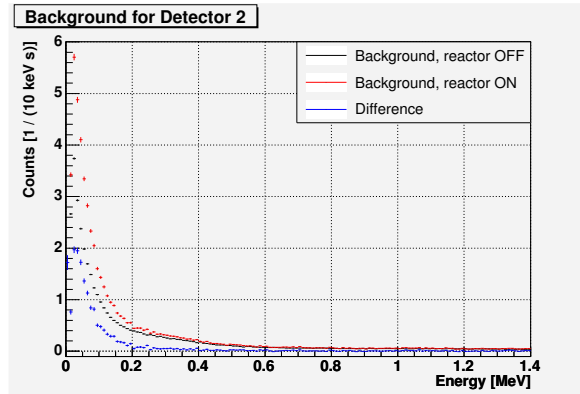


Abbildung 3.7: Vergleich des Untergrundes während des Reaktorzyklus (Hauptshutter geschlossen – Verursacher sind benachbarte Experimente) und nach Reaktorzyklus

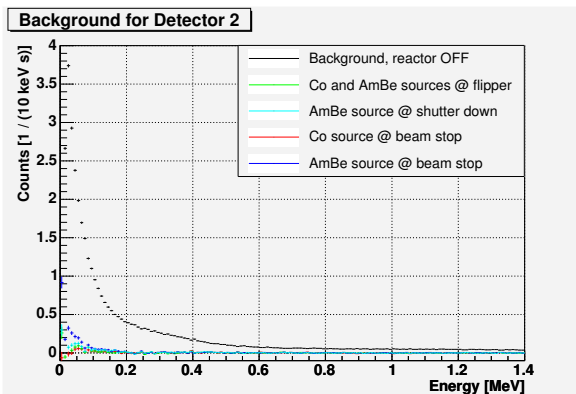


Abbildung 3.8: Nach dem Reaktorzyklus durchgeführte Abschätzung der Abschirmung: Es ist der gemessene Untergrund ohne Quelle dargestellt. Die Spektren der Quelle schneller Neutronen (AmBe) und der Gammastrahlung (^{60}Co) sind bereits von diesem Untergrund befreit.

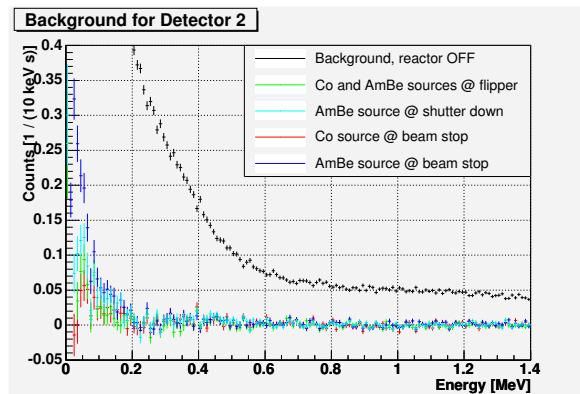


Abbildung 3.9: Vergrößerte Darstellung der Daten von Abbildung 3.8: Die über den Bereich 330-660 keV integrierte Zählrate ist für alle Quellen im Bereich von 0,1 Hz

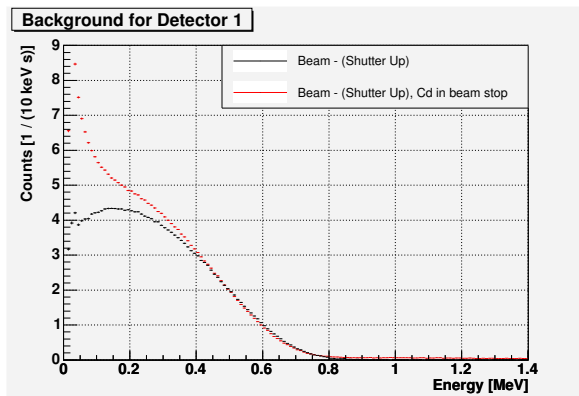


Abbildung 3.10: Test mit verschlechtertem Beamstop: Vor den LiF-Kacheln wurde ein Cadmium-Blech angebracht. Die Zählrate vergrößert sich erheblich, im Bereich höherer Energien jedoch kaum.

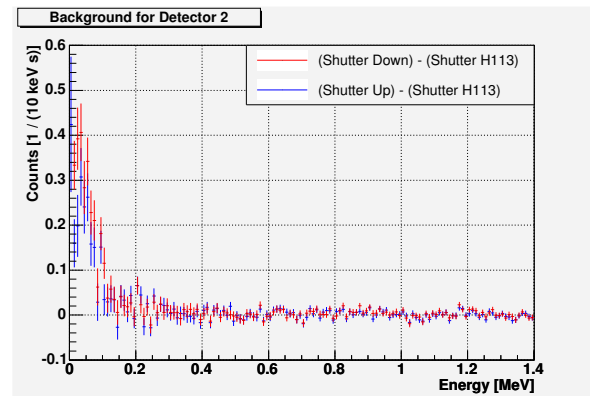


Abbildung 3.11: Test von Shutter-UP und -DOWN: Das Spektrum bei geschlossenem Hauptschutter wird jeweils abgezogen. Die Statistik der hier dargestellten Daten ist nicht ausreichend, um über ein „Überkorrigieren“ der Shutter im Bereich 330-660 keV zu entscheiden.

obwohl das Cadmium vorwiegend hochenergetische Gamma-Quanten erzeugt. Im Fitbereich sind die Auswirkungen der starken Quelle kaum zu sehen.

Auch wenn es in Abbildung 3.11 aufgrund der für diese Grafik verwendeten geringen Statistik nicht ersichtlich ist, konnte nachgewiesen werden, dass der Shutter-UP im Rahmen der Genauigkeit des Experiments *nicht* überkorrigiert. Daher ist es möglich bei der β -Asymmetrie-Auswertung die Daten des automatisch fahrbaren Shutter-UP zu verwenden. Es muss nicht auf den nur manuell steuerbaren Hauptschutter zurückgegriffen werden.

3.8 Fazit

Entscheidend für die Untergrundreduktion ist, dass kein Material an Stellen von Neutronen getroffen wird, an denen dies nicht vorgesehen ist. Durch eine nur minimal den Strahl berührende Haloblende wurde der Untergrund zwischenzeitlich um 800 % erhöht. Dennoch ist das Konzept der Haloblenden notwendig, um das gewünschte niedrige Untergrundniveau zu erhalten. Es gibt keinen „entscheidenden“ Punkt, alle Komponenten der Untergrundminimierung sind notwendig. Durch die beschriebenen Anstrengungen konnte unter den gegebenen Rahmenbedingungen eine bestmögliche Untergrundabschirmung erreicht werden.

Bor statt LiF? Aufgrund der beobachteten Problematik mit schnellen Neutronen, insbesondere ihrer schweren Abschirmbarkeit, muss in Folgeexperimenten überlegt werden, Lithium durch Bor zu ersetzen. Dies verursacht zwar 10^5 mehr Gammastrahlung, die mit zusätzlichem Blei abgeschirmt werden müsste, die Zahl der erzeugten schnellen Neutronen ist jedoch um einen Faktor 100 kleiner [Lon80]. Als Verbindung bietet sich Borcarbid oder Zirkoniumborid an, da B_4C -Gummimatten nur sehr eingeschränkt vakuumtauglich sind.

Kapitel 4

Detektorfunktion

Die in *PERKEO II* benutzten Detektoren sind ortsabhängig, d.h. abhängig vom Auftreffpunkt des Zerfallselektrons ist die ausgelesene Energie verschieden. Da die Energieeichung mittels verschiedener radioaktiver Präparate aber immer in der Mitte des Detektors erfolgt, die Zerfallselektronen sich jedoch über die gesamte Detektorfläche verteilen, wäre die Eichung falsch. Dies kann korrigiert werden, wenn die Ortsabhängigkeit des Detektor bekannt ist. Ihre Bestimmung wird in diesem Kapitel beschrieben.

4.1 Aufbau

In *PERKEO II* kommen als Detektoren zwei Plastiksintillatoren¹ zum Einsatz. Sie werden jeweils mit vier Photomultipliern² ausgelesen, die über Plexiglaslichtleiter mit den Detektoren verbunden sind. Die Szintillatoren stehen auf beiden Seiten des Zerfallsvolumens, senkrecht zum Magnetfeld.

Da sich die Zerfallselektronen nur entlang der der Magnetfeldlinien bewegen können (der maximale Gyrationradius ist 4 mm), wird das Zerfallsvolumen auf den Szintillator projiziert – leicht vergrößert, da sich das Magnetfeld zu den Detektoren hin aufweitet.

Dies wird bei dem YZ-Scanner ausgenutzt: Eine β -Quelle wird in den Bereich zwischen Szintillator und Zerfallsvolumen gebracht. Sie wird parallel zum Szintillator bewegt und kann den gesamten Detektor abrastern. Abbildung 4.1 zeigt ein Photo der mechanischen Konstruktion des Scanners, mit dem die β -Quelle kontrolliert bewegt wird. Die Positionsbestimmung erfolgt dabei mit einer Genauigkeit von 1 mm.

4.2 Ortsabhängigkeit

Es wird eine Bi-Quelle mit bekannter und konstanter Elektronenenergie verwendet. Gemessen wird die vom Detektorsystem registrierte Energie in Abhängigkeit vom Ort der Quelle.

¹Typ „BICRON 404“; Größe $440 \times 160 \text{ mm}^2$

²Typ „HAM R5504“ von „HAMAMATSU“

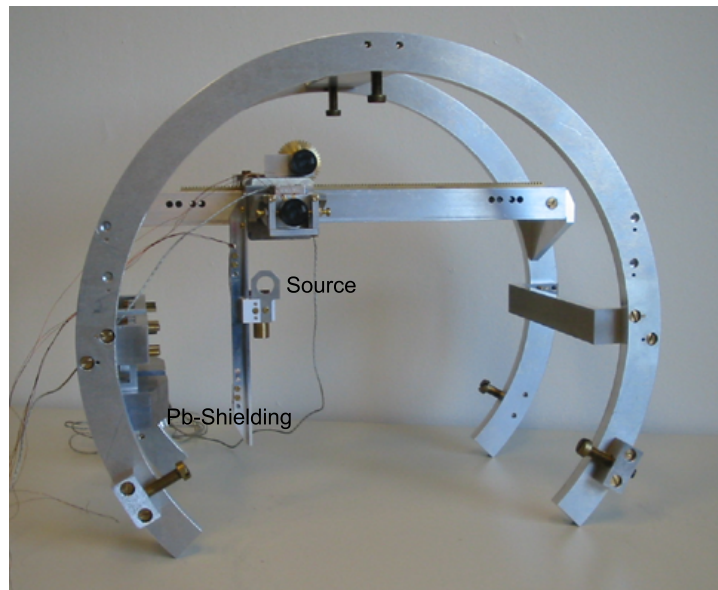


Abbildung 4.1: Der YZ-Scanner ermöglicht die Bestimmung der Ortsfunktion des Detektors, indem der Szintillator mit einem β -Strahler abgerastert wird.

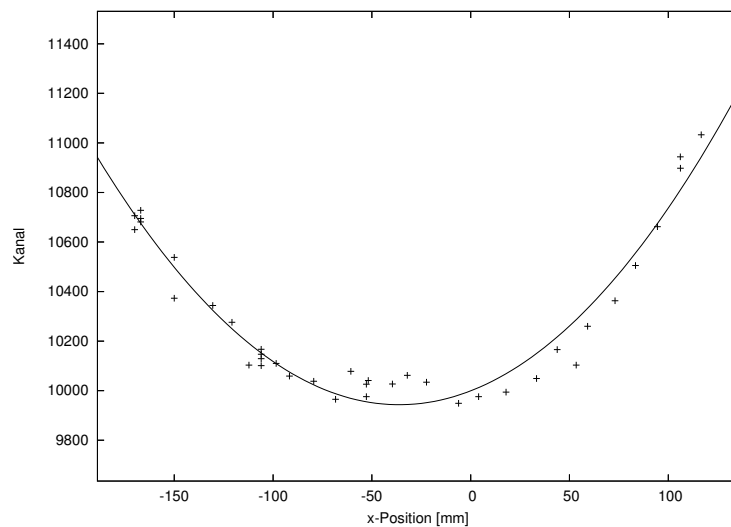


Abbildung 4.2: Bestimmung der Ortsfunktion des Detektors, mithilfe der Abrasterung durch den Scanner. Aufgetragen ist die Kanalnummer des oberen Bi-Peak.

Wie aus dem Graphen 4.2 ersichtlich, ist die Verstärkung am Rand des Detektors größer als in der Mitte. Um das Verhältnis von durchschnittlicher Verstärkung zu Verstärkung in der Detektormitte zu erhalten, wird über die Messungen auf der gesamten Detektorfläche gemittelt, und mit der Verstärkung in der Mitte verglichen. Dabei ergibt sich eine Korrektur von $(3 \pm 0,5) \%$, die auf die Energieeichung angewendet werden muss.

Kapitel 5

Zusammenfassung

In den letzten Jahren gab es mehrere experimentelle Hinweise auf eine Abweichung der Quark-Mixing CKM-Matrix von der Unitarität [Abe02], [Har03]. Das Experiment *PERKEO II*, das im Rahmen dieser Arbeit am Institut Laue-Langevin in Grenoble, Frankreich, aufgebaut und durchgeführt wurde, soll diese Hinweise näher überprüfen. Es misst die Elektron-Asymmetrie A im Zerfall freier, polarisierter Neutronen, die – zusammen mit einem Wert für die Neutronenlebensdauer τ – die Bestimmung von V_{ud} , des ersten Elements der CKM-Matrix, erlaubt.

In dieser Arbeit wurden einige zur erfolgreichen Durchführung eines Präzisionsexperiments mit kalten Neutronen unerlässlichen Punkte ausführlich beschrieben:

Zur Reduktion des magnetischen Spiegeleffekts ist eine genaue Ausrichtung des Neutronenstrahls auf das Magnetfeld sehr wichtig. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode der Kupferfolienaktivierung zur Bestimmung von Neutronenstrahlprofilen zum ersten Mal quantitativ untersucht. Die Methode bietet eine zuverlässige und extrem schnelle Methode, den Neutronenstrahl mit hoher Auflösung abzubilden - mit einer ausreichenden Linearität über drei Größenordnungen. Weiterhin wurde die vollautomatische Vermessung des Magnetfeldes des Spektrometers beschrieben und Vorschläge zur Verbesserung der Genauigkeit der Messung gemacht.

Den zentralen Teil der Arbeit nehmen Untersuchungen zur Untergrundoptimierung ein: Die Abschirmwirkung verschiedener Materialien für Neutronen wurde untersucht, dabei auch einige, von der PERKEO-Gruppe noch nie verwendete Stoffe, wie etwa Boral. Da in diesem Experiment ${}^6\text{LiF}$ zur Absorption des vollen Neutronenstrahls verwendet wurde, wird im Anhang A eine ausführliche Anleitung zur Herstellung von ${}^6\text{LiF}$ -Kacheln gegeben.

Ein bisher noch nicht ausreichend untersuchtes Problem bei Präzisionsmessungen mit kalten Neutronen war die Entstehung schneller Neutronen, die zum Untergrund der Messung beitragen. Daher wurden Untersuchungen zur Abschirmbarkeit und zur Größe des Beitrags schneller Neutronen zum Untergrund durchgeführt. Weiterhin wurden die Anstrengungen zur Reduktion des selbstproduzierten (in Polarisatoren, Kollimationssystem und Beamstop) Gammastrahlungs-Untergrundes beschrieben und Messungen des gesamten Untergrundes vorgestellt. Ein nicht erwartetes Problem stellte dabei der zeitlich nicht konstante Untergrund dar, der von den benachbarten Experimenten am ILL verursacht wird.

Aufgrund der Größe des verwendeten Elektron-Detektors hängt die Größe des gemessenen Signals vom Auftreffort des Elektrons auf dem Szintillator ab. Dieser Effekt muss bei der endgültigen Auswertung der Asymmetrie-Daten berücksichtigt werden. Dazu wurde der Detektor mit

einem zweidimensional verfahrbaren ^{207}Bi -Präparat abgescannt und die Ortsabhängigkeit des Detektors bestimmt. Die Abweichung in der Mitte vom Durchschnitt ist mit etwa 3% weit kleiner als erwartet.

Ein sehr flexibles und auch für zukünftige Experimente verwendbares Programm zur Steuerung von Schrittmotoren wird in Anhang B vorgestellt: Es ermöglicht es, die drei Shutter und zwei Eichkarusselle, die zur Untergrundbestimmung und zur Detektoreichung notwendig sind, mit nur einem Parameter einfach und effizient aus dem Messprogramm heraus zu kontrollieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Beamline und das Spektrometer *PERKEO II* aufgebaut und die Messung der β -Asymmetrie A durchgeführt. Dabei sollten die oben beschriebenen Optimierungen des Untergrundes, zusammen mit dem sehr hohen Neutronen-Polarisationsgrad von 99,7% [Schu04], eine deutlich genauere Bestimmung von A zulassen.

Vorwort zum Anhang

Der folgende Anhang ist recht technisch gehalten. Er soll die im Laufe diese Diplomarbeit gewonnen Erkenntnisse für zukünftige Experimente - insbesondere in der ANP-Gruppe - erhalten. Er ist als Schritt-für-Schritt Anleitung gedacht, bietet jedoch auch Anregungen zu Verbesserungen, die noch nicht durchgeführt werden konnten.

Anhang A

Lithiumfluorid Kacheln

Dieses Kapitel ist eine Anleitung zur Herstellung von Lithiumfluorid-Kacheln (im folgenden LiF). Es basiert auf einer früheren Diplomarbeit ([Bül98]) und eigenen Entwicklungen. Auch in [Schü83] wurde das Thema behandelt.

A.1 Zweck/Zielsetzung

Für das beschriebene Experiment wird ein Material für Blenden und Beamstop benötigt, das Neutronen einfängt, ohne dabei Strahlung zu erzeugen. Dabei muss das Material bearbeitbar sein, um die exakte Blendengeometrie zu erreichen, und gleichzeitig hochvakuumtauglich sein.

Aufgrund seines hohen Einfangquerschnitts für Neutronen bei gleichzeitig stark unterdrückter (n,γ) -Reaktion¹ bietet sich ${}^6\text{Li}$ an. Die metallische Reinform wäre optimal, aufgrund der großen chemischen Aktivität ist sie aber nicht handhabbar. Daher wird Lithiumfluorid verwendet. Die am Fluor gestreuten Neutronen² sind zwar ungünstig, aber nicht zu vermeiden.

Natürliches Li besteht nur zu 7,5% aus ${}^6\text{Li}$. Für die Verwendung als Neutronenstop sollte es angereichert werden. Da ${}^6\text{Li}$ aber schwer und wenn, dann nur metallisch, erhältlich ist und die Herstellung von LiF aus Li sehr aufwendig ist [Schü83], werden alte, zerbrochene Kacheln wiederverwendet. An diesen befinden sich größtenteils noch Kleberreste, die vor der Herstellung neuer Kacheln unbedingt entfernt werden müssen, um eine Verunreinigung der neuen Kacheln zu verhindern, die erhöhte Rückstreuung, prompte γ -Strahlung oder Aktivierung zur Folge hätte.

Die Kacheln sollten mechanisch möglichst stabil sein. Eine flache Form ist wünschenswert, um die Verwendung als Blende zu ermöglichen.

A.2 Dicke

Der Abschwächfaktor f einer LiF-Kachel hängt ausschließlich vom Absorptionsquerschnitt ($\sigma_{\text{abs}} = 940,3 \text{ b}$) und der Anzahl der Atome pro Fläche (also Kachelgewicht m , Molekulargewicht m_{mol}

¹bei 25,4 meV: (n,t) -Einfangquerschnitt: 940,3 b, (n,γ) -Wirkungsquerschnitt: 38,50 mb [KAE00].

²Streuquerschnitt ${}^{19}\text{F}$ bei 25,4 meV: 3,6 b

und Fläche A) ab.

$$f = e^{-\frac{\frac{m}{m_{\text{mol}}} N_A \sigma_{\text{abs}}}{A}}. \quad (\text{A.1})$$

Eine Abschwächung von 10^{-9} wird bei einer Kachelfläche von 10^{-2} m^2 und einem Molekulargewicht von $6 \text{ g (Li)} + 19 \text{ g (F)} = 25 \text{ g}$ mit einer Kachelmasse von 92 g erreicht.

Eine Umrechnung in Kacheldicke ist wenig sinnvoll, da sowohl die Dichte der Kachel als auch die des LiF-Pulvers variieren kann. Daher kann auch kein Abschwächfaktor gezielt hergestellt werden, sondern nur im Nachhinein abgeschätzt werden. Da die Kacheln aber ausschließlich zur vollständigen Absorption des Strahls dienen sollen, muss nur gewährleistet sein, dass eine minimale Flächendichte an jeder Stelle gegeben ist.

Außerdem zeigte sich, dass dickere Kacheln eine deutlich höhere mechanische Stabilität besitzen. Daher wurde eine Mindestmasse von 100 g angestrebt.

A.3 Die Idee zur Herstellung

LiF liegt als Pulver vor. Nach dem Pressen in die gewünschte Form wird es gesintert und erhält dadurch seine Stabilität. Nach dem Abkühlen können die Kacheln auf die gewünschte Größe zugeschnitten werden.

Beim Sintern wird ein pulverförmiges Material mehrere Stunden auf einer Temperatur knapp unter seinem Schmelzpunkt gehalten. Die einzelnen Pulverkörner verschmelzen dabei miteinander. Dies ergibt eine mechanische Stabilität, ohne jedoch eine Fernordnung wie bei einem Kristall herzustellen.

A.4 Hilfsmittel

In diesem Abschnitt werden die zur Herstellung benötigten Materialien und Werkzeuge aufgelistet und erläutert. Deren Anwendung zu Herstellung wird im Abschnitt A.5 erläutert.

A.4.1 Die Kugelmühle

Zum Pulverisieren der LiF-Splitter existiert in der ANP-Gruppe eine Fliehkraftkugelmühle³. Vor jedem Betrieb der Mühle muss geprüft werden, ob die richtige Zahl an Ausgleichsgewichten eingebaut ist. Schon eine geringe Abweichung verursacht ein lauterer Mahlgeräusch und ein „Wandern“ der Mühle.

Zum Befüllen der Mühle werden fünf Kugeln in den Mahlbecher gelegt. Dieser kann dann vollständig mit LiF-Splitttern (eventuell vorzerkleinert) gefüllt werden. Der Mahlbecher muss dann in der Mühle befestigt werden. Da die Befestigungsmutter etwas ausgeschlagen ist, muss die Spindel mit großer Kraft angezogen werden, ebenso die Kontermutter. Die Mühle kann dann mit der Drehzahleinstellung 80 betrieben werden. Dies entspricht laut Anleitung etwa 400 U/min .

³Typ „S 1000“ von „Retsch GmbH & Co. KG Haan“; <http://www.retsch.de>.

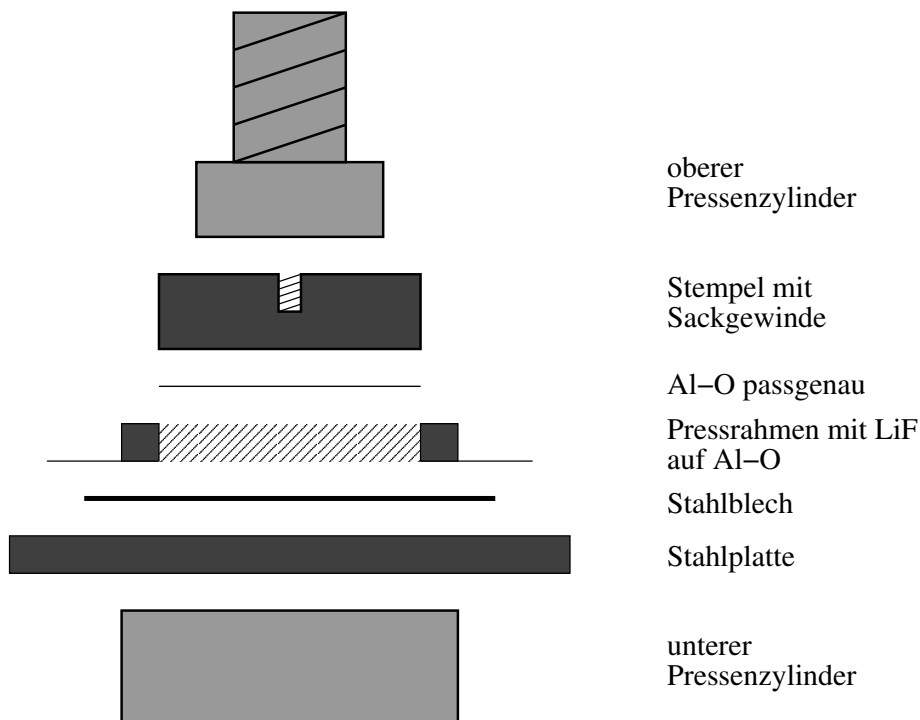


Abbildung A.1: Schematischer Aufbau beim Pressen

A.4.2 Die Presse

Zur Formgebung der Kacheln wurde die Handpresse⁴ im Keller des Physikalischen Instituts verwendet. Durch Benutzung der vorhandenen Hebelverlängerung (20 cm) lassen sich ohne Anstrengung bis zu 200 kN aufbringen. Da der Presskolben recht klein ist, empfiehlt es sich, durch Verwendung einer Stahlplatte (5 mm) den Druck etwas gleichmäßiger zu verteilen.

Die Skaleneinheit ist Tonnen und entspricht bei einer üblichen Fläche vom 100 cm² etwa 10 bar. Beide Manometer haben dieselbe Skalenteilung, das physisch größere ist aber auf 30 bar begrenzt. Bei höherem Druck muss es unbedingt durch ein Ventil abgetrennt werden.

Um die Presse wieder zu entlasten, muss ein Drehventil geöffnet werden. Leider ist es mit diesem nur schwer möglich, eine langsame Entlastung durchzuführen.

Die Stahlplatte

Der untere Presszylinder durchmisst etwa 15 cm. Das reicht nicht aus, um die Kraft auf die ganze Kachel zu verteilen. Es empfiehlt sich daher, eine 5 mm Stahlplatte aufzulegen. Für ein komfortables Arbeiten sollte diese so groß wie möglich sein - 18 cm × 18 cm waren ideal, da die Platte dann nicht an die Presssäulen stößt.

⁴„Laborpresse PW 20“ von „Paul-Otto Weber GmbH Remshalden“; <http://www.p-o-weber.de/> .

A.4.3 Der Pressrahmen

Die Form der Kacheln wird durch einen Rahmen vorgegeben, der eine Innenfläche von $11\text{ cm} \times 11\text{ cm}$ hatte. Die Höhe des Rahmens bestimmt die Dicke der Kachel, da durch Befüllen bis an den Rand die verwendete Menge LiF abgemessen wird. Anfangs wurde ein 6 mm hoher Messingrahmen verwendet, der 60 g Kacheln erzeugte, die mechanisch nicht besonders stabil waren. Der später benutzte 15 mm Rahmen lieferte 140 g Kacheln, die ausgezeichnete mechanische Eigenschaften besaßen.

Um LiF zu sparen, wurde die Rahmenhöhe auf 11 mm reduziert. Die erhaltenen Kacheln waren verwendbar, die Bruchrate beim Brennen jedoch höher als zuvor.

Der Rahmen muss auf der Innenseite glatt sein, damit kein LiF haften bleibt. Sollte bei der Herstellung eine Erodiermaschine verwendet worden sein, muss die Oberfläche mit Sandpapier nachbearbeitet werden.

Auch die Oberseite sollte glatt und ohne Unebenheiten sein, damit der Spachtel beim Wegstreichen des LiF (siehe Abschnitt A.5.3) nicht hakt.

Der Stempel

Der obere Presszylinder ist zu klein, hat nicht die passende Form und würde nicht verkippungsfrei auf das LiF drücken. Daher ist es erforderlich, einen Stempel auf das LiF zu legen, und den Presszylinder auf diesen drücken zu lassen.

Um den Presszylinder waagrecht aufsetzen zu können, ist er mit einem Sackgewinde über dem Schwerpunkt versehen, so dass er, an einer Schraube gehalten, von Hand waagrecht abgesetzt werden kann (siehe auch Abschnitt A.7).

Die Unterseite des Stempels muss glatt sein, um ein Anhaften von LiF oder Aluminiumoxidfolie (vergleiche Abschnitt A.4.6) zu vermeiden.

Die Größe des Stempels muss der des Pressrahmens genau angepasst sein. Der Spalt an jeder Seite sollte nicht größer als 0,5 mm sein.

A.4.4 Der Ofen

Für das Sintern wurde ein Ofen des Typs „Labotherm LH120/12“⁵ verwendet. Dieser erlaubt Temperaturen bis zu 1200 °C , bei einer regelbaren Aufheizgeschwindigkeit.

Die Programmierung des Ofens erfolgt durch die Eingabe von 5 Werten:

- nach die Wartezeit vor Heizbeginn,
- nach die Dauer der linearen Aufheizphase,
- nach die Endtemperatur der Aufheizphase,
- nach die Temperatur der Haltephase,
- nach die Dauer der Haltephase.

⁵„Nabertherm GmbH Lilienthal“; <http://www.nabertherm.de/>.

Sollte T1 kleiner als T2 sein, heizt der Ofen nach der Aufwärmphase mit maximaler Leistung, bis T2 erreicht ist, erst dann beginnt die Haltephase.

Alle Eingaben sind 4-stellig, Zeitangaben in Minuten, Temperaturen in Grad Celsius.

Für eine neue Programmierung muss der Stecker *nicht* gezogen werden. Es genügt, nach dem Einstellen der neuen Werte den START-Knopf zu drücken.

Am Ofen befinden sich zwei verschließbare Lüftungsöffnungen: eine unterhalb der Brennkammer, die durch einen Schieber von vorne zu bedienen ist, und eine Klappe auf der rechten Seite des Ofens (welche reperaturbedürftig ist). Beide Öffnungen sollten geschlossen sein, um eine zu schnelle Abkühlung zu vermeiden.

A.4.5 Stahlbleche und Füßchen

Das LiF wird zum Brennen auf eine Stahlblech (1 mm × 150 mm × 150 mm) gelegt. Um eine gleichmäßige Wärmeverteilung beim Brennen zu erhalten, wird dieses Stahlblech auf 4 cm hohe Füßchen (überdimensionale Fingerhüte aus Keramik) gestellt, wobei die vier Füßchen unter den Ecken des Bleches stehen.

Als Alternative zu den Stahlblechen sollten Messingbleche in Betracht gezogen werden (siehe Abschnitt A.7.3).

A.4.6 Trennfolie

Da LiF sehr reaktiv ist, wird bei hohen Temperaturen fast jedes Material angegriffen, insbesondere das beim Sintern als Unterlage dienende Stahlblech. Um dies zu vermindern, wurde eine Aluminiumoxidfolie⁶ eingesetzt, so dass Stahl und LiF keinen direkten Kontakt haben.

A.4.7 Werkzeuge

Beim Herstellungsprozess von LiF-Kacheln sind folgende Werkzeuge ungemein hilfreich:

- ein Skalpell zum Entfernen der Kleberreste an alten Kachelsplittern,
- ein haushaltsübliches Mehlsieb zum gleichmäßigen Verteilen des LiF,
- ein Trichter zum Umfüllen des LiF-Pulvers,
- mehrere weite Bechergläser zum Zwischenlagern des Pulvers.

A.5 Herstellungsprozess

A.5.1 Reinigen

Als Rohmaterial dienen alte zerbrochene Kacheln; diese müssen vor der Verarbeitung von Kleberresten befreit werden. Als brauchbare Lösung erwies sich Abkratzen mit einem Skalpell beziehungsweise Abfräsen mit einem Drehmel.

⁶ „Rath Advanced Materials GmbH Mönchengladbach“; <http://www.rath-group.com/>.

A.5.2 Mahlen

Die gereinigten Splitter werden mit der Kugelmühle 45 Minuten lang mit wechselnder Drehrichtung zu Pulver gemahlen. Danach werden mit einem feinen Teesieb untermahlene Splitter und noch vorhandene Klerberreste ausgesondert.

Das Pulver sollte nun möglichst rasch weiterverarbeitet werden, da eine starke Hygroskopie angenommen werden muss, denn schon nach wenigen Wochen verändern sich die Eigenschaften erheblich.

A.5.3 Formen und Pressen

Folgendes Verfahren hat sich als erfolgreich erwiesen:

1. Ein Stahlblech auf einer großen, ebenen, sauberen Unterlage vollständig mit einer Lage Aluminiumoxidfolie bedecken. Darauf den Pressrahmen zentriert ausrichten.
2. Das LiF-Pulver mit dem Mehlsieb gleichmäßig über dem Rahmen verteilen, bis die Rahmenhöhe an jeder Stelle erreicht ist.
3. Mit dem Spachtel das überstehende LiF *wegstreichen* – NICHT *verstreichen*, denn dies würde zu einer inhomogenen Dichte führen, die die Kachel beim Brennen springen lässt. Auf keinen Fall darf mit dem Spachtel Pulver umverteilt werden. Das LiF sollte jetzt mit der Oberkante des Pressrahmens bündig sein.
4. Nachdem das weggestrichene LiF für die nächsten Kacheln gesammelt wurde, das Stahlblech mit Rahmen und LiF erschütterungsfrei auf die Presse legen. Eine auf den Stempel zugeschnittene Aluminiumoxidfolie wird auf das LiF gelegt. (Um das LiF-Pulver nicht zu bewegen, ist es hilfreich, die Folie erst um ihren Mittelpunkt etwa 10° verdreht aufzulegen - mit dem Pressrahmen als Stütze - und dann die Folie flach in ihre Endposition zu drehen.)
5. Den Stempel waagrecht auf die Folie setzen, ohne am Pressrahmen zu verkanten.
6. Die Presse mit Hilfe der Spindel schließen, bis der Presszylinder den Stempel fast berührt. Mit dem Hebel vollständig schließen und Druck aufbauen. Bei der Maximalkraft der Presse (20 Tonnen) einige Sekunden verweilen. Dann den Druck möglichst langsam über das Drehventil wieder ablassen.
7. Den Pressrahmen nach oben abheben, eventuell vorsichtig mit dem Skalpell lockern. Beim Hochziehen mit zwei Händen kann der Stempel als Stützpunkt (gleichmäßig belasten) verwendet werden. Dieser Schritt erfordert einige Fingerkraft.
8. Schraube oben in den Stempel drehen, und den Stempel daran vorsichtig und *waagrecht* nach oben wegheben.
9. Mit einer Pinzette die obere Aluminiumoxidschicht entfernen

Jetzt steht bereits fest, ob ein gutes Resultat erzielt werden kann: Bereits kleine Risse auf der Oberfläche deuten ein unweigerliches Springen der Kachel an.

A.5.4 Brennen

Um beim Brennen eine gleichmäßige Wärmezufuhr und -abfuhr zu gewährleisten, wird das Stahlblech mit dem gepressten LiF auf vier Keramikfüßchen gestellt, wobei die Füßchen unter den Ecken des Bleches stehen.

Um die Kacheln während des Brennens vor Schmutz und chemischen Reaktionen zu schützen, wird eine Aluminiumoxidfolie auf die Kacheln gelegt. Dies ist notwendig, da sich auf den Stahlblechen eine Fluorid-/Oxidschicht bildet. Diese springt beim Abkühlen, verteilt sich auf den Kacheln und ist von dort nicht mehr zu entfernen.

Auf diese Folie wird zur besseren Wärmeverteilung ein weiteres Stahlblech gelegt.

Um Zeit zu sparen, ist es möglich, mehrere Kacheln gleichzeitig zu brennen. Dabei werden vier Stahlbleche nebeneinander gelegt (auf neun Füßchen). Darüber können in einer zweiten Lage nochmals vier Bleche gelegt werden. Mehr als zwei Lagen sollten theoretisch möglich sein, dies wurde jedoch nicht getestet.

Der Ofen wird dann 360 Minuten linear auf 740°C geheizt und dann weitere 360 Minuten auf dieser Temperatur gehalten. Die Abkühlung auf 50°C benötigt etwa 24 Stunden.

Aus frühen Versuchen konnte geschlossen werden, dass ein eventueller Bruch meist bei hohen Temperaturen stattfindet. Da ein wahrscheinlicher Grund für das Springen einer Kachel eine schnelle Temperaturänderung darstellt, muss darauf geachtet werden, dass bei Temperaturen über 200°C alle Lüftungsöffnungen des Ofens verschlossen sind.

A.5.5 Reinigen

Nach dem Abkühlen (unter 50°C) können die Kacheln aus dem Ofen genommen und mit einer Bürste von der Aluminiumoxidfolie gereinigt werden. Die LiF-Krümel um die Kacheln sollten gesammelt, aber nicht wiederverwendet werden, da sie stark verunreinigt sind.

A.6 Verarbeitung

Nach dem Brennen sind die Kacheln äußerst stabil und können mechanisch bearbeitet werden. Das Schneiden mit einer Drehmel-Diamantscheibe hat sich als sehr praktikabel erwiesen, auch Bohren ist unproblematisch.

Für die Blenden wurden jeweils vier Kacheln überlappend zu einer Blende geklebt (siehe [Schu04]).

Alternativ dazu könnte die Blende aus dem Ganzen gesägt werden, wie das bei dem Experiment TRINE [Plo04] geschehen ist. Dadurch wird die Blende insgesamt dünner, und die Blendenebene ist für beide beschneidende Richtungen genau die gleiche.

A.7 Alternative Ideen

Dieser Abschnitt soll Ideen und Anregungen wiedergeben, die zwar vielversprechend sind, aber leider nicht bis zum Erfolg weiterentwickelt werden konnten.

So ist beispielsweise das waagerechte Aufsetzen des Stempels auf das LiF-Pulver noch ein kritischer Punkt, der der Optimierung bedarf. Auch eine Flutung des Ofens mit Stickstoff während des Brennvorgangs ist einen Test wert.

A.7.1 Schmelzen

Aufgrund der demotivierenden Berichte von früheren Sinterversuchen wurde eine neue Methode erprobt: Sollte es gelingen, LiF-Pulver zu einer Kachel zu schmelzen, müsste diese mechanisch stabiler sein, da ein Glas quasi durchgehend molekulare Verbindungen besitzt, im Gegensatz zum Sintergut, bei dem einzelne Körner nur punktweise zusammengeschmolzen sind.

Erste Versuche waren erfolgversprechend, zeigten aber auch Schwierigkeiten auf: LiF hat seinen Schmelzpunkt zwischen 840 °C und 870 °C. Diese Temperatur schränkt die Auswahl an Materialien für eine Schmelzform ein. Für Tests wurde eine flache Stahlwanne mit Deckel verwendet, die mit Aluminiumoxidfolie und Graphitfolie⁷ ausgekleidet war. Nach zwei Stunden bei 880 °C war das Resultat ein mechanisch sehr stabiles, transparentes LiF-Stück, von dem jedoch nie geklärt wurde, ob es kristallin oder glasartig war. Dies ist jedoch entscheidend, da die Braggstreuung eines Kristalls im Experiment absolut unbrauchbar wäre. Außerdem wies die Probe Luftlöcher auf. Beim Versuch, diese zu vermeiden, indem die Brennzeit auf sechs Stunden verlängert wurde, verschwand das LiF jedoch vollständig: Einerseits reagierte es mit der Stahlwanne, andererseits saugte sich die als Unterlage dienende, poröse Keramikplatte damit voll. Als Ursache kommt entweder eine zu lange Brennzeit oder eine Loch in der Graphitfolie in Betracht.

Für weitere Versuche in diese Richtung muss unbedingt darauf geachtet werden, dass die Stahlwanne aus einem Stück gefräst ist. Außerdem sollte die Ofenatmosphäre sauerstofffrei sein (z.B. Vakuum oder Stickstoff).

A.7.2 Aufschwemmen

In der Vergangenheit [Bül98] wurden Kacheln durch Aufschwemmen mit Wasser hergestellt. Dies verbleibt beim Sintern jedoch in der Kachel und wirkt somit als unerwünschtes Streuzentrum.

A.7.3 Messingbleche

Bei früheren Produktionen [Bül98] wurde Messing verwendet, da dies wenig von LiF angegriffen wurde. Ungünstigerweise wird Messing bei den gegebenen Temperaturen so weich, dass die „Füßchenmethode“ nicht funktioniert. Eine Kombination beider Methoden (z.B. Stahlblech mit Messing überzogen) könnte die Vorteile keine Korrosion und gute Wärmeverteilung vereinen.

Der aus früheren Tagen existierende zerlegbare Rahmen erwies sich als untauglich, da beim Entfernen des Rahmens die unweigerlichen Erschütterungen die frischgepresste, ungesinterte Kachel zerstören.

A.7.4 Formen und Pressen

Durch das Mehlsieb und die Stahlplatte wurde die Bruchrate bereits reduziert. Dennoch zeigt sich, dass die häufigste Bruchstelle beim Brennen die Kachelränder sind. Dies könnte auf eine verbleibende Inhomogenität im Pulver hindeuten, die dadurch erklärt werden kann, dass beim Pressen das Pulver zum Rand hin, durch den nie ganz zu vermeidenden Spalt zwischen Rahmen und Stempel, ausweichen kann. Wie das jedoch ohne ein völlig neues Konzept verbessert werden kann, ist unklar.

⁷aus der Glasbläserei des Physikalischen Instituts Heidelberg.

A.8 Hinweise

Da Lithiumfluorid gesundheitsschädlich ist, sollte beim Umgang damit stets auf entsprechende Sicherheitsmaßnahmen geachtet werden. Das Tragen von Handschuhen und Atemschutzmaske ist obligatorisch. Ebenso muss auf die krebserregende Wirkung der Aluminiumoxidfolie hingewiesen werden.

Da das LiF mittlerweile eine unbekannte Zahl an Zyklen (Pulver - Brennen - Kachel - Mahlen) durchlaufen hat, und dabei einige Verunreinigungen erlitt (erkennbar an den unterschiedlichen Farbtönen der Kacheln), sollte vor einer erneuten Verwendung unbedingt eine chemische Reinigung, zumindest aber ein Analyse durchgeführt werden.

Das Herstellen von LiF-Kacheln ist ein schwieriger Prozess, der einiges an Fingerspitzengefühl erfordert. Es empfiehlt sich daher, mit ${}^7\text{LiF}$ zu üben. Dies sollte jedoch stets gut markiert und getrennt von ${}^6\text{LiF}$ aufbewahrt werden, um den fatalen Versuch, einen Neutronenstrahl mit ${}^7\text{LiF}$ zu stoppen, zu vermeiden.

A.9 Fazit

Durch Produktion dickerer Kacheln, die bessere Druckverteilung beim Pressen (aufgrund der Stahlplatte) sowie die bessere Wärmeverteilung durch die Füßchen konnte die Ausschussrate beim Brennen reduziert werden. Gleichzeitig verbesserte sich die Stabilität der Kacheln deutlich. Ansätze zur weiteren Optimierung sind vorhanden.

Anhang B

Motorsteuerung

Beim *PERKEO II*-Experiment ist es notwendig, drei Shutter sowie zwei Eichkarusselle¹ zu bewegen. Dies muss vollautomatisch und exakt reproduzierbar geschehen. Für diesen Zweck bieten sich Schrittmotoren an, da sie eine hohe Präzision mit geringem Steueraufwand erreichen.

Zur Steuerung wurde ein sehr modulares Programm entwickelt. Voll konfigurierbar erlaubt es, die gesamte Motorsteuerung mit nur einem Parameter durchzuführen. Durch seine Modularität kann es in zukünftigen Experimenten wiederverwendet werden. Selbst wenn völlig andersartige Hardware (Motoren, Messcontroller) verwendet werden sollte, ist eine Anpassung mit sehr geringem Aufwand möglich.

B.1 Programm-Philosophie

Das Programm soll nicht nur die Motorenansteuerung übernehmen, sondern auch gleichzeitig unabhängig von der Motorelektronik prüfen, ob die jeweiligen Motoren in der richtigen Position sind. Dies geschieht, um Kollisionen der Motoren zu vermeiden, sowohl untereinander als auch gegen Endbereiche (z.B. Wand). Da mit den Motoren unter anderem sensibelste Folien bewegt werden, wird bei zweifelhaften Positionsmeldungen jede Bewegung mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

B.2 isel-Schrittmotoren

Im Experiment werden zwei Steuerboxen des Typs „C10-C“² verwendet. Diese übernehmen die gesamte Hardwareansteuerung der isel-Schrittmotoren. Eine Box kontrolliert die Shutter „UP“³, „DOWN“⁴ und „BS“⁵. Die andere ist für die beiden Eichkarusselle zuständig. Die Boxen werden vom Rechner über zwei serielle Schnittstellen (RS-232) angesprochen.

¹Einrichtung zur Energieeichung der Detektoren: Verschiedene radioaktive Quellen können aus einer Abschirmung auf zwei Drehtellern einzeln vor die Szintillatoren gefahren werden (siehe Abschnitt B.5).

²„isel automation“ www.isel.de, www.systro.de

³upstream, zwischen Polarisator und Kollimationssystem

⁴downstream, direkt nach dem Kollimationssystem

⁵beamstop, um den Neutronenfluss zum Polarisationsmonitor zu kontrollieren

B.3 Messcontroller

Zur Positionsüberprüfung werden Potentiometer (Shutter-UP und Karusselle) beziehungsweise Mikroschalter (Shutter-DOWN und Shutter-BS) verwendet. Diese werden von einem Messcontroller des Typs „A343-2“⁶ abgelesen. Der Messcontroller verfügt über jeweils acht Kanäle ADC (Spannungsabfrage 0 bis 4 V, 1 mV Auflösung), DAC (konstante Gleichspannungsausgabe bis 10 V) und IO-Port (digitales NIM-Signal, Ein- und Ausgabe). Die Kommunikation mit dem Messrechner erfolgt über die USB-Schnittstelle.

B.4 Steuerprogramm

Die Grundkomponente kann ohne Modifikation auch zur Ansteuerung anderer Geräte über die serielle Schnittstelle eingesetzt werden (z.B. Hallsonde [blesen.cpp], YZ-Scanner, ...). Alle wesentlichen Parameter sind über eine Konfigurationsdatei (siehe Abschnitt B.4.2) wählbar. Das Programm ist in C++ für Linux geschrieben, kann aber auch unter MS-DOS kompiliert werden (mit Ausnahme der USB-Funktionalität). In dieser Anleitung wird die Version 1.0.3 beschrieben.

Um die einzelnen Motoren anzusteuern, werden die drei ausführbaren Programmkomponenten „motor“, „motorcomfort“ und „motorget“ in die jeweiligen Motornamen umkopiert z.B.: „shutterup“, „shutterupcomfort“ und „shutterupget“. Die zu einem Motor gehörenden drei Programme greifen auf dieselbe Konfigurationsdatei zu, deren Name sich aus dem Motornamen und der Erweiterung „.ini“ zusammensetzt z.B.: „shutterup.ini“.

B.4.1 Konzept der Positionsnummern

Um einen einfachen und einheitlichen Aufruf des Programms aus dem Messprogramm zu ermöglichen, werden Positionsnummern definiert:

Pos.-Nr.	Bedeutung	
	Karussell	Shutter
0	geparkt	offen
1	Quelle 1	geschlossen
2	Quelle 2	Referenzschalter
3	Quelle 3	
4	Referenzschalter	

Notwendigkeit einer Referenzposition Bei einem Reset der isel-Steuerboxen werden die Positionszähler auf „0“ gesetzt. Würde dies geschehen, während der Motor real auf der internen Position „0“ steht, wäre der Stromausfall nicht detektierbar. Da bei einem Stromausfall eine Dejustierung wegen des fehlenden Haltestroms sehr wahrscheinlich ist, wäre eine Verschiebung aller Positionen die Folge.

Durch Einführung der Referenzposition kann ein Stromausfall jedoch leicht daran erkannt werden, dass im Logfile eine Bewegung von der Referenzposition startet, ohne dass diese vorher angefahren wurde. Der Nutzer kann entsprechend reagieren (siehe Abschnitt B.8)

⁶E-Werkstatt, Physikalisches Institut, Uni Heidelberg

Warnbereich Die einzelnen Positionen werden unter anderem mit Potentiometern überprüft. Dabei gibt es Grenzwerte, außerhalb deren jede Bewegung mit einer Fehlermeldung verweigert wird. Da das System jedoch driften kann und unerwartete Systemstillstände vermieden werden sollen, wurden die Warnbereiche eingeführt. Diese führen wie die Grenzwerte bei Überschreiten zu einer Warnmeldung, die Bewegung wird jedoch durchgeführt.

B.4.2 Konfigurationsdatei

Die Konfiguration wird in einer ASCII-Datei vorgenommen, dabei gelten folgende Regeln:

1. Leerzeichen am Beginn einer Zeile werden grundsätzlich ignoriert.
2. Ist das erste Zeichen einer Zeile ein „#“, so ist es ein Kommentar und wird ignoriert.
3. Die Parameterzuweisung erfolgt mit „Option = Wert“ oder „Option * = Wert“ wobei „*“ die jeweilige Positionsnummer ist (siehe unten).
4. Leerzeichen zwischen „Option“ und „=“ werden ignoriert.
5. Ebenso Leerzeichen vor und nach der Positionsnummer „*“.
6. Führende Leerzeichen von „Wert“ werden ebenfalls ignoriert.
7. Groß-/Kleinschreibung wird bei den Optionsnamen nicht berücksichtigt.
8. Wird eine Option mehrfach verwendet, gilt die letzte Zuweisung.

Tabelle B.1 gibt Auskunft über die möglichen allgemeinen Optionen im Konfigurationsfile.

Tabelle B.2 gibt Auskunft über die Positions-Optionen, die für jede Position spezifiziert werden müssen.

Vorsicht: Das Programm prüft die Konfigurationsdatei nicht auf fehlerhafte oder inkonsistente Angaben.

B.4.3 LogFile

Alle drei Programme schreiben Daten in die gleiche Logdatei. Ihr Name setzt sich ähnlich wie die Konfigurationsdatei aus dem Motornamen und der Erweiterung „.log“ zusammen, z.B.: „shutterup.log“. Gleich zu Programmbeginn erfolgt der Datumseintrag mit sofortigem Bufferflush, um eventuelle Programmabstürze verfolgen zu können. Die restliche Ausgabe erfolgt am Ende des Programms.

Die Datei kann als Grundlage von Driftuntersuchungen (Shutter-UP, Karusselle) dienen. Außerdem ist sie sehr hilfreich zur genauen Rekonstruktion der Shutterstände zu beliebigen Zeitpunkten.

Optionsname gültige Werte	Erläuterung
<code>devicename</code> Zeichenkette	Der Gerätename der seriellen Schnittstelle
<code>axesinstalled</code> 1, 3, 5 oder 7	Pattern der installierten Achsen - siehe [Isel]
<code>axenumber</code> 1,2,4	Pattern der Achse des aktuellen Motors - siehe [Isel]
<code>externalcheckforzero</code> Zeichenkette	Name des externen Programms, das ausgeführt wird, und das „0“ zurückliefern muss, andernfalls wird der Motor nicht bewegt. Wird insbesondere beim Eichkarussell benötigt - siehe B.5
<code>adcnumber</code> 0 – 7	Der Eingangskanal des Messcontrollers, an dem das Potentiometer angeschlossen ist
<code>highlimitisel</code> -8388607 – 8388607	Maximale Schrittposition, zu der der Motor fahren kann
<code>lowlimitisel</code> -8388607 – 8388607	Minimale Schrittposition, zu der der Motor fahren kann
<code>maxspeedisel</code> 30 – 10000	Maximale Geschwindigkeit in Schritten pro Sekunde, mit der der Motor fahren kann
<code>minspeedisel</code> 30 – 10000	Minimale Geschwindigkeit in Schritten pro Sekunde, mit der der Motor fahren kann
<code>noiselcheck</code> 0-ja 1-nein	Positionsprüfung mit Isel
<code>nopotcheck</code> 0-ja 1-nein	Positionsprüfung mit Potentiometer
<code>nodigcheck</code> 0-ja 1-nein	Positionsprüfung mit Mikroschalter
<code>digpattern</code> 0 - 255 48 $\hat{=}$ 00110000 entspricht den Kanälen 5 und 6	Bitmuster: welche Mikroschalter werden ausgelesen
<code>stepsprocm</code> Fließkomma	Skalierungsfaktor: Alle folgenden Schritt- und Geschwindigkeitsangaben werden hiermit multipliziert, bevor sie an den Motor gesendet werden. Vom Motor gelesene Positionen werden hiermit dividiert. Gilt auch für die Parameter von <code>motorcomfort</code> .
<code>speed</code> 30 – 10000	Die Geschwindigkeit des Motors in Schritten pro Sekunde. Mit <code>stepsprocm</code> skaliert.

Tabelle B.1: Übersicht über die allgemeine Optionen im Konfigurationsfile

Die folgenden Optionen müssen mit Positionsnummer angegeben werden (das Sternchen durch eine einstellige Zahl ersetzen):

<code>possteps *</code>	Motorstellung in Schritten, für jede Position obligatorisch. Mit <code>stepsprocm</code> skaliert.
<code>-8388607/stepsprocm</code>	
<code>- 8388607/stepsprocm</code>	
<code>poslowlimit *</code>	Minimale Potentiometerspannung bei der eine Position als gültig erkannt wird.
Fließkomma 0 – 4	
<code>poshighlimit *</code>	Maximale Potentiometerspannung bei der eine Position als gültig erkannt wird.
Fließkomma 0 – 4	
<code>poslowwarning *</code>	Bei kleineren Potentiometerspannungen als dieser wird eine Kalibrationswarnung ausgegeben.
Fließkomma 0 – 4	
<code>poshighwarning *</code>	Bei größeren Potentiometerspannungen als dieser wird eine Kalibrationswarnung ausgegeben.
Fließkomma 0 – 4	
<code>poscenter *</code>	Legt mittlere Potentiometerspannung fest, macht nur Sinn mit <code>posrangelimit *</code> oder <code>posdigvalue *</code>
Fließkomma 0 – 4	
<code>posrangelimit *</code>	Legt minimale und maximale Potentiometerspannungen symmetrisch zu <code>poscenter *</code> fest
float 0 – 2	
<code>posrangewarn *</code>	Bei größeren Potentiometerspannungen als dieser wird eine Kalibrationswarnung ausgegeben.
float 0 – 2	
<code>posdigvalue *</code>	Bitmuster: welche Mikroschalter müssen aktiv sein. Vorsicht: Hier nicht mehr Bits angeben als in <code>digpattern</code> spezifiziert.
Ganzzahl 0 – 255	
16 $\hat{=}$ 00010000 entspricht Kanal 5	

Tabelle B.2: Übersicht über die Positions-Optionen im Konfigurationsfile

```

#Kommentar: Beispiel-Konfigurationsdatei für Karusellunten

devicename=/dev/ttyS0

AxeNumber=1
AxesInstalled=3

AdcNumber = 5

#Prüfe vor jeder Bewegung ob karusselloben in Parkposition ist
ExternalCheckforZero=/home/perkeo/control/karusellobenget

# Definiere allgemeinen maximalen Verfahrbereich der nie überschritten wden kann
HighLimitISEL = 48000
LowLimitISEL = -1500
MaxSpeedISEL = 1000
MinSpeedISEL = 30

StepsProCm = 1

speed=800
# entspricht 6°/s --> 90° benötigen 15 Sekunden

NoIselCheck=0

NoPotiCheck=0

NoDigCheck=1
# keine Mikroschalter am Digitalport angeschlossen

#Parkposition
PosSteps      0 = 1500
PosLowLimit   0 = 0.9
PosHighLimit  0 = 1.0
PosLowWarning 0 = 0.929
PosHighWarning0 = 0.949

#Quelle1
PosSteps      1 = 14700
PosCenter     1 = 1.3
PosRangeLimit 1 = 0.1
PosRangeWarn  1 = 0.01
# die gleiche Wirkung hätte:
#PosLowLimit  1 = 1.2
#PosHighLimit 1 = 1.4
#PosLowWarning 1 = 1.290
#PosHighWarning1 = 1.310

#Quelle2
PosSteps      2 = 25950
PosLowLimit   2 = 1.6
PosHighLimit  2 = 1.7
PosLowWarning 2 = 1.608
PosHighWarning2 = 1.628

#Quelle3
PosSteps      3 = 36950
PosLowLimit   3 = 1.9
PosHighLimit  3 = 1.999
PosLowWarning 3 = 1.912
PosHighWarning3 = 1.932

#ReferenzPosition
PosSteps      4 = 0
PosLowLimit   4 = 0.85
PosHighLimit  4 = 0.95
PosLowWarning 4 = 0.886
PosHighWarning4 = 0.906

```

Tabelle B.3: Beispiel eines Konfigurationsfiles für ein Eichkarussell

B.4.4 Parameter und Fehlerwerte

Das Hauptprogramm benötigt nur einen Parameter: die Zielposition. Zum Beispiel öffnet `shutterup 0` den Shutter-UP.

Rückgabewerte sind:

0 - Fehlerfreie Ausführung

1 - Motor war bereits in Zielposition, Motor hat sich nicht bewegt, kein Fehler

16 - Motor ist im Warnbereich, ansonsten erfolgreiche Ausführung

≥ 32 - Fehler! Motor hat sich nicht oder falsch bewegt.

B.4.5 motorget

`motorget` ist eine Variante von `motor` ohne Parameter. Der Befehl liest die aktuelle Position aus und gibt sie als Rückgabewert zurück. Es findet keine Bewegung statt. Dabei bedeutet:

0-15 fehlerfrei in der entsprechenden Position

16-31 selbe Positionen, diesmal ist das Potentiometer aber im Warnbereich

> 32 Motor in unbekannter Position oder sonstiger Fehler

B.4.6 motorcomfort

Folgende Befehle stehen zur Verfügung, Parameter in eckigen Klammern sind optional:

`motorcomfort i` initialisiert die Isel Steuerbox. Ist notwendig nach jedem Stromausfall oder Reset einer Steuerbox. Vorsicht: Die Positionswerte aller an der gleichen Box angeschlossenen Motoren gehen verloren!

`motorcomfort gi` gibt die aktuelle Position des Motors zurück

`motorcomfort ga ADCNUM` gibt die Spannung am Messcontroller Eingang ADCNUM zurück

`motorcomfort gd [IONUM]` gibt den Zustand am Messcontroller IO-Port zurück (ohne Parameter alle Kanäle)

`motorcomfort sa POSITION [SPEED]` fährt zur absoluten Position

`motorcomfort sr DISTANZ [SPEED]` fährt von der aktuellen Position relativ

`motorcomfort r [SPEED]` Referenzfahrt in negative Richtung

`motorcomfort s0` setzt an der aktuellen Position den absoluten Nullpunkt (notwendig nach Referenzfahrten)

`motorcomfort sd DACNUM SPANNUNG` setzt am Messcontroller Ausgangskanal DACNUM auf SPANNUNG (in Volt)

`motorcomfort l` zeigt die im Konfigurationsfile eingestellten Werte an

B.4.7 Potentiometerauslese

Bei den ersten Messungen traten bei den Potentiometern große Schwankungen auf (bis zu 20 mV), daher werden in der aktuellen Programmversion die Potentiometer zehnmal ausgelesen und das arithmetische Mittel verwendet. Dadurch wird wieder eine Genauigkeit von 2 mV und besser erreicht.

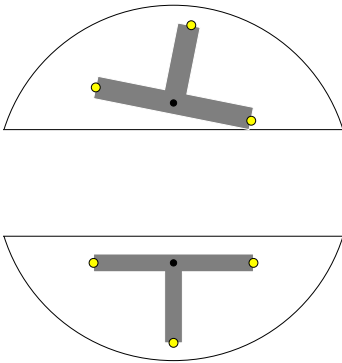


Abbildung B.1: Oberes Karussell in Referenzposition

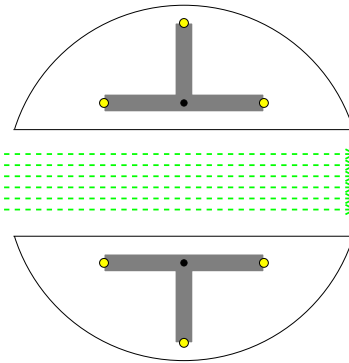


Abbildung B.2: Oberes Karussell in Parkposition - Neutronenstrahl an

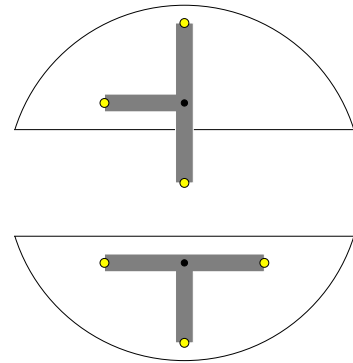


Abbildung B.3: Oberes Karussell aktiv (erstes Präparat)

Die beiden Halbkreisscheiben markieren das Gehäuse mit der Abschirmung. Die gelben Kreise stellen die Quellen dar. Die grauen Drehteller sind um die schwarzen Achsen drehbar. Die blauen Pfeile beschreiben den Neutronenstrahl.

B.5 Karussell

Die zwei Eichkarusselle sind Rotationsmotoren ohne Endposition. Um eine Positionsüberprüfung zu ermöglichen, ist mit den Achsen je ein Potentiometer verbunden, das nur drei Umdrehungen zulässt. Daher kann die Bewegung nicht nur in eine Drehrichtung stattfinden: Die Parkposition wird in negativer Richtung angefahren.

Es existiert ein Referenzschalter, um eine exakte Repositionierung, beispielsweise nach einem Stromausfall, zu ermöglichen.

Bei gleichzeitiger Aktivierung beider Eichkarusselle würden die Präparate zerstört werden. Daher verhindert die Software, dass sich ein Karussell bewegt, wenn das andere nicht in Parkposition ist. (siehe Abschnitt B.4.2 `externalcheckforzero`)

Einer Umdrehung des Motors entsprechen 48000 Schritte. Er kann in keine Richtung über den Referenzschalter fahren (sofortiger Stopp und Dekalibration). Sollte dies trotzdem notwendig sein, kann der Referenzschalter direkt am Motor mithilfe des kleineren runden Steckers abgetrennt werden; jetzt ist ein Überfahren in beide Richtungen möglich.

Bei Aufsicht auf den Motor ist dessen normale (positive isel-Schritte) Drehrichtung mathematisch positiv (Gegenuhrzeigersinn).

B.5.1 Montage

Da bei der Justage des ersten Karussells das zweite noch nicht in Parkposition sein kann (dies ist noch nicht definiert), muss die Softwareblockade abgeschaltet werden. Dies geschieht im Konfigurationsfile (`karusselloben.ini`) durch auskommentieren der Zeile mit der Option `externalcheckforzero`. Nun muss explizit der Benutzer darauf achten, dass die Karusselle sich nicht berühren. Es ist sinnvoll, mit der Justage des oberen Karussells zu beginnen, da das untere von der Schwerkraft in Parkposition gehalten wird.

Zuerst muss der Motor in Parkposition gebracht werden:

`karussellobencomfort r` für eine Referenzfahrt.

`karussellobencomfort s0`, um den internen Positionszähler der Isel-Steuerbox auf Null zu setzen.

`karussellobencomfort sa 2000` fährt etwa 15° um Spiel für die Feinjustierung der Parkposition zu haben. Außerdem ergibt eine von der Referenzposition unterschiedliche Parkposition eine weitere Möglichkeit zur Fehlerprüfung (siehe Abschnitt B.4.1).

Anschließend wird der Motor mit der Karussellachse und dem Potentiometer verbunden. Letzteres erst jetzt, um sicherzustellen, dass es bei der Referenzfahrt nicht außerhalb seiner mechanischen Anschläge gedreht wird. Das Karussell sollte beim Festschrauben auf 5° genau in der Parkposition sein.

Mit relativen Bewegungen `karussellobencomfort sr -120` wird das Karussell jetzt in die exakte Parkposition gefahren, wobei die „-120“ ein Grad in negative Richtung bedeuten, und natürlich der tatsächlichen Situation angepasst werden müssen. Mehrfaches Verfahren zum Finden der genauen Position ist möglich.

Ist die exakte Position erreicht, wird mit `karussellobencomfort gi` die aktuelle Position abgefragt und notiert.

Mit `karussellobencomfort sr 12000` wird jetzt 90° weiter gedreht, zur nächsten Position (erste Eichquelle). Dann wird wieder mit kleinen Relativbewegungen die exakte Position gesucht und notiert.

Wenn die Positionen aller Quellen gefunden sind, müssen die einzelnen Positionen nochmals direkt angefahren werden `karussellobencomfort sa 2000` (wenn „2000“ die erste Position ist). Da Achsen, Kupplungen und Durchführungen ein gewisses Spiel haben, ergibt sich mit der Schwerkraft eine leichte Hysterese, die eventuell durch nochmalige Feinjustage der Positionen berücksichtigt werden muss.

An jeder Position muss mit `karussellobencomfort ga 3` die Potentiometerspannung notiert werden („3“ ist hier die Kanalnummer des Messcontrollereingangs, an der das Potentiometer des oberen Karussells angeschlossen ist).

Nun müssen die Positionswerte (Schritte und Spannungen) noch in die Konfigurationsdatei eingetragen werden (Position 0: Parken; Position 1-3: Präparate; Position 4: Referenzposition).

Sobald das Karussell in der Parkposition steht kann die Softwareblockade wieder eingeschaltet werden und mit dem zweiten Karussell fortgefahren werden.

B.6 Shutter-UP

Ebenso wie die Karusselle, besitzt der Shutter-UP ein Potentiometer zur Positionskontrolle. Ein Referenzschalter ist zwar auch vorhanden, jedoch sollte in der verwendeten mechanischen Konfiguration keine Referenzfahrt durchgeführt werden, da die in der Isel-Steuerbox fest eingestellte Geschwindigkeit den Shutter zerstören könnte. Deshalb wird der Referenzschalter nicht angeschlossen und die Eichung erfolgt manuell. Die Position „2 - Referenzposition“ entfällt daher.

Durch Ziehen des Sub-D Steckers am Motor wird der Motor von der Steuerbox getrennt, damit er von Hand bewegt werden kann. Beim Abwärtsbewegen der Kachel ist kurz vor dem Anschlag

das leichte Knacken des Referenzschalters hörbar. Beim Wiederaufwärtsbewegen erfolgt erneut ein Knacken: In dieser Position sollte der Motor wieder mit der Steuerbox verbunden werden, damit der Haltestrom die Position fixiert.

Jetzt muss mit `shutterupcomfort s0` der Nullpunkt noch an die aktuelle Stelle gesetzt werden. Mit `shutterupcomfort ga 7` wird der Potentiometerwert an der aktuellen Stelle und +85 Schritte⁷ (`shutterupcomfort sr 85`) weiter oben ermittelt. Nachdem die Konfigurationsdatei mit diesen Werten angepasst wurde, ist der Shutter-UP betriebsbereit.

B.7 Shutter-DOWN/-BS

Shutter-DOWN und Shutter-BS sind nicht mit einem Potentiometer ausgerüstet, dafür jedoch mit einem funktionierendem Referenzschalter. Außerdem sind in den oberen und unteren Positionen jeweils Microschalter angebracht, die über den IO-PORT des Messcontrollers abgefragt werden.

Entsprechend den belegten IO-PORT-Kanälen ist die Konfiguration `digpattern` zu setzen. Die isel-Schritte für die einzelnen Positionen müssen durch langsame Annäherung ausprobiert werden. Die Werte für `posdigvalue *` der einzelnen Positionen sind die jeweiligen Rückgabewerte von `motorcomfort gd` verknüpft durch ein bitweises UND mit `digpattern`.

Nach Einrichten der Konfigurationsdateien, muss nur noch eine Referenzfahrt gemacht werden, um die Shutter in Betrieb nehmen zu können. Dabei ist darauf zu achten, dass niemals eine Referenzfahrt gestartet wird, wenn der Motor bereits den Referenzschalter berührt. Dies würde unweigerlich zum Verbiegen der Mechanik führen. Verhindern lässt sich das durch kleine Relativbewegungen⁸.

Der Referenzfahrt `shutterdowncomfort r` sollte ein `shutterdowncomfort s0` folgen.

Bei diesen beiden Shuttern kann es aufgrund ihrer Konstruktion notwendig sein, eine Referenzfahrt zu machen, obwohl kein Stromausfall oder ähnliches Ereignis für einen Kalibrationsverlust verantwortlich ist. Da die Motoren permanent gegen die Schwerkraft kämpfen, können Erschütterungen, wie Sie die Vakuumpumpen verursachen, den Nullpunkt kontinuierlich verschieben.

B.8 Stromausfall

Bei einem Ausfall der Spannungsversorgung der isel-Steuerboxen, wird deren interner Positionszähler gelöscht. Da die Software die isel-Positionen mit den Potentiometer und Mikroschaltern überprüft, wird eine falsche Bewegung (gegen Hindernisse) vermieden. Jedoch ist ein Benutzereingriff notwendig:

1. An den betroffene(n) isel-Box(en) per Handschalter einen Reset durchführen.
2. Jede betroffene Box muss initialisiert werden
(`shutterupcomfort i` bzw. `karussellobencomfort i`)

⁷Erwies sich als Fahrweg, der den Strahl vollständig öffnet, ohne dass der Shutter an die Wand stößt.

⁸Der Fahrweg kann den Konfigurationsfiles entnommen werden: Die Hälfte der Differenz `possteps1 - possteps0`.

3. Alle Motoren der betroffenen Box(en) müssen neu justiert werden: Entweder per Referenzfahrt (siehe B.5.1 und B.7) oder per manueller Eichung (siehe B.6). Bei den Karussellen muss dabei explizit jede Kollision vermieden werden (zuvor muss die Softwareblockade abgeschaltet werden, siehe B.4.2).

B.9 Bug Liste

Die programminterne Fehlerbehandlung ist noch überarbeitungsbedürftig. Beim gleichzeitigen Auftreten von mehreren Warnungen oder Fehlern, kann der zurückgegebene Wert in ungünstigen Fällen eine Addition mehrerer Fehlercodes sein. Aus dem Logfile lässt sich die tatsächliche Fehlerursache jedoch leicht ermitteln. Dennoch würde eine modulares Errorhandlingkonzept die Übersichtlichkeit und das Handling des Quelltextes verbessern.

Auf keinen Fall dürfen zwei Steuerprogramme gleichzeitig ausgeführt werden, dies kann den Messcontroller zum Absturz bringen.

B.9.1 Fehler der isel-Box

Gelegentlich bewegt sich ein Motor nicht, obwohl die Steuerbox intern die normale Soll-Position speichert. Sie gibt auch keine Fehlermeldung zurück. Einzig die Überprüfung mit Potentiometern und Mikroschaltern findet den Fehler. Danach ist ein Benutzereingriff erforderlich.

Nach Referenzfahrten wird der Positionszähler der isel-Box nicht immer automatisch auf „0“ gesetzt. Es empfiehlt sich, dies immer zu prüfen und gegebenenfalls manuell nachzuholen.

Literaturverzeichnis

- [Abe02] H. Abele, M. Astruc Hoffmann, S. Baeßler, D. Dubbers, F. Glück, U. Müller, V. Nesvizhevsky, J. Reich and O. Zimmer. Is the Unitarity of the Quark-Mixing CKM Matrix Violated in Neutron β -Decay? *Phys. Rev. Lett.* **88** 211801 (2002)
- [Abe03] H. Abele, E. Barberio, D. Dubbers, F. Glück, J.C. Hardy, W.J. Marciano, A. Serebrov, N. Severijns. Quark Mixing, CKM Unitarity. *Eur.Phys.J.* **C33** 1 (2004); arXiv:hep-ph/0312150
- [Bae96] S. Baeßler. *Die Betaasymmetrie im Zerfall des freien Neutrons*. Dissertation, Universität Heidelberg (1996)
- [Bül98] P. von Bülow. *Aufbau eines Protonendetektors zur Messung der Neutrinoasymmetrie im Neutronenzerfall*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg (1998)
- [CKM03] H. Abele and D. Mund (ed.). Proceedings *Quark-Mixing, CKM-Unitarity*, Mattes Verlag, Heidelberg (2003)
- [Gla61] S.L. Glashow. Partial-Symmetries of Weak Interactions. *Nucl. Phys.* **22** 579 (1961)
- [Har03] J.C. Hardy and I.S. Towner. Superallowed $0^+ \rightarrow 0^+$ Beta Decay: Current Status and Future Prospects. In H. Abele and D. Mund (ed.) *Quark-Mixing, CKM-Unitarity*, Mattes Verlag, Heidelberg (2003)
- [Isel] iselautomation KG. Dokumentation ISEL Steuerbox, Eichenzell
- [Jac57] J.D. Jackson, S.B. Treiman and H.W. Wyld. Possible Tests of Time Reversal Invariance in Beta Decay. *Phys. Rev.* **106** 517 (1957)
- [KAE00] Table of Nuclides, Nuclear Data Evaluation Lab, Korea Atomic Energy Research Institute (2000); <http://atom.kaeri.re.kr/ton/>
- [Krz04] M. Kreuz. *Messung von Winkelkorrelationen im Zerfall polarisierter Neutronen mit dem Spektrometer PERKEO II*. Dissertation, Universität Heidelberg (2004)
- [Lon80] M.A. Lone, D.C. Santry and W.M. Inglis. MeV neutron production from thermal neutron capture in Li and B compounds. *Nucl. Instr. Meth.* **174** 521 (1980)
- [Mar03] W.J. Marciano. New Analysis of Neutron β -Decay (Radiative Corrections) and Implications for CKM Unitarity. In H. Abele and D. Mund (ed.) *Quark-Mixing, CKM-Unitarity*, Mattes Verlag, Heidelberg (2003)

- [PDG04] S. Eidelman et al. *Phys. Lett. B* **592** 1 (2004) (particle data group)
- [Pet02] A. Petoukhov, T. Soldner, V. Nesvizhevsky, M. Kreuz, M. Dehn and M. Brehm. Towards a Perfectly Polarised Neutron Beam. In H. Abele and D. Mund (ed.) *Quark-Mixing, CKM-Unitarity*, Mattes Verlag, Heidelberg (2003)
- [Plo04] C. Plonka, persönliche Mitteilung
- [Rei99] J. Reich. *Angular Correlations in Polarized Neutron Decay*. Dissertation, Universität Heidelberg (1999)
- [Sal68] A. Salam. *Weak and Electromagnetic Interactions*. In N. Svartholm (ed.) *Elementary Particle Theory*, Stockholm (1968)
- [Schu04] M. Schumann. *Probing the Standard Model: Preparation of a new Electron Asymmetry Measurement in the Decay of Polarized Neutrons*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg (2004)
- [Schü83] H. Schütze. Entwicklung und Betrieb eines supraleitenden Spektrometers zur Messung des β -Zerfalls freier Neutronen. Diplomarbeit, Universität Heidelberg (1983)
- [Wei67] S. Weinberg. A Model of Leptons. *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967)

Danksagung

Neben allen anderen Personen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben, gilt mein Dank insbesondere:

- meinen ELTERN, für ihre bedingungslose Unterstützung;
- Hatmut ABELE für die Überlassung des interessanten und lehrreichen Projekts in Grenoble;
- Torsten SOLDNER, ohne den weder diese Arbeit noch das ganze Experiment möglich gewesen wäre;
- Bastian MÄRKISCH, dass er mir das Schleppen vieler Tonnen Blei abgenommen hat, für das freie Wochenende, und natürlich besonders für das Ausdrucken und Abgeben der Arbeit;
- Anthony HILLAIRET für seine Linux-Kenntnisse und die 10000 Skripte;
- Marc JANOSCHEK, Marc SCHUMANN, Michael KREUZ und Torsten SOLDNER für eifriges Korrekturlesen;
- Marc DEISSENROTH, Marc SCHUMANN und Torsten SOLDNER für die Unterstützung in den letzten Stunden;
- CHRISTIAN, LUCIJA, den drei MARCS, MAURITS, MICHAEL, RUDI und TORSTEN, dass sie die arbeitsreiche Zeit in Grenoble in eine lebenswerte verwandelten;
- und natürlich Daniela MUND für die lustigen Momente und die 400 SMS.