

Design, Simulation und Aufbau des GERDA-Myonvetos



Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften
der Fakultät für Mathematik und Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen
vorgelegt von

Markus Alexander Knapp

aus
Stuttgart Bad-Cannstatt
2009

Kepler Center for Astro and Particle Physics



EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2009
Dekan: Prof. Dr. Wolfgang Knapp
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Josef Jochum
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Peter Grabamyr

Design, Simulation und Aufbau des GERDA-Myonvetos

Das GERmanium Detector Array (GERDA) ist ein Experiment, welches nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall des ^{76}Ge sucht. Dieser sehr seltene Prozess der schwachen Wechselwirkung wird vorhergesagt, wenn das Neutrino eine Masse hat und ein Majorana Teilchen ist; es wäre damit sein eigenes Antiteilchen. Obwohl der doppelte Betazerfall mit Emission zweier Neutrinos bei mehreren Kernen beobachtet wurde, gibt es derzeit nur einen Teil der Heidelberg-Moskau Kollaboration, der behauptet, den neutrinolosen doppelten Betazerfall beobachtet zu haben.

Die beste Grenze für die Halbwertszeit ist zur Zeit $T_{1/2} > 1.2 \cdot 10^{25}$ Jahre [KK04]. GERDA wird in Phase I etwa 15 kg·Jahre an Daten mit Detektoren aus angereichertem Germanium der Heidelberg-Moskau und IGEX Experimente verwenden. Diese Phase wird es ermöglichen, diese Grenze auf Grund eines um einen Faktor 10 reduzierten Untergrundes innerhalb eines Jahres zu überprüfen. In der Phase II werden etwa 100 kg·Jahre an Daten angesammelt, was zu einer Grenze von $T_{1/2} > 2 \cdot 10^{26}$ Jahre führen wird, da der Untergrund nochmals um einen Faktor 10 gesenkt wird. Um auf solche Halbwertszeiten sensitiv zu sein, muss man entsprechend seltene Zerfälle beobachten. Hierfür ist die Unterdrückung der Untergrundrate auf letzten Endes $10^{-3} \frac{\text{Ereignissen}}{\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{Jahre}}$ von enormer Wichtigkeit. Deshalb werden verschiedene Techniken, wie z.B. Pulsformanalyse oder ein Myonveto eingesetzt.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung des Cherenkov-Myonveto-Detektors vorgestellt. Hierfür werden erste Designstudien diskutiert. Diese beinhalten ausführliche Monte-Carlo-Simulationen. Diese Simulationen wurden ebenfalls verwendet, um die Triggerbedingungen der Datenerfassung dahingehend zu optimieren, möglichst alle Myonen, die in den Germaniumdetektoren Energie deponieren, detektiert werden. Schließlich wird noch der Aufbau vor Ort am Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italien vorgestellt.

Design, simulation and construction of the GERDA-muon veto

The GERmanium Detector Array (GERDA) is a experiment searching for the neutrinoless double beta decay of ^{76}Ge . This very rare weakly interacting process is predicted to occur if the neutrino exhibits a mass and is a Majorana particle; i.e. it is its own antiparticle. Although the double beta decay with emission of two neutrinos has been found in several nuclei, there is at this moment only a part of the Heidelberg-Moscow Collaboration claiming to have observed the neutrinoless double beta decay.

The best limit for the half life currently is $T_{1/2} > 1.2 \cdot 10^{25}$ y [KK04]. GERDA will expose about 15 kg·y of enriched germanium detectors from the Heidelberg-Moscow and IGEX crystals in phase I. In this phase, it will be able to test the claim within one year, due to reduced background by a factor 10. In phase II about 100 kg·y of data will be accumulated, leading to $T_{1/2} > 2 \cdot 10^{26}$ y due to an additional reduction of the background by a factor of 10.

For a high sensitivity at these half lifes, it is necessary to detect the corresponding rare events. Therefore background reduction to a rate of $10^{-3} \frac{\text{counts}}{\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{year}}$ is of utmost importance. Therefore different background identification methods, like pulseshape analysis or a muon veto will be used. In this work, the development of the Cherenkov muon veto detectors is presented. First design studies will be shown, including extensive Monte-Carlo simulations. These simulations were also used to optimize the trigger conditions of the data acquisition, to detect all muons, that cause an energy deposition in the germanium detectors. Finally the on site construction at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italy will be described.

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Arbeit ohne unerlaubte Hilfe und nur unter Verwendung der im Literaturverzeichnis angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich bis jetzt noch keinen Promotionsversuch unternommen habe.

Tübingen, den 15. Oktober 2009

(Markus Knapp)

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung	1
II	Grundlagen	5
1	Neutrinos	5
2	Der neutrinolose doppelte Betazerfall	10
2.1	Grundlagen zum neutrinolosen doppelten Betazerfall	10
2.2	Bedeutung des neutrinolosen doppelten Betazerfalls	13
2.3	Der neutrinolose doppelte Betazerfall des ^{76}Ge	14
2.4	Kurzübersicht über $0\nu\beta\beta$ -Experimente	16
2.4.1	Heidelberg-Moskau Experiment	16
2.4.2	Majorana-Experiment	16
2.4.3	CUORE	17
2.4.4	Nemo	17
2.4.5	Cobra	18
3	Das GERDA-Experiment	19
3.1	Motivation und Ziel des GERDA-Experiments	19
3.2	Wahl des Standortes des GERDA-Experimentes	21
3.3	Das GERDA-Experiment	22
3.4	Aktive Untergrundunterdrückung	24
3.4.1	Phasen des Experiments	27
3.5	Die GERDA-Kollaboration	29
III	Übersicht Myonveto	33
1	Untergrund durch kosmische Strahlung	33
1.1	Herkunft und Zusammensetzung der kosmischen Strahlung	33
1.2	Atmosphärische Schauer	35
1.3	Eigenschaften von Myonen	37
1.4	Wechselwirkungen von Myonen mit Materie	38
1.5	Myonen am LNGS	39
2	Notwendigkeit eines Myonvetos	39
3	Vorgaben durch die GERDA-Kollaboration	40
4	Detektion von Cherenkov-Photonen	41
4.1	Der Cherenkov-Effekt	41

4.2	Funktionsprinzip eines Photomultipliers	42
4.3	Eigenschaften der verwendeten Photomultiplier	44
4.3.1	Quanteneffizienz	44
4.3.2	Dunkelstrom und Dunkelrate	45
4.3.3	Verstärkung	46
4.3.4	Peak-to-Valley Verhältnis	47
4.3.5	Eigenschaften des GERDA-Myonveto Referenzphotomultiplier	47
5	Die Photomultiplier-Kapselungen	48
5.1	Design der Photomultiplier-Kapselungen	48
5.2	Verschiedene Tests der Kapselungen	49
5.2.1	Prototypen	49
5.2.2	Unterswassertests der Prototypen I, III und IV	51
5.2.3	Doppelpeak-Signal	52
5.3	Zusammenfassung der Testergebnisse der Photomultipliereinkapselungen	54
6	Die Reflektorfolie VM2000	55
6.1	Reflektionseigenschaften der VM2000	56
6.2	VM2000 als Wellenlängenschieber	58
6.3	Unterswassertests der VM2000-Folie	60
7	Das Myonveto-Design	60
7.1	Die einzelnen Komponenten des GERDA-Myonvetos	61
7.1.1	Wassertank-Cherenkov-Myonveto	61
7.1.2	Pillbox-Cherenkov-Myonveto	62
7.1.3	Plastikszintillator-Veto	63
7.2	Die Myonveto-Testanlage	64
IV	Untergrundanalyse	65
1	Grundlagen zu den Computersimulationen	65
1.1	Die Monte Carlo Methode	66
1.1.1	Allgemeines	66
1.1.2	Ein einfaches Beispiel	66
1.2	GEANT4	67
1.2.1	Die Physikliste von GEANT4	68
1.2.2	Wichtige Klassen von GEANT4	71
1.2.3	Visualisierungsmöglichkeiten von GEANT4	72
1.3	MaGe	72
1.4	Verwendete Hard- und Software	74
1.5	Vergleich mit der DCGLG4Sim des Double Chooz Experiments	75
2	Implementierung des Myonvetos	75
2.1	Wassertank und Kryostat	75
2.2	Die Photomultiplierkapselungen	76
2.3	Die Reflektorfolie VM2000	77

2.4	Die Plastiksintillatorpaneele	77
2.5	Weitere Komponenten	78
2.6	Überblick über die einzelnen Simulations-Phasen	78
3	Vorbetrachtungen zum Myonveto	81
3.1	Der Myonenfluss in der Halle A des LNGS	81
3.2	Klassifizierung der Myonen	81
3.3	Intensitätskarten für Photonen im Wassertank	89
3.4	Mögliche Lücken in der Abschirmung	92
3.5	Studien zur VM2000	93
4	Monte Carlo Campaign I	94
4.1	Verteilung I	95
4.2	Verteilung II	96
4.3	Verteilung III	96
4.4	Verteilung IV	97
5	Monte Carlo Campaign II	98
5.1	Erwartete Energiedepositionsspektren in den Germaniumkristallen durch kosmische Myonen	98
5.2	Optimierung der Triggerbedingungen	101
5.2.1	Zwei mögliche Triggerbedingungen	101
5.2.2	Zufällige Koinzidenzen	102
5.2.3	Größe des Zeitfensters für die Triggerbedingung	104
5.3	Myonveto-Effizienzstudien für die verschiedenen Triggerbedingungen	107
5.3.1	Einzelne Photomultiplier-Signale als Trigger	107
5.3.2	FADCs als Trigger	108
5.4	Gruppierung der Photomultiplier für die Datennahme	110
5.5	Beispiel der Triggerung des Myonvetos	111
6	μ -induziertes Spektrum der Ge-Dioden nach dem Myonveto	112
7	Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulationen	117
V	Der Aufbau des Myonvetos	119
1	Zusammenfassung: Das „reale“ Myonveto	119
2	Kalibrierung und Überwachung des Myonvetos	120
2.1	Überwachung der einzelnen Photomultiplier	120
2.2	Überwachung aller Photomultiplier	121
2.3	Überwachung der Plastiksintillatorpaneele	122
3	Montage des Myonvetos	122
3.1	Reinheitsanforderungen	122
3.2	Einbau der Reflektorfolie	123
3.3	Einbau der Photomultiplier	123
3.4	Montage des Kalibrierungssystems	125
3.5	Der Abschluss des Aufbaus des Cherenkov-Vetos	125
3.6	Einbau der Plastiksintillatorpaneele	125
4	Überblick über die Datennahme des Myonvetos	126

4.1	Externes Stoppsignal	128
4.2	Internes Stoppsignal	128
5	Status des Myonvetos	128
5.1	Cherenkov-Veto	128
5.2	Plastikszintillator-Veto	129
5.3	Datenerfassung	129
VI Ausblick und Zusammenfassung		131
1	Status des GERDA-Experimentes	132
2	Zusammenfassung der Untergrundanalyse und Simulationen zum Myonveto	132
3	Status des Cherenkov-Myonveto-Detektors	134
4	Weitere Schritte	135
VII Anhang		137
1	Fertigung der Photomultiplier-Kapselungen	137
1.1	Konstruktion der Photomultiplierkapsel	137
1.1.1	Die Borexino-Kapselung	137
1.1.2	Schritt 1: Die Edelstahlkapsel	138
1.1.3	Schritt 2: Anschluss des Spannungsteilers	138
1.1.4	Schritt 3: Polyurethan füllen	139
1.1.5	Schritt 4: Photomultiplier einsetzen	140
1.1.6	Schritt 5: Versiegeln der Einkapselung	141
1.1.7	Schritt 6: Befüllen der Kapselung mit Öl	141
1.1.8	Die Einzelteile der Kapselung	141
1.1.9	Zusammenfassung der Konstruktion	142
1.2	Verschiedene Tests zu den Kapselungen	143
1.2.1	Tests der verschiedenen Materialien	143
1.2.2	Die Kabeldurchführung	144
1.2.3	Die μ -Metall Abschirmung	145
2	Radioaktive Verunreinigungen des Myonveto	146
Literaturverzeichnis		149
Abbildungsverzeichnis		153
Tabellenverzeichnis		156
Danksagung		159

Kapitel I

Einleitung

Seit das Neutrino 1930 von Wolfgang Pauli postuliert wurde, versuchten Physiker weltweit seine Eigenschaften zu untersuchen. Zu Beginn der experimentellen Neutrinophysik konzentrierten sich die meisten Experimente darauf, mit großen Detektormassen, den kleinen Wechselwirkungsquerschnitt der Neutrinos auszugleichen, um diese überhaupt nachzuweisen. Dabei wurden neben der Elektronflavour auch noch das Tau- und das Myonneutrino entdeckt. Die Erkenntnisse, welche bei diesen Experimenten gesammelt wurden, führten jedoch zu vielen weiteren Fragen.

Beispielsweise wurde entdeckt, dass sich Neutrinos ineinander umwandeln können, was direkt dazu führte, dass man heute weiß, dass die Massenzustände eine Linearkombination der Flavourzustände sind und umgekehrt. Allerdings sind die Anteile der einzelnen Zustände noch nicht vollständig geklärt, denn bisher wurden noch nicht alle Mischungswinkel exakt gemessen.

Eine weitere Frage beschäftigt Physiker weltweit, deren Klärung bedeuten würde, dass das Standardmodell erweitert werden muss. Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen, sprich, sind sie Majorana-Teilchen und nicht, wie die anderen Elementarteilchen Dirac-Teilchen? Mit dieser Frage beschäftigt sich das Germanium Detector Array, kurz GERDA-Experiment, welches in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italien, einem der größten Untergrundlabore der Welt, aufgebaut wird.

Hierfür untersucht es den neutrinolosen doppelten Betazerfall am ^{76}Ge Isotop. Dieses zerfällt nur über einen doppelten Betazerfall in ^{76}As . Dabei kann es passieren, dass das Neutrino aus dem ersten Zerfall den zweiten triggert und dabei absorbiert wird, womit nur zwei Elektronen emittiert werden, also keine Neutrinos. Allerdings passiert dies nur, wenn das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist. Dies führt zu einem Peak am Endpunkt des Energiespektrums des doppelten Betazerfalls bei 2039 keV.

Dieser Zerfall ist jedoch ein äußerst seltener Zerfall, wobei bisher nach [KK04] für seine Halbwertszeit eine untere Grenze von $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1,2 \cdot 10^{25}$ Jahre gemessen wurde. Diese hohe Halbwertszeit setzt eine möglichst hohe Targetmasse, eine möglichst lange Laufzeit eines Experimentes, sowie einen möglichst geringen Untergrund voraus.

Das GERDA-Experiment geht hierbei neue Wege in der Untergrundunterdrückung. Zum einen verwendet es im Gegensatz zu den meisten anderen modernen Experimenten eine Ab-

schirmung, welche ausschließlich aus Materialien mit niedriger Kernladungszahl besteht, um durch kosmische Strahlung erzeugte Untergrundsignale zu reduzieren. Zum anderen kommen viele aktive Verfahren zum Einsatz, wie zum Beispiel die Pulsformanalyse der aufgezeichneten Signale.

Auch in einem unterirdischen Labor mit stark reduziertem Myonenfluss spielen Myonen, welche durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre der Erde erzeugt werden, eine große Rolle im Untergrundspektrum eines Experimentes. Um den durch diese Myonen eingebrachten Untergrund zu unterdrücken wurde mit dieser Arbeit ein Myonveto entwickelt. Das GERDA-Myonveto wird aus drei Detektoren bestehen. Der erste Detektor ist ein Wasser-Cherenkov-Detektor. Dieser verwendet den Wassertank, welcher den Kryostaten umgibt, in dem die Germaniumdetektoren gekühlt werden. In dem Tank sind 60 Photomultiplier, mit einem Radius von 20 Zentimetern, montiert. 40 Dieser Photomultiplier wurden an der Wand und 20 weitere am Boden des Wassertanks montiert.

Der zweite Detektor ist ein weiterer Cherenkov-Detektor, welcher direkt unterhalb des Kryostaten ist und mit sechs Photomultipliern desselben Typs bestückt wurde. Dieser detektiert vor allem Myonen, welche von oben kommend, das Experiment senkrecht durchqueren.

Der letzte Teil sind zwei Schichten Plastikszintillatorpaneele oberhalb des Experimentes, welche Myonen detektieren können, die in den Germaniumdetektoren gestoppt werden.

Mit dieser Arbeit wird die Entwicklung dieses Systems beschrieben. Hierfür wurden umfangreiche Monte-Carlo-Simulationen angefertigt, wobei verschiedene Verteilungen der Photomultiplier im Wassertank getestet wurden. Außerdem wurden verschiedene Triggervarianten und -schwellen untersucht, um die Triggerlogik des Myonvetos zu optimieren. Dabei musste neben einer möglichst hohen Detektionswahrscheinlichkeit der Myonen auch darauf geachtet werden, dass die Rate an zufälligen Koinzidenzen niedrig genug ist, dass die Totzeit des Vetos nicht zu groß wird.

Ein weiterer Teil dieser Dissertation wird sich mit der Herstellung der Komponenten der einzelnen Detektoren beschäftigen, sowie mit deren Einbau am Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italien. Mit dem Einbau der Komponenten im GERDA-Experiment soll diese Arbeit dann auch geschlossen werden, wobei zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit noch einige wenige Schritte zur Vollendung fehlten. Auch ein abschließender Test konnte noch nicht durchgeführt werden, da der Wassertank hierfür erst wieder mit Wasser gefüllt werden muss.

Konventionen

- Wenn davon gesprochen wird, dass Myonen Energie deponieren, schließt dies Energiedepositionen von Sekundärteilchen mit ein und es ist immer die Energiedeposition in den Germaniumkristallen gemeint.
- Wenn von Untergrund gesprochen wird, ist immer die für GERDA relevante Untergrundrate gemeint, welche in $\frac{\text{Untergrundereignisse}}{\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{Jahre}}$ angegeben ist. Damit ist die effektive Anzahl an Untergrundereignisse auch von der eingesetzten Detektormasse abhängig, beziehungsweise vom betrachteten Energiefenster.
- Wenn von Effizienz des Myonvetos gesprochen wird, ist immer die Detektionseffizienz bezüglich Myonen mit Energiedeposition in den Germaniumdetektoren gemeint. Dies bedeutet nicht, dass die restlichen Myonen nicht detektiert werden, jedoch wurden die Simulationen zu den Effizienzstudien, um CPU-Zeit zu sparen, nur für die Myonen mit Energiedeposition angefertigt.
- Wenn von der effektiven Neutrinomasse die Rede ist, ist immer $\langle m_{\nu\alpha} \rangle = \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |\nu_i\rangle$ gemeint, welche sich aus den Elementen der Maki-Nakagawa-Sakata Matrix $U_{\alpha i}$ und den Massenzuständen $|\nu_i\rangle$ zusammensetzt.

Kapitel II

Grundlagen

Bevor das GERDA-Myonveto erläutert werden soll, wird in diesem Kapitel das GERDA-Experiment vorgestellt. Hierfür soll zuerst ein kurzer Überblick über Neutrinos im allgemeinen und ihre Eigenschaften gegeben werden. Danach wird der neutrinolose doppelte Betazerfall vorgestellt und insbesondere am Beispiel des ^{76}Ge besprochen, welcher im GERDA-Experiment untersucht werden soll.

Es folgt ein kurzer Überblick über verschiedene Experimente zum neutrinolosen doppelten Betazerfall und eine ausführliche Darstellung des GERDA-Experimentes. Neben dem Aufbau des Experimentes und seine verschiedenen Phasen wird besonders auf die Untergrundunterdrückungsverfahren, sowohl passive als auch aktive eingegangen.

1 Neutrinos

Das Neutrino wurde zum ersten Mal 1930 von Wolfgang Pauli postuliert. Dieser führte es ein, um die Energie- und Drehimpulserhaltung beim Betazerfall zu gewährleisten. In den folgenden Jahren war es immer wieder Ziel vieler Experimente, zuerst das Neutrino nachzuweisen und später dessen Eigenschaften zu bestimmen.

Dies hat sich als äußerst schwierig herausgestellt, da das Neutrino nur einen sehr geringen Wechselwirkungsquerschnitt mit anderen Teilchen besitzt. Dies liegt daran, dass es nur über eine sehr geringe Masse und keine Ladung verfügt. Deshalb unterliegt es einzig und allein der schwachen Wechselwirkung.

1956 gelang es Cowan und Reines zum ersten Mal, Antineutrinos, welche in einem Kernreaktor erzeugt wurden, experimentell nachzuweisen. Hierfür wurde ein großer Tank mit Wasser und Szintillator in der Nähe eines Kernreaktors mit einem Fluss von etwa $5 \cdot 10^{13}$ Neutrinos pro Sekunde und Quadratmeter aufgestellt. Die Neutrinos wechselwirkten mit den Protonen im Wasser und erzeugten Positronen und Neutronen.



Die so entstandenen Positronen annihilierten mit Elektronen und erzeugten zwei Gammaquanten mit einer Energie von 511 keV, welche wiederum im Szintillator Licht erzeugten.

Dieses Licht wurde in verzögerter Koinzidenz mit dem Licht, welches beim Einfang der Neutronen entsteht, von Photomultipliern detektiert.

1962 entdeckten Ledermann, Schwartz und Steinberger das Myonneutrino. Als 1975 das Tauon als drittes Lepton entdeckt wurde, war es zu erwarten, dass ein drittes Neutrino vorhanden ist. Wie beim Elektronneutrino wurden auch hier erstmals Hinweise auf das Tauonneutrino gefunden, weil bei Tauon-Zerfällen Energie und Impuls sonst nicht erhalten gewesen wären. Es wurde direkt jedoch erst im Jahr 2000 vom DONUT-Experiment¹ [Kod08] entdeckt.

Ein Problem bei der Beschreibung von Neutrinos, ist, dass man bei Neutrinos zwischen Flavour- und Masseneigenzustände unterscheiden muss, wobei die Flavourzustände eine Überlagerung aus allen drei Masseneigenzustände und die Massenzustände eine Überlagerung der Flavoureigenzustände sind. Allgemein kann ein Flavourzustand als Linearkombination der Massenzustände

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (\text{II.2})$$

dargestellt werden. Dabei sind die $|\nu_\alpha\rangle$ die Flavoureigenzustände zu den drei verschiedenen Neutrinos mit $\alpha \in \{e, \mu, \tau\}$, sowie $|\nu_i\rangle$ die Massen-Eigenzustände mit $i \in \{1, 2, 3\}$. Die Eigenzustände werden über die Elemente der Maki-Nakagawa-Sakata [PDG08] Matrix $U_{\alpha i}$ miteinander verknüpft. Dabei gilt:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Hierbei sind $c_{ij} = \cos(\Theta_{ij})$ und $s_{ij} = \sin(\Theta_{ij})$ die Winkelfunktionen der entsprechenden Mischungswinkel zwischen den Neutrinoeigenzuständen $|\nu_i\rangle$ und $|\nu_j\rangle$. Man kann also bei Experimenten, welche die Neutrinomassen messen, nur von einer *effektiven* Neutrinomassen sprechen. Bestimmt man beispielsweise die Masse aus der Kinematik bei Betazerfällen, so ist sie definiert über

$$\langle m_{\nu_\alpha} \rangle = \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |\nu_i\rangle \quad (\text{II.4})$$

Die Ergebnisse aus aktuellen Messungen sind in Tabelle 1, welche die wichtigsten Eigenschaften zusammengefasst aufgeführt. Wird die Masse hingegen, wie in Kapitel II.2.2 vorgestellt, aus dem neutrinolosen doppelten Betazerfall bestimmt, so muss man Gleichung (II.11) verwenden. Wie man der Tabelle entnehmen kann, sind für die effektiven Mas-

¹Direct Observation of the NU Tau

Tabelle 1: Eigenschaften der drei Neutrinoarten nach [PDG08].

	ν_e	$\bar{\nu}_e$	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$
Ladung	0	0	0	0	0	0
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
eff. Masse	< 2 eV	< 2 eV	< 190 keV	< 190 keV	< 18,2 MeV	< 18,2 MeV
Helizität	-1	1	-1	1	-1	1

sen bisher nur obere Grenzen angegeben. Was man allerdings bereits ausreichend genau gemessen hat, sind die Unterschiede der Massenquadrate:

$$(\Delta m_{ij})^2 = |m_i^2 - m_j^2| \quad (\text{II.5})$$

Ebenfalls noch ungeklärt ist die Frage, welcher Neutrinomassenzustand der schwerste ist. Es könnte neben der normalen Hierarchie, bei welcher ν_1 der leichteste und ν_3 der schwerste ist, auch die Möglichkeit der umgekehrten Hierarchie mit $m_{\nu_1} > m_{\nu_3}$ (siehe Abbildung 1) geben. Hier sieht man auch noch schematisch, wie die Massenzustände ν_i aus den Flavourzuständen ν_α zusammengesetzt sind. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass die Neutrinomassen ähnlich groß sind. Man spricht in diesem Fall von degenerierter Hierarchie.

Die Massenquadrate selbst wurden mit Hilfe von Experimenten zu Neutrinooszillationen bestimmt [PDG08].

$$\begin{aligned} (\Delta m_{12})^2 &= (8 \pm 0,3) 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 &< (\Delta m_{23})^2 < 3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \end{aligned}$$

Der erste Hinweis auf Neutrinooszillationen wurde gefunden, als Raymond Davis und John Bahcall in den 1960er versuchten, die solaren Neutrinos mit dem Homestake Experiment zu detektieren. Der damals verwendete Detektor bestand aus 615 Tonnen C_2Cl_4 und war in der Lage, Elektroneneutrinos über die Reaktion



zu detektieren, indem das so entstandene Argon extrahiert wurde. Dabei entdeckten sie eine Diskrepanz zwischen der erwarteten Anzahl an Elektroneneutrinos von der Sonne und der tatsächlich gemessenen. Es wurden nicht einmal die Hälfte des aus der Leuchtkraft der Sonne berechneten Neutrinoflusses registriert. Dies lässt sich nur dadurch erklären, dass sich Elektroneneutrinos, die in der Sonne entstanden sind, in Neutrinos der beiden anderen Familien umwandeln, sofern man davon ausgeht, dass unser Verständnis für die Prozesse in der Sonne richtig ist.

Zum heutigen Zeitpunkt wurden auch Oszillationen für die atmosphärischen Neutrinos und für Neutrinos aus Kernreaktoren nachgewiesen. Damit konnten zwei der Mischungswinkel

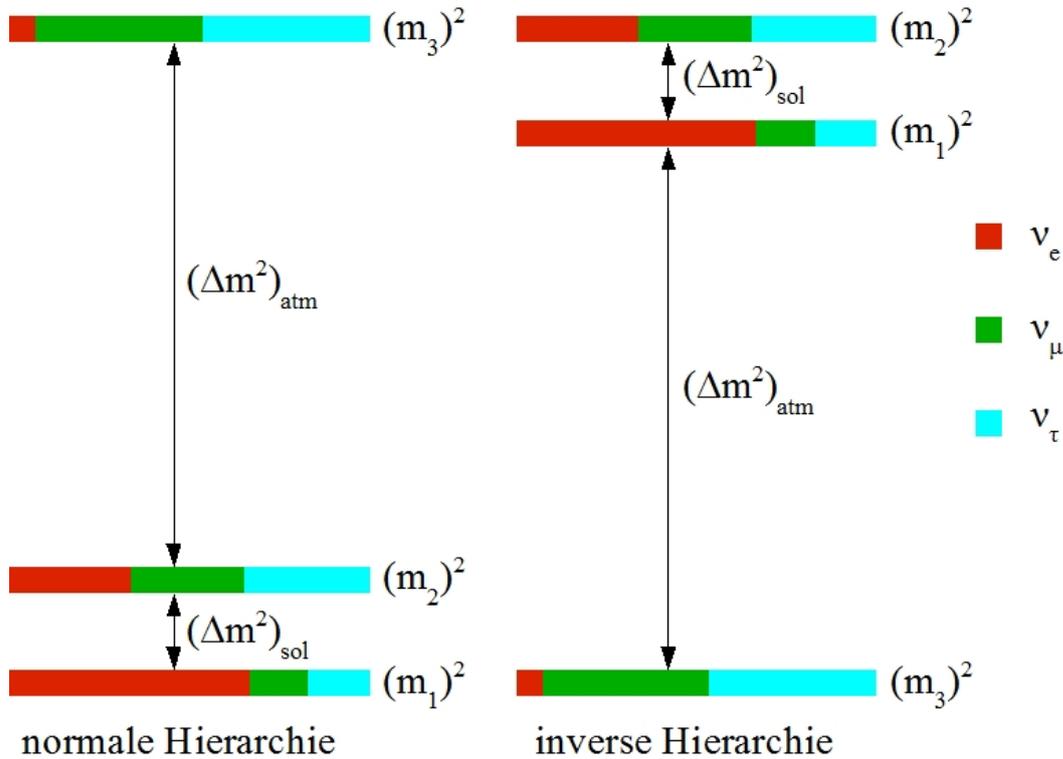


Abbildung 1: Die beiden möglichen Massenhierarchien der Neutrinos nach [Gou06]

hinreichend [PDG08] gut bestimmt werden.

$$\sin^2(2\Theta_{12}) = 0,86^{+0,04}_{-0,03}$$

$$\sin^2(2\Theta_{23}) > 0,92$$

Für den letzten Winkel ist bisher nur die Angabe [PDG08] einer oberen Grenze möglich.

$$\sin^2(2\Theta_{13}) < 0,19$$

Ein Experiment welches sich der Bestimmung dieses letzten Winkels mit Hilfe von Untersuchungen von Reaktor-neutrinos widmet, ist das Double Chooz Experiment [Ard06] in Frankreich. Für dieses Experiment wurde ebenfalls in Tübingen ein Myonvetosystem entwickelt.

Ein weiterer Punkt, der noch geklärt werden muss, ist die Majorana- oder Diracnatur der Neutrinos. Wenn es sich bei den Neutrinos um Majoranateilchen handelt, wie es von den meisten Erweiterungen des Standardmodells angenommen wird, ist das Neutrino identisch mit dem Antineutrino, wenn man von dem Vorzeichen der Helizität absieht. Hiermit beschäftigen sich die Experimente zum neutrino-losen doppelten Betazerfall (siehe Kapitel 2). Zum Schluss sei noch einmal erwähnt, dass die Wechselwirkung der Neutrinos mit Materie

sehr gering ist. Die einzige Möglichkeit sie nachzuweisen ist über die schwache Wechselwirkung, weshalb man entsprechend Detektoren mit sehr großen Massen (mehrere Tonnen) benötigt.

2 Der neutrinolose doppelte Betazerfall

Die Untersuchung des neutrinolosen doppelten Betazerfalls kann mehrere Erkenntnisse liefern. Zum einen wird sich die Frage klären, ob das Neutrino ein Majoranateilchen ist. Dies wird einen Einfluss auf die Theorien zum Standardmodell haben.

Desweiteren kann man, wie im Folgenden gezeigt wird, aus experimentellen Daten mit Hilfe der Berechnungen der nuklearen Matrix-Elemente des Zerfalls die effektiven Massen der Neutrinos bestimmen. Dies würde jedoch eine genaue Berechnung und eine Beobachtung mit sehr genauer Ratenmessung erfordern.

Zum Schluss ermöglicht es die Bestimmung der Masse der Neutrinos, den Beitrag der Neutrinos zur Massenverteilung in unserem Universum endgültig zu bestimmen. Dadurch können auch bessere Aussagen über Dunkle Materie bzw. über Dunkle Energie gemacht werden.

2.1 Grundlagen zum neutrinolosen doppelten Betazerfall

Der doppelte Betazerfall findet bei Elementen statt, bei denen der einfache Betazerfall energetisch verboten ist², weil der entstehende Kern energetisch gesehen höher liegt und wenn es sich um einen gg oder uu Kern handelt. In Abbildung 2 sind die Zerfälle für die Massenzahl $A = 76$ dargestellt, beginnend bei ^{76}Ga auf der β^- -Seite und bei ^{76}Kr von der β^+ -Seite her. Man erkennt, dass der einfache Betazerfall des ^{76}Ge energetisch verboten ist, weil ^{76}As energetisch höher liegt als ^{76}Ge .

Allerdings ist es möglich, wenn auch mit einer Lebensdauer von etwa $1,74 \cdot 10^{21}$ Jahren [CD03], dass ^{76}Ge mittels eines doppelten Betazerfalls (siehe Feynmandiagramm in Abbildung 3) direkt in ^{76}As übergeht. Wenn nun das Neutrino ein Majoranateilchen ist und über eine von Null verschiedene Masse verfügt, kann das Antineutrino aus dem ersten Betazerfall den zweiten Zerfall auslösen. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt, wobei die Zerfälle in Gleichung II.7 die beiden Vertices I und II repräsentieren.

$$\begin{aligned} \text{Vertex I:} & \quad n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \\ \text{Vertex II:} & \quad \nu_e + n \longrightarrow p + e^- \end{aligned} \tag{II.7}$$

$$\text{Gesamt:} \quad 2n \longrightarrow 2p + 2e^-$$

Dies führt zu einem wichtigen Unterschied im zu erwartenden Spektrum für die Summenenergien der beiden Elektronen des doppelten Betazerfalls (siehe Abbildung 5). Die, beim normalen doppelten Betazerfall emittierten Neutrinos tragen einen Teil der Energie weg. Es handelt sich um einen Fünf-Teilchen-Prozess. Dabei wird immer ein unterschiedlicher Anteil der Energie an das Neutrino abgeführt. Man erhält ein kontinuierliches Spektrum, was im Bereich $2\nu\beta\beta$ in Abbildung 5) für ^{76}Ge bei $E = 2039 \text{ keV}$ dargestellt ist.

²Zwar findet der doppelte Betazerfall auch bei allen anderen Kernen statt, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu ihm kommt im Vergleich zu dem einfachen Zerfall so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

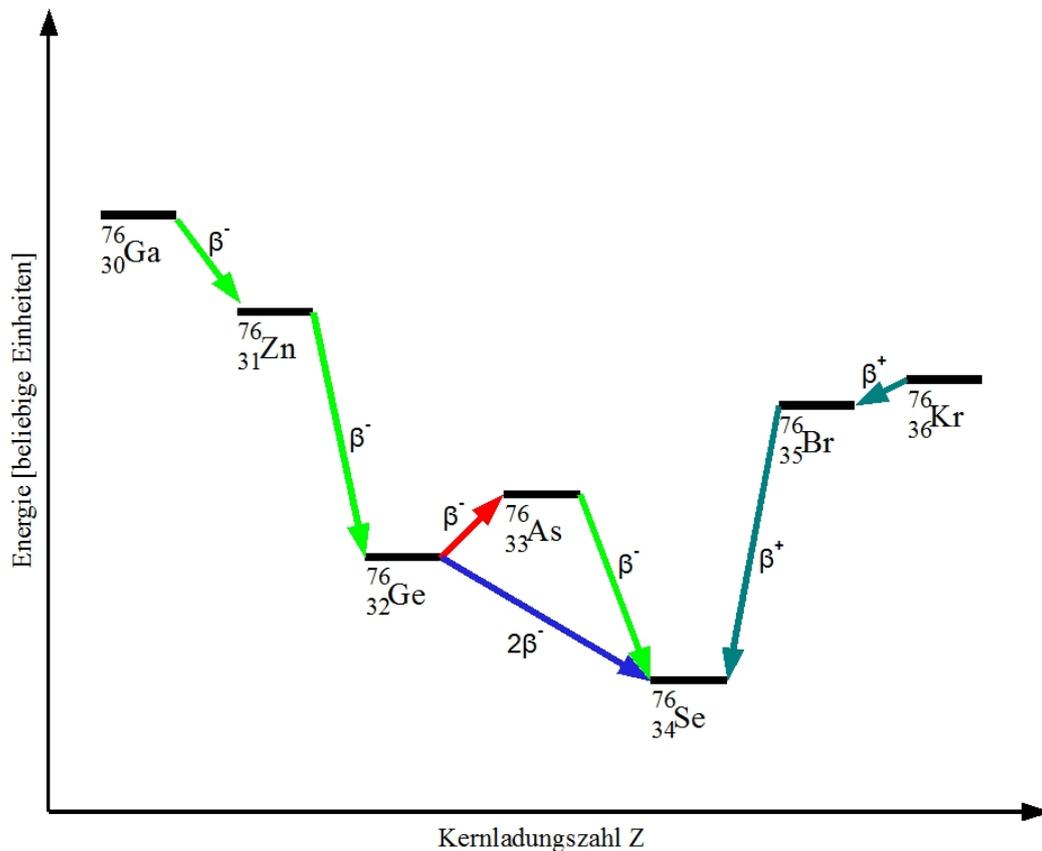


Abbildung 2: Grundzustände für Isobare mit $A=76$. In grün (türkis) sind die energetisch erlaubten (inversen) Betazerfälle angedeutet. Es ist zu sehen, dass der Betazerfall von ${}^{76}_{32}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}_{33}\text{As}$ (rot) energetisch verboten ist, während der doppelte Betazerfall (blau) von ${}^{76}_{32}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}_{34}\text{Se}$ erlaubt ist.

Sobald jedoch die Neutrinos fehlen, muss die gesamte Energie an die Elektronen übergeben werden, da die Rückstoßenergie auf den Kern vernachlässigbar klein ist. Die gemessene Summenenergie der beiden Elektronen muss damit die maximal mögliche Energie sein. Dies führt zu einem Peak am Ende des Spektrums (Bereich $0\nu\beta\beta$ in Abbildung 5). Hierfür muss sich aber das Antineutrino aus dem ersten Zerfall in ein Neutrino umwandeln können. Dies lässt sich jedoch nicht mit bisherigen Beobachtungen vereinbaren, bei denen sowohl Antineutrino als auch Neutrino nur mit festen Helizitäten aufgetreten sind.

Das Antineutrino hat dabei eine Helizität von $H = 1$ während das Neutrino eine Helizität von $H = -1$ hat. Die Helizität ist definiert als:

$$H = \vec{\sigma} \frac{\vec{p}}{|\vec{p}|} \quad (\text{II.8})$$

Dabei ist $\vec{\sigma}$ der Einheitsvektor des Spins des Neutrinos und \vec{p} sein Impuls.

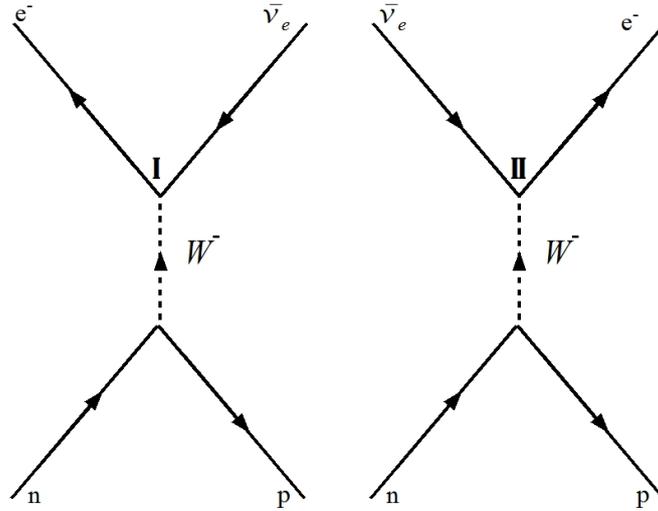


Abbildung 3: Feynmandiagramm des doppelten Betazerfalls. Dabei handelt es sich um zwei nahezu gleichzeitig statt findende Betazerfälle eines einzelnen Kerns.

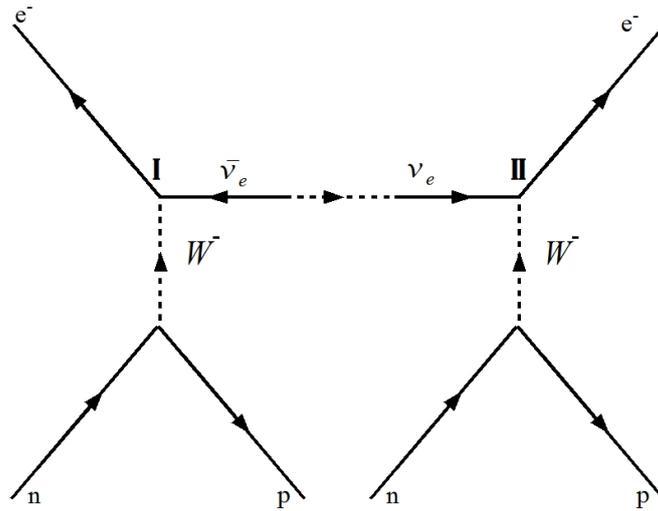


Abbildung 4: Feynmandiagramm des neutrinolosen doppelten Betazerfalls. Das Antineutrino aus dem oberen Zerfall wird auf Grund seiner Majorana-Natur in ein Neutrino umgewandelt und triggert den unteren Zerfall.

Damit muss das Antineutrino in Abbildung 4, welches bei dem Vertex I erzeugt wird, seine Helizität ändern. Dies ist jedoch nur möglich, wenn das Neutrino eine Masse hat. Damit hätte das (Anti)neutrino nicht, wie bisher angenommen, eine feste Helizität, sondern mit der Wahrscheinlichkeit W (siehe Gleichung II.9) den entsprechend anderen Wert [Sch97].

$$W = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v}{c}\right) \approx \left(\frac{m_\nu}{2E_\nu}\right)^2 \quad (\text{II.9})$$

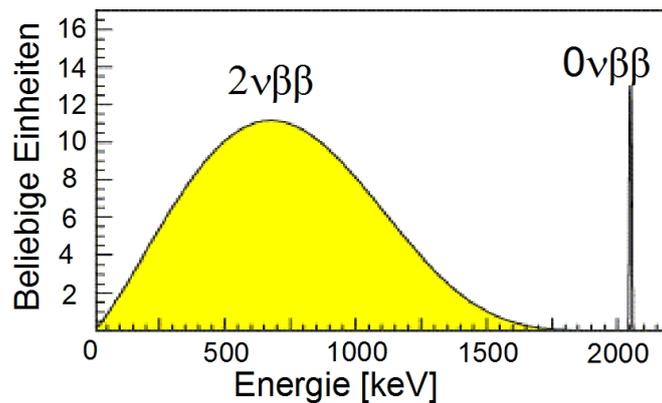


Abbildung 5: Spektrum der Energiedeposition der beiden Elektronen aus dem neutrinolosen doppelten Betazerfall des ^{76}Ge . Man erkennt den kontinuierlichen Bereich, in welchem der neutrino-behaftete doppelte Betazerfall statt findet, sowie den für den neutrinolosen doppelten Betazerfall charakteristischen Peak am Ende des Spektrums bei 2039 keV, nach [KK04]. (Die Flächenverhältnisse des kontinuierlichen Bereichs und des Peaks sind nicht proportional zueinander.)

Man kann sich diese Helizitätsänderung veranschaulichen, indem man ein Antineutrino mit einer Masse m_ν größer als null betrachtet. Dieses muss eine Geschwindigkeit v_ν kleiner als die Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum haben, weshalb die Richtung der Geschwindigkeit vom Bezugssystem abhängt. Mit einer Lorentztransformation aus dem Bezugssystem des Neutrinos in ein sich schneller bewegendes System kehrt sich der Geschwindigkeitsvektor und damit die Helizität des Neutrinos um. Man kann nicht mehr von einer festen Helizität sprechen, wie wenn die Masse des Teilchens null wäre.

Eine andere Möglichkeit wäre natürlich, dass es neben dem linkshändigen Leptonenstrom, wie er in der V-A Theorie³ beschrieben wird, noch einen kleinen rechtshändigen Anteil gibt. Damit könnte an dem Vertex I in Abbildung 4 auch ein Antineutrino mit Helizität $H = -1$ auftreten.

2.2 Bedeutung des neutrinolosen doppelten Betazerfalls

Die erste Frage die sich klären lassen wird, wenn der neutrinolose doppelte Betazerfall beobachtet wird, ist die Frage nach der Natur der Neutrinos. Handelt es sich um Dirac- oder Majorana-Teilchen?

Wenn es sich um ein Majorana-Teilchen handelt, hat das Neutrino, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben eine Masse. Diese Frage wird sich direkt aus den gewonnenen Daten klären lassen, ohne dass man zusätzliche Rechnungen aus der theoretischen Physik

³Die V-A Theorie ist eine Theorie mit vereinheitlichter schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung.

benötigt. Dies ist anders für die Bestimmung der Neutrinomasse aus dem neutrinolosen doppelten Betazerfall. Der Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit $T_{1/2}^{0\nu}$ und der effektiven Elektroneutrinomasse $\langle m_{\nu\alpha} \rangle$ ist gegeben durch [EV02]:

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = Q(E_{tot}, Z) \left| M_{GT}^{0\nu} - \left(\frac{g_V}{g_A} \right)^2 M_F^{0\nu} \right| \langle m_{\nu\alpha} \rangle^2 \quad (\text{II.10})$$

Dabei sind $Q(E_{tot}, Z)$ das Phasenraumintegral, sowie $M_{GT}^{0\nu}$ und $M_F^{0\nu}$ die Massenmatrix-Elemente. Außerdem ist die effektive Masse eines Neutrinos unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das Elektroneneutrino über Gleichung (II.2) mit den anderen Neutrinos über die Mischungsmatrix U verknüpft ist, über ihr Massenquadrat

$$\langle m_{\nu\alpha} \rangle^2 = \left| \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |\nu_i \rangle \right|^2 \quad (\text{II.11})$$

definiert. Die Bestimmung der effektiven Masse aus dieser Gleichung unterscheidet sich natürlich von Gleichung (II.4) insofern, dass es sich um zwei unterschiedliche Prozesse handelt. Wenn man Gleichung (II.11) mitberücksichtigt, erkennt man, dass die Bestimmung der Neutrinomasse von den Matrixelementen des neutrinolosen doppelten Betazerfalls abhängt. Die Berechnung dieser ist Teil aktiver Forschung in der theoretischen Kernphysik. Dabei zeigt sich eine gute Konvergenz der Rechnungen für die verschiedenen Elemente. [Fae07].

Abbildung 6 zeigt die Auswirkungen der verschiedenen theoretischen Modelle auf die Bestimmung der Halbwertszeit aus Gleichung (II.10). Die gängigsten Modelle sind die QRPA⁴ und die RQRPA⁵ und das Schalenmodell.

Ein letzter Punkt, welcher sich noch über den neutrinolosen doppelten Betazerfall klären lassen wird, ist die Massenhierarchie der Neutrinos. In Abbildung 1 sind die beiden möglichen Hierarchien für die Neutrinomassen dargestellt. Somit kann auf Grund der bestimmten Masse der Neutrinos auch eine Aussage über die Hierarchie der drei Neutrinomassen gemacht werden.

2.3 Der neutrinolose doppelte Betazerfall des ⁷⁶Ge.

In diesem Abschnitt sollen kurz die derzeitigen Daten bezüglich des neutrinolosen doppelten Betazerfalls des ⁷⁶Ge zusammengefasst werden. Der doppelte Betazerfall ist hinreichend genau untersucht und es wurde für diesen, nach [CD03] eine Halbwertszeit von

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = 1,74 \cdot 10^{21} \text{ Jahre}$$

bestimmt.

⁴QRPA: Quasi-Teilchen-Random-Phase-Näherung

⁵RQRPA: Renormalisierte Quasi-Teilchen-Random-Phase-Näherung

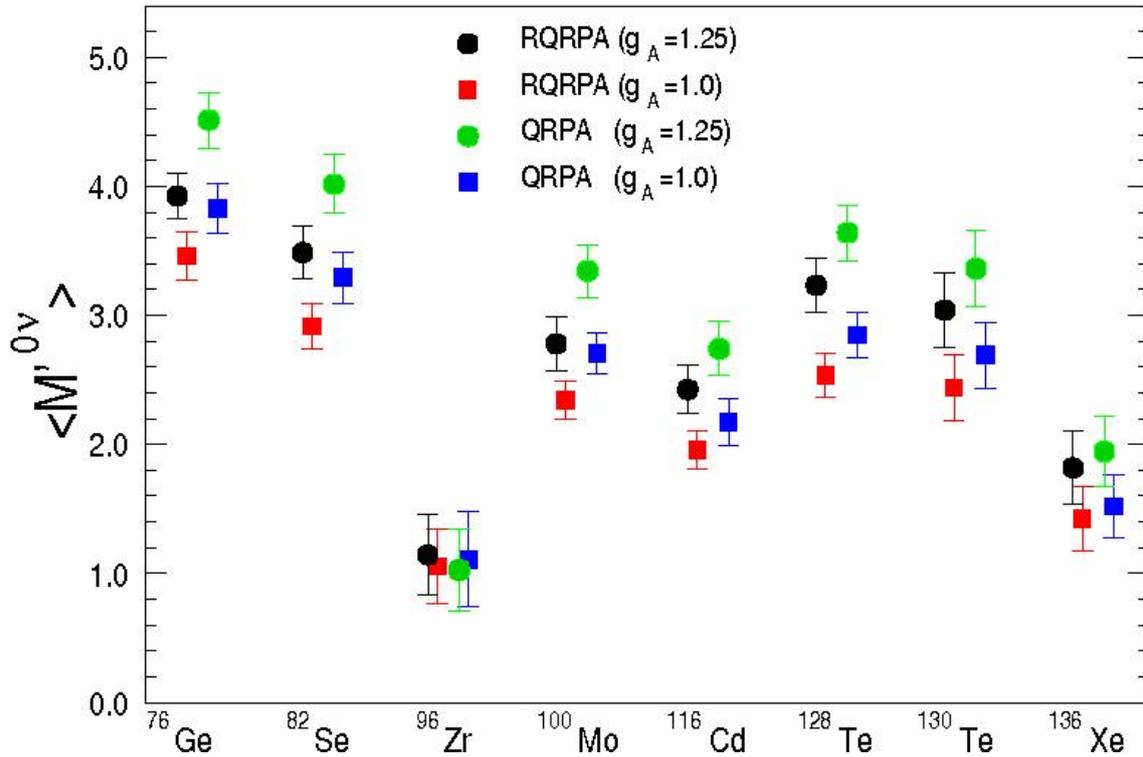


Abbildung 6: Massenmatrixelemente des neutrinosen doppelten Betazerfalls für verschiedene Elemente. Man erkennt die gute Übereinstimmung der beiden Modelle (QRPA und RQRPA) mit verschiedenen Parametern. [Fae07]

Für den neutrinosen doppelten Betazerfall hingegen ist derzeit nach [KK04] nur eine untere Grenze für die Halbwertszeit von

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1,2 \cdot 10^{25} \text{ Jahre}$$

gegeben.

Von besonderem Interesse für die Experimente, welchen den neutrinosen doppelten Betazerfall des ^{76}Ge untersuchen ist auch noch die Endpunktenergie des Spektrums aus Abbildung 5. Diese liegt nach [Abt] bei

$$Q_{\beta\beta} = 2039 \text{ keV.}$$

Aus den bisher gewonnenen Daten und mit den Massenmatrixelementen aus theoretischen Berechnungen kann derzeit auch die Masse des Elektronenneutrinos, nach [PDG08], auf einen Bereich von

$$m_{\nu_e} < 2 \text{ eV} \tag{II.12}$$

eingeschränkt werden.

2.4 Kurzübersicht über Experimente zum neutrinolosen doppelten Betazerfall

Zum Abschluss sollen noch kurz einige andere Experimente als das GERDA-Experiment, welches im folgenden Kapitel II.3 näher erläutert wird, vorgestellt werden.

2.4.1 Heidelberg-Moskau Experiment

Als erstes Experiment muss das Heidelberg-Moskau Experiment genannt werden, welches auch der Vorläufer des GERDA-Experimentes war. Es wurde ebenfalls in den LNGS in Italien aufgebaut und betrieben. Es hat von 1990 bis 2003 Daten genommen. Dabei hat die Analyse des Experimentes die obere Grenze der Masse des Elektronneutrinos auf ein Intervall von $0,2 \text{ eV} < m_{\nu_e} < 0,6 \text{ eV}$ eingeschränkt.

Außerdem behauptet eine Teilgruppe des Experimentes, mit 99.99% C.L.⁶ den neutrinolosen doppelten Betazerfall nachgewiesen zu haben [KK04].

Das Heidelberg-Moskau Experiment verwendete fünf Germaniumdetektoren mit einer Gesamtmasse von 10,96 kg, welche durch Kupfer und Bleiabschirmungen vor externer Strahlung geschützt wurden. Diese Abschirmungsvariante kam und kommt auch heute noch in vielen Experimenten zum Einsatz. Allerdings sind die Anforderungen von einigen aktuellen Experimenten, was ihren Untergrund angeht, deutlich gestiegen. Deshalb stellt schon die durch Myonen im Blei induzierte Untergrundstrahlung ein Problem dar.

2.4.2 Majorana-Experiment

Das Majorana-Experiment verwendet ein ähnliches Design wie das Heidelberg-Moskau Experiment. Allerdings sind sowohl Detektormasse als auch die Abschirmung viel größer. Es ist geplant, etwa 250 Kilogramm ^{76}Ge zu verwenden. Diese werden in vier Modulen verteilt betrieben, wobei das erste Modul mit etwa 60 Kilogramm ab 2013 mit der Datennahme beginnen soll.

Jedes Modul besteht aus 57 Germaniumdetektoren, die in einem Kupferkryostaten betrieben werden. Dieser wird durch große Mengen an Blei und Polyethylen abgeschirmt. Somit verwendet das Majorana-Experiment konventionellere Abschirmungsmethoden im Gegensatz zum GERDA-Experiment (siehe Kapitel II.3.3). Außerdem wird die große Anzahl an Detektoren verwendet, um durch Antikoinzidenzmessungen mit den einzelnen Detektoren zwischen Untergrund durch zum Beispiel Myonen oder Gammastrahlung und echten Ereignissen des neutrinolosen doppelten Betazerfalls zu unterscheiden.

Das Majorana-Experiment wird in den DUSEL⁷ Laboren in Nordamerika aufgebaut und ist ein Partnerexperiment von GERDA. Dies bedeutet, dass insbesondere in der Detektorentwicklung und bei Untergrundunterdrückungsmethoden eng zusammengearbeitet und

⁶C.L.: Confidence Level ist ein Maß aus der Statistik dafür, wie wahrscheinlich eine bestimmte Aussage ist. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit, dass es den neutrinolosen doppelten Betazerfall gibt, zu betrachten.

⁷DUSEL: Das Deep Underground Science and Engineering Lab in Homestake, USA)

Erkenntnisse geteilt werden. Desweiteren wurde, wie im Kapitel IV.1.3 erläutert wird, die Entwicklung eines gemeinsamen „Simulation Frameworks“ vorangetrieben.

2.4.3 CUORE

Ein weiteres am LNGS durchgeführtes Experiment zum neutrinolosen doppelten Betazerfall ist das CUORE Experiment beziehungsweise dessen kleiner Vorläufer CUORICINO, welcher bereits Daten nimmt. Während in CUORE 988 TeO₂-Kristalle zum Einsatz kommen werden, verwendet CUORICINO nur 62 Kristalle dieses Typs [Arn08], welche in einem Turm angeordnet sind. CUORE wird 19 dieser Türme beinhalten. Diese Kristalle werden hierfür bei etwa sieben bis zehn Millikelvin betrieben und als Tieftemperaturkalorimeter verwendet.

Mit diesem Experiment soll der neutrinolose doppelte Betazerfall von ¹³⁰Te beobachtet werden. Dabei werden NTD⁸-Germanium Thermometer auf der Oberfläche der Kristalle angebracht und überwachen so die Temperatur dieser. Mit diesen ist es über die Temperaturänderung der Kristalle möglich, die Energiedepositionen innerhalb der Kristalle sehr genau zu bestimmen.

CUORICINO wurde im Juli 2008 vorübergehend gestoppt, nachdem es von 2002 an Daten genommen hat. Vorrussichtlich wird noch 2009 ein weiterer Turm des CUORE Experimentes für Tests in CUORICINO eingebaut werden. CUORE-0, in welchem ebenfalls nur ein Turm an Kristallen zum Einsatz kommen wird, soll 2010 mit der Datennahme beginnen. Danach werden sukzessive weitere Türme an Kristallen eingebaut werden.

2.4.4 Nemo

Das Neutrino **E**ttore **M**ajorana **O**bservatory, kurz NEMO [Arn05] soll ebenfalls nicht unerwähnt bleiben. Nach zwei Prototypen (NEMO1 und NEMO2) nimmt NEMO3 seit Januar 2003 im Fréjus Underground Laboratory Daten, welche zur Zeit analysiert werden.

Das Experiment selbst verwendet als Quellen für den neutrinolosen doppelten Betazerfall sehr dünne Folien mit verschiedenen Materialien, welche über einen doppelten Betazerfall zerfallen. Insgesamt kommen 6914 g ¹⁰⁰Mo und 932 g ⁸²Se zum Einsatz. Auf beiden Seiten der Folien befinden sich Spurkammern welche mit 6180 Driftkammern bestückt sind. Dies erlaubt dreidimensionale Rekonstruktion der Spuren der beiden Elektronen des neutrinolosen doppelten Betazerfalls.

Die Spurkammer ist von einem Kalorimeter, bestehend aus 1940 Plastik-Szintillatorpaneelen umgeben. Dieses Kalorimeter hat eine sehr gute Energieauflösung und erlaubt es so, die Energien der beiden Elektronen aus einem neutrinolosen doppelten Betazerfall sehr genau zu messen.

In Nemo 3 werden Zwei-Elektronen-Ereignisse eindeutig identifiziert, indem ihre Spuren zum einen einen gemeinsamen Ursprung haben. Zum anderen muss das Ende der Spur mit einem zu einem Elektron passenden Signal in einem entsprechenden Szintillatorpaneel

⁸NTD: Neutron Transmutation Doped

korrespondieren. So kann Nemo 3 den neutrinolosen doppelten Betazerfall nachweisen.

2.4.5 Cobra

Als weiteres Experiment zum neutrinolosen doppelten Betazerfall soll noch Cobra, der Cadmium-Zinc-Tellurideo-neutrino double-beta research apparatus, genannt werden. Es setzt auf viele kleine Kristalldetektoren aus CdZnTe. Seit März 2006 gibt es einen Testaufbau für 64 jeweils ein Kubikzentimeter große Kristalle mit einem Gewicht von je 6,53 Gramm, mit welchem Daten genommen werden. Dabei hat Cobra den großen Vorteil, dass sowohl ^{116}Cd als auch ^{130}Te nur über einen doppelten Betazerfall zerfallen können [Daw09].

Das endgültige Experiment wird über 64.000 Kristalle mit einer gesamten Masse von 400 Kilogramm verfügen. Das Ziel des Experimentes ist es, ein Limit für die Masse des Elektroneneutrinos von $m_{\nu_e} < 50 \text{ meV}$ zu erreichen. COBRA wird voraussichtlich 2011 mit der endgültigen Datennahme beginnen.

3 Das GERDA-Experiment

Das größte Problem aller bisher vorgestellten Experimente zum neutrinolosen doppelten Betazerfall sind Untergrundereignisse. Diese können sowohl durch radioaktive Zerfälle in den verwendeten Materialien erzeugt werden, aber auch durch externe Quellen wie Gammastrahlung und Myonen.

Das **GER**manium **DE**tector **AR**ray, kurz **GERDA**, welches den neutrinolosen doppelten Beta-Zerfall ($0\nu\beta\beta$) (siehe Kapitel II.1) von Germanium 76 (^{76}Ge) untersuchen wird, verwendet, um dieses Problem zu lösen, eine innovative Abschirmung und verschiedene aktive Untergrundunterdrückungsverfahren. Insbesondere das Myonveto spielt hier eine wichtige Rolle. Das GERDA-Experiment wird zur Zeit in den LNGS⁹ aufgebaut und beginnt voraussichtlich 2009 mit der Datennahme.

In den folgenden Abschnitten soll ein Überblick über das grundlegende Design und die einzelnen Phasen des Experimentes gegeben werden. Dies schließt die verschiedenen passiven und aktiven Methoden ein, welche zum Einsatz kommen, um die notwendige Untergrundrate von 10^{-3} Untergrundereignissen/(keV·kg·Jahr) zu erreichen. Außerdem wird kurz die Struktur der GERDA-Kollaboration vorgestellt.

3.1 Motivation und Ziel des GERDA-Experiments

Wie im vorhergehenden Abschnitt besprochen, handelt es sich beim neutrinolosen doppelten Betazerfall um einen sehr selten auftretenden Prozess. Um die in Abschnitt II.2.3 genannte Halbwertszeit von mindestens $T_{1/2} > 1,2 \cdot 10^{25}$ für den neutrinolosen doppelten Betazerfall des ^{76}Ge experimentell zu bestimmen, muss ein Experiment äußerst optimiert werden.

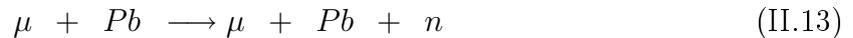
- Als erstes muss die Masse an eingesetztem ^{76}Ge möglichst groß gewählt werden. Je mehr ^{76}Ge verfügbar ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem neutrinolosen doppelten Beta-Zerfall kommt. Aber selbst bei einer Masse von einer Tonne wären das, mit einer mittleren Lebensdauer, welche der heutigen unteren Grenze entspricht, nur 400 Ereignisse pro Jahr. Wenn man dies mit dem erwarteten Untergrund von etwa 200000 Ereignissen pro Jahr vergleicht, welche durch kosmische Myonen in solch einem Detektor erzeugt würden, dann wird klar, wie selten der neutrinolose doppelte Betazerfall ist.
- Zusätzlich muss die Laufzeit des Experimentes groß gewählt werden, damit auch bei kleinen Massen Detektormaterial eine ausreichend große Anzahl an Zerfällen stattfindet. Damit man bei einer Masse von 50 kg Germanium die oben genannten 400 Ereignisse detektieren kann, muss es also 20 Jahre laufen. Man spricht deshalb in diesem Fall auch von 1000 kg·Jahren an Exposition. Dies bedeutet, dass im gesamten Experiment Daten angesammelt würden, die einer Masse von 1000 kg entsprechen, wenn ein Jahr lang gemessen würde.

⁹LNGS: Laboratori Nazionali del Gran Sasso, <http://www.lngs.infn.it/>

- Da beide oben genannte Optimierungen an natürliche Grenzen stoßen, ist es noch zwingend notwendig, dass man den Großteil des Untergrundes unabhängig von der verwendeten Detektormasse oder der Laufzeit des Experimentes identifiziert. Wenn man insbesondere im jeweils interessanten Energiebereich alle Untergrundereignisse identifiziert, dann ist das eigentliche Signal eindeutig identifizierbar.

Man erkennt somit, dass im Prinzip nur eine Kombination aller drei Optimierungen erfolgversprechend ist. Denn selbst wenn der gesamte Untergrund unterdrückt werden würde, müssen immer noch ca. 2,5 kg ^{76}Ge vorhanden sein, damit auch nur ein einziges $0\nu\beta\beta$ Ereignis pro Jahr auftritt, wenn man die aktuellen Grenzen der Lebensdauer nimmt. Aus diesem Grund wird eine möglichst große Detektormasse verwendet, und über eine längere Zeitspanne Daten genommen. Dabei wird der Untergrund durch aktive und passive Methoden möglichst gut unterdrückt. Das GERDA-Experiment schlägt bei dieser Untergrundunterdrückung im Vergleich zu anderen Experimenten wie das Heidelberg-Moskau-Experiment neue Wege ein.

Ziel ist es, ein möglichst untergrundarmes Experiment zu entwerfen. Hierfür verzichtet das GERDA-Experiment möglichst auf Materialien mit hoher Kernladungszahl, beispielsweise als Abschirmung. Näheres zu der Abschirmung findet sich in Kapitel II.3.3. Dadurch werden Sekundärteilchen vermieden, welche bei Streuung von hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung an den schweren Kernen produziert werden. Ein typisches Beispiel hierfür sind durch Myonen induzierte Neutronen im Blei.



Da Germanium ein sehr gut entwickelter Halbleiterdetektor ist, können die Germaniumkristalle sowohl als Detektor als auch als Quelle für den $0\nu\beta\beta$ verwendet werden. Um den intrinsischen Untergrund noch weiter zu reduzieren, werden die Kristalle nahezu nackt in flüssigem Argon betrieben. Die Halterungen der jeweils 2,1 kg schweren Kristalle wiegen beispielsweise nur 31 g.

Mit diesen Methoden sollte es möglich sein, den Untergrund im GERDA-Experiment auf maximal 10^{-3} Untergrundereignisse/(keV·kg·Jahr) zu reduzieren. Von dieser Entwicklung werden auch andere nachfolgende Experimente profitieren.

Mit diesem innovativen Konzept will die GERDA-Kollaboration die Majorana-Natur der Neutrinos nachweisen, indem sie ein „vollständiges Spektrum“ von ^{76}Ge misst. Mit diesem kann die Intensität der 2039 keV Linie des neutrinolosen doppelten Betazerfalls des ^{76}Ge gemessen (Vergleich Kapitel II.2.1 in Abbildung 5) und die zugehörige Halbwertszeit bis zu einer unteren Grenze von $1,35 \cdot 10^{26}$ Jahren bestimmt werden. Über diese lässt sich mit Hilfe der Matrixelemente die Hierarchie der Neutrinos (Vergleich Kapitel II.1) bestimmen bzw. die effektive Masse des Elektronneutrinos und damit die effektive Masse aller Neutrinos bestimmen (Kapitel II.2.2).

3.2 Wahl des Standortes des GERDA-Experimentes

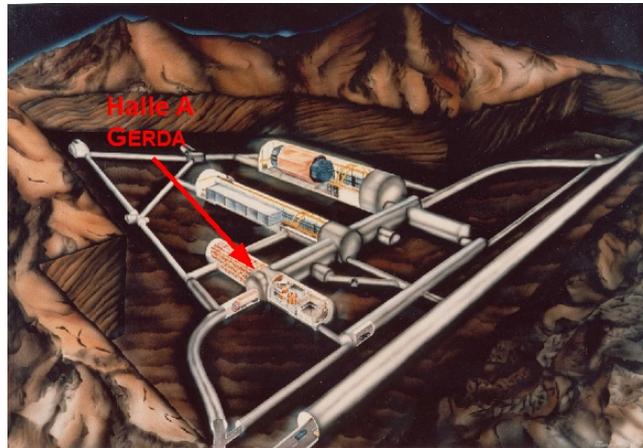


Abbildung 7: Das LNGS Untergrund Labor.

Bei der Wahl des Standortes des GERDA-Experimentes war vor allem der durch die Umgebung eingebrachte Untergrund entscheidend. Die Umgebung sollte deshalb eine möglichst gute Abschirmung und eine möglichst niedrige Untergrundrate zur Verfügung stellen. Hierfür hat sich das LNGS, in welchem bereits mehrere andere Experimente stationiert sind, die ebenfalls eine hohe Untergrundunterdrückung fordern, angeboten. Im LNGS sind beispielsweise die Experimente CRESST¹⁰, LVD¹¹ oder Borexino¹² platziert.

Die natürliche Abschirmung des Labors von ca. 1400 Metern Felsen des Gran Sasso Massivs entspricht ungefähr 3100 Metern Wasseräquivalent, was sämtlichen Untergrund von außerhalb des Labors deutlich reduziert. Hierdurch wird der Fluss von Myonen von 100 pro Sekunde auf einem Quadratmeter auf ein einzelnes Myon pro Stunde und Quadratmeter reduziert. Dies entspricht einer Reduktion des Flusses um den Faktor 360000.

In den so abgeschirmten Hallen, bietet das LNGS etwa 15 großen Experimenten Platz. Durch diese bereits vorhandenen Experimente hatte das LNGS einen weiteren wichtigen Vorteil. Es verfügt bereits über die Infrastruktur, welche notwendig ist, um ein Experiment dieser Größenordnung in Betrieb zu nehmen. Auch ist der Zugang zu den Hallen groß genug, um den Transport der großen Teile des Experiments zu ermöglichen. Zum Beispiel konnte so der Kryostat in einem Stück transportiert und aufgestellt werden.

Das LNGS befindet sich zwischen den Städten L'Aquila und Teramo ca. 120 km nordwestlich von Rom. Es wurde seitlich eines Autobahntunnels, welcher unter dem Gran Sasso Bergmassiv durchführt, gebaut (siehe Abbildung 7). Die drei großen Hallen sind jede ca. 100 Meter lang, 20 Meter breit und 18 Meter hoch.

¹⁰CRESST: Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers [<http://www.cresst.de/index.php>]

¹¹LVD: Large Volume Detector [<http://www.bo.infn.it/lvd/>]

¹²Borexino: BORon EXperiment [<http://borex.lngs.infn.it/>]

3.3 Das GERDA-Experiment

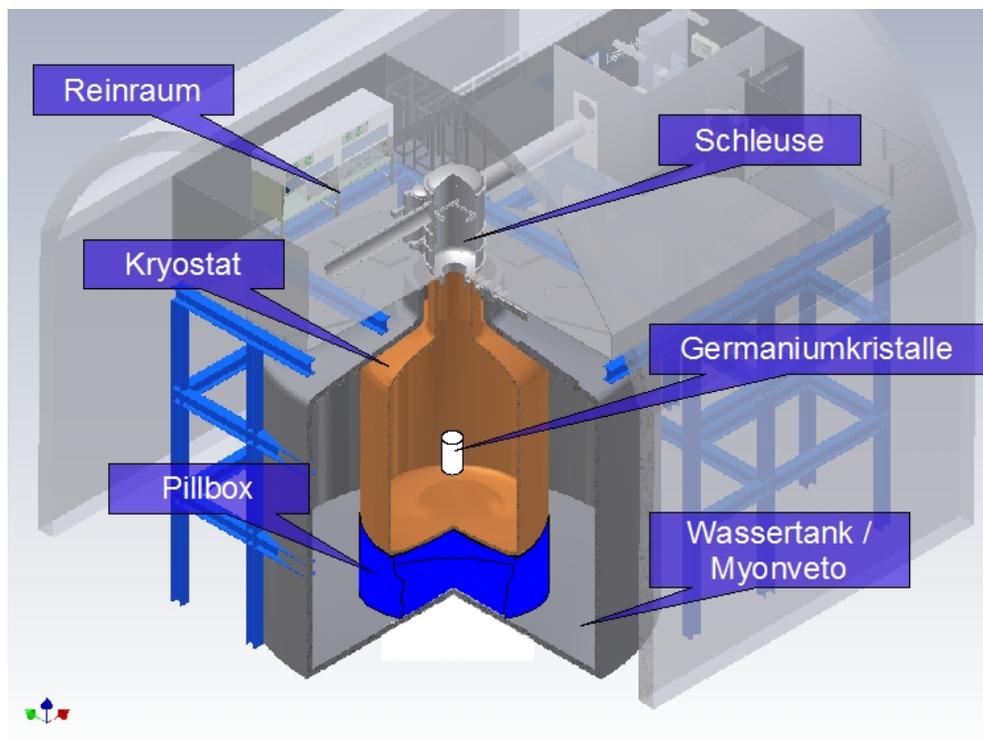


Abbildung 8: Das **GER**manium **DE**tector **AR**ray Experiment.

Das GERDA-Experiment selbst wird im Moment in der Halle A des LNGS aufgebaut und befindet sich zwischen den Experimenten CRESST und LVD. Es ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Das Herzstück des Experimentes bilden die Germaniumdetektoren. Diese befinden sich in einem mit flüssigem Argon gefüllten Stahlkryostaten mit zwei Metern Radius. Dieser kühlt die Germaniumkristalle auf Betriebstemperatur und ist in Abbildung 9 noch einmal gesondert dargestellt. Die Kühlung ist notwendig, da es sich bei Germanium um einen Halbleiter handelt. Werden die Germaniumdetektoren nicht gekühlt, verlieren sie ihre hohe Energieauflösung und Effizienz..

Argon bietet auf Grund seiner höheren Dichte gegenüber dem ursprünglich eingeplanten flüssigen Stickstoff eine deutlich bessere Abschirmung gegen Gammastrahlung. Es werden allerdings auch etwas mehr Neutronen erzeugt.

Als zusätzliche Abschirmung ist die Innenwand des Kryostaten mit Kupfer ausgekleidet. Die Dicke dieser Schicht beträgt zwischen drei und fünf Zentimeter. Kupfer hat den Vorteil, dass es sehr rein hergestellt werden kann und sich bereits in vielen Experimenten als innerste Abschirmung bewährt hat. Es bringt wenig intrinsischen Untergrund mit sich und stoppt externe oder im Wassertank oder im Stahlkryostaten produzierte Gammastrahlung. Der Kryostat schließlich ist von einem Wassertank mit einem Radius von fünf Metern und

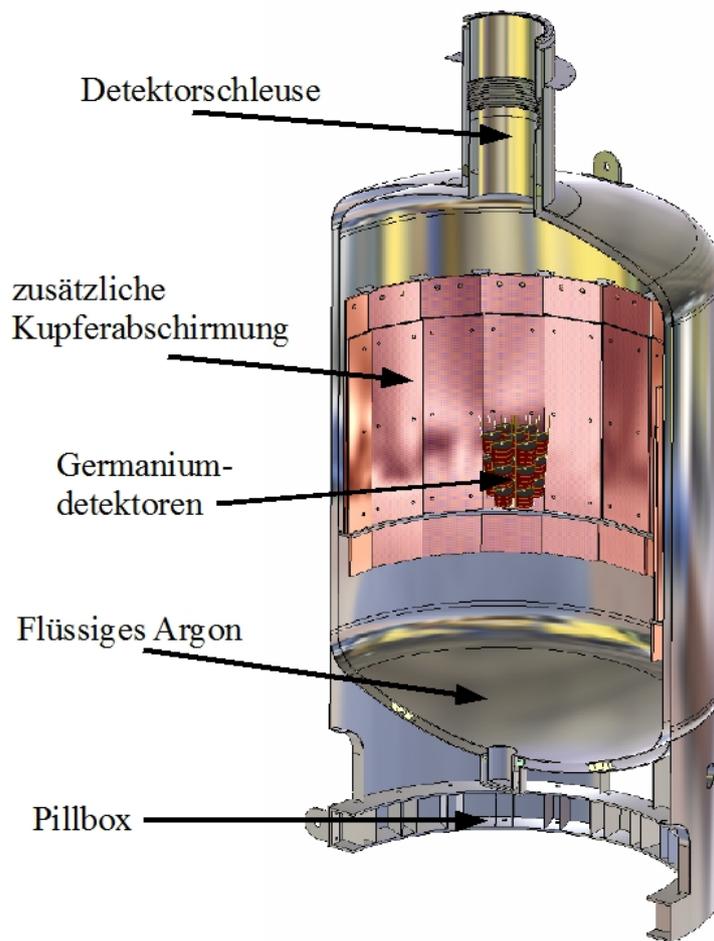


Abbildung 9: Der GERDA-Kryostat mit Kupferabschirmung und flüssigem Argon

einer Höhe von ca. neun Metern umgeben. Dieser hat zwei Aufgaben. Zum einen moderiert beziehungsweise stoppt das Wasser Neutronen, welche im Gestein beispielsweise durch Myonen oder natürliche Radioaktivität erzeugt wurden. Zusätzlich schirmt er auch gegen externe Gammastrahlung ab. Außerdem wird der Wassertank als aktives Cherenkov Myonveto verwendet, welches im nächsten Kapitel bei den aktiven Untergrundunterdrückungsverfahren kurz vorgestellt wird.

Über dem Wassertank wird ein Reinraum (Klasse¹³ 10.000) für die Arbeit mit den Detektoren aufgebaut, in welchem sich auch die Schleuse befinden wird, durch welche die Germaniumdetektoren in den Kryostaten abgesenkt werden. Seitlich des Wassertanks werden Räumlichkeiten eingerichtet, in denen zum Beispiel die Pumpen für das Wasser und die Datennahme des Myonvetos untergebracht werden.

¹³In einem Reinraum der Klasse 10.000 dürfen maximal 10.000 Teilchen, welche alle kleiner als $5\ \mu\text{m}$ sein müssen, in einem Raumfuß Luft sein.

Zum aktuellen Zeitpunkt (April 2009) sind Kryostat und Wassertank aufgebaut und der Wassertank hat seinen ersten Testlauf überstanden. Desweiteren sind große Teile des Gebäudes aufgebaut und es wird der Reinraum oberhalb des Kryostaten eingerichtet. Im Inneren des Kryostaten selbst wurde die Kupferabschirmung eingebaut und es laufen zur Zeit noch Tests, die Reinheit der Abschirmung betreffend. Außerdem ist ein Großteil des Cherenkov-Myonvetos eingebaut.

3.4 Aktive Untergrundunterdrückung

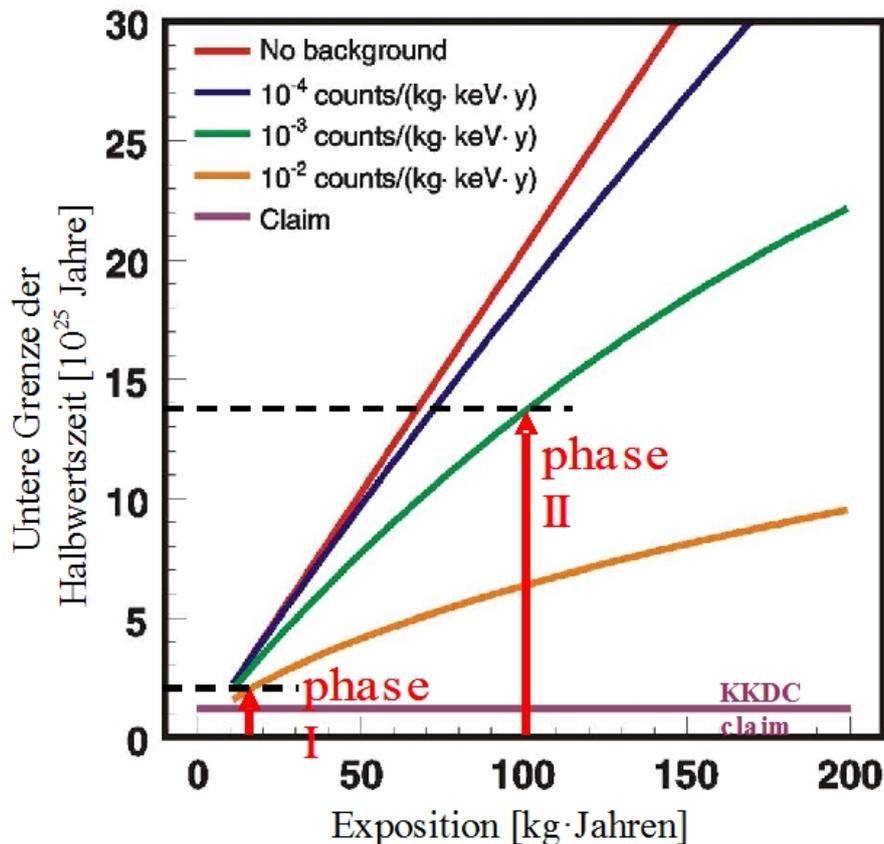


Abbildung 10: Sensitivität des GERDA-Experimentes für verschiedene Untergrundraten. [CK06]

In Abbildung 10 ist die Sensitivität des GERDA-Experimentes für verschiedene Untergrundraten dargestellt. Man erkennt, dass eine untere Grenze für die Halbwertszeit von $1,35 \cdot 10^{26}$ Jahren in der Phase II des GERDA-Experimentes nur dann innerhalb einer Laufzeit von $100 \text{ kg} \cdot \text{Jahren}$ erreichbar ist, wenn die Untergrundrate den Wert von 10^{-3} Untergrundereignissen/($\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahren}$) nicht überschreiten wird. Um eine solche Rate an

Untergrundereignissen zu erzielen, müssen zusätzlich zu dem bereits vorgestellten Abschirmungskonzept noch verschiedene aktive Untergrundunterdrückungsverfahren zum Einsatz kommen.

Neben intrinsischen Störungen durch radioaktive Elemente sind vor allem die kosmischen Myonen für einen Großteil des Untergrundes im GERDA-Experiment verantwortlich. Myonen, welche die Halle A des LNGS erreichen, haben eine mittlere Energie von ca. 270 GeV [Ahl93] und sind auf Grund dieser hohen Energie nur minimal ionisierend, sprich, sie deponieren entlang ihrer Wegstrecke nur einen Bruchteil ihrer Energie.

Sie lassen sich deshalb auch nicht durch passive Abschirmungsmethoden unterdrücken, weshalb aktive Systeme zum Einsatz kommen.

Auch andere Teilchen, wie hochenergetische Gammastrahlung, lassen sich nicht durch passive Methoden abschirmen und müssen aktiv detektiert werden. Das Hauptproblem bei dieser Art Untergrund sind vor allem die Produktion von Sekundärteilchen, die produziert werden, wenn die hochenergetischen Primärteilchen den Detektor passieren. Das können Elektronen, Positronen, Gammastrahlung oder ein ganzer Schauer an Teilchen sein, welche die 270 GeV der Myonen, energetisch gesehen, ermöglichen (siehe Kapitel II.1).

- Das Myonveto, welches ausführlich in Kapitel III besprochen wird, wird den Untergrundbeitrag von kosmischen Myonen identifizieren. Um möglichst eine Abdeckung des vollen Raumwinkels zu ermöglichen, unterteilt es sich in drei unabhängig voneinander operierende Systeme.

Der Großteil des Raumes um den Kryostaten wird durch den Wassertank, der, wie bereits erwähnt, als aktives Cherenkov Myonveto zum Einsatz kommt, abgedeckt. Er ist mit insgesamt 60 Photomultipliern (20 cm Durchmesser) ausgestattet. Dabei kommen die Photomultiplier vom Typ 9350KB und 9354KB der Firma Electron Tubes Limited zum Einsatz. Es werden insgesamt 60 Photomultiplier im Wassertank verteilt, um eine möglichst gleichmäßige Abdeckung der Oberfläche zu erreichen.

Direkt unterhalb des Kryostaten befindet sich die „Pillbox“, die ihren Namen auf Grund ihrer an eine Pillendose erinnernde Form trägt. In ihr befinden sich die letzten sechs Photomultiplier des Cherenkov-Vetos. Diese detektieren vor allem Myonen, die von oben direkt durch den Kryostaten gehen, ohne den Hauptteil des Wassertanks zu passieren. Der Vorteil des kleinen Volumens ist, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Myon zu detektieren, das durch dieses Volumen geht, sehr hoch ist.

Um die Effizienz des Cherenkov-Detektors noch zu erhöhen, werden große Teile der Oberflächen des Wassertanks und des Kryostaten mit einer hoch reflektierenden und wellenlängenschiebenden Folie (siehe Kapitel III.6) verkleidet. Diese verdoppelt, bis verdreifacht die Zahl an detektierbaren Photonen im Bereich, in dem die Photomultiplier sensitiv sind.

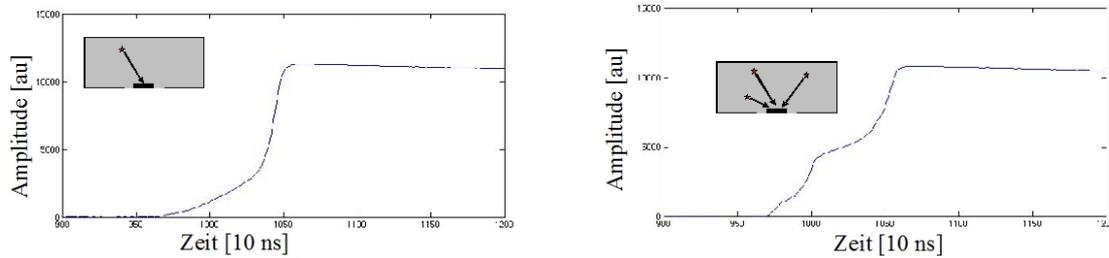
Der letzte Teil des Myonvetos ist eine sechs Zentimeter dicke Schicht an Plastikszintillatorplatten oberhalb des Reinraums. Dieser Teil des Myonvetos detektiert genau wie die Pillbox vor allem Myonen, die senkrecht von oben kommen und insbesondere solche Myonen, die im Kryostaten gestoppt werden, da diese in keinem anderen Teil des Vetos detektiert werden können.

- Einer der beiden Detektortypen für Phase II (siehe folgendes Kapitel), die zur Zeit miteinander verglichen werden, wird vorraussichtlich in insgesamt 18 Segmente unterteilt sein. Dies ermöglicht es über *Anti-Koinzidenz-Verfahren* zwischen zwei Detektorsegmenten, zwischen den erwarteten Signalen des $0\nu\beta\beta$ und verschiedenen Untergrundsignalen zu unterscheiden. So erzeugen hochenergetische Teilchen beim Durchqueren der Detektoren im Normalfall mehrere Energiedepositionen in den Detektoren. Insbesondere auch in verschiedenen Segmenten. Bei einem $0\nu\beta\beta$ Ereignis wird jedoch nur eine Energiedeposition von 2039 keV in einem einzigen Segment erwartet.

Durchqueren zum Beispiel Myonen mit einer mittleren Energie von 270 GeV das Experiment, treffen etwa, wie in Monte Carlo Simulationen bestimmt, 2,9 Millionen Myonen pro Jahr Laufzeit das GERDA-Experiment. Von diesen haben etwa sieben Myonen räumlich ausreichend eng lokalisierte Energiedepositionen im Bereich der erwarteten 2039 keV des $0\nu\beta\beta$ produziert (siehe Kapitel IV.3.2) um nicht mit Hilfe der Segmentierung der Detektoren von echten $0\nu\beta\beta$ Ereignissen unterschieden zu werden.

Die alternativen BEGe-Detektoren (siehe im nächsten Abschnitt 3.3.4.1) ermöglichen dies nur eingeschränkt. So wie die alten Detektoren des Heidelberg-Moskau und des IGEX Experimentes ist hier nur eine Unterscheidung über Antikoinzidenzen zwischen den einzelnen Detektoren möglich. Hier kann man nur zwischen Energiedepositionen in mehreren Kristallen unterscheiden.

- Ebenfalls unter den aktiven Verfahren, den Untergrund des GERDA-Experimentes zu minimieren, fällt die Pulsformanalyse der Signale der Germaniumkristalle. Insbesondere die neuen BEGe-Detektoren haben sehr gute Pulsformanalyse-Eigenschaften, die ebenfalls eine gute Ortsauflösung ermöglichen wird. In den Abbildungen II.11(a) und II.11(b) sind zwei typische Pulsformen für eine einzelne Energiedeposition (links) und mehreren Depositionen (rechts) dargestellt. Es ist sehr schön der Unterschied zwischen den beiden Ereignissen zu erkennen. Die Ereignisse mit einer einzelnen Energiedeposition werden zum Beispiel durch Elektronen erzeugt und haben die gleiche Pulsform wie das erwartete $0\nu\beta\beta$ -Ereignis. Mehrfache Energiedepositionen in einem einzelnen Kristall werden typischerweise durch Gammaquanten erzeugt und können auf Grund ihrer leicht von den Einzeldepositionen unterscheidbaren Pulsform als Untergrund identifiziert werden.
- Zur Zeit gibt es auch noch Pläne, die Szintillationseigenschaften des Argons zu nutzen. Dies würde eine weitere Möglichkeit bieten, geladene Teilchen zu detektieren, welche den Kryostaten passieren. Hierfür sollen kleine Silizium Photomultiplier in den Kryostaten eingebracht werden. Diese Pläne sind jedoch zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht weit fortgeschritten.



(a) Einzelne Energiedeposition, durch ein Elektron erzeugt. (b) Mehrere Energiedepositionen, durch ein Gammaquant erzeugt.

Abbildung 11: Einige Beispiele für Pulsformen von verschiedenen Signalen in den Germaniumdetektoren [Bud08]

3.4.1 Phasen des Experiments

Das GERDA-Experiment selbst wird voraussichtlich aus drei Phasen bestehen, wobei bereits jetzt in einer Vorphase in einem Testaufbau, dem GERDA Detector Laboratory (GDL) die vorhandenen Detektoren getestet werden. Dieses befindet sich ebenfalls am LNGS und ähnelt in seinem Aufbau dem GERDA-Experiment, allerdings deutlich kleiner. Die so gewonnenen Daten werden es ermöglichen, die Ergebnisse des Heidelberg-Moskau Experimentes ([KK04]) zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern.

Danach beginnt die eigentliche Datennahme, welche in zwei bis drei Phasen unterteilt ist. Eine Übersicht über diese Phasen ist in Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Die Phasen des GERDA-Experiments [Abt]

Phase	Beginn	Detektor	Untergrundereignisse	voraussichtliches Limit
I	Mai 2009	15 kg·Jahre	$10^{-2} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahre}}$	$T_{1/2} > 1,2 \cdot 10^{25}$ Jahre
II	Mai 2010	100 kg·Jahre	$10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahre}}$	$T_{1/2} > 1,35 \cdot 10^{26}$ Jahre
III	???	O(500kg)	$10^{-5} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahre}}$???

In Phase I des Experiments werden die Detektoren des Heidelberg-Moskau Experimentes, aber auch Kristalle des IGEX¹⁴-Experimentes zum Einsatz kommen. Bei diesen Detektoren handelt es sich um etwa zwei Kilogramm schwere aus Einkristallen gefertigte Dioden. Insgesamt werden vier Detektoren des Heidelberg-Moskau-Experimentes und drei Detektoren des IGEX-Experimentes verwendet werden. Bis zu diesem Zeitpunkt werden vielleicht auch einige neue Germaniumdetektoren der Phase II verfügbar sein, welche in diesem Fall sofort zum Einsatz kommen werden.

¹⁴IGEX: International Germanium Experiment [<http://www.nu.to.infn.it/exp/all/igex/>]

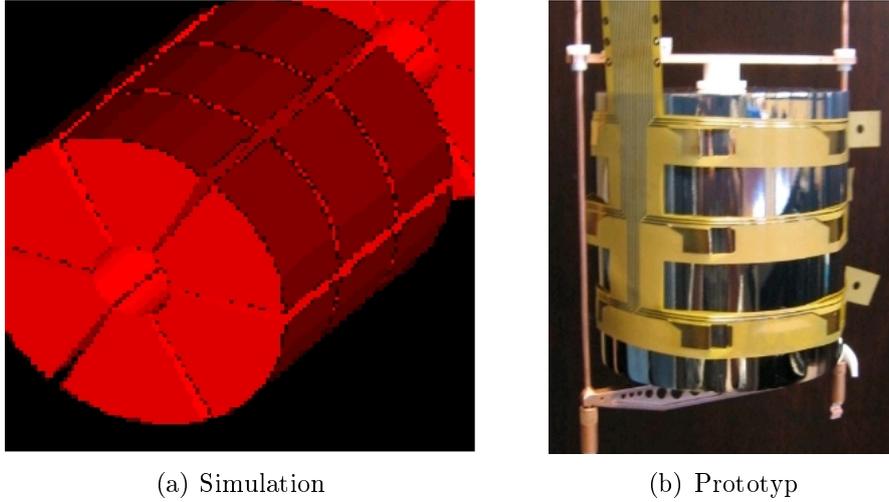


Abbildung 12: Segmentierter Germanium Kristall (18 Segmente, 3 in z -, 6 in φ -Richtung) für die Phase II des GERDA-Experiments.

In dieser Phase I sollen ca. 15 kg·Jahre an Daten gesammelt werden. Dies wird es erlauben, das derzeitige Limit für die Halbwertszeit des $0\nu\beta\beta$ von $T_{1/2} > 1,2 \cdot 10^{25}$ Jahren zu überprüfen.

Momentan werden noch zwei verschiedene Detektortypen untersucht, die für die Phase II des GERDA-Experimentes in Frage kommen. Bei dem ersten Detektor handelt es sich um einen segmentierten n-Typ¹⁵ Detektor. Bei diesem Kristall handelt es sich, um in 18 Segmente unterteilte Elektroden, welche vor allem die im vorigen Kapitel besprochene Untergrundunterdrückung durch Antikoinzidenz-Verfahren ermöglichen wird. Die Detektoren verfügen über drei Segmente in z -Richtung und sechs in φ -Richtung (siehe Abbildung II.12(a)).

Eine mögliche Alternative ist der Einsatz so genannter BEGe¹⁶-Detektoren. Diese speziellen p-Typ¹⁷ Detektoren haben eine bessere Energieauflösung als die segmentierten n-Typ Detektoren und sehr gute Pulsformanalyseigenschaften. Ein großer Vorteil dieser nicht segmentierten Detektoren wäre, dass deutlich weniger Material in der Nähe der Detektoren ist, da man pro zwei Kilogramm an Detektormaterial nicht 18 sondern nur eine Signalleitung benötigen würde. Dadurch wird deutlich weniger Untergrund in das Experiment eingebracht. Zur Zeit werden diese Detektoren noch am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg getestet.

In Phase II sollen ca. 100 kg·Jahre an Daten akkumuliert werden, was zu einem unteren Grenzwert von $T_{1/2} > 1,35 \cdot 10^{26}$ Jahren führen müsste. Dieser Wert hängt jedoch

¹⁵Ein n-Typ Halbleiter wurde mit entsprechenden Elementen so dotiert, dass die Anzahl der Elektronen künstlich erhöht wurde.

¹⁶BEGe : Broad Energy Germanium Detektoren

¹⁷Ein p-Typ Halbleiter wurde mit entsprechenden Elementen so dotiert, dass die Anzahl der Löcher künstlich erhöht wurde.

sehr stark davon ab, ob das endgültige Ziel von 10^{-3} Untergrundereignissen/(keV·kg·Jahr) erreicht wird. Um dies zu realisieren, kommen die bereits besprochenen Untergrundunterdrückungsverfahren zum Einsatz.

Zur Zeit wird außerdem noch über eine letzte Phase III nachgedacht. Dabei würden mehrere hundert Kilogramm ^{76}Ge zum Einsatz kommen. Bereits seit ihrer Gründung arbeitet die GERDA-Kollaboration mit der amerikanischen Majorana-Gruppe zusammen, welche sich ebenfalls der Suche nach dem $0\nu\beta\beta$ des ^{76}Ge widmet. Das Majorana-Experiment ist ein mehr auf konventionelle Abschirmung bedachtes Projekt und wird in Kapitel II.2.4 näher beschrieben. Für diese letzte Phase wird darüber nachgedacht beide Gruppen zusammenzulegen und die Detektoren in dem Typ Experiment einzusetzen, welches bis zu diesem Zeitpunkt am erfolgreichsten ist.

3.5 Die GERDA-Kollaboration

Die GERDA-Kollaboration ist ein Zusammenschluss von vielen internationalen Instituten aus Belgien, Deutschland, Italien, Polen, Russland und der Schweiz. Die Institute sind im Einzelnen:

- Gran Sasso National Laboratory, Assergi, Italien
- Institut für Kern- und Teilchenphysik, Technische Universität Dresden, Deutschland
- Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russland
- Institute for Reference Materials and Measurements, Geel, Belgien
- Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Deutschland
- Institute of Physics, Jagellonian University Krakau, Polen
- Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moskau, Russland
- Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moskau, Russland
- Russian Research Center Kurchatov Institute, Moskau, Russland
- Dipartimento di Fisica, Universita Milano Bicocca, Italien
- Max-Planck-Institut für Physik, München, Deutschland
- Dipartimento di Fisica, Universita di Padova, Padova, Italien
- Kepler Center for Astro and Particle Physics, Eberhard Karls University of Tübingen, Deutschland
- Physik Institut, University of Zürich, Schweiz

Bei einer so großen Kollaboration ist es notwendig, die Arbeit an den verschiedenen Teilgebieten zu koordinieren. Um dabei einen reibungslosen Ablauf des Aufbaus und der Durchführung des Experimentes zu gewährleisten, ist die gesamte Kollaboration in sogenannte Taskgroups organisiert. Es gibt insgesamt zwölf dieser Taskgroups, welche sich jeweils einem Bereich des Experimentes widmen:

- TG 01: Modifikation und Test bereits vorhandener Detektoren
- TG 02: Design und Produktion neuer Detektoren
- TG 03: Frontend Elektronik
- TG 04: Kryostat und zugehörige Infrastruktur
- TG 05: Reinraum und Detektorschleusensystem
- TG 06: Wassertank und zugehörige Infrastruktur
- TG 07: Das Myonveto
- TG 08: Infrastruktur und Logistik
- TG 09: Datenerfassung und Software für die Germaniumdetektoren
- TG 10: Monte Carlo Simulation und Untergrundanalysen
- TG 11: Materialuntersuchungen bezüglich Radioaktivität
- TG 12: Kalibration der Detektoren

Im Folgenden sollen nun noch kurz die Taskgroups genauer vorgestellt werden, welche für die Durchführung dieser Dissertation von besonderem Interesse waren.

- **Taskgroup 7 - Das Myonveto:**

Wie der Name der Taskgroup 7 (TG 7) sagt, ist sie die für diese Arbeit wichtigste Taskgroup gewesen. Das Design und der Aufbau des Myonvetos für das GERDA-Experiment, welche Teil dieser Arbeit sind, sind auch die Aufgaben der TG 7. Sie besteht zu großen Teilen aus Physikern der Eberhard Karls Universität Tübingen und des Joint Institute for Nuclear Research aus Dubna.

Dazu gehören alle in dieser Arbeit vorgestellten vorbereitenden Arbeiten, wie zum Beispiel Auswahl der Photomultiplierdetektoren oder das Design und die Fertigung der Kapselung der Photomultiplier in Tübingen. Es wurden aber auch logistische Fragen wie zum Beispiel der Platzbedarf des Messraums für das Myonveto oder der Bedarf an Steckdosen und Netzwerkverbindungen diskutiert und gelöst.

Bei einer großen Kollaboration mit vielen verschiedenen Teilprojekten ist es auch von besonderer Bedeutung, den Zeitplan mit den übrigen Taskgroups abzustimmen. Es ist zum Beispiel nicht möglich, im Wassertank Photomultiplier zu montieren, wenn

oberhalb des Tanks die mehrere Tonnen schwere Schleuse für die Detektoren eingebaut wird. Die TG 7 muss die verfügbaren Zeitlücken nützen, damit auch die übrigen Teile des Experiments ohne Verzögerungen eingebaut werden können.

Außerdem wurden die Plastikszintillatorpaneele für das Myonveto in Dubna entworfen und produziert. Diese werden auf dem Dach des Reinraums platziert, direkt oberhalb der Detektorschleuse in den Kryostaten.

Neben dem Aufbau und der Inbetriebnahme des Myonvetos ist es schließlich noch die Aufgabe der TG 7, während dem Experiment die Datennahme und -analyse des Vetos zu betreiben.

- **Taskgroup 10 - Monte Carlo Simulation und Untergrundanalysen:**

Die Taskgroup 10 (TG 10) hat sich mit sämtlichen Simulationen für GERDA beschäftigt. Diese wurden im Rahmen des MaGe Projektes angefertigt. Dabei handelt es sich um einen Zusammenschluss der Majorana und der GERDA-Simulationsarbeiten (siehe Kapitel IV.1.3). In der TG 10 wurde zum Beispiel in den Germaniumdetektoren das erwartete Spektrum simuliert. Ebenfalls wurden Simulationen der verschiedenen intrinsischen radioaktiven Quellen für Untergrundstrahlung angefertigt.

Schließlich wurden auch die für diese Arbeit so wichtigen Effizienzstudien der verschiedenen Anordnungen von den Photomultipliern (siehe Kapitel IV.4) im Rahmen der TG 10 durchgeführt. Außerdem wird, wenn das Myonveto begonnen hat, Daten zu nehmen, ein Vergleich der Simulationen mit den tatsächlichen Daten angestrebt. Ebenfalls können die gewonnenen Erkenntnisse der Simulationen eine Analyse der Myonveto-Daten erleichtern.

Kapitel III

Übersicht Myonveto

In diesem Kapitel soll das Herzstück dieser Arbeit vorgestellt werden. Der GERDA-Myonveto Cherenkov Detektor. Hierfür soll zuerst ein kurzer Überblick über die Herkunft der zu detektierenden Myonen und ihren Einfluss auf das GERDA-Experiment gegeben werden. Hieraus wird auch die Notwendigkeit des Myonvetos ersichtlich.

Im Folgenden wird ein kurzer Exkurs über die Detektion von Cherenkov-Photonen das dem Myonveto zu Grunde liegende Konzept vorstellen. Die restlichen Kapitel beschreiben die einzelnen Komponenten wie die Photomultiplier und ihre Kapselungen, sowie die Reflektorfolie VM2000. Zum Abschluss wird das grundlegende Design des Myonvetos beschrieben.

1 Untergrund durch kosmische Strahlung

Mit dieser Arbeit wird ein Vetodetektorsystem für Myonen entworfen und gebaut. Um Sinn und Zweck dieses Systems besser zu verstehen, soll in diesem Kapitel die kosmische Strahlung und die durch sie resultierenden atmosphärischen Schauer besprochen werden. Im Folgenden wird ihre Auswirkung auf aktuelle Experimente beschrieben. Insbesondere soll sie für den Fall der LNGS, in welchen das GERDA-Experiment aufgebaut wird, betrachtet werden.

1.1 Herkunft und Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Bei der Herkunft der kosmischen Strahlung wird zwischen solarer, galaktischer und extragalaktischer Strahlung unterschieden.

- **Solare kosmische Strahlung:**

Bei der solaren kosmischen Strahlung handelt es sich um Teilchen, welche von der Sonne unseres Sonnensystems stammen. Sie werden zum Beispiel durch den Sonnenwind oder solare Eruptionen ins Weltall geschleudert. Auf Grund ihrer hohen Geschwindigkeiten erreichen diese innerhalb von acht Minuten die Erde.

Diese kosmische Strahlung hat eine ähnliche Zusammensetzung wie die Sonne selbst.

Der größte Anteil der Strahlung wird von Protonen dominiert ($\approx 90\%$). Weitere 9% der Strahlung, welche die Atmosphäre der Erde erreicht, besteht aus Alphateilchen (Heliumkerne). Bei dem Rest handelt es sich um Elektronen, schwerere Kerne und Kernfragmente sowie Gammastrahlung. Die meisten Teilchen aus der solaren kosmischen Strahlung haben Energien geringer als 500 MeV. Auf Grund dieser recht niedrigen Energien (im Vergleich zur galaktischen oder gar extragalaktischen Strahlung) werden die Teilchen der solaren Strahlung eher selten die Erdoberfläche erreichen. Die solare kosmische Strahlung erzeugt auf Grund der hohen Flussdichte von 10^7 bis 10^{10} Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde den größten Anteil an atmosphärischen Schauern (siehe Kapitel 1.2). Außerdem werden die geladenen Teilchen der solaren kosmischen Strahlung an den magnetischen Polen der Erde fokussiert und erzeugen dort das sogenannte Polarlicht.

- **Galaktische kosmische Strahlung:**

Man nimmt an, dass die galaktische kosmische Strahlung unter anderem aus Schockfronten von Supernovae-Explosionen, Sagittarius A*¹ oder Quasaren herrührt. Dabei werden insbesondere die hochenergetischen Teilchen nur wenig durch die Magnetfelder von Sonnen und Planeten abgelenkt. So ist es möglich, deren Herkunft direkt zu bestimmen.

Die Zusammensetzung der galaktischen kosmischen Strahlung unterscheidet sich nur wenig von der solaren. Allerdings haben einige wenige Teilchen der galaktischen Strahlung genug Energie, so dass sie nicht in der Atmosphäre gestoppt werden, sondern die Erdoberfläche erreichen können. Im Mittel haben die Teilchen der galaktischen kosmischen Strahlung eine Energie von einem GeV.

- **Extragalaktische kosmische Strahlung:**

Die extragalaktische Strahlung hat, wie ihr Name schon sagt, ihren Ursprung außerhalb unserer Galaxie. In ihrer Zusammensetzung unterscheidet sie sich nicht von den anderen Typen kosmischer Strahlung. Allerdings trifft sie, anders als die solare kosmische Strahlung isotrop auf die Erde auf. Zum einen, weil die Quellen isotrop im Weltall verteilt sind. Zum anderen aber auch, weil die Energien der Teilchen hoch genug sind, dass sie nicht wie zum Beispiel der Sonnenwind, an den magnetischen Polen der Erde fokussiert werden.

Die mittlere Energie der Teilchen deutlich höher. Es werden maximal Energien bis zu 10^{21} eV erreicht. Allerdings ist die gesamte Flussdichte von 10^{-20} Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde so gering, dass es schwierig ist, Aussagen über ihren exakten Ursprung zu machen.

Man kann jedoch eindeutig bestimmen, dass Teilchen mit einer Energie oberhalb von 10^{18} eV nicht aus unserer Galaxie stammen können. Dies kommt daher, dass

¹Bei Sagittarius A* handelt es sich um das schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie. Jets dieses schwarzen Loches schleudern große Mengen an Teilchen ins Weltall, welche als kosmische Strahlung auf der Erde ankommen.

die Teilchen der kosmischen Strahlung im galaktischen Magnetfeld Kreisbewegungen mit dem sogenannten Gyroradius r_G durchführen. Dieser ist ein Maß dafür wie groß ein Objekt sein muss, damit es ein Teilchen mit bestimmter Ladung und Energie einschließen kann.

$$r_G [\text{pc}] = 1,08 \cdot 10^{-16} \frac{1}{Z} \frac{E [\text{GeV}]}{B [\text{T}]} \quad (\text{III.1})$$

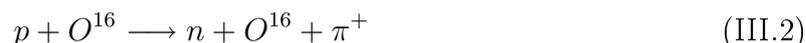
Nimmt man ein mittleres galaktisches Magnetfeld von etwa $B = 2 \cdot 10^{-10} \text{ T}$ an, und berechnet den Ein Teilchen mit einer Kernladungszahl $Z = 1$ und einer Energie von $E > 4 \cdot 10^{18} \text{ eV}$ kann damit nur von einer Galaxie, die größer ist als unsere Milchstraße, die eine ungefähre Dicke von 2000 pc hat, noch eingeschlossen werden.

1.2 Atmosphärische Schauer

Treffen Teilchen der kosmischen Strahlung auf die Atmosphäre der Erde, entstehen zum Beispiel durch starke Wechselwirkung mit den Sauerstoff- und Stickstoffatomen hochenergetische Mesonen wie Pionen und Kaonen. Neben den Mesonen werden auch eine Vielzahl anderer Teilchen wie Protonen, Elektronen, Gammaquanten sowie Kernfragmente erzeugt. Diese bilden den Ausgangspunkt für die sogenannten atmosphärischen Schauer.

Dabei wechselwirken die in der Atmosphäre erzeugten hochenergetischen Teilchen auf ihrem Weg zur Erde mit der Atmosphäre und produzieren eine Vielzahl weiterer Teilchen, wodurch eine Kaskade ausgelöst wird. Dabei unterscheidet man zwischen der hadronischen, der elektromagnetischen und der myonischen Komponente des Schauers.

Die hadronische Komponente besteht zum Großteil aus Pionen und Kaonen. Beispielsweise kann bei der Kollision eines Protons mit einem Sauerstoffatom der Atmosphäre ein π^+ entstehen.



Auf Grund der kurzen Lebensdauern der entstandenen pionischen Teilchen und der kurzen mittleren freien Weglänge in der Atmosphäre erzeugt diese Komponente einen um die Achse des einfallenden Primärteilchens konzentrierten Schauer. Nur sehr wenige dieser Teilchen erreichen überhaupt die Erdoberfläche. Die meisten zerfallen in kürzester Zeit und erzeugen so die beiden anderen Komponenten. Ungeladene Pionen zerfallen dabei innerhalb einer mittleren Lebensdauer von $8,4 \cdot 10^{-17} \text{ Sekunden}$ [PDG08] über die elektromagnetische Wechselwirkung zu zwei Gammaquanten:

$$\pi^0 \longrightarrow 2\gamma \quad (\text{III.3})$$

Diese wechselwirken über den Photoeffekt, die Comptonstreuung und Paarbildung mit der Materie der Atmosphäre. Dabei produzieren sie eine große Menge an weiteren Photonen, Elektronen und Positronen. Da die Wahrscheinlichkeit dieser Prozesse energieabhängig ist, überwiegt bei den hohen Energien der initialen Photonen die Paarbildung. Die Elektronen

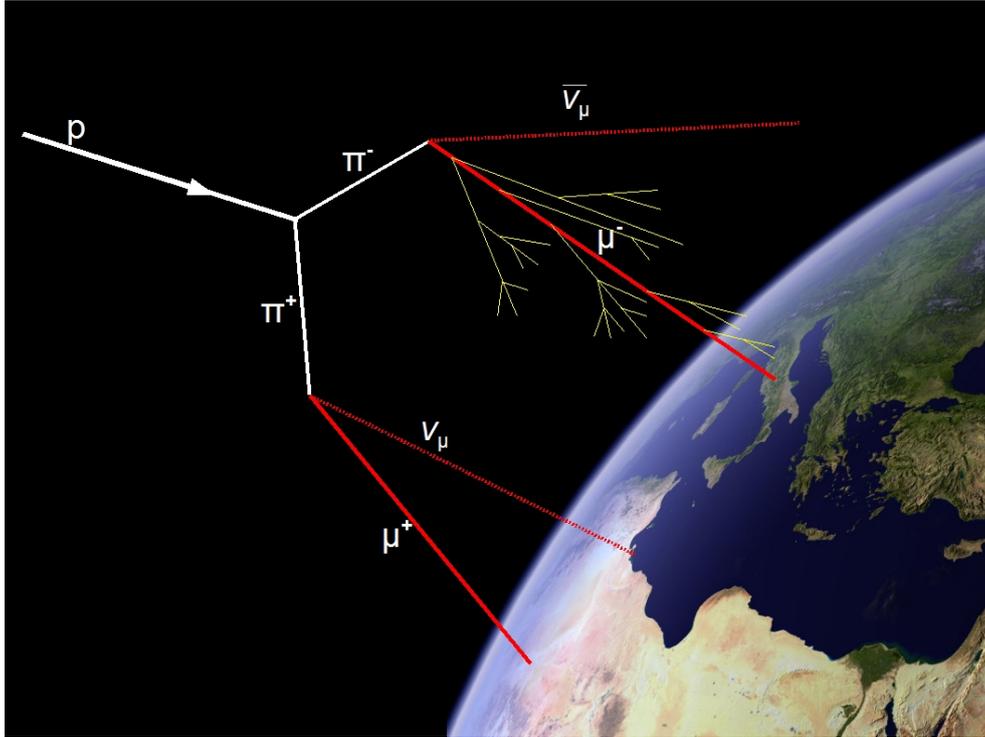


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Entstehung eines Schauers in der Atmosphäre der Erde. Ein Teilchen, in diesem Fall ein Proton, trifft auf die Erdatmosphäre und erzeugt dort zwei Pionen. Diese wiederum zerfallen und erzeugen dabei Myonen, die die Erdoberfläche erreichen und zum Beispiel in Italien in den Detektoren des GERDA-Experimentes Energie deponieren können. Dies ist durch das obere μ^- skizziert.

erzeugen wiederum durch Bremsstrahlung Photonen. Ebenfalls werden bei der Annihilation des Positrons Gammaquanten emittiert.

Diese sind auf Grund der hohen Anfangsenergie noch immer energiereich genug, um durch Paarbildung weitere Paare von Elektronen und Positronen zu erzeugen. Dies führt zu einer Lawine an Teilchen, wobei sich deren Anzahl in jeder Generation etwa verdoppelt. Dadurch wird ein Teilchenkegel um die Richtung des primären Quants erzeugt. Hierbei sollte noch erwähnt werden, dass nur im Fall einer Energie von über 10^{12} eV die Schauer überhaupt die Erdoberfläche erreichen können.

Zum Schluss gibt es noch die für diese Dissertation wichtige myonische Komponente. Dabei zerfallen die geladenen Pionen durch die schwache Wechselwirkung nach einer mittleren Lebensdauer von $2,602 \cdot 10^{-8}$ Sekunden [PDG08] zu Myonen und Myonneutrinos, beziehungsweise ihren Antiteilchen:

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (\text{III.4})$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (\text{III.5})$$

Auch etwa 99 % der durch kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre erzeugten Kaonen zerfallen entweder direkt oder über Pionen zu Myonen, was auf Grund der kurzen Lebensdauern ebenfalls in der Atmosphäre geschieht. Desweiteren gibt es noch einige andere Mesonen, wie Σ^+ , Σ^- und Λ , welche ebenfalls über Pionen zu einer höheren Rate an Myonen führen.

Hochenergetische Myonen deponieren, verglichen mit Elektronen derselben Energie, auf Grund ihrer etwa 207 mal schwereren Masse beim Durchqueren von Materie deutlich weniger Energie. Deshalb erreichen auch die meisten Myonen die Erdoberfläche und die hochenergetischen dringen ohne Probleme tief ins Erdinnere ein. Aus diesem Grund sind sie ein wesentlicher Bestandteil des experimentellen Untergrunds und es ist notwendig, sie zu identifizieren.

1.3 Eigenschaften von Myonen

Bei Myonen handelt es sich um Leptonen der zweiten Familie². Die Masse des Myons beträgt 105,6 MeV, seine mittlere Lebensdauer nur $\tau = 2,199 \cdot 10^{-6}$ Sekunden [PDG08]. Danach zerfällt es wie in dem in Abbildung 14 dargestellten Feynmandiagramm.

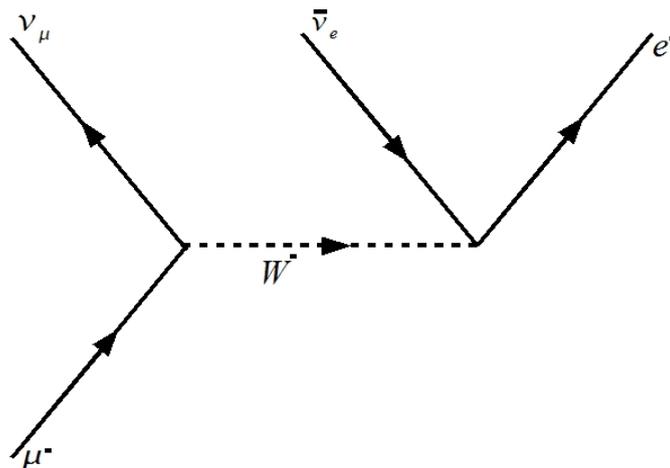


Abbildung 14: Feynmandiagramm des Myonzerfalls. Es zerfällt ein μ^- unter der schwachen Wechselwirkung in ein Myonenneutrino, ein Elektronantineutrino und ein Elektron.

Myonen werden in Schauern der kosmischen Höhenstrahlung erzeugt. Dabei entstehen sie in etwa zehn Kilometern Höhe, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben. Dabei spielt jedoch die Zeitdilatation eine große Rolle. Normalerweise würde es die mittlere Lebensdauer der Myonen nicht erlauben, dass sie die Erdoberfläche erreichen. Die Lebensdauer τ_E

²Im Standardmodell gibt es drei leptonische Familien. Das Elektron und das Elektronenneutrino, sowie deren entsprechende Antiteilchen bilden die erste Familie. Das Myon und das Myonenneutrino und ihre Antiteilchen bilden die zweite, Tauon und Tauonneutrino mit deren Antiteilchen die dritte Familie.

außerhalb des Ruhesystems des Myons, in diesem Fall auf der Erde ist gegeben durch:

$$\tau_E = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_\mu^2}{c^2}}} \cdot \tau_\mu \quad (\text{III.6})$$

Somit hat ein relativistisches Myon, welches mit 99,99 % der Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist, eine Lebensdauer im System der Erde von $\tau_E \approx 70 \cdot \tau_\mu$. Dies erlaubt es, dass das Myon eine Gesamtstrecke von über elf Kilometern zurücklegt und somit die Erdoberfläche erreicht. Damit wird ein Fluss von etwa 100 Myonen pro Quadratmeter und Sekunde auf Meereshöhe gemessen. Diese Myonen haben im Mittel eine Energie von einem GeV.

1.4 Wechselwirkungen von Myonen mit Materie

Wenn die Myonen die Erdoberfläche erreichen, wechselwirken sie mit der Materie vor allem über elektromagnetische und schwache Wechselwirkung. Dabei wird ein breites Spektrum an Elementarteilchen und Hadronen erzeugt (siehe Abbildung 15).

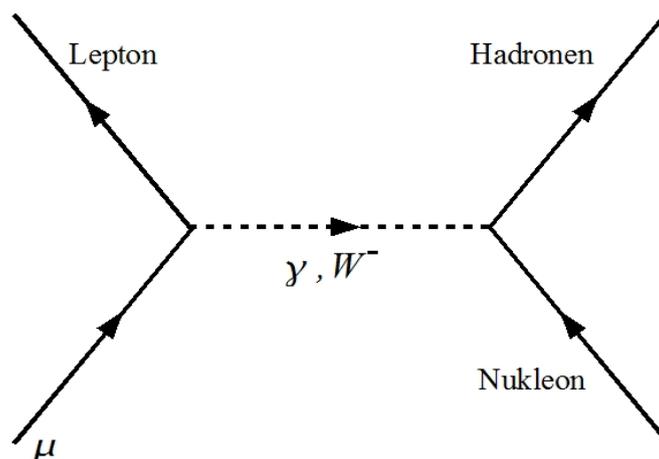


Abbildung 15: Feynmandiagramm der Wechselwirkung von Myonen mit Nukleonen. Hierbei können eine Vielzahl an Hadronen erzeugt werden.

Da es sich bei den hochenergetischen Myonen aus atmosphärischen Schauern um minimal ionisierende Teilchen handelt, deponieren sie entlang ihrer Flugbahn nur einen Bruchteil ihrer Energie ohne gestoppt zu werden. Aus diesem Grund sind Myonen auch so gefährlich für viele Experimente, da sie keine typischen Energiedepositionen erzeugen, an denen sie erkannt werden könnten, wenn sie die Detektoren durchqueren. Desweiteren können sie verschiedenste Sekundärteilchen erzeugen, die wiederum unterschiedliche Signaturen erzeugen. Ein typisches Spektrum wird in IV über die Simulationen zum Myonveto in Abbildung 55 gezeigt.

Dies bedeutet, dass für viele Experimente, welche einen niedrigen Untergrund benötigen,

immer Ereignisse im jeweils interessanten Energiebereich auftreten können, welche dem erwarteten Signal entsprechen.

Deshalb haben alle modernen Experimente, die auf niedrigen Untergrund angewiesen sind, ein Myonveto. Dieses identifiziert Signale, die durch Myonen, welche das Experiment passieren, erzeugt wurden und kann so den durch Myonen eingebrachten Untergrund unterdrücken. Oft machen Neutronen Probleme, welche produziert werden, wenn Myonen eine Abschirmung aus Materialien mit hoher Kernladungszahl durchqueren und mit dieser wechselwirken. Eine typische Abschirmung mit hoher Kernladungszahl wäre zum Beispiel Blei. Da bei vielen Niedrig-Untergrund-Experimenten Blei eine der inneren Abschirmungen darstellt, werden Neutronen sehr nahe bei den Detektoren erzeugt und können diese meist ohne Probleme erreichen.

1.5 Myonen am LNGS

Die Abschirmung durch etwa 1400 Meter Fels des Gran Sasso Massivs entspricht etwa 3100 Metern Wasser. Dadurch wird der Fluss von Myonen, um einen Faktor 360000 gegenüber der Erdoberfläche, auf ein einzelnes Myon pro Quadratmeter und Stunde reduziert. Im Mittel haben diese Myonen eine Energie von 270 GeV, was deutlich höher als die mittlere Energie der Myonen ist, welche auf Meereshöhe ohne Abschirmung detektiert werden. Die weiche Komponente des Myonenspektrums wurde durch das Gran Sasso Massiv weggefiltert.

Ausführlicher wird auf die Energien und die Verteilung der Myonen in den Untergrundlaboren in Kapitel IV.3.1 eingegangen. Ein Spektrum der Energie und der Winkelverteilung ist in den Abbildungen 42, 43 und 44 dargestellt.

2 Notwendigkeit eines Myonvetos

Im vorhergehenden Abschnitt wurde geschildert, dass Myonen ein Problem für Experimente sind, welche nach seltenen Ereignissen suchen. In Abbildung 10 ist die erwartete Sensitivität des GERDA-Experimentes für verschiedene Untergrundraten dargestellt. Es zeigt sich, dass bereits Phase I die Ergebnisse des Heidelberg-Moskau-Experimentes überprüfen wird, unabhängig vom dabei erreichten Untergrundlevel.

Für Phase II wird es jedoch entscheidend sein, wie stark der Untergrund reduziert werden kann. Wird der Untergrund nur auf 10^{-2} Untergrundereignisse/(keV·kg·Jahr) reduziert, kann nur eine Halbwertszeit von $6 \cdot 10^{25}$ Jahren überprüft werden, wenn man von einer Messzeit von von 100 kg·Jahren ausgeht.

Ab einer Reduktion auf 10^{-3} Untergrundereignisse/(keV·kg·Jahr) erreicht man bereits ein doppelt so großes Limit, ohne die Laufzeit des Experimentes erhöhen zu müssen. Somit ist die Reduktion des Untergrundes ein wichtiger Bestandteil der Optimierung des GERDA-Experimentes.

Mit dem Myonen-Fluss aus dem vorhergehenden Kapitel, haben Monte-Carlo-Simulationen (siehe Kapitel IV.3) gezeigt, dass innerhalb eines Jahres etwa 4000 Myonen eine Energie-

deposition in den Germaniumdetektoren erzeugen werden.

Von diesen Myonen erzeugen immerhin noch 125 eine Energiedeposition in der Umgebung der 2039 keV des $0\nu\beta\beta$ des ${}^{76}\text{Ge}$. Mittels Anti-Koinzidenzverfahren sollte es möglich sein, den Großteil dieser zu identifizieren. Dies ist jedoch stark vom Energie- und Ortsauflösungsvermögen der Germaniumdioden abhängig. Bei einer Energieauflösung von zehn keV und einer örtlichen Auflösung von zehn Millimetern bleibt immer noch ein Myon alle zwei Jahre übrig, welches ein identisches Signal wie der $0\nu\beta\beta$ produziert. Dies mag sich im ersten Moment nicht nach viel anhören, bedenkt man jedoch die gewünschte hohe Sensitivität auf die extrem lange Lebensdauer des neutrinolosen doppelten Betazerfalls (siehe Kapitel II.2) von mehr als 10^{25} Jahren, was zwölf neutrinolosen doppelten Betazerfällen innerhalb von zwei Jahren entsprechen würde, ist dies ziemlich viel.

Außerdem entspricht ein halbes extrem gefährliches Myon pro Jahr einem Untergrund von $6,34 \cdot 10^{-4}$ Untergründereignissen/(keV·kg·Jahr). Allein damit ist bereits der tolerable maximale Untergrundlevel für Phase II nahezu erreicht und es wird allein durch Myonen die Grenze für die Halbwertszeit auf $1,6 \cdot 10^{26}$ Jahre beschränkt. Wenn man nun bedenkt, dass die Myonen nur ein Teil des gesamten Untergrundes sind, zeigt sich, wie wichtig das Myonveto ist.

3 Vorgaben durch die GERDA-Kollaboration

Für das GERDA-Myonveto gab es zwei Arten von Rahmenbedingungen. Zum einen sollte es auf das grundsätzliche Design des GERDA-Experimentes (siehe Kapitel II.3.2) abgestimmt werden. Die Abschirmung des GERDA-Experimentes wird aus Materialien mit niedriger Kernladungszahl bestehen. Deshalb ist es unter anderem von einem Wassertank umgeben. Daher lag es nahe, diesen als aktives Cherenkov-Myonveto zu verwenden. Damit wäre beinahe der volle Raumwinkel um die Germaniumdetektoren abgedeckt. Es bliebe nur eine kleine Lücke oberhalb der Detektoren, wo sich die Schleuse befindet, durch welche die Detektoren in den Kryostaten eingebracht werden sollen. Um diese Lücke zu schließen wird ein teilweise abgetrenntes Volumen unterhalb des Kryostaten verwendet, welches Myonen, die aus dieser Richtung kommen, detektieren wird.

Als zusätzliche Absicherung wird eine Schicht Plastikszintillatorpaneele oberhalb des Reinraums angebracht.

Zum anderen gab es, wie bei jedem Experiment, einen finanziellen Rahmen. Dieser erlaubte es dem Physikalischen Institut der Universität Tübingen etwa 80 bis 90 eingekapselte Photomultiplier (siehe Kapitel III.4.2 und 1 im Anhang) für das Myonveto herzustellen. Es bestand auch die Möglichkeit, an Stelle von etwa zehn Photomultipliern, eine hochreflektierende Folie zu kaufen. Diese Variante hat sich, wie in den Simulation in Kapitel IV.3.5 gezeigt, gegenüber den zusätzlichen Photomultipliern durchgesetzt.

4 Detektion von Cherenkov-Photonen

Bevor das eigentliche Myonveto erläutert wird, soll in diesem Abschnitt der Cherenkov-Effekt kurz eingeführt werden. Durch diesen werden die Cherenkov-Photonen produziert, welche mit den Photomultipliern des Myonvetos detektiert werden, wodurch die Myonen erkannt werden. Außerdem wird im folgenden Abschnitt auf die Funktionsweise und die relevanten Eigenschaften von Photomultipliern eingegangen.

4.1 Der Cherenkov-Effekt

Die Myonen, welche am LNGS die drei Hallen erreichen, haben im Mittel eine Energie von 270 GeV, was einem $\gamma = 70$ entspricht. Wenn sie das Wasser durchqueren, gilt, bei einem Brechungsindex $n_{H_2O} = 1,33$, für ihre Geschwindigkeit:

$$v_{\mu} \approx c_0 > c_{H_2O} = \frac{c_0}{n_{H_2O}} \approx \frac{3}{4} c_0 \quad (\text{III.7})$$

Sie überschreiten somit beim Eintritt in das Medium Wasser dessen Lichtgeschwindigkeit c_{H_2O} . Dies ist Voraussetzung dafür, dass es zu dem nach seinem Entdecker Pavel Alekseyevich Cherenkov benannten Cherenkov-Effekt kommt. Dieser ist schematisch in Abbildung 16 dargestellt.

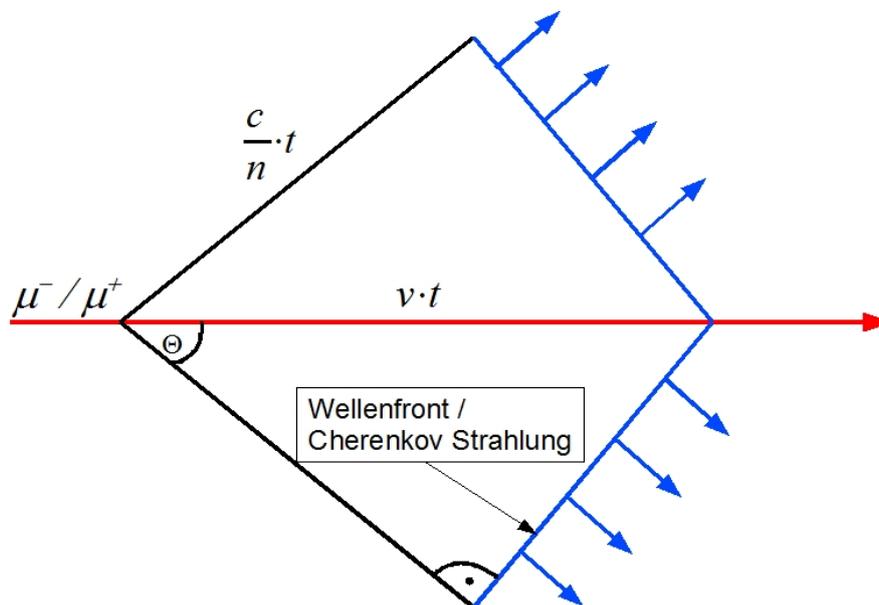


Abbildung 16: Schema des Cherenkov-Effekts für Myonen in Wasser.

Dabei werden die Wassermoleküle entlang der Flugbahn der Myonen polarisiert und senden elektromagnetische Strahlung aus. Normalerweise interferieren die von benachbarten Atomen erzeugten Wellen destruktiv miteinander und man kann keine Strahlung detektieren.

Bewegen sich jedoch die geladenen Myonen schneller als Licht durch das Medium, kommt es in einem vorwärts gerichteten Kegel zu konstruktiver Interferenz. Es wird Cherenkov-Licht emittiert.

Die Richtung der ausgesandten Strahlung hängt von der Geschwindigkeit der Myonen und des Brechungsindex des Mediums, hier Wasser, ab.

$$\cos \Theta = \frac{c_0}{n_{H_2O} v_\mu} \approx \frac{3}{4} \quad (\text{III.8})$$

Der Öffnungswinkel dieses auf Grund seiner Geometrie benannten Cherenkov-Kegels beträgt damit $\Theta \approx 41,4^\circ$. Die Anzahl an Cherenkov-Photonen in einem Wellenlängenbereich $d\lambda$, die emittiert werden, wenn ein hochenergetisches Myon eine Strecke $\Delta x = x_2 - x_1$ in Wasser durchquert, berechnet sich wie folgt [Gru93]:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\lambda} &= 2\pi\alpha \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\lambda^2} \left(1 - \frac{c^2}{n_{H_2O}^2 v_\mu^2} \right) dx \\ &= 2\pi\alpha \frac{1}{\lambda^2} \left(1 - \frac{c^2}{n_{H_2O}^2 v_\mu^2} \right) \Delta x \\ &\approx (2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}) \cdot \frac{1}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Dabei ist $\alpha = \frac{1}{137}$ die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante. Mit Formel (III.9) lässt sich die Anzahl an pro Zentimeter Weglänge emittierten Photonen im Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ von 300 nm bis 500 nm, in welchem die eingesetzten Photomultiplier (siehe Kapitel 4.3) sensitiv sind, berechnen.

$$N(\Delta\lambda) = (2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = 265 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}} \quad (\text{III.10})$$

Bei einer durchschnittlichen Wegstrecke von etwa fünf Metern im Wassertank, entspricht dies etwa 130.000 optischen Photonen, die durch den Cherenkov-Effekt produziert werden. Bei einer Abdeckung der Oberfläche des Wassertanks mit Photomultipliern von etwa 0,5% bedeutet dies, dass im Schnitt 650 Photonen die Photomultiplier treffen. Diese Zahl kann etwa verdoppelt werden, wenn der Wassertank mit VM2000, einer reflektierenden und wellenlängenschiebenden Folie ausgekleidet wird (siehe Abschnitt III.6).

4.2 Funktionsprinzip eines Photomultipliers

In Abbildung 17 ist das Funktionsprinzip eines typischen Photomultipliers dargestellt. Er besteht aus einer evakuierten Glasröhre mit einer Kathode im Eintrittsfenster. Ein typisches Signal eines Photomultipliers ist in Abbildung 22 dargestellt. An einem 50Ω Abschlusswiderstand hat es typischerweise eine Höhe von mehreren hundert Millivolt und eine Dauer von 20 Nanosekunden bis 50 Nanosekunden.

Die Signale entstehen, wenn Photonen auf diese Photokathode treffen und dabei Elektronen

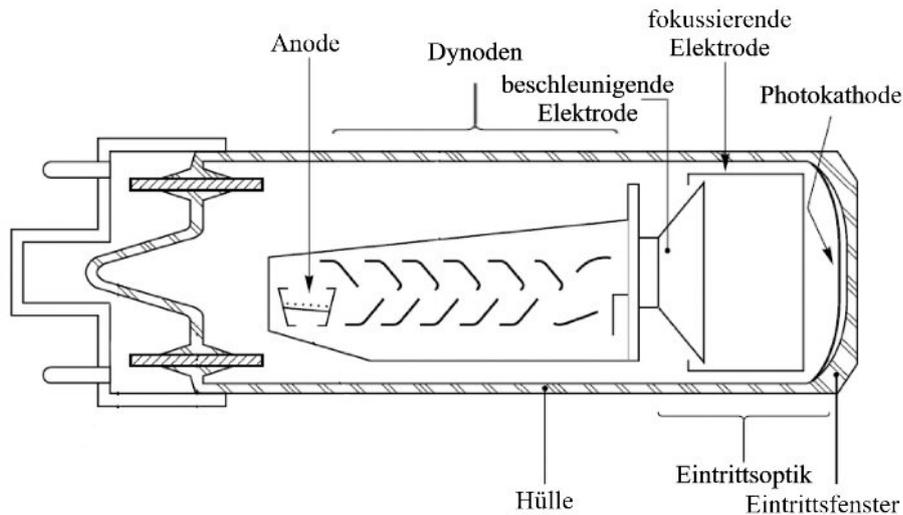


Abbildung 17: Funktionsprinzip eines Photomultipliers nach [FM02].

mittels Photoeffekt³ herauslösen. Da die Photokathode an der Erdung der Spannungsversorgung anliegt, werden die ausgelösten Elektronen von der beschleunigenden Elektrode, an der positive Spannung anliegt, angezogen. Man nennt diese Elektronen auch Photoelektronen. Sie haben dann genug Energie, um die erste Dynode zu erreichen. Damit möglichst viele Photoelektronen diese erreichen, ist im vorderen Bereich der Glasröhre des Photomultipliers eine Fokussierelektrode eingebaut.

Die so beschleunigten Photoelektronen lösen wiederum Elektronen aus der ersten Dynode heraus, wenn sie auf diese treffen. Dabei hängt die Anzahl an Elektronen nur von der Energie des Photoelektrons ab. Die nun folgenden Dynoden haben sukzessive höhere positive Spannungen. Dadurch werden die produzierten Elektronen immer wieder beschleunigt. Beim Auftreffen auf die jeweils nächste Dynode lösen sie damit wieder neue zusätzliche Elektronen heraus. Es kommt zum sogenannten Lawineneffekt, bei dem durch ein einzelnes Elektron eine große Zahl an weiteren Elektronen produziert wird. Daher auch der Name: Photomultiplier oder Sekundärelektronenvervielfacher. Typischerweise werden bei jeder Dynode etwa drei bis fünf Elektronen pro ankommendem Elektron ausgelöst. Am Ende der Dynodenkette ist eine Anode angebracht, welche die Elektronen aufammelt, wodurch es zu einem Strom von wenigen Zehntel bis maximal mehreren Milliampere kommt.

³Photonen können auf Grund ihrer Energie Elektronen aus einer Metalloberfläche herauslösen. Dies wurde von Albert Einstein in seiner Nobelpreisarbeit beschrieben.

4.3 Eigenschaften der verwendeten Photomultiplier

Im Folgenden sollen allgemein die Eigenschaften von Photomultipliern erklärt werden. Anhand dieser wird insbesondere auf die Eigenschaften der im GERDA-Myonveto verwendeten Photomultiplier 9350KB und 9354KB von Electron Tubes Limited⁴ eingegangen.

4.3.1 Quanteneffizienz

Die Quanteneffizienz ρ gibt an, wie gut ein Photomultiplier Photonen einer bestimmten Wellenlänge λ detektieren kann. Sie ist definiert über die Anzahl an emittierten Photoelektronen n_e und über die Anzahl an einfallenden Photonen n_p .

$$\rho = \frac{n_e}{n_p} \quad (\text{III.11})$$

Im Fall des GERDA-Myonvetos werden Photomultiplier mit 20 cm Durchmesser verwendet, welche insbesondere Photonen aus dem sichtbaren Bereich detektieren (vgl. Abb. 18). Sie haben im Bereich von 300 nm bis 500 nm ihre höchste Quanteneffizienz von 20 bis 30 Prozent.

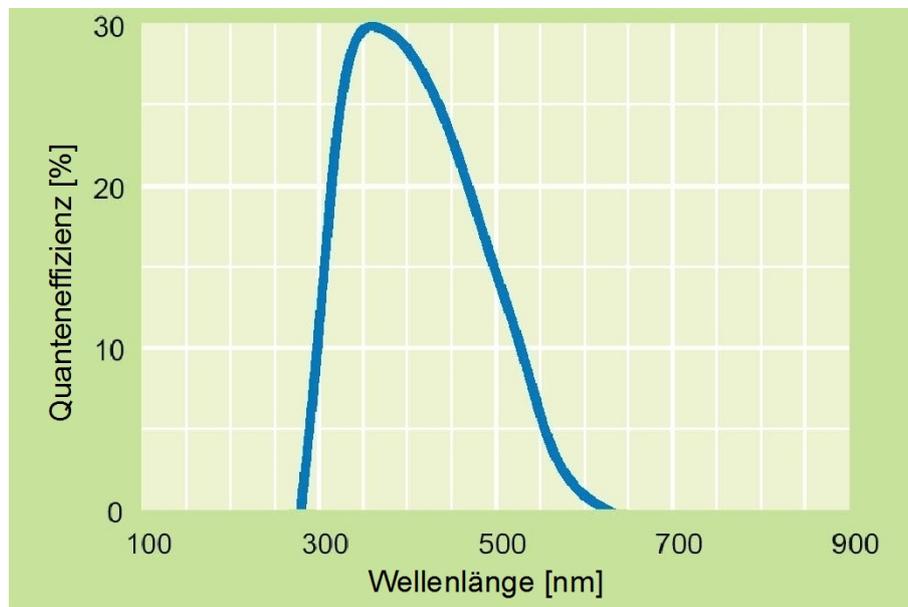


Abbildung 18: Typische Quanteneffizienz $\rho(\lambda)$ für Photomultiplier vom Typ 9354KB nach Datenblatt von [Electron Tubes Limited].)

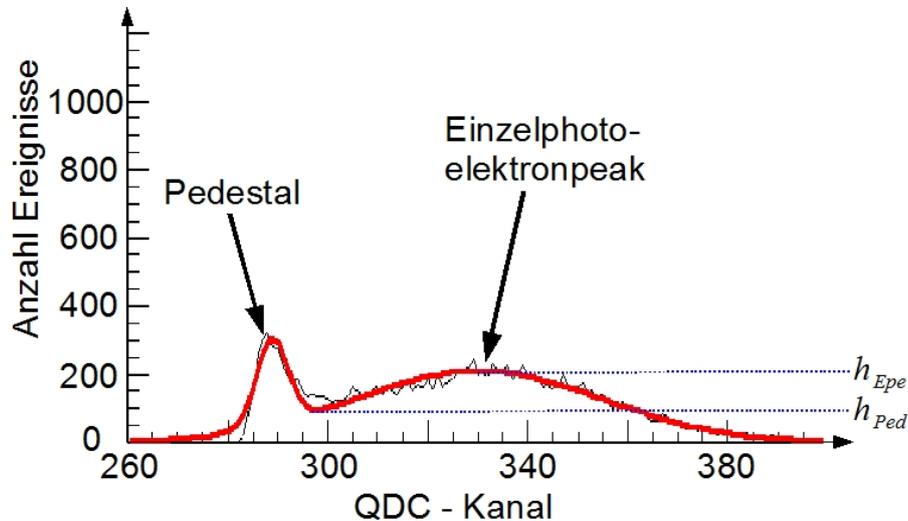


Abbildung 19: Das Dunkelpulshöhenspektrum des Referenz-Photomultipliers des GERDA-Myonvetos, eines Typ 9350KB Photomultipliers, bei 1800 Volt.

4.3.2 Dunkelstrom und Dunkelrate

Selbst in absoluter Dunkelheit zeigt ein Photomultiplier von Zeit zu Zeit Signale. Diese sogenannten Dunkelpulse sind typischerweise Einzelphotoelektronenpulse. Sie werden bestimmt durch Feldeffekte-Emissionen oder thermischen Emissionen und ergeben typischerweise eine Rate von mehreren kHz an Ereignissen. Diese Rate wird Dunkelrate genannt. Den Strom, welcher bei diesen Ereignissen entsteht, nennt man Dunkelstrom. Die Amplitude der Dunkelpulse kann sehr stark variieren und ist im Spektrum in Abbildung 19 dargestellt. Man erkennt das Pedestal⁵ sowie den Einzelphotoelektronenpeak. Anhand dieses Spektrums lassen sich verschiedene wichtige Eigenschaften des Photomultipliers bestimmen (siehe Kapitel 4.3.3 und 4.3.4). In Tabelle 3 ist die Dunkelrate des Referenz-Photomultipliers⁶ des GERDA-Myonvetos für verschiedene Spannungen angegeben. Zur Bestimmung der Dunkelrate wird, um das Rauschen der Ausleseelektronik zu unterdrücken, eine Schwelle gesetzt, welche üblicherweise 1/4 des Einzelphotoelektronenpeaks beträgt. Damit wird gewährleistet, dass nahezu alle registrierten Signale auch wirklich Signale des Photomultipliers sind.

⁴Electron Tubes Limited ist heute Teil der ET Enterprises Limited, Uxbridge, United Kingdom

⁵Bei dem Pedestal handelt es sich um einen Gausspeak, der durch das Rauschen der elektronischen Komponenten zu Stande kommt. Dieser ist auch zu sehen, wenn man den Photomultiplier ohne Spannung betreibt, sprich, dieser keine Signale liefert. Es kommt zum Beispiel von den Modulen der Datennahme wie QDC oder Signalervielfältiger.

⁶Als Referenz-Photomultiplier für das GERDA-Myonveto wurde die Kapselung 55 ausgewählt.

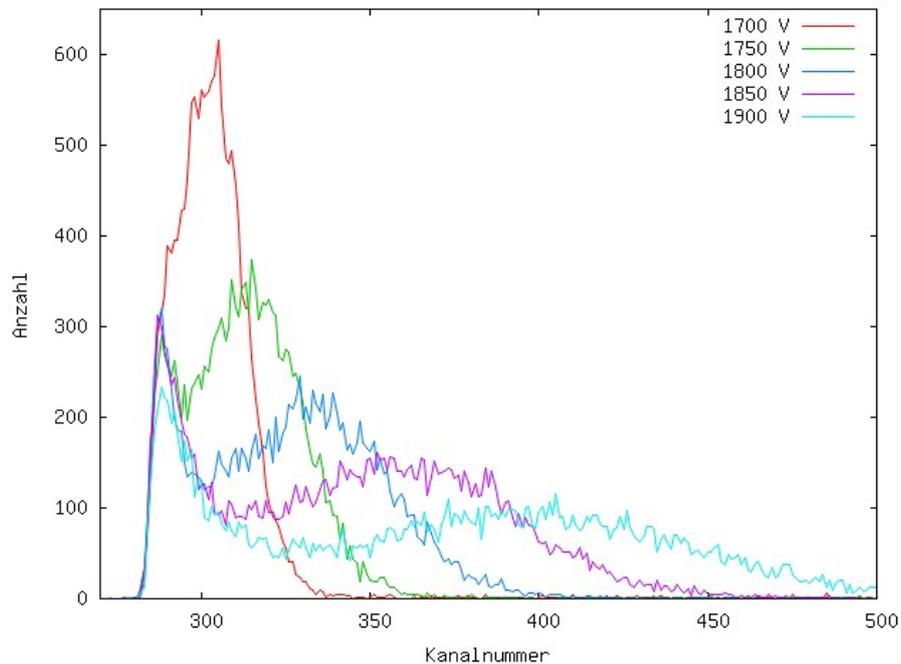


Abbildung 20: Typisches Einzelphotoelektronenspektrum für einen Photomultiplier vom Typ 9350KB bei verschiedenen Spannungen.

4.3.3 Verstärkung

Anhand des im vorigen Abschnitt bestimmten Dunkelpulshöhenspektrums lässt sich, wenn man die Ladungsaufösung pro Kanal A des QDCs kennt, direkt die Verstärkung $G(U)$ für eine bestimmte Spannung U angeben. Hierfür wird der Abstand N_{QDC} des Pedestals und des Einzelphotoelektronenpeaks in Kanälen des verwendeten QDCs bestimmt. Damit berechnet sich die Verstärkung zu:

$$G(U) = \frac{N_{QDC} \cdot A}{e} \quad (\text{III.12})$$

Mit der Elementarladung e und der Auflösung A des verwendeten QDCs (LeCroy 2249W) von $0,25 \frac{pC}{\text{Kanal}}$ ergibt sich bei einer Betriebsspannung von 1750 V eine Verstärkung von $2,12 \cdot 10^7$. Ein einzelnes Photoelektron generiert somit, durch den Lawineneffekt an den Dynoden, $2,12 \cdot 10^7$ Elektronen. In Tabelle 3 ist die Verstärkung des Referenz Photomultipliers für verschiedene Spannungen gegeben.

4.3.4 Peak-to-Valley Verhältnis

Als *Peak-to-Valley Verhältnis* wird bei den verwendeten Photomultipliern, wenn sie im Einzelphotoelektronenmodus betrieben werden, das Verhältnis zwischen der Höhe des Einzelphotoelektronenpeaks h_{Epe} und des Tales zwischen diesem und dem Pedestal h_{Ped} bezeichnet. Im Beispiel der Kurve aus Abbildung 19 entspricht dies einem Verhältnis von:

$$PtV = \frac{h_{Epe}}{h_{Ped}} = \frac{200}{100} = 2,0$$

Je höher dieses Verhältnis ist, umso leichter kann zwischen Rauschen und Signal unterschieden werden. Wenn hier keine saubere Trennung zwischen Einzelphotoelektronenpeak und Pedestal möglich ist, dann muss das zu detektierende Signal mindestens aus zwei Photoelektronen entstanden sein, damit es von der Datenerfassung immer als solches erkannt wird. Dies würde die Effizienz des Myonvetos reduzieren.

4.3.5 Beispiel: Eigenschaften des GERDA-Myonveto-Referenz-Photomultiplier

Tabelle 3: Eigenschaften des Referenz-Photomultipliers (Kapselung 55) des GERDA-Myonvetos bei verschiedenen Spannungen.

Spannung [V]	Verstärkung [10^7]	Peak-to-Valley Verhältnis	Dunkelrate [Dcts/s]
1700	2,12	1,00	3300
1750	3,90	1,77	4200
1800	6,44	2,00	5100
1850	9,96	2,00	6500
1900	15,2	2,25	8000

In Tabelle 3 sind als Beispiel die Eigenschaften der Kapselung 55 aufgezeigt. Sie enthält einen Photomultiplier vom Typ 9350KB mit der Seriennummer 9124. Außerdem sind in Abbildung 20 die Dunkelpulshöhenspektren für verschiedene Spannungen zu sehen. Man erkennt, dass der Einzelphotoelektronenpeak mit zunehmender Spannung immer weiter nach rechts geschoben wird, was der steigenden Verstärkung entspricht.

Bei der Auswahl der verwendeten Photomultiplier für das endgültige Myonveto wurde als ein erstes Kriterium die Dunkelrate der Photomultiplier verwendet. Um die Rate an zufälligen Koinzidenzen (siehe Abschnitt IV.5.2.2) möglichst niedrig zu halten, wurden hier vor allem Photomultiplier mit niedrigen Werten ausgewählt. Diese wurden im Normalfall für eine Verstärkung von etwa $2 \cdot 10^7$ verglichen.

Desweiteren wurde versucht, möglichst Photomultiplier mit hohen Verstärkungen bei möglichst niedrigen Spannungen und einem möglichst hohen Peak to Valley Verhältnis auszuwählen, um bei der Analyse der Daten des Myonvetos möglichst leicht zwischen Pedestal und echten Signalen unterscheiden zu können.

Man erkennt hier auch das Hauptproblem bei der Auswahl der Photomultiplier für das Myonveto. Um die Dunkelrate niedrig zu halten, muss der Photomultiplier bei möglichst niedriger Spannung betrieben werden, während er, um eine möglichst hohe Verstärkung zu erreichen, bei hohen Spannungen betrieben werden muss. Die Auswahl der Photomultiplier ist also ein Optimierungsproblem dieser beiden Größen.

5 Die Photomultiplier-Kapselungen

In diesem Abschnitt soll eine Übersicht über die verwendeten Photomultiplier-Kapselungen gegeben werden. Dabei wird ihr Design und die allgemeinen Tests der Kapselungen vorgestellt. Für eine detailliertere Beschreibung der Fertigung sowie der Auswahlkriterien der einzelnen Materialien soll auf das Kapitel 1 im Anhang verwiesen werden.

5.1 Design der Photomultiplier-Kapselungen

Wie in Kapitel 7.1 gezeigt, besteht das GERDA-Myonveto zum Teil aus dem als Cherenkov-Veto fungierenden Wassertank. Da die Photomultiplier unter Wasser eingesetzt werden, war es von besonderer Bedeutung, eine wasserdichte Kapselung für die Photomultiplier zu verwenden. Eine erste Version wurde bereits für das Borexino Experiment entwickelt. Aus diesem Grund kommt ein ähnliches Design auch für das GERDA-Myonveto zum Einsatz. Dadurch kann von früheren Erfahrungen profitiert werden, um die Kapselungen weiterzuentwickeln.

In Abbildung 21 ist ein Querschnitt durch die verwendete Kapselung dargestellt. Der Hauptteil der Kapselung besteht aus einem Edelstahlkegel mit angeschweißtem Fuß. In diesem Fuß befinden sich zwei Löcher welche zur Montage der fertigen Photomultiplier-Kapselungen dienen. Die Kapsel wird durch eine lichtdurchlässige PET-Haube abgeschlossen.

Der Spannungsteiler des Photomultipliers wird in Polyurethan eingegossen und somit vor gegebenenfalls eindringendem Wasser geschützt und gleichzeitig fixiert. Zusätzlich wurde flüssiges Silikon gel eingebracht, welches die Kontakte vollständig umschließt und somit einen zusätzlichen Schutz darstellt. Das restliche Volumen der Kapsel ist mit Mineralöl gefüllt, um den optischen Übergang von Wasser über PET ins Glas der Photomultiplier zu glätten und Brechung zu minimieren.

Insgesamt wurden neben vier Prototypen 73 Kapselungen innerhalb von drei Monaten hergestellt.

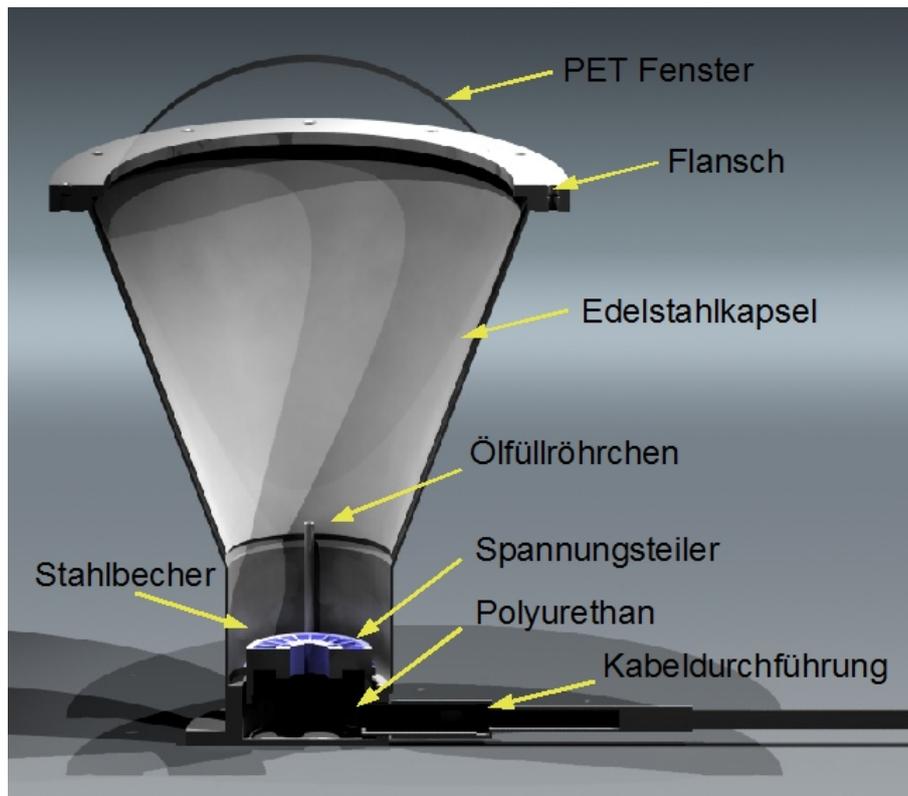


Abbildung 21: Querschnitt durch eine der Photomultiplier-Edelstahlkapseln. Auf Grund der besseren Übersicht, wurde der Photomultiplier nicht mit eingezeichnet.

5.2 Verschiedene Tests der Kapselungen

In diesem Abschnitt sollen die verschiedenen Prototypen und die Tests dieser zusammengefasst werden. Hier sind insbesondere die Langzeittests unter Wasser von Interesse.

5.2.1 Prototypen

Insgesamt wurden vier Photomultiplier als Prototypen eingekapselt. Anhand dieser wurden die einzelnen Schritte während des Einkapselvorgangs überprüft. Außerdem wurden Schwachstellen im ursprünglichen Borexino-Design gefunden und ausgebessert. Damit wird gewährleistet, dass die im Experiment verwendeten Photomultiplier für die gesamte Messdauer unter Wasser funktionieren und kein Wasser eindringen kann. Im Folgenden werden kurz die einzelnen Prototypen beschrieben.

- **Prototyp I**

Prototyp I, *Rusty* zeigt, dass die Einkapselung funktioniert. Nach etwa zwei Jahren unter Wasser sind die bei ihm verwendeten Schrauben (ab Prototyp II kamen Edelstahlschrauben zum Einsatz) korrodiert. Trotzdem liefert der Photomultiplier noch

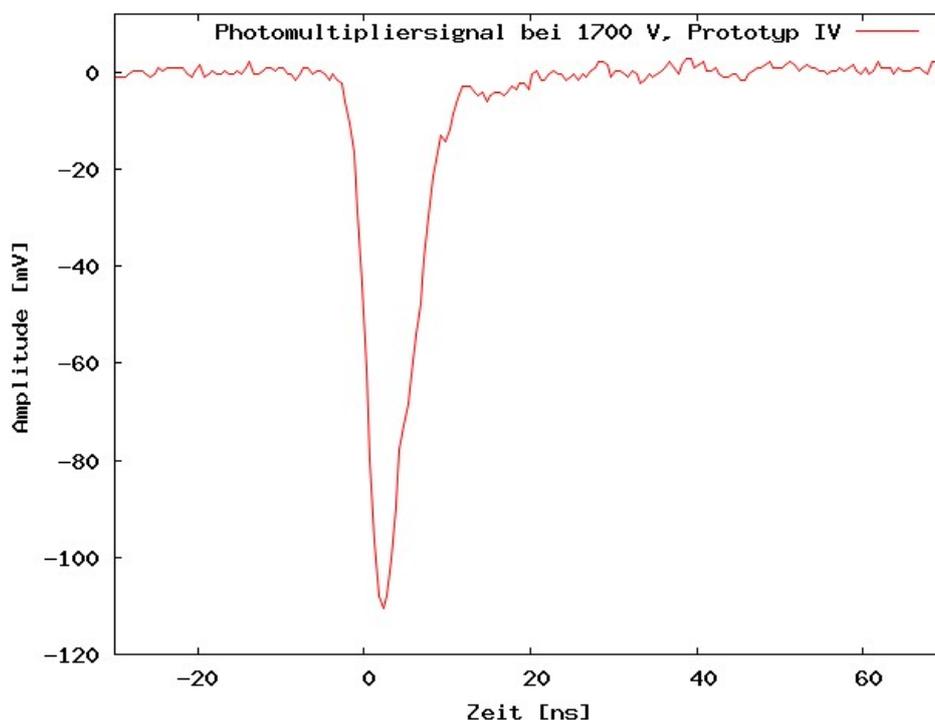


Abbildung 22: Signal des Prototypen IV bei 1700 V nach zwei Jahren unter Wasser.

immer ein Signal. Somit konnte gezeigt werden, dass die Absicherung mit Polyurethan und Silikon gegen eindringendes Wasser funktioniert.

Außerdem konnten an Hand von diesem Prototypen wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die Fertigung gewonnen werden. Beispielsweise wurden mögliche Leckstellen identifiziert und zusätzlich mit Klebstoff abgedichtet.

- **Prototyp II**

Prototyp II wurde wie Prototyp I zusammengebaut mit dem Unterschied, dass hier nur noch Edelstahlteile zum Einsatz kamen. Um genauer zu untersuchen, ob die einzelnen Schritte des Einkapselns funktionieren, wurde Prototyp II wieder auseinandergebaut und untersucht. Insbesondere war wichtig, sicher zu stellen, dass das Polyurethan auch in die Kabeldurchführung fließt. Hierfür wurde der Stahlbecher aufgesägt und es zeigte sich, dass genug Polyurethan eindringen kann.

- **Prototyp III**

Prototyp III ist, abgesehen von einer Doppelpack-Struktur im Signal (siehe Kapitel 5.2.3), eine voll funktionsfähige Kapselung. Sie wird zur Zeit in einem Langzeittest unter Wasser betrieben und zeigt noch keinerlei Zeichen einer Veränderung. Weder das äußere Erscheinungsbild der Kapselung hat sich geändert, noch die Signalqualität.



Abbildung 23: Prototyp I in seinem Behälter für den Unterwassertest. Man erkennt die leucht rötliche Färbung des oberen Flansches auf Grund der Schrauben, welche nicht aus Edelstahl waren.

- **Prototyp IV**

Prototyp IV ist die erste voll funktionstüchtige Kapselung gewesen. Ihr Photomultiplier zeigt ein deutliches Signal (siehe Abbildung 22) und wird ebenfalls seit etwa zwei Jahren stabil unter Wasser betrieben.

5.2.2 Unterwassertests der Prototypen I, III und IV

Insgesamt gibt es zwei Testaufbauten, in denen die Unterwassertauglichkeit der Photomultiplierkapseln überprüft wurde.

Für die Prototypen I und II wurden einfache Wasserbehälter gewählt (siehe Bild 23).

Prototyp I funktioniert noch immer ohne Probleme, obwohl die Kapselung nicht vollständig abgedichtet war und die Schrauben des oberen Flansches korrodiert sind. Auch ein Leck am oberen Flansch der Kapselung, hat die Funktion des Photomultipliers im Inneren der Kapselung nicht beeinträchtigt. Eindringendes Wasser könnte somit die elektronischen Komponenten der Einkapselung nicht erreichen. Trotzdem würde es die Detektion von Photonen beeinflussen, da es an den optischen Übergängen zu Brechung kommt, da das Wasser einen anderen Brechungsindex als das Öl hat.

Die Prototypen III und IV sind in einer unter Druck stehenden Stahlkammer zusammen mit sechs der Metallkammern der Kabeldurchführungstestordnung (siehe Anhang 1.2.2) untergebracht. Der Drucktesttank ist in Abbildung 24 zu sehen.

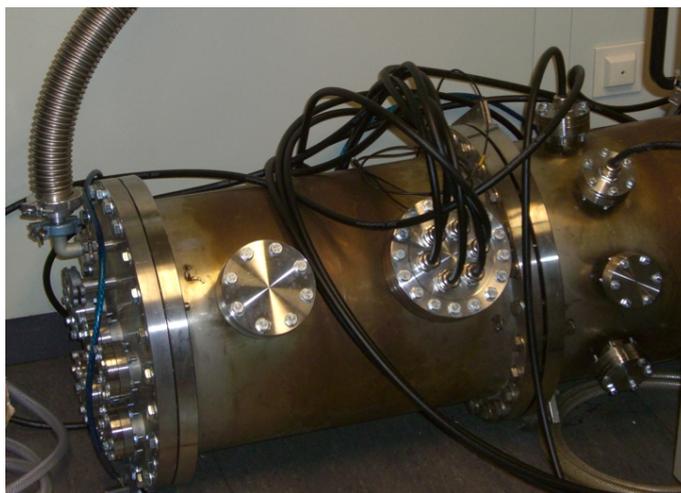


Abbildung 24: Der Tank für Drucktests mit den Prototypen III und IV.

Ihre Kabel wurden über die Durchführungen, die auch beim GERDA-Experiment zum Einsatz kommen, herausgeführt. Danach wurde der Tank mit Wasser gefüllt und an eine mit Stickstoff gefüllte Gasflasche angeschlossen. Mit dieser ist es möglich über einen Druckminderer mit Überdruckventil die mit Wasser gefüllte Kammer unter Druck zu setzen. Hierdurch wird der im GERDA-Wassertank herrschende Druck von maximal einem Bar simuliert. Beide Prototypen III und IV zeigen auch nach beinahe zwei Jahren noch die gleichen Signalformen wie vor dem Test. Die Einkapselung erfüllt damit ihren Zweck.

5.2.3 Doppelpeak-Signal

Während der Produktion der ersten drei Prototypen trat ein Problem mit den Signalen der eingekapselten Photomultiplier auf. Nach der Fertigstellung zeigte der Zeitverlauf des Signals eine doppelte Peakstruktur (siehe Abbildung 25). Diese sieht wie eine Reflektion aus. Da es aber nicht auftritt, wenn der Photomultiplier und die Base außerhalb der Kapselung sind, konnte sie nicht auf Grund der Verkabelung des Photomultipliers entstehen. Nach mehreren Tests konnte das Problem auf die Edelstahlkapsel selbst zurückgeführt werden. Sobald der Photomultiplier in die Kapselung eingebracht wurde, trat die Störung auf. Diese zeigte sich jedoch nur, wenn die Kapselung vollständig war. Es mussten sowohl Stahlkegel als auch Stahlbecher, aber auch die Kabeldurchführung zusammenschraubt werden, bevor der zweite Peak auftauchte.

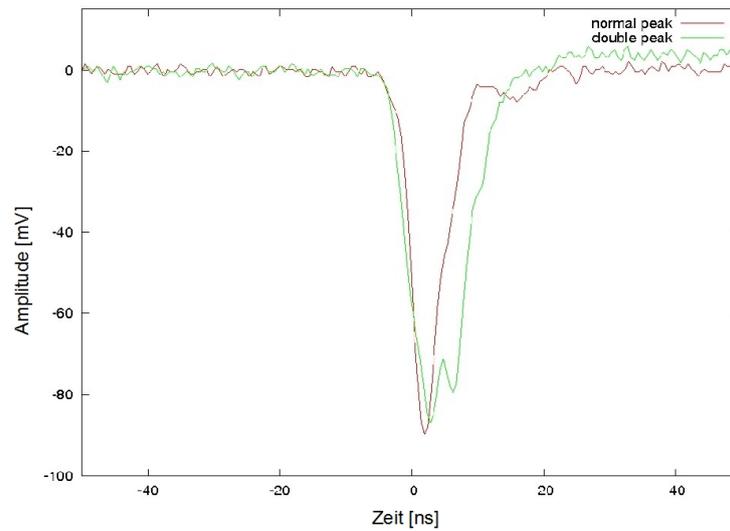


Abbildung 25: Doppelpeak und ein normales Signal eines Photomultipliers.

Schließlich stellte sich heraus, dass ein Kondensator der Base mit der Induktivität der Kapselung einen Schwingkreis mit einer Zeitkonstante von etwa fünf Nanosekunden (man erkennt in Abbildung 25 zwei Erhöhungen) dafür verantwortlich war. Diese Zeitkonstante τ entspricht mit

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC} \quad (\text{III.13})$$

mit einer festen Kapazität $C = 4,7 \text{ nF}$, einer Induktivität L von etwa 135 Picohenry, was zu den Kapselungen passen könnte. Um die Schwingung zu eliminieren wurde der Abschlusswiderstand durch einen $100 \text{ k}\Omega$ Widerstand ersetzt, wodurch die Schwingung einfach weggedämpft wurde. Zusätzlich wurde das Signal vergrößert, indem man an einem Ende des Kabels im Prinzip 50Ω entfernte. Der Widerstand ist in Abbildung 26, dem endgültigen Schaltplan der Base, mit einem roten Kreis markiert.



Abbildung 27: Eine der fertig gestellten Photomultiplierkapselungen des GERDA-Myonvetos.

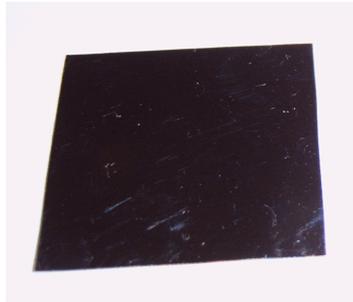
6 Die Reflektorfolie VM2000

Um die Effizienz des Cherenkov-Myonvetos zu erhöhen, werden alle Oberflächen innerhalb des Wassertanks und der Pillbox mit einer hochreflektierenden Folie der Firma 3M ausgekleidet. Diese VM2000 Folie hat eine Reflektivität von nahezu 100 % (siehe Abbildung 29). Die mittlere freie Weglänge von optischen Photonen beträgt in Wasser etwa zwölf Meter. Damit kann ein Photon zwei- bis dreimal im Wassertank reflektiert werden, bevor es vom Wasser absorbiert wird. Die Reflektorfolie allein verdoppelt beziehungsweise verdreifacht die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon einen Photomultiplier trifft und damit detektiert wird. Auf Grund der deutlich kürzeren Wege in der Pillbox, wird es hier zehn- bis fünfzehnmal reflektiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass es einen Photomultiplier trifft, steigt in diesem Flall noch stärker an.

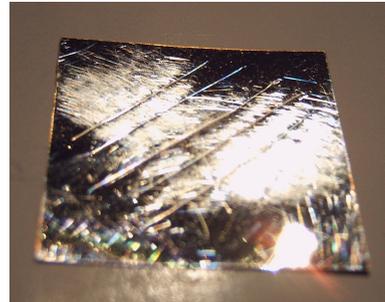
Die Folie hat eine weitere wichtige Eigenschaft. Sie schiebt Photonen aus dem ultravioletten Bereich in den optischen, in dem die verwendeten Photomultiplier ihre maximale Quanteneffizienz haben (siehe Abbildung 18). Wenn man die $\frac{1}{\lambda^2}$ Abhängigkeit der produzierten Cherenkov-Photonen berücksichtigt (siehe Formel (III.9)), erkennt man, dass die Zahl an registrierbaren optischen Photonen deutlich ansteigt.

Die Zusammensetzung oder der Aufbau der Folie sind nur insofern bekannt, dass es sich um mehrere Schichten verschiedener Kunststoffe handelt, jedoch nicht um eine Metallbeschichtung. Die genaue Zusammensetzung der Folie ist jedoch ein Betriebsgeheimnis.

6.1 Reflektionseigenschaften der VM2000



(a) VM2000



(b) Beschädigte VM2000

Abbildung 28: Zwei Proben der Reflektorfolie VM2000 von 3M.

Um die Reflektionseigenschaften der Reflektorfolie VM2000 zu bestimmen, wurden am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg die Reflektion für verschiedene Wellenlängen bestimmt. Die Messung fand mit Hilfe eines Spektrographen statt, welcher eine Auflösung von mehreren Nanometern erlaubte.

Dabei wurden unter anderem zwei verschiedene Proben untersucht. Die erste Probe war ein unbehandeltes Stück der Reflektorfolie, so wie es von 3M geliefert wird. Die zweite Probe wurde speziell präpariert, um zu überprüfen, wie sich große Schäden (Kratzer, Staub, usw.) auf die Eigenschaften der Folie auswirken. Die beiden Stücke sind in den Abbildungen III.28(a) und III.28(b) zu sehen.

Bei den Reflektionseigenschaften wurde zwischen totaler und diffuser Reflektion unterschieden. Dabei setzt sich die totale Reflektion aus der gerichteten und der diffusen Reflektion zusammen.

Bei der diffusen Reflektion wird der senkrecht einfallende Lichtstrahl ungerichtet in den Halbraum vor der Folie zurückgeworfen. Diffuse Reflektion kommt vor allem durch Unebenheiten und Verschmutzung auf der Oberfläche zustande.

In Abbildung 29 ist die totale Reflektion für die beiden Proben der Reflektorfolie dargestellt. Es gibt zwischen der stark beschädigten und der unbehandelten Folie nur einen kleinen Unterschied. Die totale Reflektion der stark beschädigten Folie ist um etwa drei Prozent niedriger als die der unbehandelten Folie. Diese Abnahme von drei Prozent trat jedoch erst auf, nachdem die Folie extrem stark beschädigt wurde und spielt daher für das Myonveto keine Rolle.

Anders sieht dies bei dem diffusen Anteil der Reflektion aus. Dieser zeigt eine deutliche Änderung, denn von 300 nm bis 380 nm verdoppelt sich dieser Anteil. Noch deutlicher ist die Änderung bei höheren Wellenlängen. Hier verzehnfacht sich der Anteil.

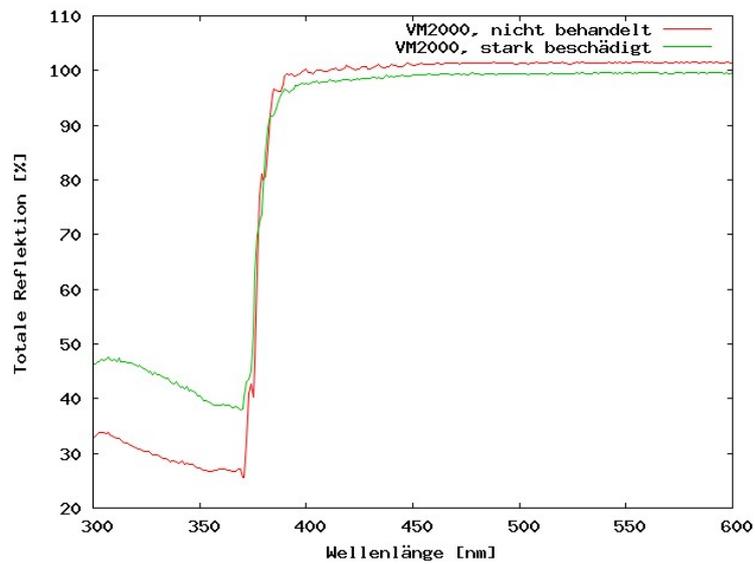


Abbildung 29: Spektrum für totale Reflektion für verschiedene Proben der Reflektorfolie VM2000 von 3M.

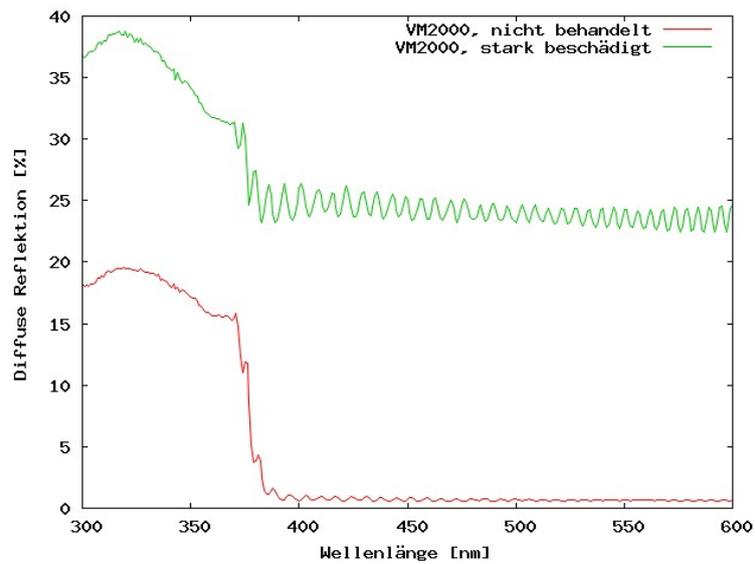


Abbildung 30: Spektrum für diffuse Reflektion für verschiedene Proben der Reflektorfolie VM2000 von 3M.

6.2 VM2000 als Wellenlängenschieber

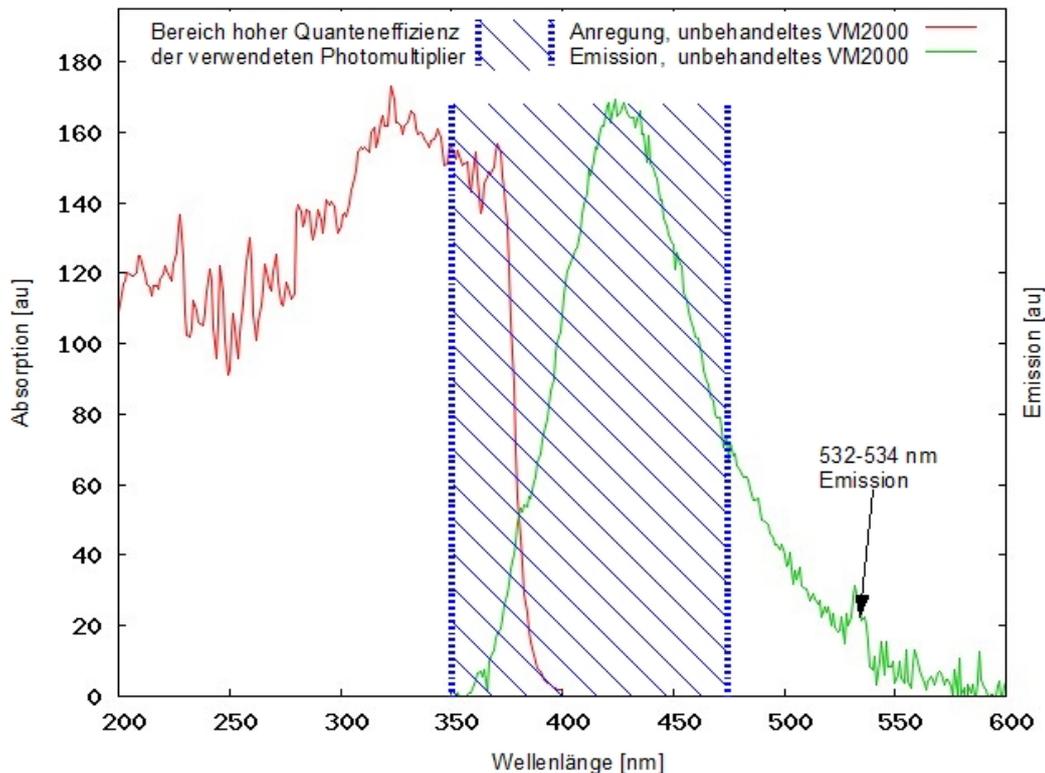


Abbildung 31: Anregungs- und Emissionsspektren einer unbeschädigten Probe der Reflektorfolie VM2000.

Ein großer Vorteil der Reflektorfolie VM2000 ist, dass sie neben der hohen Reflektivität (siehe Kapitel 6.1) auch über wellenlängenschiebende Eigenschaften verfügt. Hierbei werden die Moleküle der Folie durch die energetisch höheren ultravioletten Photonen der Cherenkov-Strahlung angeregt. Sie emittieren, wenn sie sich abregen, optische Photonen. Wie dieser Prozess jedoch im Einzelnen aussieht, beziehungsweise welche Moleküle für diesen Prozess verantwortlich sind, ist nicht bekannt, da 3M diese Daten nicht zur Verfügung stellte.

In Abbildung 31 ist das Anregungs- und Emissionsspektrum von einer nicht behandelten VM2000 Probe zu sehen. Der Bereich maximaler Quanteneffizienz (siehe Abbildung 18) der verwendeten Photomultiplier ist in Abbildung 31 als blau schraffierte Fläche dargestellt. Vergleicht man das Emissionsspektrum mit dem schraffierten Bereich, erkennt man, dass die beiden sehr gut überlappen. Die unbehandelte Folie ist somit perfekt dafür geeignet, die ultravioletten Cherenkov-Photonen in den sensitiven Bereich der Photomultiplier zu schieben. Dies verdoppelt etwa den Anteil an detektierbaren Photonen, ohne die Reflektionseigenschaften aus dem vorhergehenden Abschnitt zu berücksichtigen.

Anders sieht dies in Abbildung 32 aus. Hier werden die Anregungs- und Emissionseigen-

schaften der schwer beschädigten Folie aus Abbildung III.28(b) gezeigt. Man erkennt sofort, dass ein großer Anteil der emittierten Photonen außerhalb des Bereichs hoher Quanteneffizienz liegt.

Ein in Abbildung 31 noch recht kleiner Peak zwischen 532 nm und 534 nm wächst deutlich an, wenn die reflektierende Oberfläche zerkratzt ist. Auch wenn Staub auf die Folie aufgebracht wird, ist dieser Peak nicht größer als im Fall der unbehandelten Folie. Dies legt nahe, dass er aus einer der unteren Schichten der Folie stammt und durch die oberen Schichten größtenteils unterdrückt wird, wenn diese noch intakt sind.

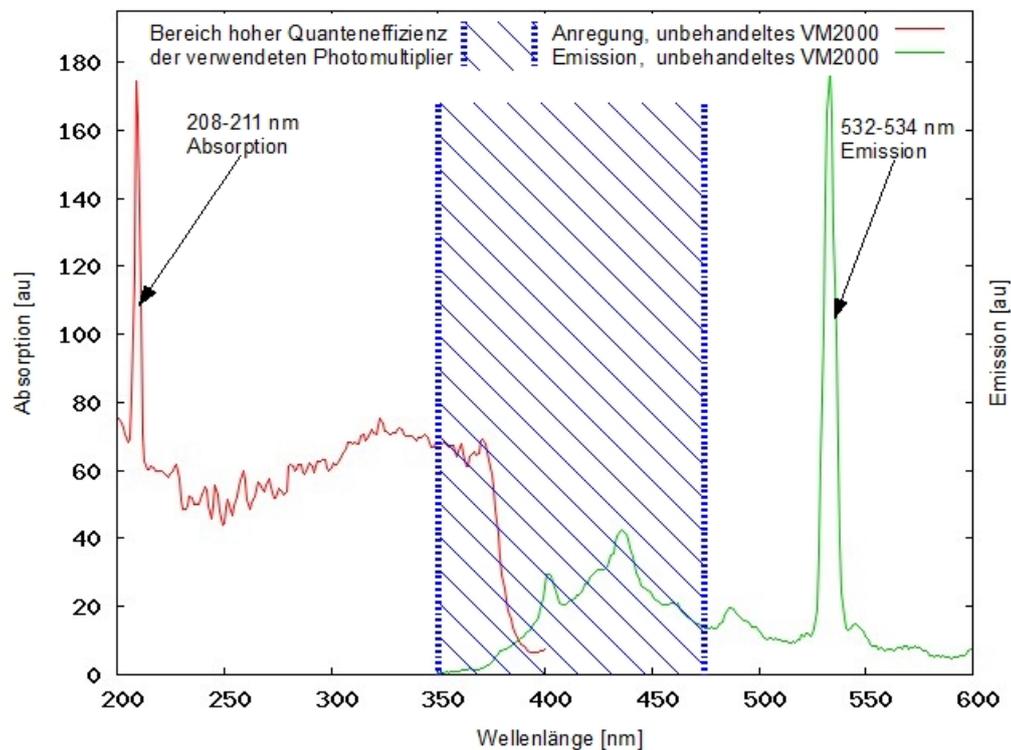


Abbildung 32: Anregungs- und Emissionsspektren einer beschädigten Probe der Reflektorfolie VM2000.

Bei dem Absorptionsspektrum der behandelten Folie gibt es einen vergleichbaren Peak zwischen 208 nm bis 211 nm. Dieser ist in den Kurven der unbehandelten Folie gar nicht zu sehen. Trotz der wenige Nanometer betragenden Auflösung des verwendeten Spektrographen, kann leider kein Vergleich mit Datenbanken angestellt werden, da den beiden Bereichen mehrere Linien von Molekülen und Atomen zugeordnet werden können.

Man kann damit zusammenfassen, dass unter allen Umständen vermieden werden sollte, die VM2000 Folie während der Montage zu beschädigen, wenn man die wellenlängenschiebenden Eigenschaften der Folie nicht verlieren will.

6.3 Unterwassertests der VM2000-Folie

Die Reflektorfolie wird auf die Oberflächen des Wassertanks und des Kryostaten sowie auf die Innenseite der Pillbox aufgebracht und muss mehrere Jahre unter Wasser überstehen. Um ihr Verhalten unter Wasser zu überprüfen wurden verschiedene Tests durchgeführt.

- i) Als Erstes wurden mehrere Stücke der VM2000-Folie in demineralisiertem Wasser eingelegt. Diese Probe wurde dann unter beständigem Erhitzen auf 50°C gehalten und schließlich mittels einer CHNS⁷ Analyse im chemischen Labor der Universität Tübingen untersucht. Dabei wurde keine erhöhte Konzentration von Kohlenstoff, Wasserstoff oder Stickstoff im demineralisierten Wasser gefunden.
- ii) Die zweite Probe wurde über einen Zeitraum von beinahe einem Jahr ebenfalls in demineralisiertem Wasser angesetzt. Auch bei dieser wurden keine Stoffe im Wasser mittels CHNS Analyse gefunden.
- iii) Die dritte Probe ist ein Stück VM2000-Folie, welches auf eine Edelstahlplatte geklebt wurde. Damit wird überprüft, ob der Klebstoff auch unter Wasser geeignet ist, um die Folie an der Stahloberfläche des Wassertanks zu befestigen. Die Folie klebt auch nach einem Jahr unter Wasser immer noch auf der Edelstahlplatte.

7 Das Myonveto-Design

Um möglichst eine Abdeckung des vollen Raumwinkels um die Germaniumdetektoren zu gewährleisten, unterteilt sich das Myonveto in drei räumlich voneinander getrennte Systeme. Diese decken jeweils einen Teil des Raumwinkels um das Experiment herum ab.

Der Hauptteil des Myonvetos verwendet den Wassertank, welcher den Kryostaten umgibt, als aktives Cherenkov-Myonveto (siehe Kapitel III.7.1.1). Er überwacht den Großteil des Bereichs um die Germaniumdetektoren.

Der letzte Teil des Myonvetos (siehe Kapitel III.7.1.3) ist eine drei bis sechs Zentimeter dicke Schicht an Plastikszintillatorplatten, die sich oberhalb des Reinraumes (siehe Kapitel II.3.2) befinden. Diese detektieren vor allem die von oben kommenden Myonen.

Unterhalb des Kryostaten befindet sich in einem kleinen abgeschlossenen Volumen ein weiteres Cherenkvo-Myonveto. Dieses wird auf Grund seiner dosenartigen Form als „Pillbox“ bezeichnet (siehe Kapitel III.7.1.2). Die Pillbox detektiert vor allem Myonen, welche nahezu senkrecht von oben den Kryostaten in der Nähe der Germaniumdetektoren durchqueren. Sie registriert aber auch Myonen, die die Plastikpaneele verfehlen und den Wassertank nur kurz durchqueren.

In Abbildung 33 sind die einzelnen Elemente des Myonvetos, wie sie in den Simulationen verwendet wurden und später auch eingebaut werden, dargestellt.

⁷Bei der CHNS Analyse handelt es sich um eine chemische Elementaranalyse.

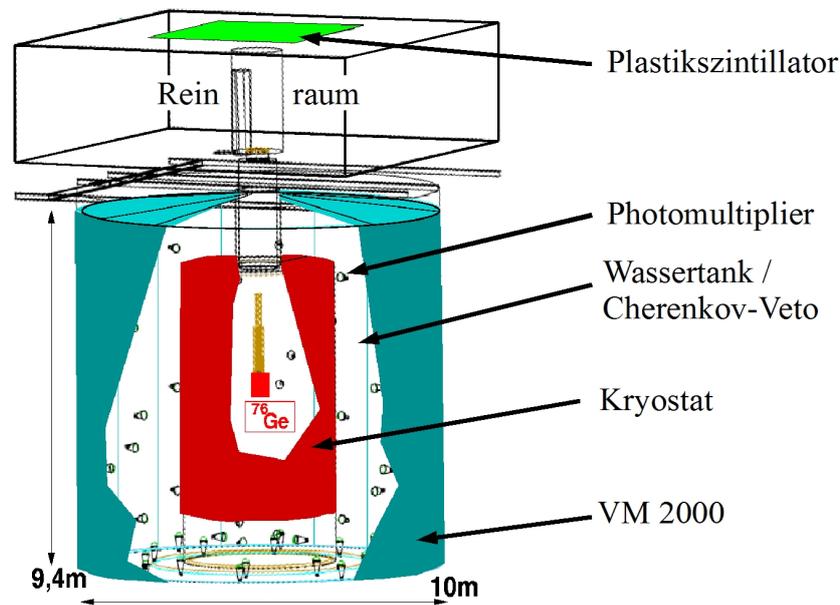


Abbildung 33: Simulationsgeometrie des Myonvetos, visualisiert mit Dawn, einem Programm zur Visualisierung für Geant4.

7.1 Die einzelnen Komponenten des GERDA-Myonvetos

7.1.1 Wassertank-Cherenkov-Myonveto

Der Kryostat des GERDA-Experiments ist von einem neun Meter hohen und zehn Meter durchmessenden Wassertank aus Edelstahl umgeben. Dieser ist mit beinahe 650 m^3 demineralisiertem Wasser gefüllt. Wenn Myonen nicht im Kryostaten gestoppt werden, müssen sie auf jeden Fall den Wassertank durchqueren (siehe Abbildung 51). Dabei erzeugen sie Cherenkov-Photonen (siehe Abschnitt III.4.1).

Das im Tank erzeugte Licht wird über 60 Photomultiplier detektiert, die über die Wand und den Boden des Wassertanks verteilt sind. 40 Photomultiplier sind an der Wand angebracht, wobei jeweils zehn Photomultiplier auf der selben Höhe sind. Sie sind 200, 350, 500 und 650 Zentimetern vom Boden entfernt angebracht. Die Photomultiplier wurden dabei jeweils alle 36° und in Bezug auf die vorhergehende Höhe um 18° versetzt angebracht.

20 weitere Photomultiplier werden auf dem Boden in Ringen von acht bzw. zwölf Detektoren aufgestellt. Die genaue Verteilung ist in Abbildung 34 zu sehen.

Um die Lichtausbeute zu erhöhen, wird außerdem ein möglichst großer Anteil der Oberflächen innerhalb des Wassers mit der Reflektorfolie VM2000 von 3M ausgekleidet, welche neben einer Reflektivität von etwa 99 Prozent auch noch als Wellenlängenschieber dient (siehe Kapitel III.6). Dadurch wird ein zusätzlicher Teil des produzierten ultravioletten Anteils des Cherenkov-Lichtes für die verwendeten Photomultiplier sichtbar.

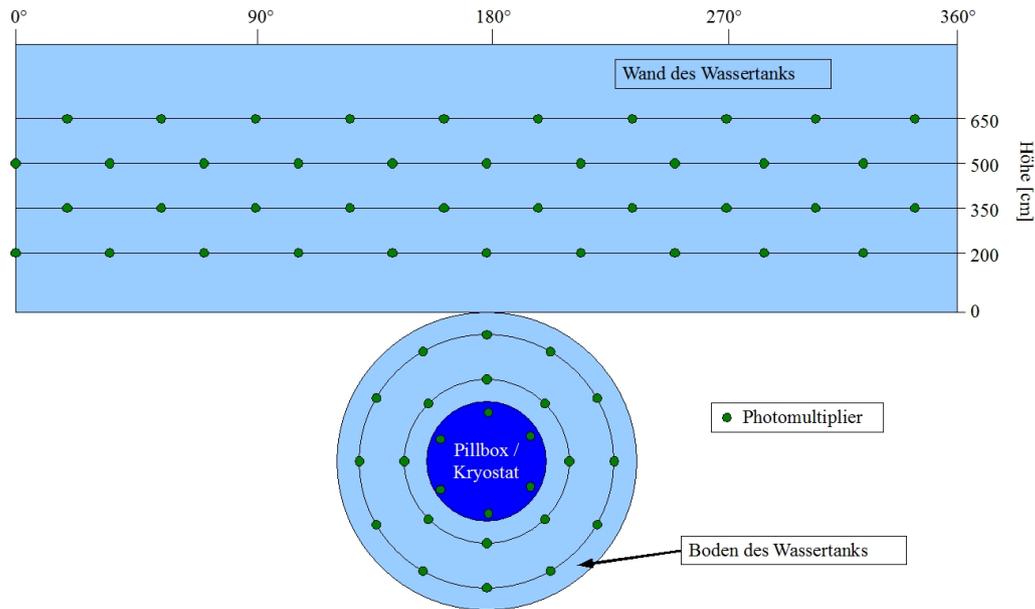


Abbildung 34: Aufriß des GERDA-Wassertanks zur Position der Photomultiplier.

7.1.2 Pillbox-Cherenkov-Myonveto

Wenn Myonen die Halle A des LNGS erreichen und das GERDA-Experiment treffen, können sie von oben kommen⁸ und das Experiment mehr oder weniger senkrecht durchqueren, ohne im Wassertank eine, für ein Signal, ausreichende Strecke zurückzulegen. Deshalb muss dieser Bereich zusätzlich abgedeckt werden.

Dies geschieht mit dem zweiten Teil des GERDA-Myonvetos, ebenfalls einem Cherenkov-Veto. Dabei handelt es sich um die sogenannte Pillbox, das kleine Volumen direkt unterhalb des Kryostaten. In ihr befinden sich sechs weitere gekapselte Photomultiplier des Typs 9354KB. Dies sind Photomultiplier mit besonders reinem Glas (wenig ^{40}K), weil sie in der Nähe des Kryostaten und damit in der Nähe der Germaniumdetektoren eingesetzt werden. Hauptsächlich wird die Pillbox jene Myonen detektieren, welche den Wassertank nur streifen, aber trotzdem das Volumen um die Germaniumdioden passieren. Diese müssen dann aus rein geometrischen Aspekten die Pillbox durchqueren, da es sich um einen schmalen Winkelbereich handelt, durch den diese Myonen kommen können (siehe Abbildung 51). Auch die Pillbox wird mit der Reflektorfolie VM2000 ausgekleidet, um die Effizienz des Myonvetos deutlich zu erhöhen.

⁸Die Winkelverteilung der Myonen in Halle A des LNGS wurde bereits in Kapitel IV.1.5 besprochen. Sie ist in den Abbildungen 42, 43 und 44 dargestellt.

7.1.3 Plastiksintillator-Veto

Außerdem besteht immer die Gefahr, dass Myonen durch die Detektorschleuse den Kryostaten erreichen, ohne das Wasser des Cherenkov-Myonvetos zu durchqueren (siehe Abbildung 51). Werden diese Myonen dann im Inneren des Kryostaten gestoppt, gibt es keine Möglichkeit, diese über die beiden anderen Vetosysteme zu detektieren.

Aus diesem Grund werden oberhalb des Reinraums vorraussichtlich zwei Lagen aus Plastiksintillatorpaneelen (siehe Abb. 35) angebracht. Dies wird es ermöglichen, über Koinzidenzen zwischen zwei übereinander liegenden Paneelen, zwischen Gammastrahlung und Myonen zu unterscheiden.

Die Paneele selbst sind 200 Zentimeter lang, 50 Zentimeter breit und drei Zentimeter dick. In ihrem Inneren befindet sich eine Plastikplatte mit einer Dicke von drei Zentimetern. Treffen Myonen auf diese Plastikplatte, produzieren sie mittels Szintillations-Effekt in den

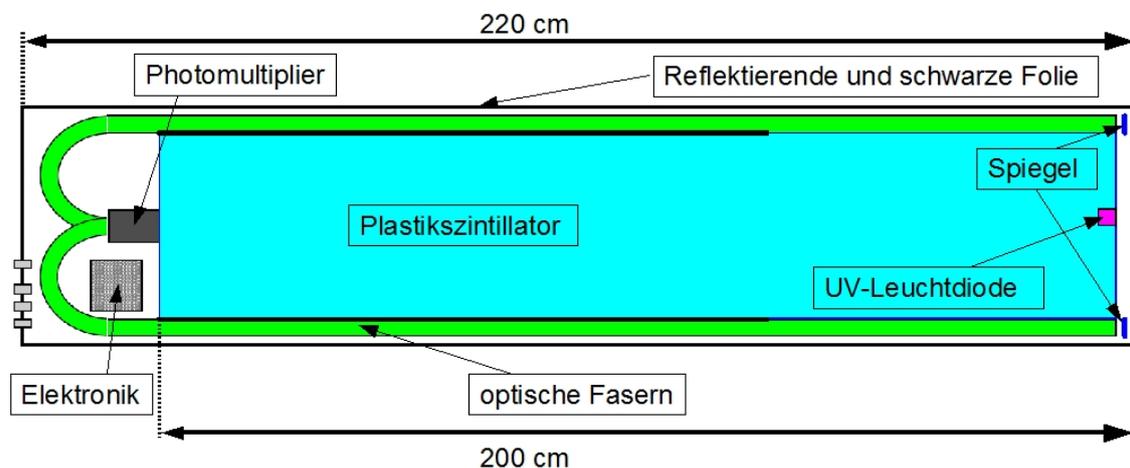


Abbildung 35: Schematische Zeichnung der in Dubna hergestellten Plastikszintillatorpaneele.

Platten Photonen. Im Schnitt deponieren sie etwa zwei MeV pro Zentimeter beim Durchqueren des Plastiks und somit im Normalfall mehr als sechs MeV. Dies entspricht einer Größenordnung von ca. 10^6 Photonen, welche über optische Lichtleiter an Photomultiplier vom Typ H6780 der Firma Hamamatsu geführt werden.

Außerdem sind die Platten mit verschiedenen Folien umwickelt. Zum einen mit einer reflektierenden Folie, um Photonen daran zu hindern das Paneel zu verlassen. Zum anderen mit einer schwarzen, lichtdichten Folie, um zu verhindern, dass Photonen von außen in den Detektor eindringen und das Ergebnis verfälschen. Die Plastikszintillatordetektoren werden am Joint Institute for Nuclear Research, dem JINR, in Dubna in Russland hergestellt. Die momentan wahrscheinlichste Anordnung wird sieben Platten breit, zwei Platten tief und zwei Platten hoch sein. Das würde einer Fläche von sieben Quadratmetern entsprechen.

7.2 Die Myonveto-Testanlage

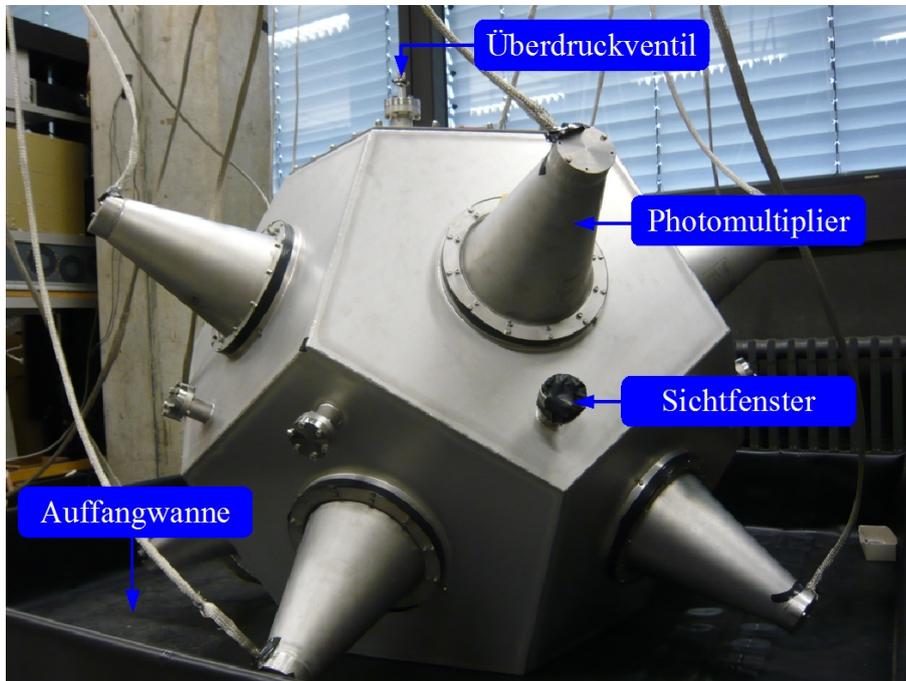


Abbildung 36: Foto des Flüssigszintillator-Testdetektors. Man erkennt den Dodekaeder mit den aufgeflanschten Stahlkapseln in welchen sich die Photomultiplier befinden. Später wurde der Tank durch zusätzliche Abdeckungen lichtdicht versiegelt.

Im Rahmen der Diplomarbeit *Aufbau eines Flüssigszintillator-Testdetektors* von Andrea Hagen wurde in Tübingen eine Testanlage aufgebaut, bei der ein wassergefüllter Edeltank zum Einsatz kommt. Mit dieser konnten auch einige Eigenschaften des GERDA-Myonvetos getestet werden. Ein Foto des Aufbaus ist in Abbildung 36 gezeigt. Es handelt sich um einen dodekaederförmigen Tank mit elf angeflanschten Photomultipliern. Dabei wird an jeder Seite, abgesehen von der Auflagefläche, ein Photomultiplier angebracht. Zwei Ergänzungen des Tanks sind ein Sichtfenster und ein Überdruckventil.

Mit den angebrachten Photomultipliern ist es möglich über Koinzidenzmessungen Myonen zu detektieren. Bei ersten Messungen hat sich gezeigt, dass es möglich ist, bis zu neunfach koinzidente Signale zu detektieren.

Mit diesem Aufbau war es möglich, Elemente der Datennahme wie die verwendeten Splitterboxen (siehe Abbildung 73) zu testen und auch die Datennahme einer ersten Überprüfung im Einsatz zu unterziehen.

Kapitel IV

Untergrundanalyse

In diesem Kapitel werden die Simulationen beschrieben, welche zur Optimierung des fertigen Myonvetos durchgeführt wurden. Zu Beginn wird ein kurzer Überblick über die Vorgaben und verwendeten Methoden gegeben. Dabei werden zuerst Monte Carlo Methoden besprochen. Es folgt ein Überblick über das MAGE-Framework, in welchem der Großteil der Simulationen angefertigt wurde.

Nach diesem Überblick werden die vorbereitenden Arbeiten vorgestellt. Dies schließt die Klassifizierung der Myonen in normale und gefährliche Myonen ein. Desweiteren wurden Intensitätskarten für Photonen angefertigt, um einen ersten Eindruck für die Positionierung der Photomultiplier zu bekommen. Im Zuge dieser Arbeiten wurden auch die Vorteile der Reflektorfolie VM2000 untersucht.

Schließlich wurden verschiedene Verteilungen für die Photomultiplier untersucht und es wurde die beste machbare Variante identifiziert. Diese wurde dann in das MAGE-Framework eingebaut und es wurden Studien für effizientere Triggerstrategien angefertigt. Insbesondere wurde untersucht, wie ein möglichst effizientes System mit den Vorgaben durch die Datennahme erstellt werden kann, indem die Photomultiplier entsprechend auf verschiedene FADCs gruppiert wurden.

Als Abschluss dieses Kapitels wird gezeigt werden, dass ein Myonveto entworfen wurde, welches nahezu den gesamten myoninduzierten Untergrund in den Germaniumdetektoren identifizieren sollte.

1 Grundlagen zu den Computersimulationen

Bevor die eigentlichen Simulationen besprochen werden, sollen in diesem Abschnitt Monte Carlo Simulationen im Allgemeinen und im Speziellen anhand der verwendeten GEANT4 Software erklärt. Es wird außerdem ein Überblick über die für die Simulation wichtigen Klassen beziehungsweise Funktionen von GEANT4 gegeben. Ebenfalls werden Möglichkeiten zur Visualisierung der Simulationen gezeigt.

Desweiteren soll auf das MAGE-Framework eingegangen werden. In diesem fanden alle fortgeschrittenen Simulationen statt. Zum Schluss des Abschnitts wird dann noch ein

Überblick über die verwendete Hardware gegeben.

1.1 Die Monte Carlo Methode

Bei Monte Carlo Methoden handelt es sich um Algorithmen, die speziell dafür entwickelt wurden, stochastische Prozesse zu beschreiben. In diesem Abschnitt werden die Monte Carlo Simulationen kurz allgemein beschrieben. Danach wird noch an Hand eines einfachen Beispiels die Verwendung der Monte Carlo Methoden verdeutlicht.

1.1.1 Allgemeines

Der Name *Monte Carlo* Simulation kommt tatsächlich von der berühmten Stadt mit ihren Spielcasinos. Dieses Verfahren verwendet zufällig generierte Zahlen um bestimmte Prozesse zu simulieren. Von diesen Prozessen gibt es in einem Casino eine große Zahl und somit viele Anwendungsmöglichkeiten für Monte Carlo Verfahren. Doch seine erste Anwendung hatte einen ganz anderen Grund.

Bei der Arbeit an dem *Manhattan Projekt* zum Bau der ersten Atombombe gab es sehr komplizierte Gleichungen zu lösen, wenn man feststellen wollte, ob ein Neutron, welches bei der Spaltung eines Uranatoms entstanden ist, ein weiteres Atom zur Spaltung bringen würde. Die Wissenschaftler stellten damals fest, dass es möglich ist, den Weg eines Neutrons zu simulieren, indem man bei jedem Schritt aufs Neue die Wahrscheinlichkeit überprüft, ob das Neutron absorbiert wird, der Bombe entkommt oder aber eine neue Spaltung induziert. Nun mussten sie nur noch ausreichend Flugbahnen der Neutronen berechnen.

Diesen, damals noch von Hand durchgeführten, *Simulationen* liegt das gleiche Prinzip zu Grunde wie den heutigen modernen Computersimulationen. Man sollte jedoch bei Simulationen nie vergessen, dass sie nur so gut sein können, wie die Daten, welche ihnen zu Grunde liegen. Deshalb ist es besser, wenn man Simulationen vor allem dafür verwendet, eine konservative Abschätzung anzufertigen. Deshalb wurden in den hier angefertigten Simulationen auch immer etwas schlechtere Werte angenommen als eigentlich erwartet wurden. So wurden zum Beispiel die Reflektivität der VM2000 Folie oder die Effizienz der Photomultiplier reduziert.

1.1.2 Ein einfaches Beispiel

Ein einfaches Beispiel für die Anwendung von Monte Carlo Methoden ist die Bestimmung der Zahl π . Hierfür betrachtet man ein Einheitsquadrat (siehe Abbildung 37). In dieses legt man ein Viertel eines Einheitskreises. Nun werden in dieses Quadrat zufällig Punkte platziert, wobei deren x- und y-Koordinate immer zwischen null und eins liegt.

Dies wiederholt man sehr oft und bestimmt die Anzahl Punkte $N_{r<1}$, deren Abstand zum Ursprung $r = \sqrt{x^2 + y^2} \leq 1$ ist und vergleicht sie mit der gesamten Anzahl Punkte N . Dabei gilt:

$$\frac{N_{r<1}}{N} = \frac{\pi}{4} \quad (\text{IV.1})$$

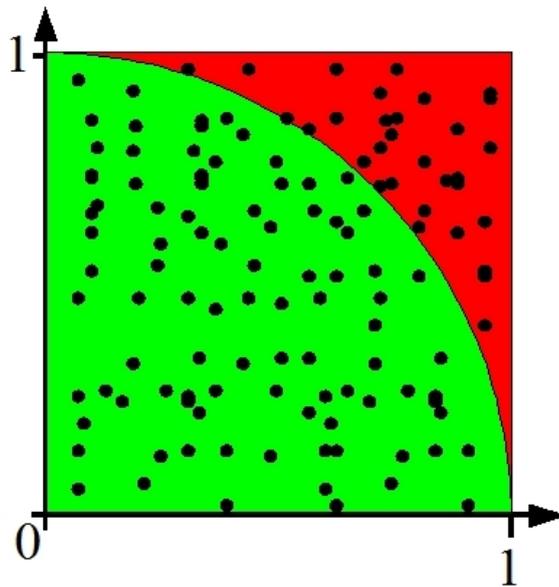


Abbildung 37: Ein einfaches Beispiel für Monte Carlo Methoden.

Mit dieser einfachen Monte Carlo Methode kann man die Zahl π sehr genau bestimmen, wenn man die Zahl N genügend groß wählt und die Verteilung der Punkte wirklich zufällig ist.

1.2 GEANT4

GEANT4 (**Ge**ometry **and** **tr**acking, englisch für Geometrie und Nachverfolgung) ist ein Paket für die Simulation von Teilchen, die Materie durchqueren. Dabei verwendet es die bereits im vorhergehenden Abschnitt behandelten Monte Carlo Methoden. Diese werden in objektorientiertem Programmieren in C++ implementiert. Ursprünglich wurde es am CERN¹ entwickelt, um Simulationen zur Hochenergie-, Kern- und Beschleunigerphysik durchzuführen. Es findet heute in vielen anderen Teilgebieten der Physik seine Anwendung.

Insbesondere in den letzten Jahren hat sich ein breites Spektrum an Anwendern, unter anderem in der Niederenergie- und der Astrophysik, aber eben auch bei Simulationen zum Untergrund in Experimenten zum neutrinolosen doppelten Betazerfall, gefunden. Dies liegt vor allem daran, dass GEANT4 über eine Großzahl an bereits implementierten Eigenschaften verfügt, die es deutlich einfacher machen, verschiedene Experimente nachzubauen und zu simulieren.

¹Die Europäische Organisation für Kernforschung, CERN. Die Abkürzung stammt von dem früheren französischen Namen der Organisation CONSEIL EUROPÉEN POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE.)

- Die Geometrie des Experimentes lässt sich durch vordefinierte Formen wie Quader, Kugeln und Zylinder aber auch durch selbst definierte Volumina einfach nachbauen.
- Eigenschaften von vielen Materialien, wie der Wechselwirkungsquerschnitt für verschiedene Prozesse sind bereits in den Datenbanken von GEANT4 eingebunden. Ebenfalls ist es leicht möglich, eigene Eigenschaften von Materialien zu implementieren.
- Außerdem sind alle bekannten Teilchen, wie zum Beispiel Neutronen, sowie alle physikalischen Prozesse, wie zum Beispiel Neutroneneinfang bereits implementiert und werden über eine einfache Klasse, die Physikliste (siehe im nächsten Abschnitt) aktiviert.
- GEANT4 erlaubt es ohne großen Aufwand, verschiedene Primärteilchen zu verwenden, um die Reaktion des Experimentes auf unterschiedliche äußere Störungen zu untersuchen. In der hier vorgestellten Dissertation wurde der durch Myonen eingebrachte Untergrund im GERDA-Experiment untersucht. Die Primärteilchen sind in diesem Fall Myonen.
- Neben der leichten Verfolgung von Teilchen beim Durchqueren des Experimentes ist es mit GEANT4 auch möglich, Detektoren zu simulieren. Dies geschieht über die Klasse der sensitiven Detektoren (siehe Abschnitt IV.1.2.2). Die Antworten der Detektoren lassen sich in diesem Fall als Daten in verschiedenen Formen, zum Beispiel ASCII²-Code oder auch als ROOT³-Datei abspeichern.
- Schließlich ist auch die Visualisierung der Experimente in GEANT4 sehr einfach (siehe Abschnitt 1.2.3).

1.2.1 Die Physikliste von GEANT4

Mit der wichtigste Teil einer Simulation mit GEANT4 ist die sogenannte „Physikliste“. In ihr wird definiert, welche Prozesse und Teilchen während der Simulation eines Ereignisses mit berücksichtigt werden sollen. Im Großen und Ganzen lassen sich die verschiedenen Prozesse in drei Gruppen unterteilen: Optische, elektromagnetische und hadronische Prozesse. Für die Simulation des Myonvetos sind die Prozesse von unterschiedlicher Bedeutung. Die elektromagnetischen und hadronischen Prozesse werden benötigt, um die im Abschnitt IV.3.2 dargestellte Klassifizierung der Myonen durchzuführen. Bei diesen kommt es letzten Endes nur darauf an, wie viel Energie und in welcher Form diese in den Germaniumkristallen deponiert wird. Nicht destotrotz kommen alle Prozesse zum Einsatz, um das Experiment möglichst exakt zu simulieren.

In der abschließenden Simulation, in der überprüft wird, wie effizient das Cherenkov-Veto

²Bei dem *American Standard Code for Information Interchange* handelt es sich um eine Sieben-Bit-Zeichenkodierung. Diese entspricht der europäischen ISO 646 Norm.

³Bei ROOT handelt es sich um eine ebenfalls vom CERN entwickelte objektorientierte Software zur Analyse von Daten.

Myonen detektieren kann, spielen die optischen Prozesse eine wichtigere Rolle. Im Folgenden sollen diese drei Typen etwas näher erläutert werden.

- **Elektromagnetische Prozesse:**

Dieser Teil der Physikliste von GEANT4 beinhaltet alle Prozesse, bei denen elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen geladenen Teilchen beschrieben werden. Dabei werden sowohl Elektronen und Positronen, wie auch geladene Hadronen berücksichtigt. Desweiteren behandeln diese Prozesse auch die Wechselwirkungen der Myonen mit Materie, welche für die vorgestellten Simulationen besonders wichtig sind.

Die wichtigsten Prozesse, welche diese Klasse umfasst sind:

- Mehrfache Streuung
- Bremsstrahlung
- Ionisation
- Materie-Antimaterie Annihilation
- Photoelektrischer Prozess
- Compton Streuung
- Rayleigh Streuung
- Elektron-Positron-Paarproduktion
- Synchrotron Strahlung

- **Hadronische Prozesse:**

Die hadronischen Prozesse in GEANT4 beschreiben die starke Wechselwirkung und die Teilchen, die ihr unterliegen. Diese umfassen alle Mesonen, wie zum Beispiel die Pionen und Kaonen und alle Baryonen, wie beispielsweise Protonen und Neutronen. Die wichtigsten Prozesse sind:

- Elastische Streuung
- Inelastische Streuung
- Radioaktive Zerfallsprozesse
- Teilcheneinfang
- Isotopenproduktion
- Fusion

Um diese verschiedenen Prozesse in den Simulationen möglichst exakt zu beschreiben, verfügt GEANT4 über drei verschiedene Methoden.

- i) **Datensätze aus der Experimentalphysik**

Bei dieser Methode wird ein enormer Katalog an experimentell gewonnen Daten

angelegt und mit diesem die einzelnen Prozesse beschrieben. Dieser umfasst zum Beispiel die Wechselwirkungsquerschnitte von allen Elementen mit Neutronen. Dabei wird für jedes Element eine eigene Datei angelegt, in welcher dann für verschiedene Energien die Werte des Wechselwirkungsquerschnittes aufgelistet sind.

ii) **Modelle aus der theoretischen Physik**

Die zweite Möglichkeit hadronische Prozesse zu beschreiben, ist die Verwendung von theoretischen Modellen. Hierbei werden experimentelle Daten nur noch verwendet, um die Modelle zu normieren oder zu testen. Die Modelle stammen hauptsächlich aus der Quanten-Chromo-Dynamik, der chiralen Störungstheorie oder aus der Stringtheorie.

iii) **Parametrisierte Verfahren**

Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine Mischung der beiden oben genannten. Es gibt hier genug Daten, um zum Beispiel den Wechselwirkungsquerschnitt ausreichend genau vorzugeben, aber die Endzustände werden über theoretische Modelle berechnet. Ein Beispiel für diesen Typ an Prozessen wäre die Fusion.

• **Optische Prozesse:**

Die für die Simulation des Myonvetos wohl häufigsten Prozesse sind jedoch mit Abstand die optischen. Diese schließen alle Prozesse ein an denen optische Photonen beteiligt sind. Dies wären zum Beispiel:

- Cherenkov-Strahlung
- Reflexion und Brechung
- Absorption
- Szintillation
- Fluoreszenz

Von diesen Prozessen ist die Cherenkov-Strahlung der mit Abstand wichtigste für diese Simulation. Durch den in Kapitel III.4.1 definierten Prozess werden Photonen erzeugt, wenn die simulierten Myonen den Wassertank durchqueren. Dabei werden Photonen gemäß Gleichung (III.9) erzeugt.

Die Propagation der so erzeugten Photonen wird ebenfalls durch die optischen Prozesse beschrieben. Hierfür werden den einzelnen Materialien, insbesondere dem Wasser, optische Eigenschaften, wie Brechungsindizes für verschiedene Wellenlängen oder die mittlere freie Weglänge von optischen Photonen, zugewiesen. GEANT4 berechnet dann an Hand bekannter Gesetze, wie dem Snelliuschen Brechungsgesetz, das Verhalten der Photonen an Grenzflächen oder in der Materie. Dies schließt Brechung, Reflexion oder Absorption mit ein.

Auch die wellenlängenschiebenden Eigenschaften der Reflektorfolie VM2000 werden über die optischen Eigenschaften der Folie geregelt. Hierbei werden die Daten der Spektren aus Abbildungen 29 und 31 eingelesen und von GEANT4 verarbeitet.

Zum Schluss sind in den optischen Prozessen noch die Szintillationsprozesse implementiert. Durch diese wird zum einen Licht in den Plastikszintillatorpaneelen erzeugt. Zum anderen werden die Szintillationen für geladene Teilchen mit berücksichtigt.

1.2.2 Wichtige Klassen von GEANT4

In diesem Abschnitt sollen kurz die wichtigsten Klassen vorgestellt werden, welche in den Simulationen für diese Dissertation wichtig waren. Dabei sollen die Klassen in derselben Reihenfolge, wie sie in den Simulationen auftauchen, beschrieben werden.

- **Die Teilchenkanone:**

Die Teilchenkanone ist ein wichtiger Bestandteil von allen Simulationen. Mit dieser werden Teilchen in die Simulationsgeometrie eingespeist. Dabei werden Teilchenart, Energie und Richtung der Teilchen vorgegeben. In den Simulationen zum Myonveto werden Myonen mit der Energie- und Richtungsverteilung der Halle A des LNGS, wie in Abbildungen 42 bis 44 dargestellt, erzeugt. Dabei wird die Startposition durch einen Zufallsgenerator in einer Scheibe mit 20 Metern Durchmesser oberhalb von GERDA bestimmt.

- **Logische/Physikalische Volumen:** Die Definition von Volumen läuft in GEANT4 über die sogenannten logischen beziehungsweise physikalischen Volumen. Dabei gibt es eine Vielzahl an vordefinierten Volumen wie Quader, Kugeln und Kegel. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit, jedes beliebige Volumen aus vordefinierten zusammenzusetzen oder über etwas kompliziertere Verfahren ein ganz neues zu definieren. Dabei legt man im logischen Volumen Material und andere wichtige Eigenschaften fest, während das physikalische Volumen Position und Rotation bestimmt. Die Größe des Volumens wird bei der Auswahl der Form definiert.

- **Optische Oberflächen:**

Wenn die oben genannten Volumina definiert sind, kann man ihnen noch eine optische Oberfläche zuweisen. Dies ist insbesondere bei der Simulation der Propagation der optischen Photonen im Wassertank notwendig. Dabei wird zum Beispiel der VM2000-Reflektorfolie eine optische Oberfläche mit einer Reflektivität für optische Photonen zugewiesen. Man kann damit auch noch andere Oberflächen, wie den Edelstahl der Kapselungen, mit einer Reflektivität versehen.

Macht man dies nicht, werden alle Oberflächen von physikalischen Volumina mit einer schwarzen Oberfläche versehen, welche 100 % aller Photonen absorbiert und es kommt zu keiner Reflektion mehr.

- **Sensitiver Detektor:**

Nachdem die Photonen einen Photomultiplier treffen, muss GEANT4 dies registrieren und vor allem die so gewonnenen Daten in ein lesbares Datenformat konvertieren. Hierfür gibt es verschiedene Verfahren. Das eleganteste ist jedoch ein Volumen, hier die Photokathode des Photomultipliers, als sensitiven Detektor zu definieren.

Dies erlaubt es, dass bei einer Wechselwirkung eines Teilchens mit dem Detektor Werte, wie Zeitpunkt und Ort der Wechselwirkung aber auch die Energiedeposition, aus der Simulation extrahiert werden können. Diese Daten werden in einer sogenannten „HitsCollection“, einer Sammlung aller Treffer in diesem Detektor weggeschrieben und können dann ausgelesen werden.

Man kann auch beliebige andere Informationen über das Teilchen sammeln, welches den Treffer erzeugt. So wird zum Beispiel die Wellenlänge der Photonen mit ausgelesen, um die Effizienz der Photomultiplier in verschiedenen Wellenlängenbereichen mit zu berücksichtigen.

1.2.3 Visualisierungsmöglichkeiten von GEANT4

Im Großen und Ganzen wurden zwei verschiedene Verfahren der Visualisierung verwendet, wobei es noch ein paar weitere gibt, auf die jedoch in dieser Arbeit nicht mehr eingegangen werden soll.

In den meisten Fällen wurde in dieser Dissertation Dawn⁴ 3.88a für die Visualisierung der Geometrie verwendet. Die einzige Ausnahme, in der nicht Dawn, sondern OpenGL verwendet wurde, war für eine schnelle Überprüfung der Teilchenbahnen. Mit dieser war es deutlich schneller und einfacher möglich, die Visualisierung neu zu initialisieren, als es mit Dawn möglich war. Jedoch war es mit Dawn leichter, die gewonnenen Bilder in die entsprechenden Formate zu exportieren, weshalb für die Erzeugung von Bildern Dawn zum Einsatz kam.

1.3 MaGe

Das **Majorana-GERDA**-, kurz **MaGe**-Framework ist ein Zusammenschluss der Simulationsgruppen des Majorana⁵- und des GERDA-Experiments, die sich beide der Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall des ⁷⁶Ge widmen. In diesem Framework verwenden beide Gruppen jeweils ihre eigenen Geometrien der Experimente, sowie eigene Ausgaberroutinen. Allerdings werden sämtliche Strukturen, wie physikalische Prozesse, Teilchengeneratoren oder auch Geometrien von Testanlagen, die gemeinsam genützt werden können, von beiden Gruppen gemeinsam weiter entwickelt und verwendet. Ein Schema des Frameworks ist in Abbildung 38 dargestellt. Das Framework bietet eine Vielzahl an Vorteilen. So ermöglicht zum Beispiel der Zusammenschluss von mehreren Instituten einen enormen Wissenstransfer zwischen den einzelnen Gruppen. Dies wird insbesondere dann deutlich, wenn ein neues Mitglied in die Verwendung von MAGE beziehungsweise GEANT4 eingewiesen werden muss.

⁴Bei Dawn handelt es sich um ein speziell für GEANT4 entwickeltes Visualisierungspaket, welches die Geometrie und Teilchenpfade als Graphiken ausgeben kann.

⁵Siehe Kapitel II.2.4 zu einer Übersicht des Majorana-Experimentes.

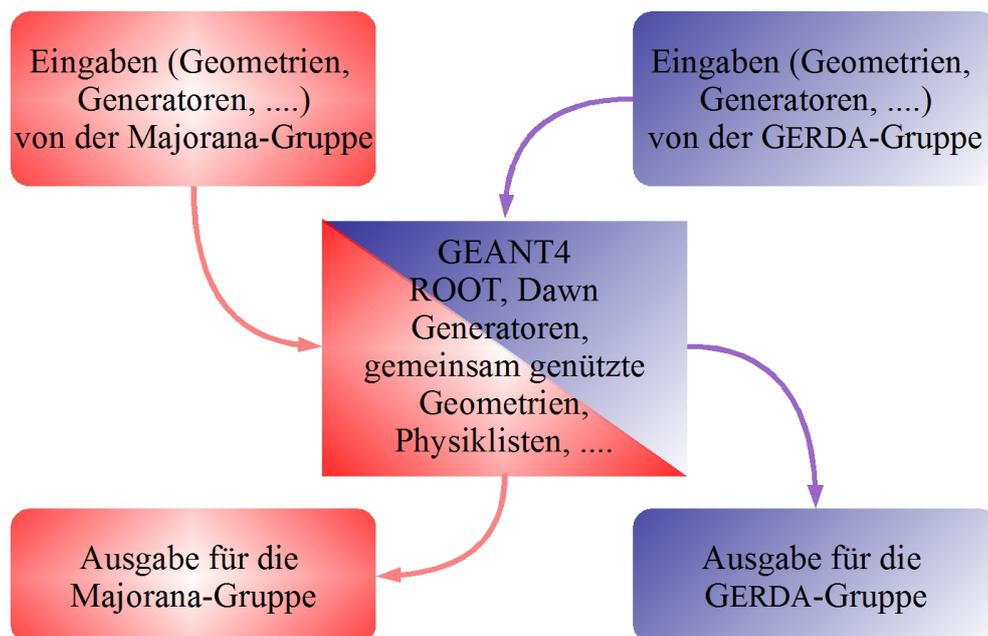


Abbildung 38: Struktur des MaGe-Frameworks.

Durch email-Verteiler und Telefonkonferenzen ist es möglich jedem neuen Mitglied Hilfeleistung bei nahezu allen Fragen zu ihren bzw. seinen Simulationen zu helfen.

Die Simulationen zum Myonveto profitieren von der verfeinerten Geometrie in der Nähe der Germaniumdetektoren, die im Rahmen der Simulationen zu radioaktivem Untergrund durch die Halterungen und Kabel der Germaniumdetektoren angefertigt wurden. Durch das zusätzliche Material steigt die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung des Myons, wenn es die Geometrie durchquert, insbesondere in der Nähe der Detektoren.

Außerdem ist es möglich, dass Institute mit weniger CPU-Leistung die Computer anderer Gruppen mitbenutzen. Beispielsweise erlaubt es die Arbeitsgruppe von Prof. Zuber an der Technischen Universität Dresden, dass man die dortigen CPUs mitbenutzen kann. Dies bietet eine zusätzliche Leistung von etwa 1000 CPUs und bedeutet für die meisten Institute eine deutliche Steigerung ihrer Kapazitäten.

Insgesamt sind von Seiten der GERDA-Kollaboration fünf Institute an der Weiterentwicklung und Nutzung des MAGE-Frameworks beteiligt. Neben dem Physikalischen Institut der Universität Tübingen beteiligen sich zwei weitere deutsche Institute zu diesem Zeitpunkt. Zum einen das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, zum anderen das Max-Planck-Institut für Physik in München.

Desweiteren beteiligten sich Mitglieder des LNGS in Italien und des Physikalischen Instituts der Universität Zürich am MAGE-Framework. Zusätzlich gab es Beteiligung an den Simulationsbestrebungen durch russische Gruppen vom JINR in Dubna und vom INR in Moskau.

1.4 Verwendete Hard- und Software

Tabelle 4: Zusammenfassung der verwendeten Hard- und Software für die abschließenden Simulationen. (Februar 2009)

Prozessor:	Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8400@3.00GHz
RAM:	4 Gigabyte
Betriebssystem:	Suse Linux 10.3
Kompilierungssoftware:	gcc 4.2
Simulation:	Geant 4.9.1.p02
Datenverarbeitung:	Root 5.18
Visualisierung:	Dawn 3.88a

Für die Simulationen wurden mehrere 64-bit PC-Systeme von AMD und Intel verwendet. Der Großteil der Simulationen wurde auf einem Prozessor des Typs Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8400@3.00GHz durchgeführt. Von besonderer Bedeutung war hier, dass die Systeme mit ausreichend RAM (mindestens 4 Gigabyte) ausgestattet waren, da die Simulationen besonders in der Anfangsphase einen enormen Speicherbedarf hatten, sobald die optischen Prozesse aktiviert wurden. Hilfreich war es ebenfalls, wenn die Computer über mindestens einen Dual-Core Prozessor verfügten. Dies ermöglichte die gleichzeitige Simulation zweier Prozesse, beziehungsweise ließ die gleichzeitige Arbeit mit anderen Programmen zu.

Die Simulationen fanden unter Linux statt, wobei zuerst die Version Suse 9.2, später Suse 10.3 verwendet wurde. Zu Beginn der Arbeit im MAGE-Framework wurde noch GEANT4.7 verwendet. Im Zuge der Weiterentwicklung des Quellcodes wurde später auf GEANT4.8 umgestellt. Für die abschließenden Simulationen in der Monte Carlo Campaign II (siehe Abschnitt IV.5) wurde auf GEANT4.9.1.p02 umgestellt, welches zu diesem Zeitpunkt die aktuellste Version war.

Ebenfalls wurde von diesem Zeitpunkt an eine aktuelle Kompilierungssoftware ersetzt, welche die Version des gcc von 3.2 auf 4.2 aufwertete. Im Zuge dieser Aktualisierung musste ebenfalls das Format der ausgegebenen Simulationsdaten von ROOT 5.14 auf ROOT 5.18 umgestellt werden. Dies hatte zur Folge, dass es diverser Änderungen bedurfte, um die Ausgabe an die neue Version zu adaptieren.

Zur Visualisierung der Geometrie und zum einfacheren Überprüfen der einzelnen Volumenelemente wurde die Software Dawn (siehe Abschnitt 1.2.3) verwendet. Zum Schluss werden in Tabelle 4 die Daten für die aktuellste Simulation zusammengefasst.

1.5 Vergleich mit der DCGLG4Sim des Double Chooz Experiments

Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurde auch eine kurze Studie mit einer anderen Simulationsgruppe am Physikalischen Institut angefertigt. In dieser Studie wurde überprüft, ob die beiden verwendeten Frameworks, das MaGe-Framework der GERDA-Kollaboration und das DCGLG4Sim des Double Chooz Experimentes gleiche Ergebnisse bei einer einfachen Geometrie liefern.

Hierfür wurden Blöcke mit zehn Zentimetern Kantenlänge aus verschiedenen Materialien in einer sehr einfachen Simulationsgeometrie erzeugt. Es wurden Blöcke aus Blei, Kupfer, Germanium, Wasser und Plastik verwendet. Dies sind Materialien, die sich in den meisten Experimenten durch ihr häufiges Auftreten auszeichnen. Auf diese wurde mittels einer Teilchenkanone (siehe Abschnitt IV.1.2.2) verschiedene Teilchensorten mit verschiedenen Energien geschossen. Dabei wurden Myonen, Neutronen und Gammastrahlung mit verschiedenen Energien verwendet.

Es hat sich bei allen getesteten Teilchen und Materialien eine gute Übereinstimmung der beiden Simulationsgruppen gefunden. Damit hat sich gezeigt, dass die verwendete Physikliste (siehe Abschnitt IV.1.2.1) und die Definition der Materialien der beiden Frameworks in guter Übereinstimmung sind. Diese definieren das Verhalten von Teilchen beim Durchqueren der Geometrie des Experimentes, weshalb man davon ausgehen kann, dass die beiden Experimente in beiden Frameworks ähnliche Ergebnisse liefern würden.

2 Implementierung des Myonvetos in der Simulationsgeometrie

In diesem Abschnitt soll dargelegt werden, wie die einzelnen Bestandteile des Myonvetos, wie es in Kapitel III.7 vorgestellt wurde, in der Simulation realisiert werden. Zuerst müssen hier der Wassertank und der Kryostat erwähnt werden, welche die Rahmenbedingungen für das Myonveto bilden.

Im Übrigen handelt es sich bei den Komponenten des Vetos um die Photomultiplier, die VM2000 Reflektorfolie und die Plastiksziintillatorpaneele. Desweiteren gibt es noch ein paar Objekte wie den Kabelkanal, die groß genug sind, um in der Simulation eine Rolle zu spielen.

2.1 Wassertank und Kryostat

Der Wassertank ist als Stahlzylinder in MAGE implementiert, welcher mit zwei Stahlscheiben als Boden und Deckel abgeschlossen wird. In diesem befindet sich ein weiteres Zylindervolumen aus Wasser, welches das Volumen des Stahltanks ausfüllt.

Im Zentrum dieser beiden Zylinder wurde ein weiterer Zylinder implementiert, welcher mit

Halbkugeln abgeschlossen wurde. Im Inneren dieses Kryostaten befindet sich flüssiges Argon, sowie die Germaniumdetektoren. Unter dem Kryostaten befindet sich ein Hohlraum, welcher von einem Stahlzylinder an den Seiten und dem Kryostaten von oben und dem Wassertank von unten eingeschlossen ist. Dies ist die Pillbox.

2.2 Die Photomultiplierkapselungen

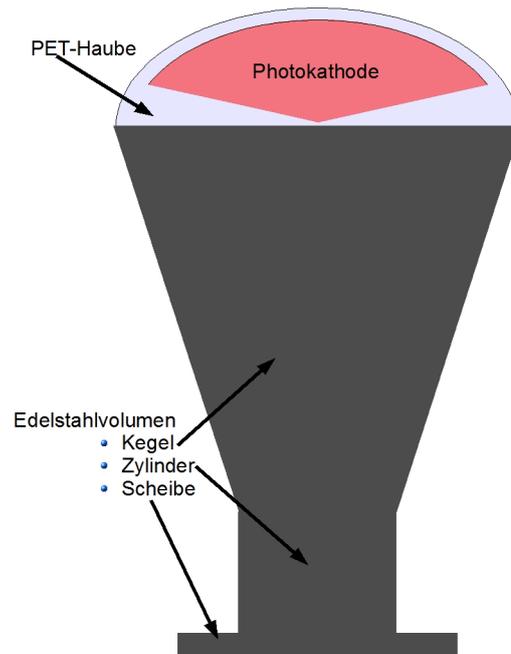


Abbildung 39: Schematische Skizze der in MAGE implementierten Photomultiplierkapselung.

Wie bereits in Abschnitt IV.1.1 erwähnt, ist es bei den Simulationen deutlich wichtiger, konservativ in den Annahmen zu bleiben, als alles „bis zur letzten Schraube“ zu simulieren. Bei den Photomultipliern ist vor allem die Position und Form der Photokathode wichtig. Um zu verhindern, dass auch Photonen, die von der Wassertankwand reflektiert werden, die Photokathode treffen, muss auch die Stahlkapsel in diesen eingebaut werden. Dies sorgt ebenfalls für den richtigen Schattenwurf im Wassertank.

Die verschiedenen Volumina, aus denen eine Kapselung zusammengesetzt wird, sind in Abbildung 39 zu sehen. Ein Vollzylinder und ein Hohlzylinder aus Stahl stellen den Stahlbecher der Einkapselung dar. Ein Kegel aus Stahl den Rest der Kapselung. Das Volumen wird durch eine PET Haube abgeschlossen, unter der sich die Photokathode befindet. Diese ist eine Teilkugel mit einem Öffnungswinkel von 160 Grad. Auf die Implementierung des Flansches wurde auf Grund seiner geringen Größe verzichtet.

Nun muss noch die Quanteneffizienz (siehe Abschnitt III.4.3.1) der verwendeten Photomultiplier simuliert werden. Diese beträgt für die verwendeten Photomultiplier typischerweise

etwa 20 %. Man muss also 80 % der ankommenden Photonen nicht berücksichtigen. Um Rechenzeit zu sparen, wurden diese Photonen bereits bei ihrer Erzeugung gelöscht und damit nicht simuliert. Dies hatte den großen Vorteil, dass vier fünftel der Rechenzeit für die Cherenkov-Photonen eingespart wurde. Nun muss nur noch bei der Analyse darauf geachtet werden, dass nur Photonen mit der richtigen Wellenlänge als Treffer registriert werden.

Auf diese Weise ist es möglich alle wichtigen Eigenschaften der Kapselungen mit zu berücksichtigen und trotzdem eine schnelle und umfangreiche Simulation zu ermöglichen.

2.3 Die Reflektorfolie VM2000

Die VM2000 Reflektorfolie wird als Kunststofffolie in die Simulationen implementiert. Dabei wurden die Wand und der Boden des Wassertanks sowie die Außenseite des Kryostaten mit ihr umhüllt. Außerdem wurde die Innenseite der Pillbox damit ausgekleidet.

Die Eigenschaften der Folie werden über die optischen Variablen in GEANT4 bestimmt. Dazu wird zuerst eine optische Oberfläche für die Folie definiert und dieser dann eine Reflektivität von 95 % für den optischen Bereich von 370 Nanometer bis 650 Nanometer zugewiesen. Für den UV-Bereich wird eine Reflektivität von 15 % angenommen. Um die Abschätzung durch die Simulation weiterhin konservativ zu halten, sind beide Werte etwas kleiner als die in Abbildung 29 gemessenen Reflektivitäten. Damit müsste die in den Simulationen bestimmte Effizienz des Myonvetos etwas geringer ausfallen als in der Realität. Zum Schluss muss der Oberfläche noch die wellenlängenschiebenden Eigenschaften zugewiesen werden. Hierbei werden die gemessenen Daten der Folie direkt über eine Datei, welche tabellenartig aufgebaut ist, in die Simulation eingelesen und verwendet. Diese entsprechen den Daten aus Abbildung 31.

Trifft nun ein UV-Photon auf die Oberfläche, wird es zuerst mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in ein optisches Photon umgewandelt und dann erneut in eine zufällige Richtung emittiert.

2.4 Die Plastikszintillatorpaneele

Da erst kurz vor Abgabe dieser Arbeit geklärt werden konnte, ob die Decke des Reinraums in der Lage sein würde, die Last einer doppelten Lage an Plastikszintillatorpaneelen zu tragen, wurden diese Paneele nur rudimentär implementiert.

Es gab von Anfang an Diskussionen, ob 16 Paneele in einer einzigen Lage oder 32 Paneele in einer doppelten Lage direkt über der Schleuse des Kryostaten angebracht werden sollen. Die zweite Variante hat den Vorteil, dass man einfacher zwischen Gammastrahlung, welche nur in einem, von zwei übereinander liegenden Paneelen Energie deponiert, und Myonen, die immer in beiden Paneelen Energie deponieren, unterscheiden kann. Die Dicke hat jedoch keinen Einfluss auf die Simulationen, da in diesen nur Myonen generiert wurden. Es genügt also eine der beiden zu implementieren, wobei die erste gewählt wurde, die, auf Grund der geringeren Dicke, etwas konservativer ist.

Es gibt auch noch die Möglichkeit bis zu 40 Paneele zu verwenden. Da jedoch noch nicht

geklärt ist, ob so viele Paneele überhaupt auf dem Dach untergebracht werden können, beziehungsweise in welcher Anordnung diese platziert werden können, wurde nur die oben genannte Verteilung verwendet.

Dabei wurden die Paneele als einzelnes Volumen in die Simulationen implementiert, da das Einbringen von toten⁶ Volumen in der Simulation zum jetzigen Zeitpunkt überflüssig wäre. Bei den toten Volumen der Paneele handelt es sich hauptsächlich um die Bereiche in denen die Elektronik und der Photomultiplier untergebracht sind. Allerdings wird auch zwischen den einzelnen Paneelen eine dünne Spalte sein, in welcher sich kein Szintillator befinden wird. Wenn ein Myon diese Volumen passiert, wird es kein Licht in den Paneelen erzeugen und damit nicht von den Plastikszintillatorpaneelen detektiert werden.

Wenn das Myonveto aufgebaut ist, werden für Analysesimulationen die Paneele vollständig implementiert. Bis zu diesem Zeitpunkt hat sich in den Simulationen vor allem gezeigt, dass sie eine gute Ergänzung der Pillbox sind und insbesondere den Bereich oberhalb der Germaniumdetektoren abdecken.

2.5 Weitere Komponenten

Neben den Detektoren und der Reflektorfolie müssen auch noch einige andere Elemente eingebaut werden. Dabei werden jedoch nur solche Komponenten implementiert, die auch einen Einfluss auf das Myonveto, zum Beispiel durch Schattenwürfe, haben werden.

Der Kabelkanal wird als 30 Trapezvolumina und 15 Stahlplatten eingebaut. Dadurch ist der Schatten, den er in der Simulation wirft, dichter als im eigentlichen Experiment. Damit wird sichergestellt, dass das eigentliche Veto keine niedrigere Effizienz hat, als das simulierte.

Die Pillbox wird durch den Fuß des Kryostaten bestimmt. Zu Beginn der Simulationen war die Größe der Pillbox nicht klar, weshalb von einem kleinen Volumen ausgegangen wurde. Sie wurde durch einen Zylinder aus VM2000 implementiert. Später, als die technischen Zeichnungen des Kryostaten verfügbar waren, wurde ein Edelstahlfuß eingebaut und dessen Inneres mit VM2000 ausgekleidet. In diese Volumina wurden zwischen vier und sechs Photomultiplier, je nach Verteilung, eingebaut.

2.6 Überblick über die einzelnen Simulations-Phasen

Im Großen und Ganzen lassen sich die Simulationen zum Myonveto in zwei Abschnitte unterteilen, wenn man von den vorbereitenden Arbeiten absieht. Die sogenannten Monte Carlo Campaigns I und II, welche in diesem Abschnitt vorgestellt werden sollen.

- **Monte Carlo Campaign I**

In der Anfangsphase dieser Arbeit war die GERDA-Geometrie in dem MAGE-Framework noch nicht voll ausgereift. Die Anzahl und Position der Germaniumdetektoren entsprach in dieser Simulation der vorraussichtlichen Phase I des GERDA-

⁶Unter totem Volumen versteht man Bereiche, welche Myonen passieren können, ohne ein Signal zu erzeugen. In diesem Fall die Volumen, in denen sich kein Plastikszintillator befindet.

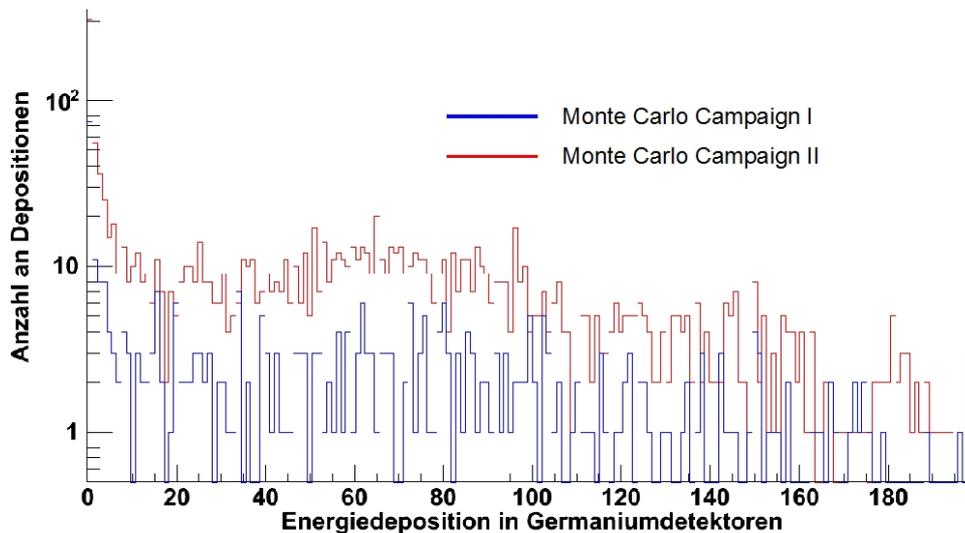


Abbildung 40: Vergleich der Energiedeposition von kosmischen Myonen (oder von ihnen erzeugten Sekundärteilchen) in den Germaniumkristallen für die Monte Carlo Campaign I und II. In der Campaign I haben innerhalb eines Jahres 935 Myonen, in der Campaign II 4078 Myonen Energie deponiert.

Experimentes. Außerdem fehlten die Halterungen der Germaniumdioden und verschiedene andere große Komponenten wie die Kabelkanäle. Auch der Kryostat hatte noch nicht seine endgültige Form, da er zu dem Zeitpunkt der Campaign I Simulationen noch in der Planungsphase war.

Dies hatte zur Folge, dass vor allem auf Grund des fehlenden Materials in der Nähe der Germaniumdetektoren deutlich weniger Targetmaterial zur Verfügung stand und damit weniger Myonen eine Energiedeposition erzeugten, als in späteren Simulationen (siehe Abbildung 40). Aus diesem Grund wurden vor allem vorbereitende Simulationen mit dieser Geometrie durchgeführt, wie die Studien zur Reflektorfolie VM2000.

Insgesamt wurde eine Anzahl an Myonen simuliert, welche 17 Jahren an Daten entsprechen. Die so gewonnenen Daten erlaubten es, Studien zum Myonveto, wie zum Beispiel die Untersuchung verschiedener Verteilungen der Photomultiplier im Wassertank durchzuführen.

- **Monte Carlo Campaign II**

Die zweite Phase der Monte Carlo Simulationen verfügte über eine deutlich verfeinerte und realistischere Geometrie. Hierbei wurden zum ersten mal auch die Anzahl, welche in Phase II deutlich größer ist als für Phase I, und Position der Germaniumdetektoren gemäß der wahrscheinlichen Phase II Konfiguration des GERDA-Experimentes verwendet. Desweiteren wurden viele Kleinigkeiten optimiert und in die Simulation implementiert. Insbesondere von Seiten des Max-Planck Instituts für

Physik in München wurden umfangreiche Modifikationen der Halterungen der Germaniumdetektoren gemacht. Dieses zusätzliche Material in der Nähe der Detektoren hat natürlich auch einen Einfluss auf die Simulationen des Untergrunds durch die Myonen. Dies zeigt sich besonders gut in Abbildung 40, durch einen deutlich höheren Untergrund. In Abbildung 41 ist die verfeinerte Geometrie der Kristalle mit

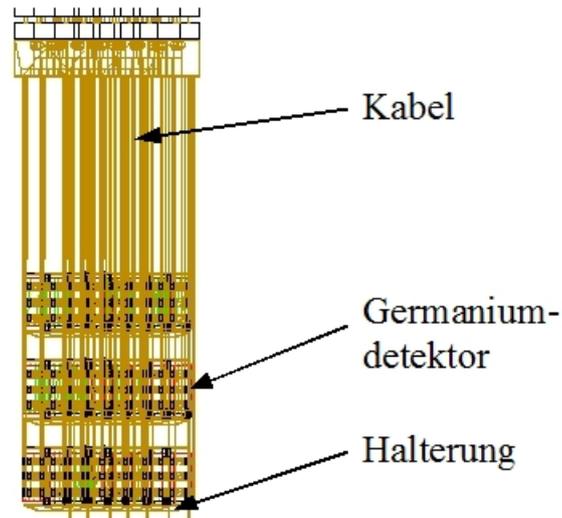


Abbildung 41: Ausschnitt der mit Dawn erzeugten Visualisierung der in der Simulation für Phase II verwendeten Geometrie. Man erkennt die Kristallgeometrie mit Halterungen und Kabel.

Dawn visualisiert. Man erkennt die Kabel in Gold, welche von den Kristallen zu der Aufhängung führen. Auch die Halterungen in Schwarz sind um die roten Kristalle herum angedeutet. Es ist somit deutlich zu erkennen, dass diverse Materialien in der Umgebung der Kristalle sind. In diesen Materialien können deutlich mehr Wechselwirkungen der Myonen stattfinden.

In diesen Simulationen wurden zum ersten Mal die Germaniumdiode, welche voraussichtlich in der Phase II des GERDA-Experimentes eingesetzt werden, in die Geometrie des MAGE-Frameworks implementiert. In dieser Phase der Simulationen wurden die abschließenden Studien zu der Effizienz des Myonvetos durchgeführt und erwartete Energiespektren der Germaniumdetektoren bestimmt.

3 Vorbetrachtungen zum Myonveto

In diesem Kapitel wird ein großer Teil der im Vorfeld der Effizienzstudien betriebenen Arbeiten zusammengefasst. Dabei war vor allem die Selektion der gefährlichen Myonen von besonderer Bedeutung, bei der aus dem Myonenspektrum in der Halle A der LNGS zuerst jene Myonen extrahiert wurden, die zu einer Energiedeposition in den Germaniumdetektoren führten. Diese konnten dann in die verschiedenen Klassen von Myonen eingeteilt werden.

Für das GERDA-Experiment sind insbesondere Myonen, die in den Germaniumdetektoren zu einer Energiedeposition in der Nähe von 2039 keV führen, besonders gefährlich. Aus diesem Grund wurden für diese Myonen Intensitätskarten der erzeugten Cherenkov-Photonen angefertigt. An Hand dieser wurde eine erste ungefähre Positionierung der Photomultiplier durchgeführt.

Es wurden auch Studien die VM2000-Reflektorfolie betreffend durchgeführt. Dabei wurde überprüft, wo sie notwendig ist und in wie weit sie die Ausbeute an Photonen erhöht. Diese werden in diesem Kapitel ebenfalls vorgestellt.

3.1 Der Myonenfluss in der Halle A des LNGS

Für die Simulation des GERDA-Myonvetos wurden Ergebnisse des Macro Experimentes [Ahl93] verwendet. Durch diese wurde der Myonenfluss in Halle A des LNGS bestimmt. Spektren der Winkel- und Energieverteilung sind in den Abbildungen 42, sowie 43 und 44 zu sehen.

Im Mittel haben die verwendeten Myonen eine Energie von 270 GeV. Man erkennt auch sehr schön in Abbildung 43, welches normalerweise ein flaches Spektrum ist, das Profil des Gran Sasso Massivs, welches zu einer Überhöhung bei etwa 0,6 führt.

3.2 Klassifizierung der Myonen

Ein Nachteil von GEANT4 beziehungsweise von Monte Carlo Simulationen im Allgemeinen, ist eine ziemlich starke CPU Belastung. Insbesondere wenn die Teilchenanzahl größer wird, nimmt die benötigte Zeit für eine Simulation deutlich zu. Wenn ein Myon durch den GERDA Wassertank fliegt, produziert es auf Grund des Cherenkov-Effektes (siehe Kapitel III.4.1) sehr viele Photonen. Dies hat zur Folge, dass die Simulation eines einzelnen Myons mehrere Minuten dauern kann, wenn der Cherenkov-Effekt in den Simulationen aktiviert ist und jedes Photon in der Simulation verfolgt wird.

Da es sich bei dem GERDA-Experiment um ein Experiment handelt, welches sehr seltene Ereignisse untersuchen will, müssen jedoch sehr viele Myonen simuliert werden, um die lange Laufzeit des Experimentes zu berücksichtigen, in der auch sehr seltene Energiedepositionen eine Rolle spielen. Aus diesem Grund werden die Myonen in vier verschiedene Klassen eingeteilt, um später nur noch die relevanten Myonen zu betrachten.

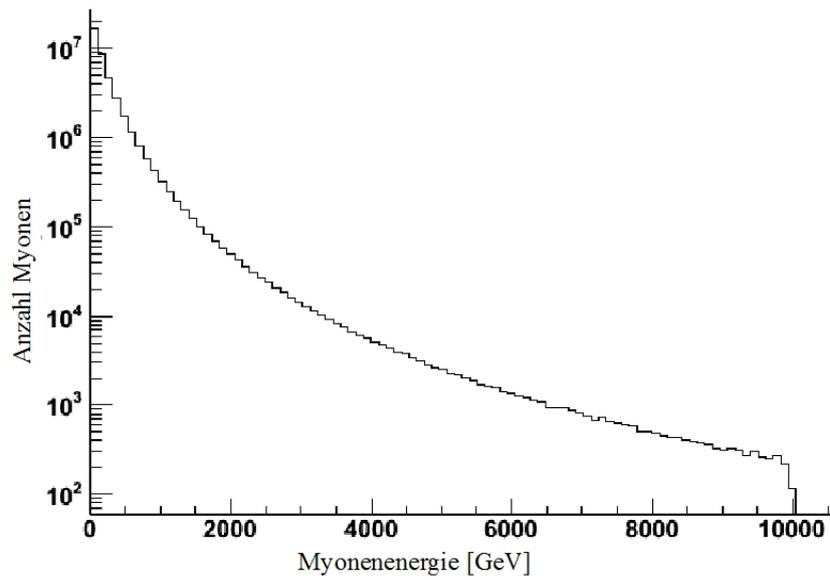


Abbildung 42: Auf den Daten des Macro Experimentes basierendes Energiespektrum der Myonen in Halle A des LNGS.

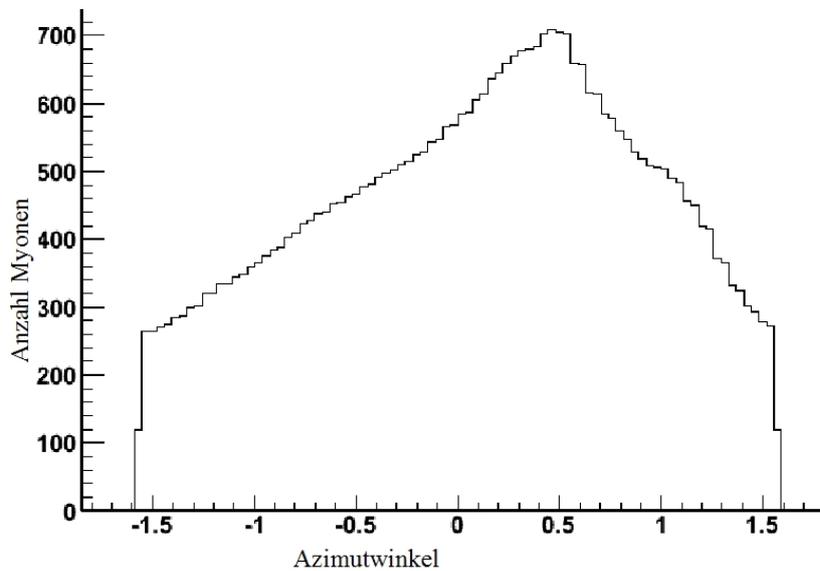


Abbildung 43: Auf den Daten des Macro Experimentes basierendes Spektrum des Azimutwinkels der Myonen am LNGS (integriert über alle Elevationswinkel).

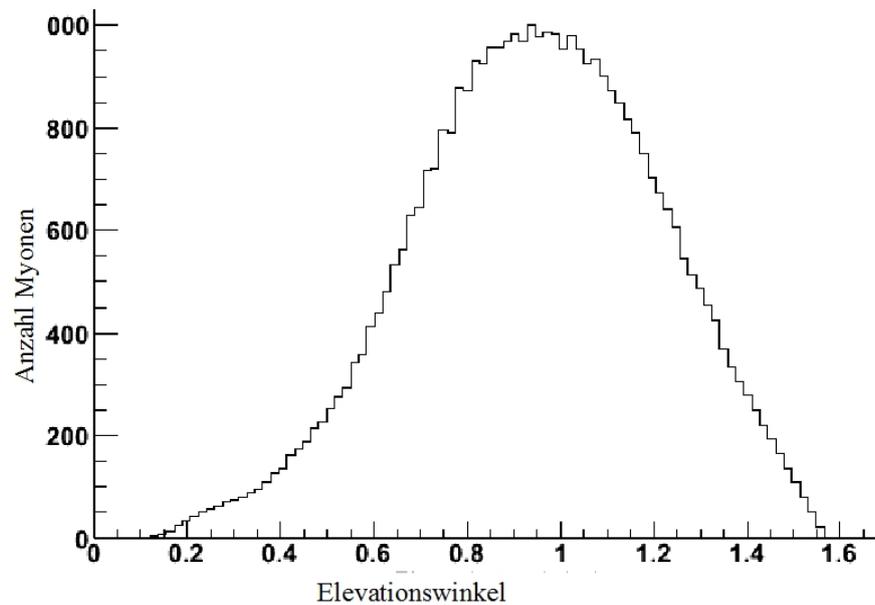


Abbildung 44: Auf den Daten des Macro Experimentes basierendes Spektrum des Elevationswinkels der Myonen in Halle A des LNGS (integriert über alle Azimutwinkel).

- **Myonklasse 0 - Myonen am LNGS:**

Dies sind alle Myonen, welche die Hallen der LNGS erreichen. Dabei wird das im vorhergehenden Kapitel beschriebene Spektrum für Energie- und Winkelverteilung verwendet und in die Simulation implementiert. Die Myonen werden dabei in einer Scheibe, etwa zwei Meter oberhalb des Reinraums, erzeugt. Diese hat einen Durchmesser von 20 Meter, wobei ihr Zentrum direkt über den Germaniumdetektoren liegt. Hierbei ist es möglich, dass produzierte Myonen in mehreren Metern Entfernung an dem GERDA-Experiment vorbei fliegen. Sie gelangen nicht in die Nähe der Germaniumdetektoren. Die Simulation dieser Myonen ist überflüssig. Aus diesem Grund gibt es weitere Klassen an Myonen.

- **Myonklasse 1 - Myonen mit Energiedeposition in den Germaniumdetektoren:**

Während der Simulation dieser Myonen wird in den Germaniumkristallen Energie deponiert. Dies kann auf vielfältige Art und Weise geschehen. Zum einen kann es durch direkte Wechselwirkung der Myonen mit den Kristallen zu einer Deposition kommen. Zum anderen kann auch ein durch die Myonen erzeugtes sekundäres Teilchen die Energie im Kristall deponieren. Diese Myonen sind besonders für die Monte Carlo Campaign II der MaGe Gruppe wichtig, um das Energiedepositions-Spektrum in den Germaniumkristalle zu bestimmen (siehe Kapitel IV.5). Um die Effizienz des Myonvetos in der Monte Carlo Campaign II zu bestimmen, wurden diese Myonen in einem weiteren Schritt noch einmal simuliert. Dabei wurden alle optischen Prozesse aktiviert.

Für die Arbeiten in der Monte Carlo Campaign I konnten diese Myonen auf Grund ihrer hohen Anzahl nicht verwendet werden, da zu diesem Zeitpunkt deren Simulation noch zu viel Rechnerleistung benötigte. Deshalb wurde eine weitere Klasse eingeführt.

- **Myonklasse 2 - Gefährliche Myonen:**

Diese Myonen werden als gefährlich eingestuft, weil während ihrer Simulation in den Germaniumkristallen eine Energie in der Umgebung von den 2039 keV der erwarteten $0\nu\beta\beta$ Linie (siehe Kapitel II.2.1 in Abbildung 5) deponiert wird. Dabei wird ein Energiebereich um die Linie des neutrinolosen doppelten Betazerfalls in der Größenordnung des Auflösungsvermögen D_{Ge} der Germaniumdioden gewählt.

Diese Myonen wurden in der Monte Carlo Campaign I noch einmal gesondert mit aktivierten optischen Prozessen simuliert.

- **Myonklasse 3 - Extrem gefährliche Myonen:**

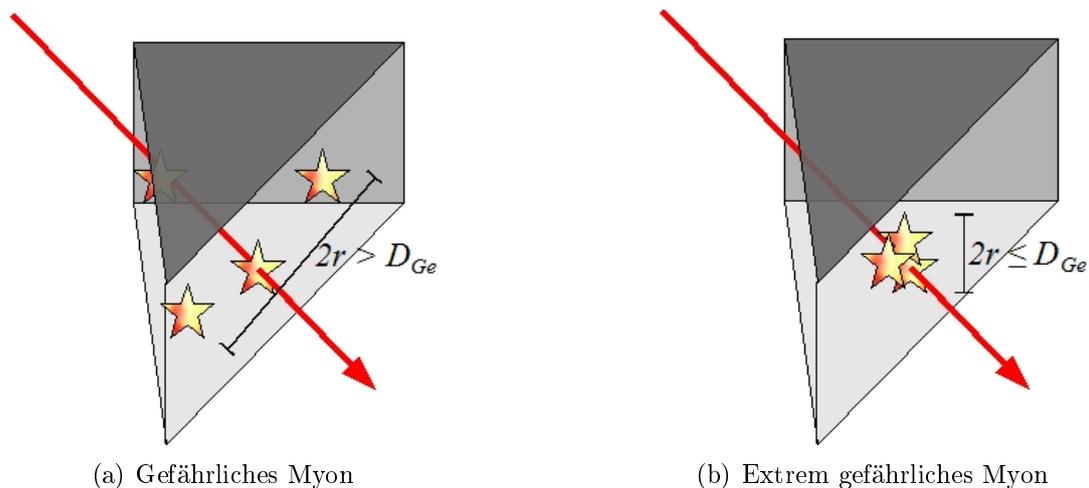


Abbildung 45: Skizzen einer Energiedeposition eines gefährlichen Myons und eines extrem gefährlichen Myons in einem Segment eines Germaniumdetektors. Dabei kann es bei den gefährlichen Myonen auch zu mehreren Energiedepositionen kommen.

Extrem gefährliche Myonen ergeben ein Signal mit der gleichen Signatur wie die des erwarteten Signals des $0\nu\beta\beta$. Im Gegensatz zu den gefährlichen Myonen wird hier noch verlangt, dass die Energie in den Germaniumkristallen innerhalb eines vordefinierten Volumens deponiert wird. Dies ist in Abbildung 45 skizziert. Dabei wird der Abstand zum Zentrum aller Energiedepositionen, nach der jeweiligen Energie

gewichtet, um einen mittleren Abstand $|\vec{r}|$ zum Energieschwerpunkt

$$\vec{r}_s = \frac{\sum_i \vec{r}_i E_i}{\sum_i E_i} \quad (\text{IV.2})$$

zu bestimmen. Dieser berechnet sich wie folgt:

$$|\vec{r}| = \frac{\sum_i |\vec{r}_i - \vec{r}_s| E_i}{\sum_i E_i} \quad (\text{IV.3})$$

Wenn die Gesamtenergiedeposition in einem Segment deutlich von der $0\nu\beta\beta$ Linie abweicht, wird dieses bereits nur noch als Myon der Klasse 1 mit einer beliebigen Energiedeposition geführt und ist damit nicht mehr in der Selektion. Ist seine Energiedeposition zwar im Energieauflösungsbereich der Germaniumdetektoren um die $0\nu\beta\beta$ Linie herum orientiert, gab es jedoch ausreichend viele Depositionen außerhalb der Ortsauflösung, wird das entsprechende Myon als Klasse 2 Myon deklariert. Erst wenn sowohl Energieauflösung und Ortsauflösung der Germaniumdetektoren versagen, wird ein Myon als extrem gefährlich eingestuft.

Der Vorteil dieser Einteilung ist, dass der Hauptteil der durchzuführenden Simulation ohne aktivierten Cherenkov-Effekt erfolgen kann. Dies reduziert die benötigte CPU Zeit um einen Faktor von 1000. In Tabelle 5 sind die Anzahl an simulierten Myonen der vier Klassen gegeben. Dabei wird zwischen den beiden Monte Carlo Campaigns I und II der Simulationen unterschieden.

Tabelle 5: Anzahl an simulierten Myonen der Monte Carlo Campaign I und II des GERDA-Experiments. Dabei ist jeweils in der ersten Spalte die pro Jahr erwartete Anzahl und in der zweiten Spalte die insgesamt simulierten Myonen aufgeführt. Für beide Phasen wurden etwa 17 Jahre an Daten simuliert.

Myonenklasse	Campaign I		Campaign II	
	pro Jahr	gesamt	pro Jahr	gesamt
LNGS Myonen	$2,9 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^7$
mit Energiedeposition	935	16.126	4078	56.251
gefährliche Myonen	13	220	125	2143

Es wird besonders deutlich, dass beim Übergang von I auf II bei einem höheren Anteil an Myonen eine Energiedeposition in den Germaniumdioden festgestellt wurde. Wenn man nur Myonen betrachtet, welche eine Energiedeposition hatten, hat sich deren Anzahl im Vergleich von der Campaign II zu I vervierfacht. Dies liegt zum großen Teil einfach daran, dass in der Monte Carlo Campaign II zu einem deutlich mehr Germaniumdioden zum

Einsatz kamen als in der Campaign I Simulation. Damit gibt es mehr Möglichkeiten für das Myon wechselzuwirken und somit Energie direkt und über Sekundärteilchen in den Detektoren zu deponieren.

Ein weiterer Grund für die höhere Zahl ist, dass für die Simulation in der Campaign II eine verfeinerte Geometrie mit mehr Material in der Nähe der Germaniumdetektoren verwendet wurde. Für die gefährlichen Myonen wird dieser Unterschied noch deutlicher.

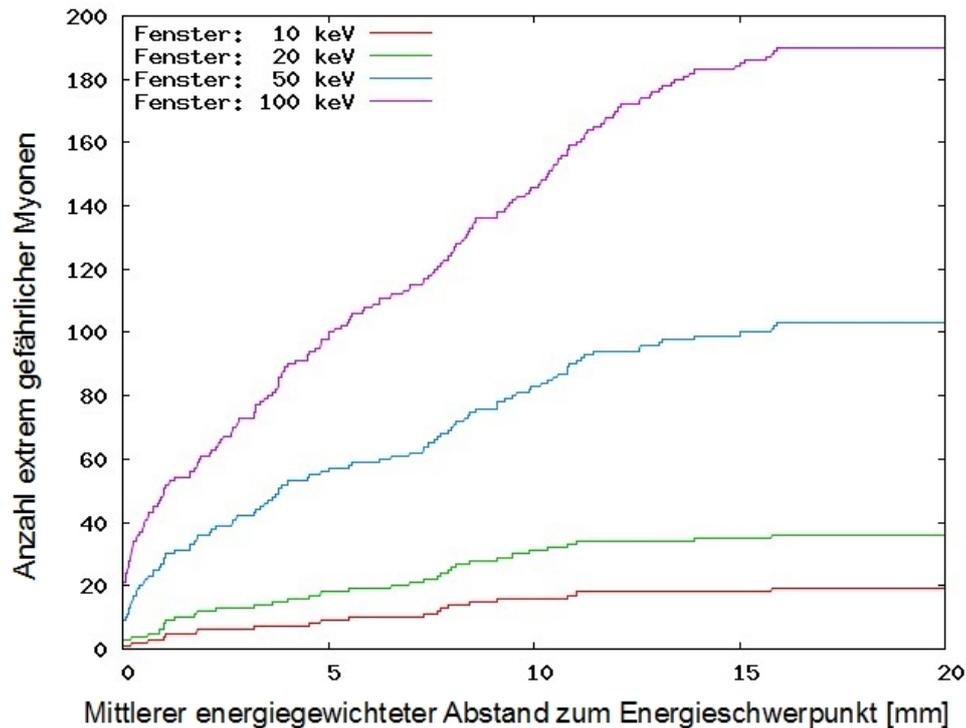


Abbildung 46: Anzahl an extrem gefährlichen Myonen für verschiedene Energiefenster über dem energiegewichteten mittleren Abstand aller Energiedepositionen vom Energieschwerpunkt. Die Anzahl an Myonen entspricht knapp vierzehn Jahren Laufzeit der Phase II des GERDA-Experiments.

Hier gibt es in der Campaign II zehnmal so viele Myonen wie in I. Trotzdem unterscheidet sich der Untergrund im GERDA-Experiment nicht wesentlich, da er relativ zur verwendeten Germaniummasse ist. Für Phase I, in der etwa 15 kg an Germanium 76 eingesetzt wird, bestimmt sich der Untergrund U_I zu:

$$U_I = 8,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}} \quad (\text{IV.4})$$

Für Phase II ist dieser auf Grund der deutlich höheren Masse von etwa 40 kg nur um etwa das Vierfache größer. Der Untergrund U_{II} beträgt hier

$$U_{II} = 3,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}}. \quad (\text{IV.5})$$

Es sollte jedoch bei diesen Zahlen berücksichtigt werden, dass auch der Untergrund von Phase I, auf Grund des in der Campaign I nicht berücksichtigten Materials in der Nähe der Germaniumdioden höher liegen dürfte als in den hier vorgestellten Simulationen.

Es zeigt sich, dass der Untergrund für die Phase II des GERDA-Experiments oberhalb dem Ziel von $U_{\text{GERDA}} < 10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}}$, welches sich das GERDA-Experiment gesetzt hat, liegt. Der hier bestimmte Untergrund wird nur durch Myonen erzeugt und berücksichtigt zum Beispiel den Untergrund durch Verunreinigungen nicht. Dies zeigt, dass Myonen eine Gefahr für das GERDA-Experiment darstellen. In Kapitel IV.5 wird gezeigt, wie es das Myonveto auch für Phase II ermöglichen wird, den Myonen-Untergrund zu reduzieren. Desweiteren hängt die Anzahl der extrem gefährlichen Myonen auch davon ab, über welche räumliche Auflösung die Germaniumdioden verfügen.

Ihre Anzahl ist in Abbildung 46 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für größere Energiefenster die Anzahl an extrem gefährlichen Myonen zunimmt. Dies war zu erwarten, da die Energiedeposition von Myonen auf Grund der geringen Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung und der vielfältigen Art dieser stark variiert. Ebenfalls zeigt sich hier deutlich, dass auch bei guter Ortsauflösung der Germaniumdioden einige gefährliche Myonen innerhalb des Simulationszeitraums von vierzehn Jahren in Erscheinung getreten sind. In Tabelle 6 ist der durch Myonen induzierte Untergrund für verschiedene Auflösungsvermögen der simulierten Germaniumdetektoren⁷ zusammengefasst. Man erkennt, wie auch in Abbildung

Tabelle 6: Untergrund durch extrem gefährliche Myonen für verschiedene Orts- und Energieauflösungen der Germaniumdioden der Phase II. Dabei entspricht das simulierte Energiefenster etwa dem doppelten theoretischen Energieauflösungsvermögen eines Germaniumdetektors.

Energieauflösungsvermögen [keV]	Untergrund [$\frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}}$] für eine Ortsauflösung von		
	5 mm	10 mm	20 mm
5,0	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$7,25 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
10,0	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$6,34 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
25,0	$7,25 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$
50,0	$6,89 \cdot 10^{-4}$	$9,06 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$
250,0	$8,63 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$

46, dass der durch Myonen induzierte Untergrund umso größer ist, je schlechter die Ortsauflösung der Germaniumdetektoren ist.

⁷Ein Energiefenster in der Simulation entspricht etwa dem doppelten der theoretisch angenommenen Energieauflösung eines Germaniumdetektors.

Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der durch Myonen induzierte Untergrund nur wenig von der Größe des verwendeten Energiefensters abhängt. Dies liegt an der Art der Normierung pro keV des Untergrundindexes, wie sie vom GERDA-Experiment verwendet wird. Für die beiden ersten Ortsauflösungen von fünf und zehn Millimetern zeigt sich jedoch ein kleiner Sprung ab einem Auflösungsvermögen von 25 keV. Es müssen, verglichen mit der Größe des Fensters, weniger Myonen in dem nur 20 keV großen Fenster um die 2039 keV Linie des neutrinoslosen doppelten Betazerfall, Energie deponieren als in den größeren Fenstern.

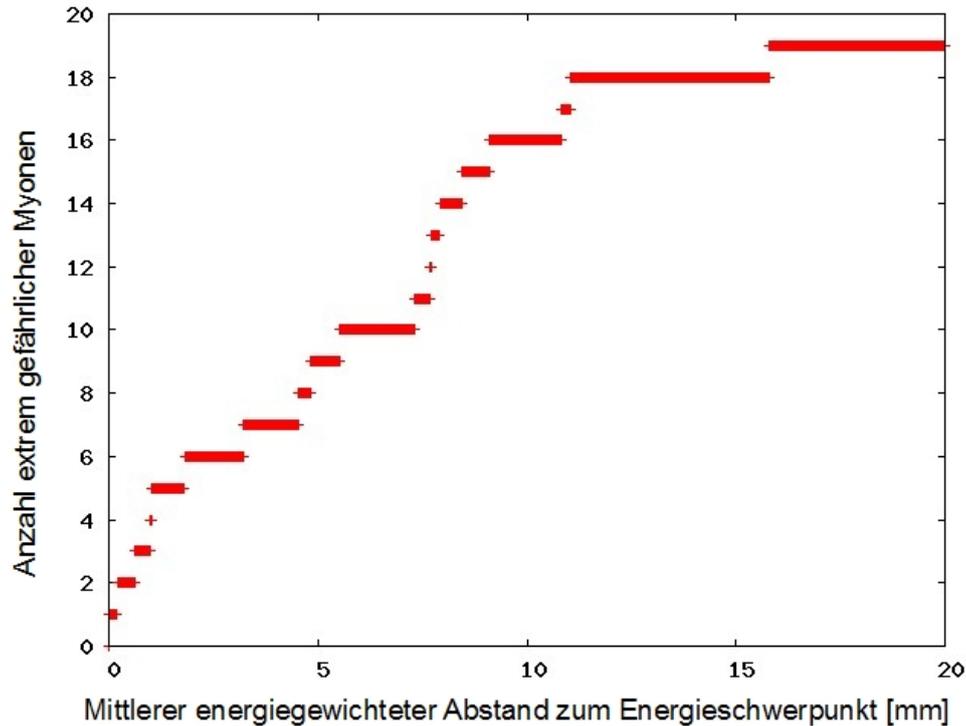


Abbildung 47: Anzahl an extrem gefährlichen Myonen für ein Energiefenster von 10 keV, über dem energiegewichteten mittleren Abstand aller Energiedepositionen vom Energieschwerpunkt. Die Anzahl an Myonen entspricht knapp vierzehn Jahren Laufzeit des GERDA-Experiments. Es handelt sich um einen Ausschnitt aus Abbildung 46.

In Abbildung 47 ist schließlich nur noch die Anzahl an extrem gefährlichen Myonen für ein Fenster einer Energie von 10 keV dargestellt. Es handelt sich um einen Ausschnitt aus Abbildung 46 und entspricht einer Auflösung der Germaniumdetektoren von $D_{Ge} \leq 5$ keV. Bereits ab einer Ortsauflösung von fünf Millimetern wird damit ein Untergrund von

$$U_{5\text{mm}} = 3,63 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}} \quad (\text{IV.6})$$

durch Myonen induziert. Dieser Untergrund ist schon sehr dicht an dem für Phase II des GERDA-Experimentes geforderten Wert (siehe Abbildung 10). Sollte die Ortsauflösung

schlechter oder gar nur durch die Größe der Segmente der Germaniumdetektoren definiert sein, würde dies einem Untergrund von

$$U_{\text{seg}} = 1,09 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}} \quad (\text{IV.7})$$

entsprechen, wenn man von einer mittleren Größe der Segmente von zwei Zentimetern ausgeht. Damit wäre der Untergrund sogar höher als für Phase II des Experimentes gefordert. Da in diesen Zahlen noch keine anderen Untergrundquellen mit berücksichtigt werden, wird deutlich, wie wichtig das Myonveto für das GERDA-Experiment ist.

3.3 Intensitätskarten für Photonen im Wassertank

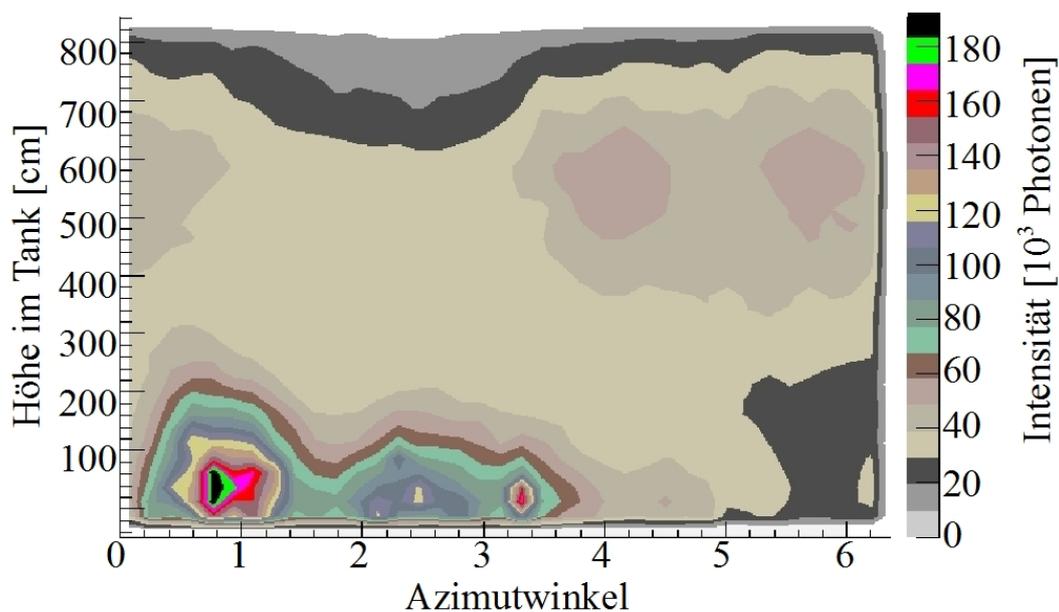


Abbildung 48: Photonintensitäten für die Wand des Wassertanks. Es wurden die 220 gefährlichen Myonen der Phase I Simulationen verwendet. Dies entspricht in etwa 17 Jahren Laufzeit des Experimentes. Man erkennt deutlich eine Vorzugsrichtung der Myonen und zwei Bereiche mit erhöhter Intensität. Der Großteil der Photonen wird im unteren Bereich detektiert, was an der Flugrichtung der Myonen und dem Öffnungswinkel des Cherenkov-Kegels liegt.

Um einen ersten Ansatz für die spätere Verteilung der Photomultiplier im Wassertank zu erhalten, wurden nach der Klassifizierung der Myonen (siehe vorhergehenden Abschnitt)

Intensitätskarten für Photonen im Wassertank angefertigt. Hierzu wurden die gefährlichen Myonen der Phase I Simulationen (siehe Abschnitt 3.2) ausgewählt und mehrfach in ausreichend hoher Statistik simuliert.

Für diese Simulation wurde der Edelstahl des Wassertanks als sensitiver Detektor für Photonen definiert. Auf diese Weise konnten Karten der Tankoberfläche erzeugt werden, welche die Intensität der Cherenkov-Photonen auf den Oberflächen des Wassertanks darstellen (siehe Abbildungen 48 und 49). Ebenfalls wurden solche Karten für die Pillbox, das kleine Volumen unter dem Kryostaten angefertigt (siehe Abbildungen IV.50(a) und IV.50(b)).

An Hand dieser Karten wird deutlich, dass es mehrere Bereiche gibt in denen eine hö-

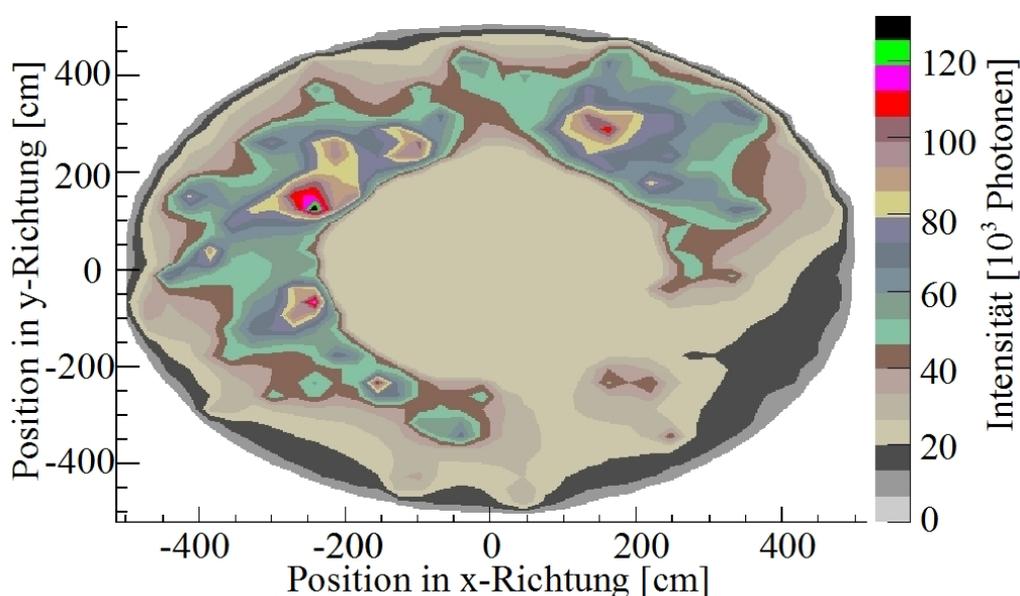


Abbildung 49: Photonintensitäten für den Boden des Wassertanks. Es wurden die 220 gefährlichen Myonen der Phase I Simulationen verwendet. Dies entspricht in etwa 17 Jahren Laufzeit des Experimentes. Der Schatten im Zentrum ist die Pillbox, beziehungsweise der Fuß des Kryostaten. Auch hier erkennt man einen Bereich deutlich erhöhter Intensität, welcher auf Grund der Richtungsverteilung der Myonen entsteht.

here Intensität an Photonen besteht. Diese Bereiche kommen durch die nicht homogene Winkelverteilung der Myonen in Halle A des LNGS zustande (siehe Abbildungen 43 und 44), welche durch das Profil des Gran Sasso Massivs, sowie durch den Schattenwurf des Kryostaten erzeugt werden. Auf Grund dieser Verteilung gibt es eine Vorzugsrichtung in der Azimutverteilung.

Der nach unten geöffnete Cherenkov-Kegel (siehe Kapitel III.4.1) schließlich sorgt dafür, dass besonders im unteren Bereich des Wassertanks deutlich mehr Photonen registriert wurden, als im oberen Teil.

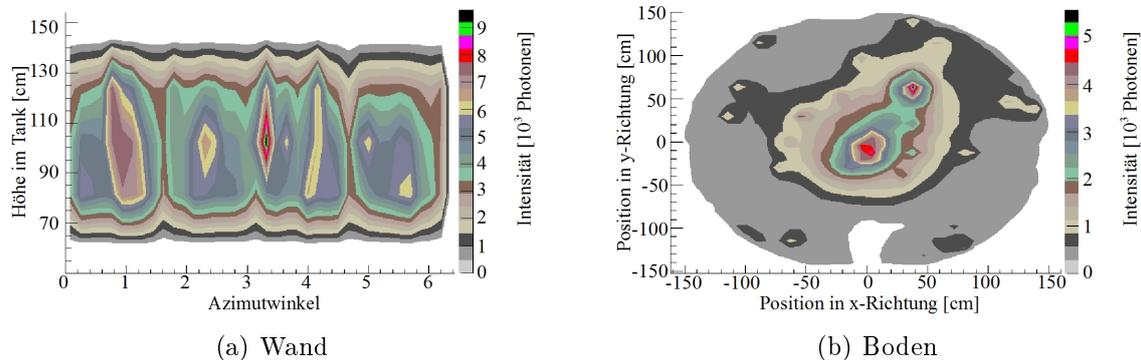


Abbildung 50: Photonintensitäten für die Pillbox. Es wurden die 220 gefährlichen Myonen der Phase I Simulationen verwendet. Dies entspricht in etwa 17 Jahren Laufzeit des Experimentes.

Offensichtlich musste diesen Bereichen besondere Beachtung geschenkt werden. Dabei gibt es zwei mögliche Ansätze. Einerseits kann man hier besonders viele Photomultiplier platzieren, um möglichst viel Licht zu detektieren. Andererseits wäre es auch möglich, hier nur wenige Photomultiplier anzuordnen, da in diesen Bereichen genug Licht erzeugt wird, um auch von wenigen Detektoren erfasst zu werden. In dieser Variante würden Bereichen mit weniger Licht eine höhere Anzahl an Photomultiplier zugeordnet werden.

Tests zeigten jedoch, dass die erste Variante effizienter ist (siehe Abschnitt IV.4). Dies liegt vermutlich daran, dass in den Bereichen mit niedrigerer Intensität so wenig Licht ankommt, dass die Photomultiplier Schwierigkeiten haben, dieses noch zu detektieren. Ein weiterer Nachteil ist, dass man einen großen Teil der Detektionsfläche in den Bereichen hoher Intensität verliert. Aus diesem Grund werden dort deutlich weniger Photonen detektiert. Dabei hat in dem hier vorgestellten Myonveto der Anteil an nicht mehr detektierten Photonen den Anteil an zusätzlich detektierten Photonen deutlich überwogen, weshalb in den Bereichen hoher Intensität im Wassertank mehr Photomultiplier platziert wurden.

Zum Abschluss des Kapitels soll noch kurz auf die Abbildungen IV.50(a) und IV.50(b) hingewiesen werden. Es handelt sich hierbei um die Intensitätskarten der Pillbox. Es gibt auch in diesen Karten einen Bereich mit erhöhter Intensität. Dies ist insbesondere in Abbildung IV.50(b) auf dem Boden zu erkennen. Es ist jedoch im Fall der Pillbox nicht möglich die Photomultiplier auf dem Boden zu montieren, weshalb nur die Wandfläche in Abbildung IV.50(a) in Frage kommt. Hier zeigt nahezu die gesamte Karte, insbesondere auf mittlerer Höhe, ungefähr gleiche Intensitäten. Lediglich im Zentrum ist die Intensität etwas erhöht. Deshalb wird hier eine gleichmäßige Verteilung von den zur Verfügung stehenden Photomultipliern verwendet.

3.4 Mögliche Lücken in der Abschirmung

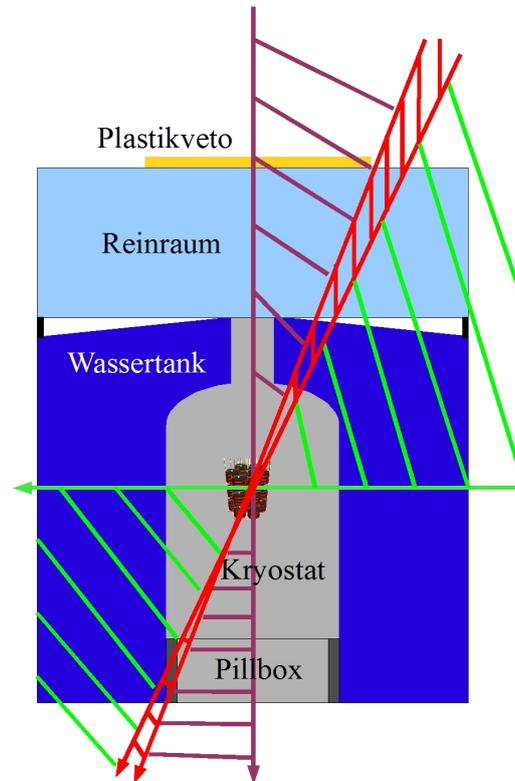


Abbildung 51: Mögliche Lücken in der Abschirmung durch das Myonveto. Man erkennt, dass Myonen nur in einem sehr schmalen Winkelbereich (rot schraffiert) keinen oder nur einen kurzen Weg durch das Cherenkov-Veto zurücklegen müssen. In den übrigen Bereichen müssen sie mindestens das Plastikveto oder die Pillbox passieren oder aber einen langen Weg im Wassertank zurücklegen

Der nächste Schritt war es, mögliche Lücken in der Abschirmung durch das Myonveto zu identifizieren und zu schließen oder aber wenigstens zu minimieren. In Abbildung 51 ist ein Querschnitt durch das GERDA-Experiment skizziert. Die bordeaux schraffierten Bereiche werden durch die Pillbox oder das Plastikveto oberhalb des Reinraumes abgedeckt. Dies betrifft die Myonen die hauptsächlich von oben kommen und das GERDA-Experiment passieren.

Der größte Teil des Raumwinkels (grün schraffierter Bereich) um das GERDA-Experiment wird allerdings durch das Wassertank-Cherenkov-Vetosystem abgedeckt. Der einzige Bereich in welchem es zu Problemen kommen kann, ist der rot schraffierte Übergangsbereich. Aber selbst hier ist immer sichergestellt, dass das Myon wenigstens einen Meter im Wassertank oder eine Strecke von etwa 50 Zentimetern in der Pillbox zurücklegen muss. In der Pillbox entspricht dies etwa 13000 Photonen was auf Grund der höheren Abdeckung der

Fläche zu etwa 100 Photoelektronen führen sollte. Hinzu kommen jedoch noch die Photonen, welche durch die VM2000 aus dem UV-Bereich in den optischen Bereich geschoben wurden. Dies stellt sicher, dass Myonen in der Pillbox bereits ab einer Weglänge von etwa zehn Zenitmetern detektiert werden müssten.

Deshalb ist es auch in diesem Zwischenbereich nicht sehr wahrscheinlich, dass ein Myon unentdeckt bleibt. Dies wird sich auch noch in den abschließenden Simulationen in Abschnitt IV.5.2 zeigen. Insgesamt wurde damit ein Myonvetosystem entworfen, welches nahezu den vollen Raumwinkel um die Germaniumdetektoren des GERDA-Experimentes abdeckt.

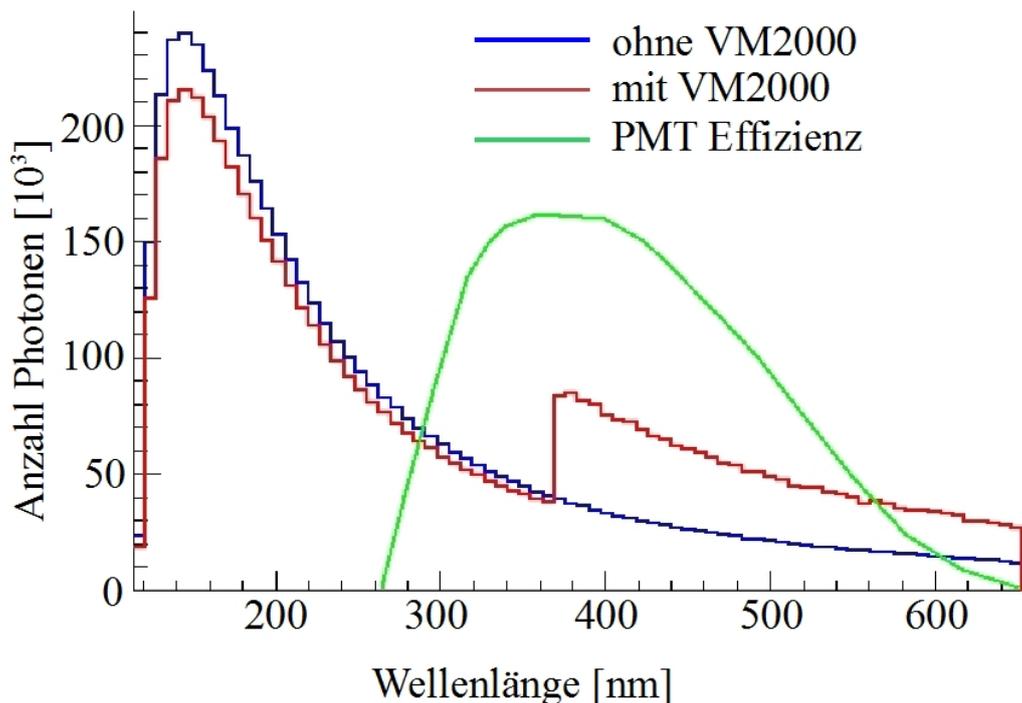


Abbildung 52: In der Simulation registriertes Photonenspektrum mit und ohne VM2000, sowie die ungefähre Sensitivität der verwendeten PMTs. Man erkennt oberhalb von 380 nm die Verdopplung der Anzahl durch die wellenlängenschiebenden Eigenschaften der VM2000.

3.5 Studien zur VM2000

Um den Nutzen der VM2000-Reflektorfolie (siehe Kapitel III.6) zu überprüfen wurde eine Simulation angefertigt, bei der die Wellenlängen der erzeugten Photonen festgehalten wurde. Es zeigt sich sehr deutlich, dass durch die Folie ungefähr doppelt so viele Photonen im optischen Bereich, in dem die Photomultiplier 9354KB von Electron Tubes sensitiv sind (Vgl. Abb. 18), registriert wurden (siehe Abb. 52). Auf Grund dieser Simulationen wurde entschieden, möglichst alle verfügbaren Flächen im Wassertank mit der Reflektorfolie zu verkleiden.

In den späteren Simulationen zeigte sich dann, dass durch die Verkleidung der Tankwand, viele Informationen bezüglich der Einfallrichtung des simulierten Myons verloren gingen, da die Reflektorfolie auch einen großen Anteil an diffuser Reflektion hat. Dies ist jedoch für die Effizienz des Vetos kein Nachteil und kann deshalb ohne Einschränkung der Funktionalität akzeptiert werden. Weitere Informationen zu VM2000 finden sich in Kapitel III.6.

4 Monte Carlo Campaign I

Bevor die endgültige Verteilung der Photomultiplier im Wassertank festgelegt werden konnte, wurden zehn verschiedene Verteilungen getestet. Der Weg zur endgültigen Geometrie und die verschiedenen Vorläufer sollen in diesem Kapitel an Hand von vier ausgewählten Geometrien vorgestellt werden. Von besonderem Interesse sind hier die Unterschiede zu der endgültigen Verteilung aus Kapitel III.7 und deren Auswirkungen auf die Anzahl an detektierten Myonen. Diese Simulationen fanden in der Anfangsphase dieser Dissertation statt und verwendeten noch eine vereinfachte Geometrie, beispielsweise fehlten die Kabelkanäle und die Halterungen der Germaniumdioden.

In den Abbildungen IV.53(a) bis IV.53(d) ist eine Skizze, sowie in Tabelle 7 eine Zusammenfassung der Studie zu den vier Verteilungen gegeben.

Tabelle 7: Effizienz der Myonendetektion für die vier verschiedenen Testverteilungen der Simulationen. Insgesamt wurden in dieser ersten Phase 220 Myonen simuliert, welche in der Umgebung von 2039 keV Energie in den Kristallen deponiert hatten. (R entspricht der Anzahl an Ringen aus P Photomultipliern)

Verteilung	Boden		Decke		Wand		Pillbox	Detektierte Myonen
	R	P	R	P	R	P	P	
I	2	10	2	10	5	10	0	197
II	2	10	2	10	5	10	4	216
III	2	10	0	0	5	10	4	216
IV	2	10	0	0	4	10	4	215

Die in der Monte Carlo Campaign I verwendeten Myonen wurden mittels dem in Kapitel IV.3.2 besprochenen Verfahren ermittelt. Insgesamt wurden 17 Jahre simulierter Daten erzeugt. In dieser Phase der Simulation war der Speicherbedarf zu groß, um sämtliche Klasse 2 Myonen vollständig zu simulieren. Deshalb wurden nur die 220 Klasse 3 gefährlichen Myonen verwendet. Es handelt sich um die selben, welche für die vorbereitenden Simulationen wie die Photonintensitätskarten zum Einsatz kamen.

Alle Verteilungen hatten bereits gemeinsam, dass die Oberfläche des Wassertanks und des Kryostaten mit der Reflektorfolie VM2000 verkleidet waren.

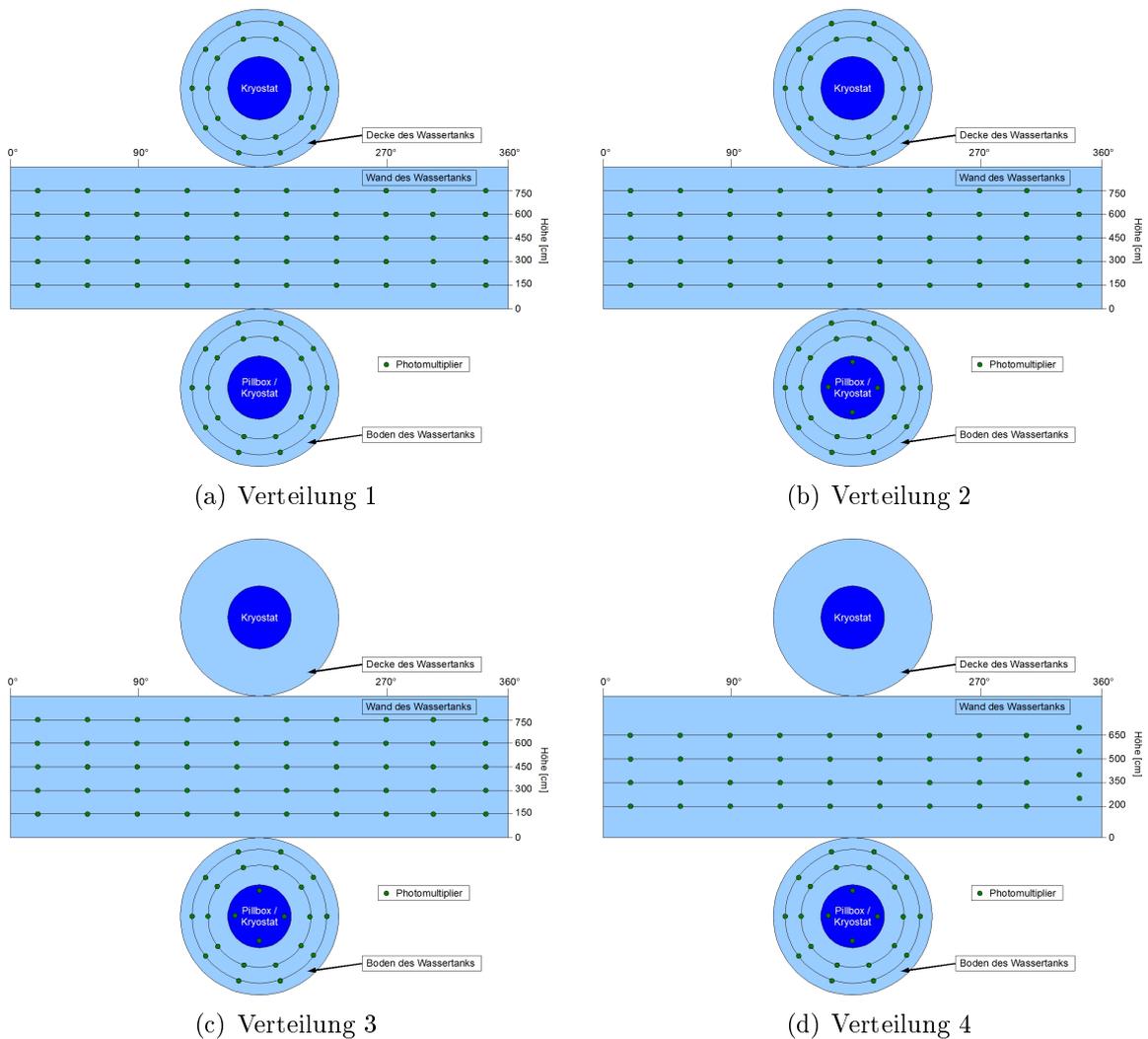


Abbildung 53: Entwicklung der verschiedenen verwendeten Testverteilungen für die Photomultiplier in den Simulationen. Zuerst wurden viele Photomultiplier an der Decke, der Wand und am Boden eingesetzt. In der zweiten Variante wurden Photomultiplier in der Pillbox eingesetzt. Danach wurden die Photomultiplier der Decke ausgelassen und zum Schluss noch zehn Photomultiplier an der Wand des Wassertanks nicht eingebaut.

4.1 Verteilung I

Die erste Verteilung der Photomultiplier war isotrop im gesamten Wassertank. Dabei wurden sowohl Photomultiplier an der Decke, als auch auf dem Boden und an der Wand untergebracht. Insgesamt wurden 90 Photomultiplier eingesetzt. Von den 90 Photomultipliern befanden sich jeweils 20 Stück am Boden und an der Decke, sowie 50 Stück an der Wand. Diese wurden in Gruppen von jeweils 10 Photomultipliern in Ringen auf den Höhen 150, 300, 450, 600 und 750 cm untergebracht.

Der wichtigste Unterschied zur endgültigen Verteilung ist die fehlende Pillbox unter dem Kryostaten. Dies führte dazu, dass nur 197 der 220 Klasse 3 gefährlichen Myonen detektiert wurden. Deutlich zu wenig für die gewünschten Untergrundrate. Außerdem waren die Photomultiplier nicht versetzt angeordnet, und die beiden Ringe auf dem Boden hatten jeweils zehn und nicht acht und zwölf Photomultiplier.

4.2 Verteilung II

In der zweiten Verteilung wurde die Pillbox mit vier Photomultipliern besetzt. Ansonsten wurde die Verteilung nicht verändert. Dies erhöhte die Anzahl an detektierten Myonen auf 216. Damit war klar, dass die Pillbox von essentieller Bedeutung für eine hohe Effizienz des Myonvetos war. Allerdings war diese Verteilung mit 94 Photomultiplier nur schwer zu realisieren, da in diesem Fall nahezu alle verfügbaren Photomultiplier eingebaut werden müssten, was keinen Raum für eine Reserve oder für bei der Produktion beschädigte Kapselungen ließ.

Diese Verteilung war, wenn man von den zusätzlichen Photomultiplier an der Decke abieht, der endgültigen Verteilung recht ähnlich. Allerdings hatte die endgültige Verteilung mehr Photomultiplier in der Pillbox, um diese unter allen Umständen betriebsbereit zu halten, selbst wenn einer oder zwei der Photomultiplier ausfallen sollten. In dieser Phase der Simulation wurde die Wichtigkeit der Pillbox nur vermutet.

4.3 Verteilung III

Wenn man sich Abbildung 54 betrachtet, sieht man, dass eine isotrope Verteilung der Photomultiplier im Wassertank nicht sinnvoll ist. Die meisten gefährlichen Myonen müssen, damit überhaupt Energie in den Germaniumdetektoren deponiert wird, in der Nähe dieses Experiment passieren. Wenn man noch die Winkelverteilungen aus den Abbildungen 43 und 44 der Myonen mitberücksichtigt wird deutlich, dass die durch die Myonen erzeugten Photonen zum großen Teil im unteren Bereich des Wassertanks zum ersten Mal auf die Photomultiplier treffen. Dies hatte sich bereits in den Photonintensitätskarten in den Abbildungen 48 und 49 gezeigt.

Aus diesem Grund wich die dritte Verteilung von dem isotropen Schema ab. Es wurden mehr Photomultiplier im unteren und weniger im oberen Bereich des Tanks untergebracht. Es wurden nur noch 74 Photomultiplier eingesetzt. Von diesen befanden sich vier in der Pillbox. 20 weitere Photomultiplier wurden in zwei Ringen mit jeweils zehn Photomultipliern auf dem Boden und 50 weitere in fünf Ringen an der Wand befestigt.

Auch mit dieser Verteilung wurden 216 der 220 gefährlichen Myonen detektiert, obwohl die Photomultiplier an der Decke weggelassen wurden. Um die Gesamtzahl an Kanälen weiter zu reduzieren und somit die Montage und die Wartung des Myonvetos zu vereinfachen wurde trotz der schon recht hohen Detektionsrate versucht, die Anzahl an Photomultiplier weiter zu reduzieren.

Diese Verteilung kam der endgültigen Verteilung sehr nahe. Der einzige Unterschied waren die nicht versetzten Photomultiplier und der zusätzliche Ring an Photomultipliern an der Wand, und die zwei fehlenden Photomultiplier in der Pillbox.

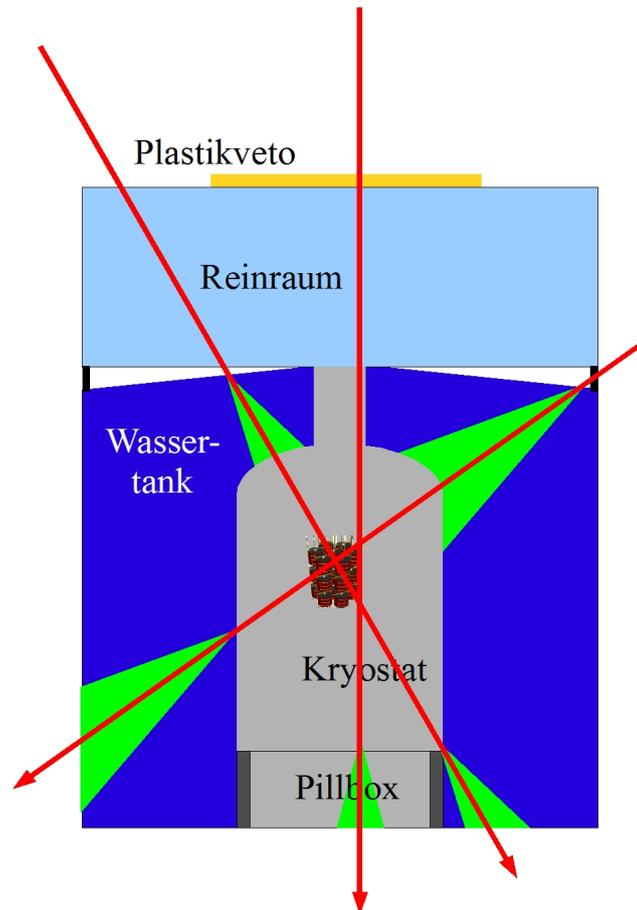


Abbildung 54: Skizze der Pfade von Klasse 2 gefährlichen Myonen. Man erkennt, dass die Myonen nahe den Germaniumdioden das Experiment passieren. Außerdem zeigt sich, wenn man die grün skizzierten Cherenkov-Kegel betrachtet, weshalb man die an der Decke angebrachten Photomultiplier nicht benötigt, und den unteren Teil des Wassertanks stärker mit Photomultipliern besetzen soll.

4.4 Verteilung IV

Hierfür wurde in dieser Verteilung einfach einer der Ringe an der Wand weggelassen und die übrigen erneut gleichmäßig über die Höhe des Wassertanks verteilt. Damit wurden nur

noch 40 Photomultiplier an der Wand, verteilt über vier Ringe mit jeweils zehn Photomultipliern, eingesetzt. Die Anzahl an Photomultipliern und deren Verteilung in der Pillbox und auf dem Boden wurde nicht verändert. Damit kamen in dieser Verteilung insgesamt 64 Photomultiplier zum Einsatz.

Die Detektionsrate dieser Verteilung wich nur minimal von der dritten Verteilung ab und es konnte immer noch 215 der 220 gefährlichen Myonen detektiert werden. Sie genügte damit ebenfalls den Anforderungen des GERDA-Experimentes an das Myonveto. Außerdem hatte sie den Vorteil, dass eine gewisse Reserve an eingekapselten Photomultipliern verfügbar war und einige Photomultiplier für einen Testaufbau in Tübingen verwendet werden konnten. Im Folgenden wurde diese Verteilung noch optimiert. Die Änderungen waren zum einen die Erhöhung der Photomultiplier in der Pillbox von vier auf sechs, um die Funktionstüchtigkeit dieser zu gewährleisten. Zum anderen wurden die Photomultiplier am Boden und an der Wand versetzt zueinander angebracht, wodurch der maximale Abstand zwischen zwei Photomultipliern verringert wurde.

5 Monte Carlo Campaign II

Die Monte Carlo Campaign II war eine große Simulation bei der alle an MAGE beteiligten Institute teilnahmen. Es wurden insbesondere Simulationen bezüglich des Untergrundes in den Germaniumdetektoren angefertigt. Dabei wurden alle Untergrundquellen berücksichtigt, wobei diese Arbeit den myoneninduzierten Untergrund beigetragen hat. Dabei wurde im Rahmen der Monte Carlo Campaign II wurde auch ein neues Datenset an Myonen aufgebaut, bei deren Simulation es zu einer Energiedeposition in den Detektoren kam.

Diese wurden dann in einer abschließenden Simulation in die Geometrie injiziert und mit aktivierten optischen Prozessen simuliert. Dabei wurde ebenfalls ein letztes Mal die Effizienz des Myonvetos bestimmt. Hierfür wurde erstmals die Geometrie der Phase II des GERDA-Experimentes verwendet. Es wurden insgesamt 40 Millionen Myonen simuliert, was in etwa 14 Jahren Laufzeit des GERDA-Experimentes entspricht.

Bei der verwendeten Geometrie handelt es sich um eine detailreiche Version der für die Monte Carlo Campaign I verwendeten Variante.

5.1 Erwartete Energiedepositionsspektren in den Germaniumkristallen durch kosmische Myonen

In Abbildung 55 ist nahezu das gesamte durch kosmische Myonen erzeugte Energiedepositionsspektrum in den Germaniumdetektoren dargestellt. Dabei werden teils Energien bis über drei GeV in den Kristallen deponiert. (Um die Kurve übersichtlich zu halten wurde das Binning der Energieachseinteilung größer gewählt, wodurch der Eindruck entsteht, dass deutlich mehr Ereignisse im niedrigen Bereich sind.)

In Abbildung 56 wurde nur noch der Bereich bis drei MeV des Spektrums betrachtet und in Abbildung 57 der Bereich um die 2039 keV Linie des neutrinolosen doppelten Betazerfalls gesondert dargestellt. In Abbildung 56 ist die 511 keV Linie der Elektron-Positron

Annihilation zu erkennen. Ansonsten ist der Untergrund bis auf den Anfangsbereich eine kontinuierliche Funktion ohne besonders ausgeprägte Linien. Dies liegt daran, dass beim Durchqueren der Myonen durch das Experiment eine Vielzahl an Wechselwirkungen stattfinden kann. Dabei werden dann verschiedenste Teilchen wie Photonen, Elektronen, Positronen erzeugt, welche dann wiederum in den Germaniumdetektoren Energie deponieren können. Die Myonen deponieren nur selten durch direkte Wechselwirkung mit den Kristallen Energie.

Abbildung 57 zeigt, dass durch Myonen in der direkten Umgebung der 2039 keV keine Linien erzeugt werden. Es handelt sich hier vielmehr um ein flaches Spektrum mit gleichmäßiger Verteilung.

Insgesamt hat die Phase II Simulation der Monte Carlo Campaign II gezeigt, dass die Myonen deutlich gefährlicher sind als ursprünglich angenommen. Durch sie alleine kann mehr Untergrund in den Germaniumkristallen induziert werden, als für das GERDA-Experiment erlaubt ist ohne den Untergrund durch andere Quellen zu berücksichtigen.

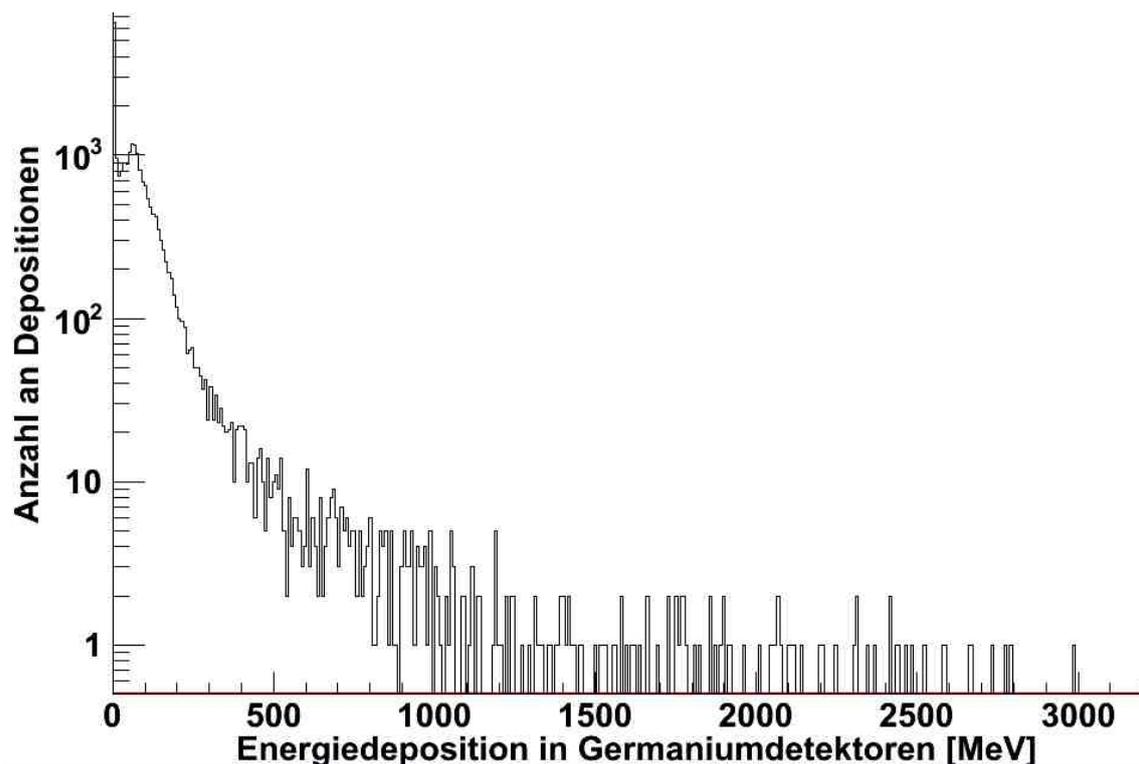


Abbildung 55: Gesamtes Spektrum der Energiedeposition in den Germaniumdetektoren von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments für den Bereich bis drei GeV für 14 Jahre des Experiments.

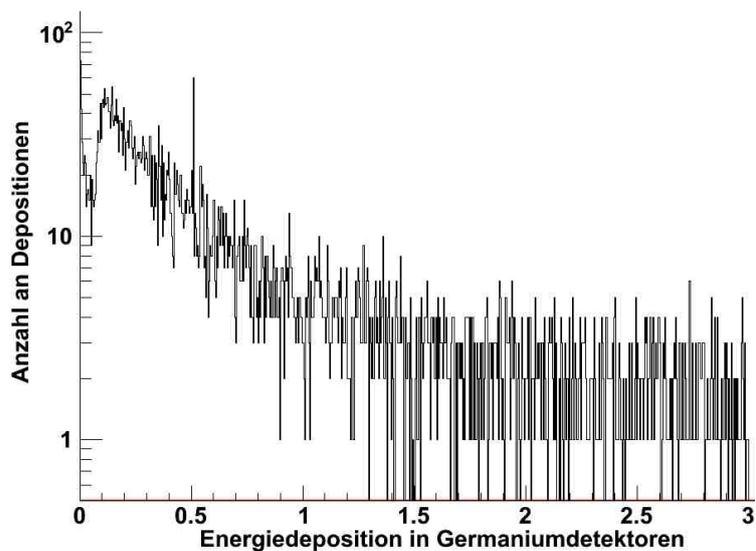


Abbildung 56: Spektrum der Energiedeposition in den Germaniumdetektoren von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments für den Bereich bis drei MeV für 14 Jahre des Experiments.

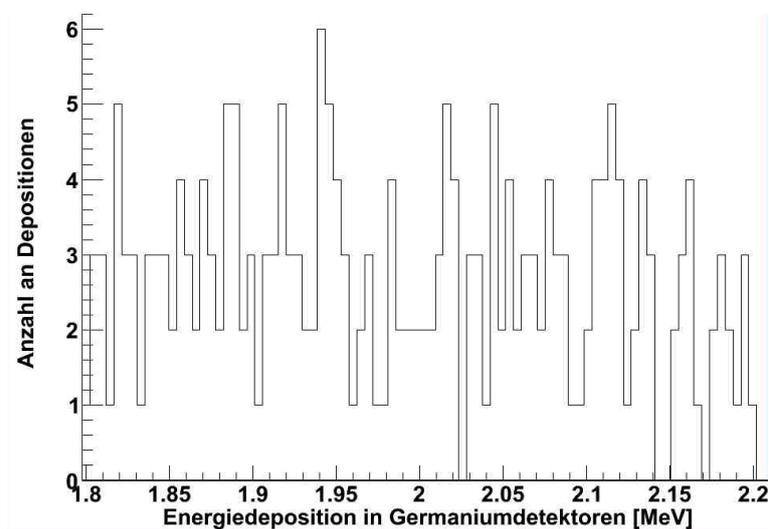


Abbildung 57: Energiedeposition in den Germaniumdetektoren von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments in der Umgebung der 2039 keV Linie des neutrinoselbständigen doppelten Betazerfalls für 14 Jahre des Experiments.

5.2 Optimierung der Triggerbedingungen

Mit den Daten der Monte-Carlo Campaign II und der endgültigen Verteilung der Photomultiplier kann nun die Triggerbedingung des Myonvetos optimiert werden. Von besonderem Interesse ist hier die Vetoeffizienz für verschiedene Triggerbedingungen und damit wie viele Photomultiplier gleichzeitig ein Photon sehen müssen, um das Myonveto auszulösen. Ebenfalls macht es die Verwendung der FlashADCs SIS3300⁸ von Struck (siehe Kapitel V.4) notwendig, die Photomultiplier in Gruppen von maximal acht zu sortieren. Hierfür wird ebenfalls eine optimale Lösung gesucht.

Bevor man sich jedoch für eine Triggerbedingungen entscheidet, müssen noch Überlegungen bezüglich der Dunkelrate und der Rate an zufälligen Koinzidenzen angestellt werden. Auch die Größe des Zeitfensters, in welchem man eine Koinzidenz zwischen mehreren Photomultipliern fordert, ist von Bedeutung.

5.2.1 Zwei mögliche Triggerbedingungen

Durch die Vorgaben des Myonvetos standen von Anfang an zwei mögliche Triggerverfahren zur Auswahl. Die erste basierte darauf, einzelne Photomultipliersignale direkt zu benützen, während die andere die internen Triggergeneratoren der verwendeten FADCs einsetzte.

- **Einzelne Photomultipliersignale als Trigger:**

Die erste Variante verwendet die einzelnen Signale der Photomultiplier und generiert über „Leading Edge Diskriminatoren“ ein Triggersignal. Dies hat den Vorteil, dass dabei relativ einfach eine beliebige Kombination von einzelnen Kanälen verwendet werden kann, um ein solches Signal zu erzeugen.

Im Fall des GERDA-Myonvetos hat sich angeboten, die Photomultiplier der Pillbox gesondert von den restlichen Photomultipliern zu betrachten. Dabei wird das Myonveto ausgelöst, wenn eine bestimmte Anzahl an Photomultiplier der Pillbox bzw. des restlichen Wassertanks ein Signal erzeugen.

Diese Variante hat aber auch einen entscheidenden Nachteil. Sie benötigt zusätzliche elektronische Komponenten. Dies würde bedeuten, dass jeder Kanal einen eigenen LED benötigt. Auf Grund dieser deutlich erhöhten Kosten wurden auch noch Alternativen überprüft.

- **FADCs als Trigger:**

Eine Alternative zu der im vorigen Abschnitt vorgestellten Variante ist es, das Triggersignal, welches intern von den FADCs erzeugt wird, zu verwenden. Diese Alternative hat den Vorteil, dass so gut wie keine zusätzliche Elektronik benötigt wird. Das Hauptproblem bei dieser Triggerung ist, dass die FADCs nur ein logisches UND aller Kanäle oder ein logisches ODER verarbeiten können. Der Trigger wird entweder nur dann generiert, wenn sämtliche Photomultiplier eines FADCs gleichzeitig ein Signal

⁸Die SIS33000 von Struck wurden ausgewählt, da die identischen FADCs auch bei der Datennahme der Germaniumdioden zum Einsatz kommen. Dies erleichtert die Kommunikation der beiden Systeme enorm. Außerdem können sich die beiden Datennahmen die selben Reservemodule teilen.

sehen oder aber wenn ein einzelner der acht ein Signal sendet.

Die Variante, bei der alle acht Photomultiplier feuern sollen hat jedoch ein Problem. Bei einer Abdeckung der Wassertankoberfläche von etwa 0,5% durch die Photomultiplier ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein einzelnes Myon acht Photomultiplier gleichzeitig auslöst. Noch unwahrscheinlicher ist es, dass es gerade die acht Photomultiplier sind, welche in den acht Kanälen eines einzelnen FADCs sind. Diese Variante fällt damit aus.

Für die Variante mit logischem ODER müssen die Photomultiplier so gruppiert werden, dass es möglichst wahrscheinlich ist, dass mehrere Photomultiplier von verschiedenen FADCs gleichzeitig ein Signal sehen. Die Gruppierung wird im Abschnitt IV.5.4 besprochen.

5.2.2 Zufällige Koinzidenzen

Eine weitere wichtige Größe, welche beachtet werden sollte, bevor man eine Entscheidung trifft, welches Triggerverfahren verwendet werden soll, sind die zufälligen Koinzidenzen, welche durch die Dunkelrate der Photomultiplier D entstehen (siehe Kapitel III.4.3.2). Im Folgenden soll nun die Rate an zufälligen Koinzidenzen für die möglichen Triggerbedingungen berechnet werden.

Allgemein berechnet sich die Rate an zufälligen Koinzidenzen D_C nach:

$$\begin{aligned} D_C &= \binom{F}{N} D^N \cdot (\Delta t)^{N-1} \\ &= \frac{F!}{N! \cdot (F-N)!} D^N \cdot (\Delta t)^{N-1} \end{aligned} \quad (\text{IV.8})$$

Dabei sind F die gesamte Anzahl an verwendeten Detektoren, aus denen jeweils N gleichzeitig ein Signal innerhalb eines Zeitfensters von Δt detektieren. Mit dieser Gleichung ist es nun möglich Aussagen über die beiden verschiedenen Triggervarianten zu treffen.

Dabei muss jedoch die erwartete Rate an Myonen berücksichtigt werden. Wenn man den Querschnitt des Wassertanks und die Rate von einem Myon pro Quadratmeter und Stunde berücksichtigt, erwartet man etwa zwei bis drei Myonen pro Minute zu detektieren. Die Rate an zufälligen Koinzidenzen sollte auf jeden Fall nicht deutlich über dieser Rate liegen.

- **Einzelne Photomultipliersignale als Trigger:**

Die Dunkelrate der eingesetzten Photomultiplier variiert sehr stark. Werte von 300 Hz bis zu 20 kHz treten auf. Es wird eine mittlere Dunkelrate von $D = 5000$ Hz angenommen, was einer internen Verstärkung von $5 \cdot 10^7$ eines Photomultipliers entspricht. Diese Dunkelrate fiel im realen Myonveto etwas geringer aus. Insgesamt werden im Myonveto $F = 66$ Photomultiplier zum Einsatz kommen, wobei zwischen den Pillbox Photomultipliern $F_P = 6$ und den Wassertank Photomultipliern $F_W = 60$ unterschieden werden muss.

Tabelle 8: Raten in Hz für zufällige Koinzidenzen bei verschiedenen Triggerbedingungen für die sechs Pillbox Photomultiplier. N entspricht dabei der Zahl an geforderten Photomultipliersignalen.

$\Delta t \backslash N$	2	3	4
20 ns	7,5	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$
30 ns	11,3	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
40 ns	15,0	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$
50 ns	18,8	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$

Betrachtet man Formel (IV.8), erkennt man sofort, dass die Rate an zufälligen Koinzidenzen in der Pillbox auf Grund der niedrigeren Potenz des Zeitfensters Δt^{N-1} dominieren wird. In Tabelle 8 sind Raten für zufällige Koinzidenzen für verschiedene Zeitfenster und geforderten Anzahlen an Signalen der Pillbox Photomultiplier zusammengefasst. Bei einer Rate von zwei bis drei Myonsignalen pro Minute ist es wichtig, diese Rate nicht um mehr als 10 Prozent weiter zu erhöhen. Die Rate an zufälligen Koinzidenzen sollte also 3,3 Millihertz nicht überschreiten. Somit erkennt man, dass erst ab mindestens drei Photomultipliersignalen die Rate an zufälligen Koinzidenzen akzeptabel ist. Dies ist allerdings eine recht starke Forderung, da hiermit drei von sechs, also 50 % aller Photomultiplier der Pillbox ein Signal sehen müssen.

- **FADCs als Trigger:**

Bei der zweiten Variante werden die insgesamt 66 Photomultiplier auf zehn FADCs verteilt. In Abschnitt IV.5.4 wird eine Gruppierung gewählt, die eine gesamte Dunkelrate von $D_{FADC} = 17.900$ Hz pro FADC erreichen wird. Formel (IV.8) sieht nun folgendermaßen aus:

$$\begin{aligned}
 D_C &= \binom{F}{N} D_{FADC}^N \cdot (\Delta t)^{N-1} \\
 &= \frac{F!}{N! \cdot (F-N)!} D_{FADC}^N \cdot (\Delta t)^{N-1}
 \end{aligned} \tag{IV.9}$$

Nun ist F die Gesamtzahl an FADCs und N die Anzahl an gefeuerten FADCs. In Tabelle 9 sind Raten für zufällige Koinzidenzen für verschieden lange Zeitfenster gegeben, in denen eine Koinzidenz zwischen einer bestimmten Anzahl an FADCs gefordert wird.

Erneut darf die Rate an Myonen nicht um mehr als zehn Prozent erhöht werden, weshalb man erkennt, dass mindestens eine Koinzidenz zwischen drei Flash ADCs verlangt werden muss.

Tabelle 9: Raten in Hz für zufällige Koinzidenzen bei verschiedenen Triggerbedingungen für zehn verwendete Flash ADCs. N entspricht der Anzahl an verlangten FADCs für einen Trigger.

$\Delta t \backslash N$	2	3	4	5
20 ns	84,4	$4,47 \cdot 10^{-2}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$3,45 \cdot 10^{-9}$
30 ns	127	$9,83 \cdot 10^{-2}$	$5,78 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$
40 ns	169	$1,76 \cdot 10^{-1}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-8}$
50 ns	211	$2,73 \cdot 10^{-1}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-7}$

5.2.3 Größe des Zeitfensters für die Triggerbedingung

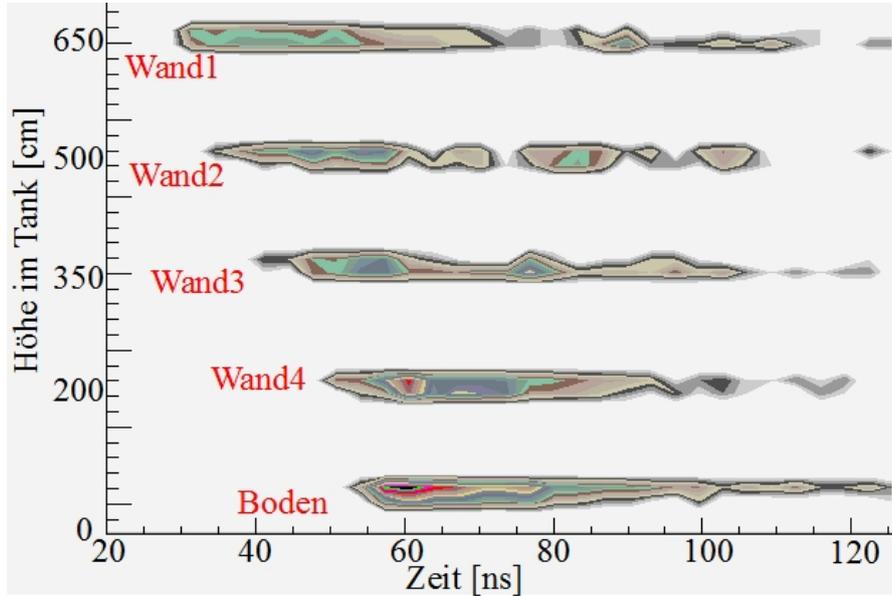


Abbildung 58: Intensität der detektierten Photonen in Abhängigkeit von der Zeit für alle 60 Photomultiplier in dem Wassertank des GERDA-Myonvetos. Man erkennt, dass die Detektoren im oberen Bereich früher von Photonen getroffen werden, als die Photomultiplier am Boden.

Nachdem nun klar ist, dass mindestens drei Photomultiplier oder drei FADCs als Triggerbedingung notwendig sein werden, muss noch geklärt werden, wie groß die Zeitfenster sein müssen, damit genügend Photonen innerhalb dieser registriert werden. Hierfür kann man die zeitliche Verteilung der Ankunft von Photonen auf den Kathoden der einzelnen Photomultiplier betrachten.

In Abbildung 58 ist die Intensität der ankommenden Photonen für alle Photomultiplier des Myonvetos, abgesehen von den sechs Photomultipliern in der Pillbox, dargestellt. Man erkennt, dass die Photomultiplier im oberen Bereich des Wassertanks bereits wenige Nanosekunden nach dem Generieren des initialen ($t = 0$ ns) Myons Cherenkov-Photonen detektieren. Etwa alle fünf Nanosekunden später beginnen die Photomultiplier des jeweils nächst tiefer gelegenen Rings von Photonen getroffen zu werden. Dies entspricht ziemlich genau der Zeit, die das Myon benötigt, um die Strecke von 150 Zentimetern zurück zu legen, wenn es mit nahezu Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 das Wasser durchquert.

Hier ist ebenfalls zu erkennen, dass die Intensität im unteren Bereich, insbesondere etwa zehn Nanosekunden nach dem Eintreffen der ersten Photonen, deutlich ansteigt. Hierbei handelt es sich um Photonen die im oberen Bereich des Wassertanks erzeugt wurden. Diese treffen innerhalb der nächsten 30 ns bis 40 ns ein.

Zuletzt zeigt sich noch, dass in den oberen beiden Ringen eine kleine Unterbrechung der Intensität zu sehen ist. Bei dieser zweiten *Welle* handelt es sich um von der VM2000-Folie am Boden reflektierte Photonen, welche erst ungefähr 45 ns nach den ersten Photonen wieder im zweiten Ring, beziehungsweise nach 55 ns im ersten Ring eintreffen. Man erkennt bereits hier, dass ein Großteil der Photonen innerhalb eines engen Zeitfensters eintrifft.

Dies wird noch deutlicher, wenn man Abbildung 59 betrachtet. Hier ist der zeitliche Verlauf der Intensität über alle Photomultiplier aufsummiert. Man erkennt, dass etwa 80% aller Photonen in einem kleinen Bereich von nur 30 ns (rot schraffierter Bereich) von den Photomultipliern detektiert werden.

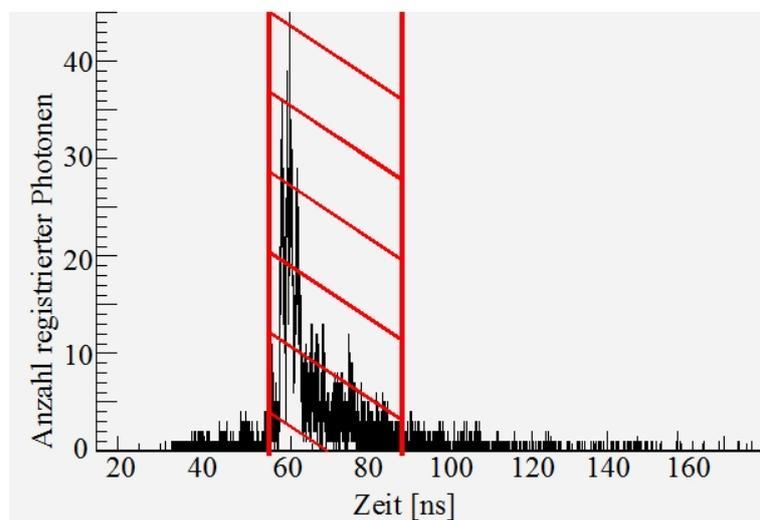


Abbildung 59: Intensität der detektierten Photonen eines einzelnen Photomultipliers in Abhängigkeit von der Zeit. Man erkennt, dass ein Großteil der Photonen innerhalb eines Zeitfensters von etwa 30 ns auf der Kathode des Photomultiplier eintreffen (rot markierter Bereich).

Abbildung 59 zeigt sich ein anderes Problem. Wenn man ein Zeitfenster öffnet, wenn ein FADC ein Signal gesehen hat, muss man weiterhin für jedes weitere Signal ebenfalls solche Zeitfenster öffnen. Sollte man dies nicht machen, kann es passieren, dass ein Signal, welches noch in das erste Zeitfenster fällt, nicht für zwei nachfolgende Signale mitgezählt wird, die nur in das zweite aber nicht in das erste Fenster fallen. Dies ist in Abbildung 60 skizziert. Man erkennt, dass das zweite Signal für die Triggeregenerierung wichtig ist, obwohl es im ersten Zeitfenster nicht zu einem Trigger kam. Erst wenn man das zweite Signal zusammen mit dem dritten und vierten Signal berücksichtigt, wird ein Trigger generiert. Man muss also immer, wenn ein Photomultiplier ein Photon detektiert, ein neues Fenster öffnen. Erst wenn in einem Fenster zwei weitere FADCs oder Photomultiplier ebenfalls ein Signal detektiert haben, kann man das Myon als detektiert ansehen und ein Vetosignal an die Germaniumdioden schicken. Man kann also zusammenfassen, dass ein Zeitfenster von 30 bis 50 Nanosekunden ein ausreichend großes Fenster ist um einen Großteil der von einem Myon erzeugten Cherenkov-Photonen zu detektieren.

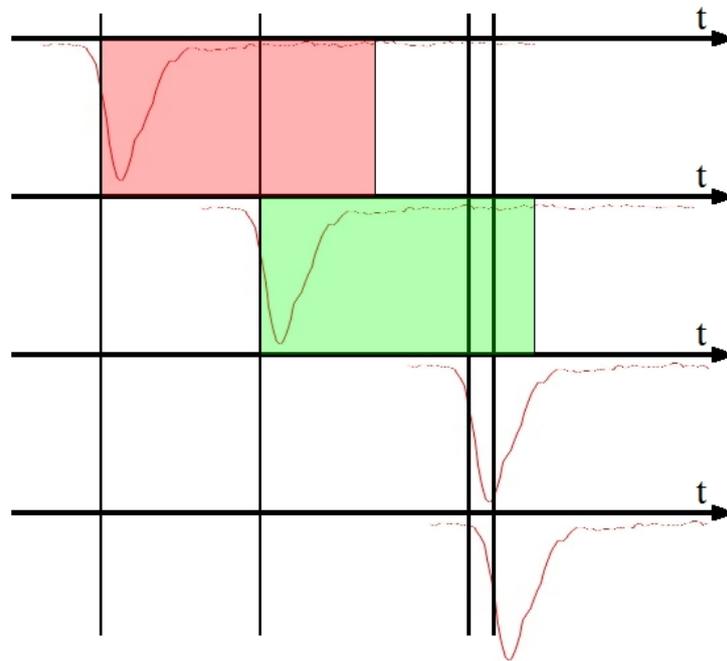


Abbildung 60: Zur Generierung von Zeitfenstern für die Triggeregenerierung für eine dreifache Koinzidenz. In rot ist ein Zeitbereich dargestellt, welcher nicht zur Generierung eines Triggers geführt hat, während in grün ein Fenster dargestellt ist, welches einen Trigger erzeugt hat.

5.3 Myonveto-Effizienzstudien für die verschiedenen Triggerbedingungen

Nachdem nun die Größe des Zeitfensters für koinzidente Signale und die, auf Grund der zufälligen Koinzidenzen, minimale Anzahl an notwendigen Photomultiplier- oder FADC-Signalen geklärt ist, soll nun eine Entscheidung für das schlussendlich verwendete Triggerverfahren getroffen werden. Hierfür werden die vorraussichtlichen Myonvetoeffizienzen für die beiden Triggerschemata berechnet. Dabei werden immer für zwei Zeitfenster (30 ns und 50 ns) die Detektionseffizienzen bestimmt.

Man sollte jedoch immer, wenn man diese Zahlen betrachtet, im Hinterkopf behalten, dass diese Simulationen fehlerbehaftet sein können. Insbesondere besteht die Möglichkeit, dass Datenbanken nicht vollständig oder sogar fehlerhaft sein können, was bei normaler Verwendung der Software nur durch Zufall oder eben gar nicht bemerkt werden kann.

Aus diesem Grund wurde nach der Berücksichtigung der Quanteneffizienz der Photomultiplier von 20 % noch einmal jedes zweite Photon nicht berücksichtigt, wodurch die Ergebnisse sehr konservativ sind. Im besten Fall sind die Simulationen sogar sehr genau und man kann im realen Myonveto nicht auf Einzelphotoelektronen triggern, sondern auf Zweiphotoelektronen. Dies würde die Rate an zufälligen Koinzidenzen auf nahezu Null reduzieren, da die Dunkelrate der Photomultiplier von Einzelphotoelektronen bestimmt ist. Im schlechtesten Fall würde die Anzahl der detektierten Photonen um einen Faktor zwei abweichen, was dann aber schon berücksichtigt wäre.

Aus diesen Gründen ist die Angabe des statistischen Fehlers gegebenenfalls nicht vollständig, da er nicht der einzige Fehler ist. Der systematische Fehler aus den Simulationen kann nicht mitberücksichtigt werden.

Es wurden in dieser Phase insgesamt 40 Millionen Myonen, was etwa 14 Jahren an Laufzeit entspricht simuliert. Von diesen hatten 56252 Myonen eine Energiedeposition in den Germaniumdetektoren und wurden für die Effizienzstudien erneut simuliert. Anhand dieser wurde dann die Effizienz für das Myonveto, bezüglich Myonen, welche Energie in den Germaniumdetektoren deponiert haben, bestimmt.

5.3.1 Einzelne Photomultipliersignale als Trigger

Die Effizienz des Myonvetos bei dieser Triggervariante würde über 99 % betragen. Dabei weichen die Ergebnisse, welche in den Tabellen 10 und 11 dargestellt sind, für die beiden verschiedenen Zeitfenster nur unwesentlich voneinander ab, was sich ja bereits im vorhergehenden Abschnitt über die Größe der Zeitfenster angedeutet hat. Man erkennt ebenfalls, dass die Effizienz des Wassertanks allein nur etwa 80 % beträgt. Dies ist deutlich unterhalb der Anforderungen an das Myonveto, weshalb die Pillbox unbedingt erforderlich ist.

Tabelle 10: Zusammenfassung: Einzelne Photomultipliersignale als Triggerbedingung des GERDA-Myonvetos für ein Zeitfenster von 30 ns. Insgesamt wurden 56252 Myonen mit Energiedeposition in den Germaniumdetektoren simuliert. Dies entspricht insgesamt 40 Millionen Myonen und damit knapp 14 Jahren.

Pillbox		Wassertank		Gesamte
# PMTs	Effizienz [%]	# PMTs	Effizienz [%]	Effizienz [%]
2	38,2	5	81,9	$99,6 \pm 0,42$
2	38,2	6	79,8	$99,5 \pm 0,42$
2	38,2	7	78,0	$99,3 \pm 0,42$
3	37,2	5	81,9	$99,4 \pm 0,42$
3	37,2	6	79,8	$99,2 \pm 0,42$
3	37,2	7	78,0	$99,1 \pm 0,42$
4	36,9	5	81,9	$99,4 \pm 0,42$
4	36,9	6	79,8	$99,2 \pm 0,42$
4	36,9	7	78,0	$99,1 \pm 0,42$

Tabelle 11: Zusammenfassung: Einzelne Photomultipliersignale als Triggerbedingung des GERDA-Myonvetos für ein Zeitfenster von 50 ns. Insgesamt wurden 56252 Myonen mit Energiedeposition in den Germaniumdetektoren simuliert. Dies entspricht insgesamt 40 Millionen Myonen und damit knapp 14 Jahren.

Pillbox		Wassertank		Gesamte
# PMTs	Effizienz [%]	# PMTs	Effizienz [%]	Effizienz [%]
2	38,4	5	81,9	$99,6 \pm 0,42$
2	38,4	6	80,5	$99,5 \pm 0,42$
2	38,4	7	78,6	$99,3 \pm 0,42$
3	37,7	5	81,9	$99,5 \pm 0,42$
3	37,7	6	80,5	$99,3 \pm 0,42$
3	37,7	7	78,6	$99,2 \pm 0,42$
4	37,2	5	81,9	$99,4 \pm 0,42$
4	37,2	6	80,5	$99,2 \pm 0,42$
4	37,2	7	78,6	$99,1 \pm 0,42$

5.3.2 FADCs als Trigger

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Effizienzstudien für die Triggervariante mit FADCs zusammengefasst. Es zeigt sich, dass eine Vergrößerung des Zeitfensters, wie bereits in Abschnitt IV.5.2.3 besprochen, auf 50 ns nicht notwendig ist. Die Verbesserung der Effizienz

ist minimal. Insbesondere bei drei bis fünf FADCs als Triggerschwelle ergibt sich nur eine minimale Verbesserung der Effizienz. Erst bei sechs oder sieben FADCs als Schwelle zeigt sich eine deutliche Verbesserung bei der Erhöhung der Effizienz durch das längere Zeitfenster. Dies sind jedoch sehr starke Schwellen, weshalb sie nicht verwendet werden sollten. Bei diesen würde auch die Effizienz des Myonvetos deutlich reduziert werden.

Abgesehen von den beiden letzten Schwellen haben alle Varianten eine Effizienz von beinahe 99 % oder sogar von fast 100 %. Von den hier vorgestellten Simulationsdaten ausgehend haben sich die beiden Varianten, bei der drei oder vier FADCs als Schwelle eingesetzt werden, hervorgetan. Wenn man ein Zeitfenster von 30 ns für diese Varianten verwendet, würden sich Effizienzen von 99,85 % und 99,56 % ergeben. Beide erfüllen damit die Anforderungen an das Myonveto.

Ebenfalls ist die Rate von $6,16 \cdot 10^{-1}$ Hz beziehungsweise $5,78 \cdot 10^{-4}$ Hz an zufälligen Koinzidenzen in beiden Fällen akzeptabel, wobei die zweite Variante auf Grund der deutlich geringeren Rate bevorzugt werden sollte, um die Totzeit des Experimentes nicht unnötig zu erhöhen. Welche der beiden Varianten letzten Endes gewählt wird, wird sich nach dem Einbau des Myonvetos zeigen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass eine Effizienz von über 99 % für das fertiggestellte Myonveto erreichbar sein sollte.

Es hat sich gezeigt, dass eine Triggervariante mit mindestens drei oder vier FADCs bei einer Länge eines Zeitfensters von 30 Nanosekunden ausreichen sollte. Wie genau sich die Energiedepositionsspektren der Myonen bei den verschiedenen Varianten verhalten wird sich in Abschnitt IV.6 zeigen.

Tabelle 12: Zusammenfassung: Mehrere FADCs als Triggerbedingung des GERDA-Myonvetos für verschiedene Zeitfenster. Insgesamt wurden 56252 Myonen mit Energiedeposition in den Germaniumdetektoren simuliert. Dies entspricht insgesamt 40 Millionen Myonen und damit knapp 14 Jahren.

# FADCs	Zeitfenster [ns]	Myonen detektiert	Effizienz [%]
3	30	56163	$99,84 \pm 0,42$
3	50	56172	$99,86 \pm 0,42$
4	30	56005	$99,56 \pm 0,42$
4	50	56042	$99,63 \pm 0,42$
5	30	55545	$98,74 \pm 0,42$
5	50	55725	$99,06 \pm 0,42$
6	30	53861	$95,75 \pm 0,43$
6	50	54840	$97,49 \pm 0,43$
7	30	39186	$69,66 \pm 0,51$
7	50	41029	$72,94 \pm 0,51$

5.4 Gruppierung der Photomultiplier für die Datennahme

Zum Schluss dieses Abschnitts soll noch dargelegt werden, wie die Photomultiplier in den FADCs gruppiert wurden. Insgesamt werden für diese Auslese des GERDA-Myonvetos zehn FADCs zur Verfügung stehen. Dabei ist der Grundgedanke hinter der Gruppierung, dass vermieden wird, dass bei einem Ereignis mit wenig feuernden Photomultipliern, diese größtenteils von einem einzelnen FADC ausgelesen werden. Deshalb liegt nahe, die Photomultiplier eines einzelnen FADCs mit möglichst großem Abstand zueinander auszuwählen.

Damit liegt nahe, dass die Photomultiplier der Pillbox von verschiedenen FADCs ausgelesen werden müssen. Wenn alle von demselben FADC ausgelesen werden würden, würde das Myonveto nie ausgelöst werden, wenn Myonen senkrecht von oben kommen, ohne einen gewissen Weg im Wassertank selbst zurückgelegt zu haben und somit auch andere FADCs auszulösen.

Die restlichen Photomultiplier werden auf die sieben Kanäle der ersten sechs und die 32 Kanäle der restlichen vier FADCs verteilt. Damit bleiben am Ende 14 Kanäle unbesetzt. Dies bedeutet zwar, dass im Prinzip ein FADC eingespart hätte werden können, jedoch ist die Dunkelrate auf diese Art geringer und die optimale Verteilung der Photomultiplier leichter zu realisieren.

Die Verteilung auf die einzelnen FADCs ist in den Abbildungen IV.61(a) und IV.61(b)

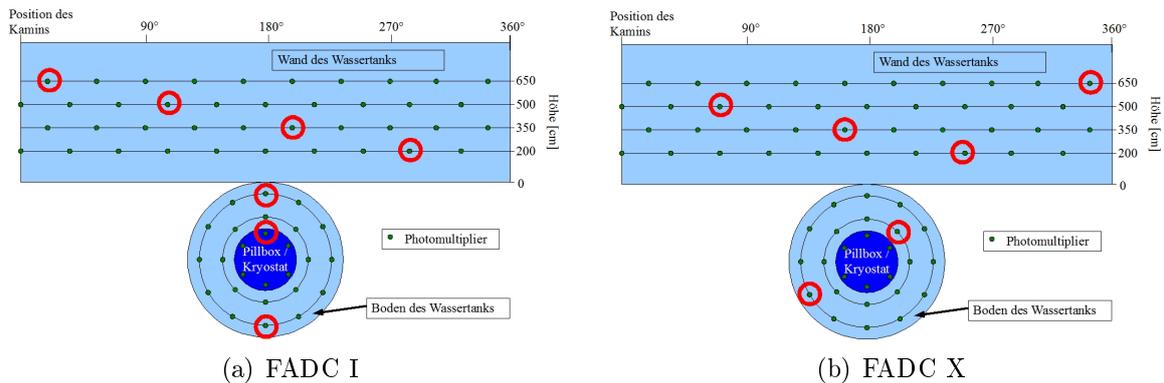


Abbildung 61: Zwei Gruppen an Photomultipliern welche in den FADCs I und X verarbeitet werden. Die jeweils eingekreisten Photomultiplier werden von den entsprechenden FADCs ausgelesen.

skizziert. Dabei steht der FADC I exemplarisch für die ersten sechs FADCs, auf welche die Pillbox Photomultiplier verteilt sind. FADC X repräsentiert die übrigen vier FADCs. Alle FADCs enthalten vier Photomultiplier von der Wand des Wassertanks, wobei jeweils einer aus jedem Ring ausgewählt wird. Hierbei wird darauf geachtet, dass immer 90° zwischen den vier Photomultipliern liegen. Es werden danach noch jeweils zwei Photomultiplier vom Boden ausgewählt, wobei auch hier darauf geachtet wird, dass ein möglichst großer Abstand zwischen allen Photomultipliern (auch denen vom unteren Ring der Wand) eingehalten wird. Eine Ausnahme bilden hierbei, wie bereits erwähnt, die sechs Photomultiplier

der Pillbox. Diese werden einfach auf den jeweils ersten Kanal der FADCs I-VI verteilt. Ein weiterer Punkt, der berücksichtigt werden sollte, ist, dass die Dunkelrate der FADCs ungefähr gleich groß ist. Hier konnte eine mittlere Dunkelrate von etwa 17.900 Hertz mit einer maximalen Abweichung von 100 Hertz für einen einzelnen FADC realisiert werden, indem entsprechende Photomultiplier ausgewählt wurden.

5.5 Beispiel der Triggerung des Myonvetos

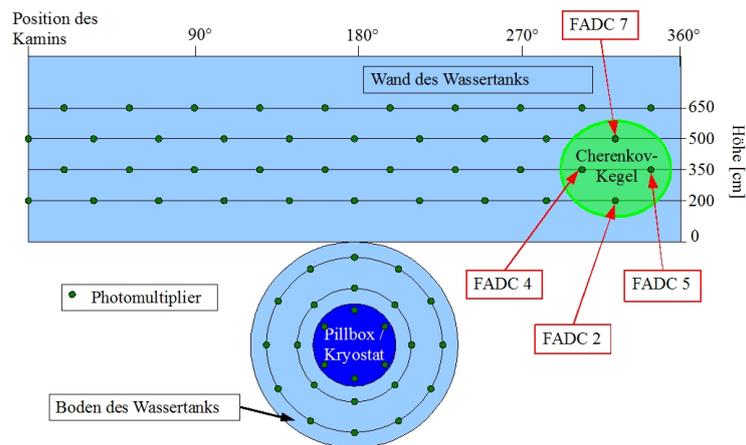


Abbildung 62: Beispiel für vier von einem Cherenkov-Kegel beleuchteten Photomultiplier und den entsprechend getriggerten FADCs.

In Abbildung 62 erkennt man, wie vier zusammen liegende Photomultiplier von einem, durch ein Myon erzeugten, Cherenkov-Kegel angeleuchtet werden. Es sollten, wenn man die Abbildungen 58 und 59 berücksichtigt, etwa zehn Nanosekunden nachdem der oberste Photomultiplier die ersten Cherenkov-Photonen detektiert, auch die übrigen Photomultiplier ein Signal erzeugen. Dies geschieht also auf jeden Fall in dem 30 Nanosekunden Zeitfenster der Triggerlogik.

In diesem speziellen Fall würde, auf Grund der Verteilung der Photomultiplier auf die FADCs, dieses Myon die FADCs 2,4,5 und 7 auslösen. Dies würde die Schwelle der Triggerlogik überschreiten und damit die Datennahme des Myonvetos auslösen. Gleichzeitig würde ein Signal an die Germaniumdetektoren geschickt werden.

6 Myoneninduziertes Spektrum der Germaniumdetektoren nach dem Myonveto

Nachdem nun sowohl der durch Myonen induzierte Untergrund in den Germaniumkristallen bestimmt und die Effizienz des Myonvetos berechnet wurde, soll in diesem Abschnitt untersucht werden, in wie weit das Myonveto den Untergrund in den Germaniumdetektoren reduzieren kann. Hierfür ist offensichtlich der Bereich um die 2039 keV des neutrinolosen doppelten Betazerfalls von besonderem Interesse. In Abbildung 63 ist dieser noch einmal dargestellt.

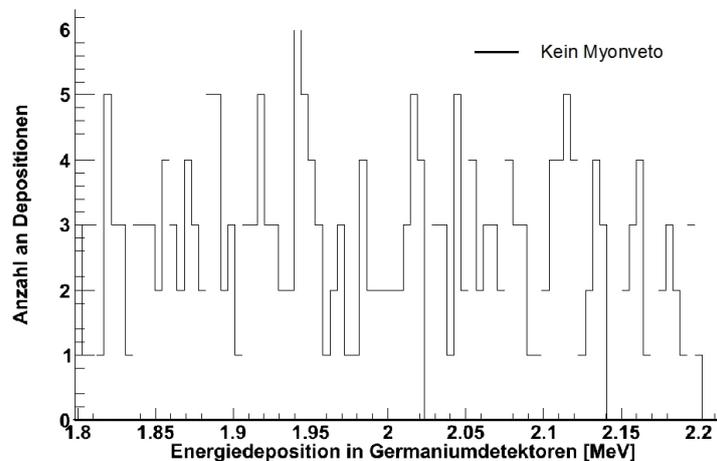


Abbildung 63: Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments für den Bereich um 2039 keV.

Für die folgenden Spektren wurde davon ausgegangen, dass die Photomultiplier entsprechend der in Abschnitt IV.5.4 verwendeten Verteilung auf die verschiedenen FADCs gruppiert wurden. Außerdem wurden Zeitfenster für die Koinzidenzen von 30 ns verlangt. Dabei wurde sukzessive die Forderung an die Anzahl an getriggerten FADCs erhöht. Dies ist in den Abbildungen 64 bis 68 dargestellt.

Man erkennt bei jeder der simulierten Triggervarianten eine deutliche Reduktion des Untergrundes in der Umgebung des erwarteten Zerfalls. Insbesondere in Abbildung 64 für den Bereich um die 2039 keV Linie des neutrinolosen doppelten Betazerfalls wurden alle zu Energiedeposition führenden Myonen detektiert. Bei diesem Spektrum handelt es sich um die bereits aus den Effizienzstudien favorisierte Triggervariante mit drei FADCs und einem Koinzidenzfenster von 30 ns.

Ebenfalls bei den Abbildungen 65 und 66 ist die Untergrundreduktion ausreichend. Dies ist wichtig für den Fall, dass die Rate an zufälligen Koinzidenzen doch höher ist, als durch die Messungen der Dunkelrate der Photomultiplier vermutet. Dann kann immer noch auf

eine Variante mit einer höheren Triggerschwelle mit mehr FADCs umgeschwenkt werden. Erst ab einer Schwelle von sechs oder mehr FADCs beginnt der Untergrund signifikant anzusteigen. Dies ist in der Abbildung 67 dargestellt, aber selbst hier ist der Untergrund noch sehr niedrig. Bei der Forderung, dass sieben FADCs gleichzeitig ein Signal sehen, zeigt sich jedoch eine deutliche Zunahme des nicht detektierten Untergrundes in Abbildung 68. Dies ist jedoch eine sehr starke Triggerbedingung, denn es gibt insgesamt nur zehn FADCs. Damit würde diese Schwelle 70 % der FADCs entsprechen.

Bleibt noch die Frage zu klären, in wie weit sich dies auf das GERDA-Experiment auswirken wird. Der durch Myonen eingebrachte Untergrund für die verschiedenen Triggerbedingungen ist in Tabelle 13 aufgeführt. Man erkennt, dass im Prinzip die aus Abbildung 10 bekannten Anforderungen an das Experiment von $10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{Jahr}}$ für Phase I und $10^{-4} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{Jahr}}$ für Phase II problemlos für alle bis auf die letzten beiden Triggerschwellen erfüllt sind. Sollte also die Variante mit einer Schwelle von drei FADCs eingesetzt werden, wird der Untergrund durch kosmische Myonen ausreichend unterdrückt und identifiziert.

Tabelle 13: Untergrund durch kosmische Myonen für verschiedene Triggerschwellen für die Anzahl an gefeurten FADCs. Es wird die in Kapitel IV.5.4 verwendeten Verteilung der Photomultiplier und ein Zeitfenster von 30 ns angenommen.

Triggerschwelle	Untergrund $[\frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{Jahr}}]$
kein Myonveto	$(1,02 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$
3	$(0 \pm 0,22) \cdot 10^{-8}$
4	$(8,93 \pm 0,04) \cdot 10^{-6}$
5	$(1,34 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
6	$(3,57 \pm 0,01) \cdot 10^{-5}$
7	$(3,39 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$

Zum Abschluss ist noch in Abbildung 69 der Vergleich des gesamten Energiespektrums des durch Myonen induzierten Untergrundes mit dem Untergrund, welcher nach Anwendung des Myonvetos übrig bleibt, dargestellt. Man erkennt, dass nahezu der gesamte Untergrund verschwindet, was sich auch mit den bereits erwarteten Detektionsraten von über 99 % deckt.

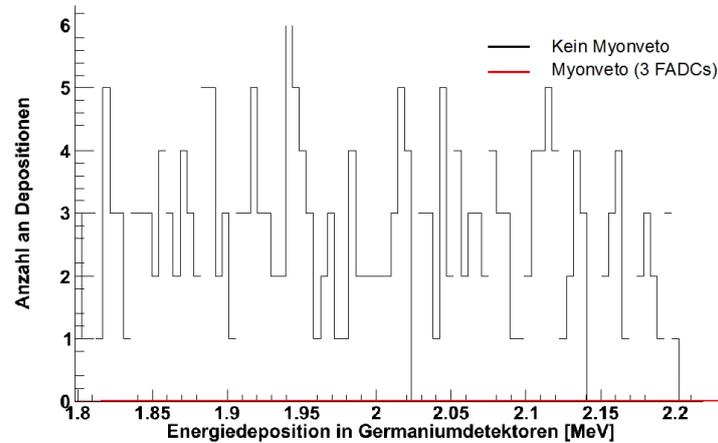


Abbildung 64: Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments, nachdem das Myonveto mit einer Schwelle von 3 FADCs eingesetzt wurde für die simulierten 14 Jahre für den Bereich um 2039 keV. Im Vergleich dazu in schwarz, das Spektrum ohne Myonveto.

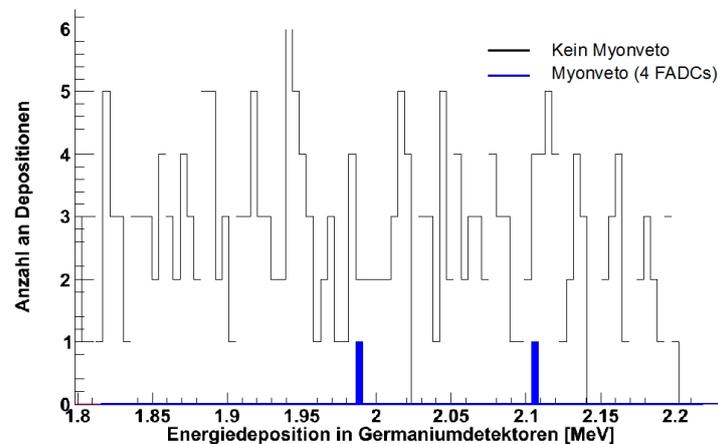


Abbildung 65: Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments, nachdem das Myonveto mit einer Schwelle von 4 FADCs eingesetzt wurde für die simulierten 14 Jahre für den Bereich um 2039 keV. Im Vergleich dazu in schwarz, das Spektrum ohne Myonveto.

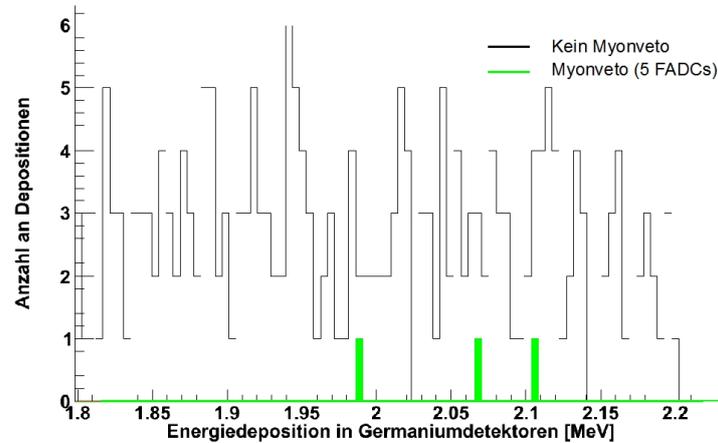


Abbildung 66: Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments, nachdem das Myonveto mit einer Schwelle von 5 FADCs eingesetzt wurde für die simulierten 14 Jahre für den Bereich um 2039 keV. Im Vergleich dazu in schwarz, das Spektrum ohne Myonveto.

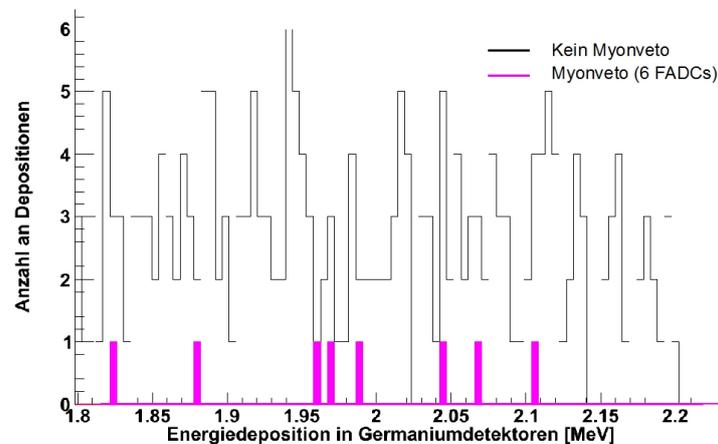


Abbildung 67: Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments, nachdem das Myonveto mit einer Schwelle von 6 FADCs eingesetzt wurde für die simulierten 14 Jahre für den Bereich um 2039 keV. Im Vergleich dazu in schwarz, das Spektrum ohne Myonveto.

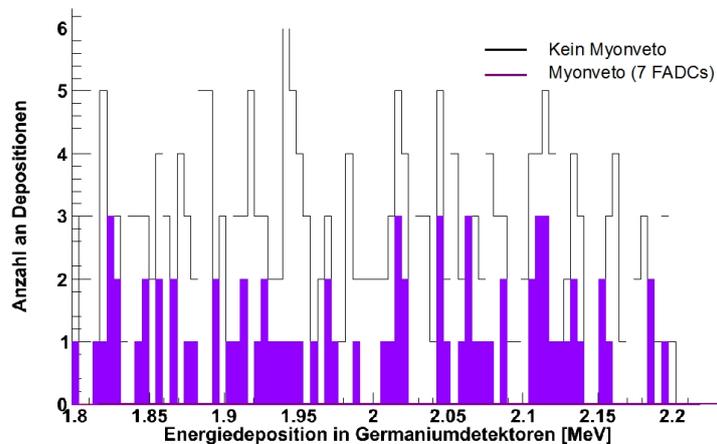


Abbildung 68: Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments, nachdem das Myonveto mit einer Schwelle von 7 FADCs eingesetzt wurde für die simulierten 14 Jahre für den Bereich um 2039 keV. Im Vergleich dazu in schwarz, das Spektrum ohne Myonveto.

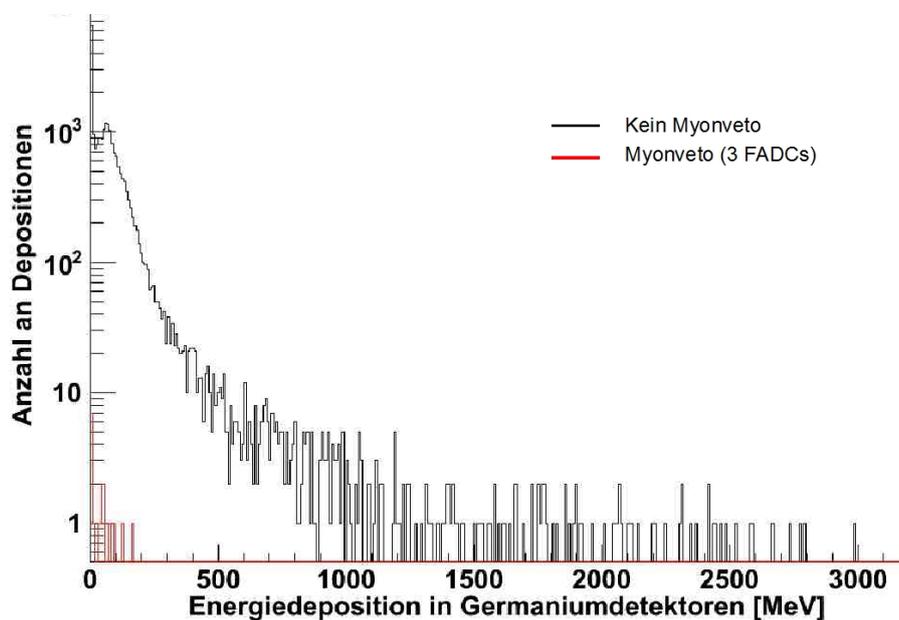


Abbildung 69: Gesamte Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments, nachdem das Myonveto mit einer Schwelle von 3 FADCs eingesetzt wurde für die simulierten 14 Jahre für den Bereich bis 3000 MeV.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulationen

Zu Beginn dieser Dissertation war die erste Aufgabe, ein Myonveto für das GERDA-Experiment zu entwerfen. Hierfür gab es einige Rahmenbedingungen wie die Verwendung des Wassertanks als Cherenkov-Veto oder die maximal mögliche Anzahl an Photomultipliern. Um ein möglichst effizientes Veto zu entwickeln, wurden umfangreiche Studien in dem MAGE-Framework (siehe Abschnitt IV.1.3) angestellt.

In diesen Simulationen wurden Myonen in eine möglichst exakte Geometrie des GERDA-Experimentes injiziert. Dabei wurde das in Halle A des LNGS gemessene Myonenspektrum als Energie- und Winkelverteilung verwendet. Diese Myonen wurden nach einer ersten Simulation ohne aktivierten Cherenkoeffekt in verschiedene Klassen unterteilt um die notwendige Simulationszeit zu reduzieren (siehe Abschnitt IV.3.2). Dabei wurde zwischen vier verschiedenen Klassen unterschieden:

- Klasse 0: Myonen ohne Einschränkung.
- Klasse 1: Myonen mit einer Energiedeposition in den Germaniumdetektoren.
- Klasse 2: Myonen mit einer Energiedeposition mit einer Energie in der Nähe des neutrinolosen doppelten Betazerfalls.
- Klasse 3: Myonen mit einer ausreichend räumlich lokalisierten Energiedeposition in der Größenordnung des neutrinolosen doppelten Betazerfalls.

Dabei sind die höheren Klassen immer Teilmengen der niedrigeren Klassen. Mit den Klasse 2 Myonen wurden Intensitätskarten für Photonen innerhalb des Wassertanks angefertigt um einen ersten Eindruck für die Positionen der Photomultiplier zu erhalten (siehe Abschnitt 3.3).

In den nun folgenden Studien wurde die optimale Verteilung für die Photomultiplier im Wassertank gesucht. Hierbei hat sich gezeigt, dass es notwendig ist, das kleine Volumen unterhalb des Kryostaten gesondert zu betrachten und dort einige Photomultiplier unterzubringen. Ebenfalls hat sich die Verwendung der Reflektorfolie VM2000 gegenüber dem Einsatz von zehn zusätzlichen Photomultipliern, auf Grund der nahezu verdoppelten Anzahl an erzeugten Photonen im sensitiven Bereich der Photomultiplier, durchgesetzt. Insgesamt wurden 66 Photomultiplier im Wassertank platziert. 40 Stück wurden an der Wand, 20 Stück am Boden und 6 Stück in der Pillbox angebracht. Dabei wurde eine möglichst isotrope Verteilung mit versetzt angebrachten Positionen gewählt (siehe Abschnitt 4).

Für diese Verteilung wurden im Folgenden Studien für eine möglichst optimale Triggerbedingung für die Datennahme des Myonvetos angestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass es möglich ist, die FADCs als Trigger zu verwenden, um die Kosten zu senken, aber auch zu gewährleisten, dass die Elektronik auf Grund weniger Komponenten weniger fehleranfällig ist. Für diese Variante wurde eine Verteilung der Photomultiplier auf die verschiedenen Kanäle der FADCs gefunden, die eine Effizienz von über 99 % erlaubt (siehe Tabelle 12).

In Abschnitt 6 konnte schließlich gezeigt werden, dass die in den Simulationen erzielte Effizienz ausreichend ist, um nahezu den gesamten myoninduzierten Untergrund in den

Germaniumdetektoren zu identifizieren. In den simulierten 14 Jahren wurden nahezu alle Myonen, welche zu einer Energiedeposition in den Germaniumkristallen führten, detektiert. Es konnte bei einer Rate von zufälligen Koinzidenzen

$$R = 9,83 \cdot 10^{-2} \text{ Hz}$$

eine Effizienz von

$$\eta = (99,86 \pm 0,42) \%$$

erreicht werden, wenn man eine Triggerschwelle von drei FADCs verlangt. Dies entspricht einer Untergrundrate von

$$(0 \pm 0,22) \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}} \quad (\text{IV.10})$$

in der Umgebung des neutrinolosen doppelten Betazerfalls. Wenn man hingegen eine Triggerschwelle von vier FADCs verlangt, konnte eine Rate von zufälligen Koinzidenzen von

$$R = 5,78 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$$

und eine Effizienz von

$$\eta = (99,56 \pm 0,42) \%$$

erreicht werden, was einer Untergrundrate von

$$(8,93 \pm 0,04) \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}} \quad (\text{IV.11})$$

in der Umgebung des neutrinolosen doppelten Betazerfalls entspricht.

Kapitel V

Der Aufbau des Myonvetos

Nachdem im den vorhergehenden Kapiteln das Design und grundlegende Gedanken, sowie die vorbereitenden Simulationen vorgestellt wurden, soll in diesem Kapitel noch das endgültige Myonveto erläutert werden. Hierbei wird auch auf die Montage eingegangen. Außerdem wird ein System zur Kalibrierung und Überwachung der Photomultiplier und die Datennahme vorgestellt. Als Abschluss werden dann noch der aktuelle Status des Myonvetos erläutert.

1 Zusammenfassung: Das „reale“ Myonveto

Das GERDA-Myonveto wird aus den in Abschnitt III.7.1 vorgestellten Detektorsystemen bestehen. Zum Einen der Cherenkov-Detektor, welcher sich in den Hauptteil des Wassertanks und die Pillbox unterteilt. Zum Anderen werden zwei Lagen Plastiksintillator-Paneele oberhalb des Reinraums angebracht werden.

Das Cherenkov-Veto wird insgesamt über 66 Photomultiplier verfügen. Von diesen befinden sich 40 in vier Ringen mit jeweils zehn Photomultipliern an der Wand und zwei Ringe mit acht beziehungsweise zwölf Photomultipliern am Boden des Wassertanks. Die restlichen sechs Photomultiplier werden in der Pillbox montiert. Diese Photomultiplier werden gemäß der in Kapitel IV.5.4 vorgestellten Art und Weise auf die zehn FADCs der Datennahme verteilt.

Um die Effizienz zu erhöhen werden große Teile der Oberflächen des Wassertanks und des Kryostaten mit der in Kapitel III.6 vorgestellten Reflektorfolie VM2000 verkleidet.

Aus den Simulationen hat sich gezeigt, dass ein Triggerschema, welches ausschließlich auf den Triggerelementen der FADCs basiert, problemlos realisierbar ist. Dabei haben sich die beiden Varianten mit drei beziehungsweise vier FADCs als Schwelle für einen Trigger des Myonvetos hervorgetan. Beide erreichen eine Effizienz von über 99,5 %, wobei sie immer noch eine Rate an zufälligen Koinzidenzen von wenigen mHz beziehungsweise einem Zehntel Hz nicht überschreiten. Bei einer erwarteten Rate von etwa einem Zehntel Hz an Myonen, welche das GERDA-Experiment treffen, sind beide Werte akzeptabel.

Um einen reibungslosen Betrieb des Myonvetos zu gewährleisten wird außerdem ein System zur Kalibrierung und Überwachung der Photomultiplier aufgebaut. Dieses wird in dem nächsten Abschnitt V.2 vorgestellt.

2 Kalibrierung und Überwachung des Myonvetos

Bei einem Experiment, das mehrere Jahre in Betrieb sein soll, ist es wichtig, dass man eine beständige Überwachung und Kalibrierung der ganzen Systeme gewährleisten kann. Hierfür kommen im GERDA-Myonveto drei unabhängige Methoden zum Einsatz. Einerseits sollen die Eigenschaften der einzelnen Photomultiplier immer wieder überprüft werden. Auf der anderen Seite soll aber auch sichergestellt sein, dass das Myonveto als Ganzes funktioniert. Dieses Überwachungssystem wurde zusammen mit dem Institute for Nuclear Research, dem INR in Moskau entwickelt.

2.1 Überwachung der einzelnen Photomultiplier

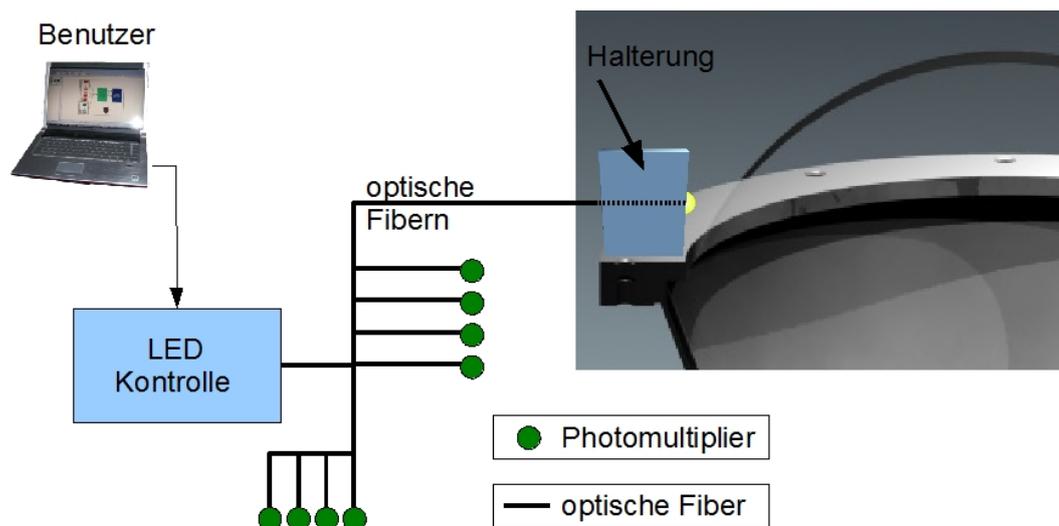


Abbildung 70: Schema der Überwachung einzelner Photomultiplier mittels Leuchtdioden.

Das erste System ist in Abbildung 70 skizziert. Es dient der Überwachung der Photomultiplier im Wassertank. Während des Betriebs des Myonvetos wird man eine Leuchtdiode, deren Signal über optische Fasern die Photomultiplier erreicht, ansteuern können. Mit diesem System ist es möglich, alle Photomultiplier gleichzeitig mit Lichtpulsen von nahezu identischer Stärke und Dauer zu beleuchten, weshalb man identische Signale erwarten sollte. Dies ermöglicht es anhand eines Referenz-Photomultipliers die Funktionstüchtigkeit aller Anderen zu überprüfen.

Dieses System erlaubt es, sowohl die einzelnen Photomultiplier miteinander zu vergleichen,

als auch die Eigenschaften einzelner Photomultiplier gezielt zu überprüfen.

Wenn zum Beispiel ein Photomultiplier mehrfach keine Signale zeigt, obwohl die ihn umgebenden Photomultiplier Licht gesehen haben, kann dieser gezielt auf seine Stabilität und seine Verstärkung getestet werden.

2.2 Überwachung aller Photomultiplier

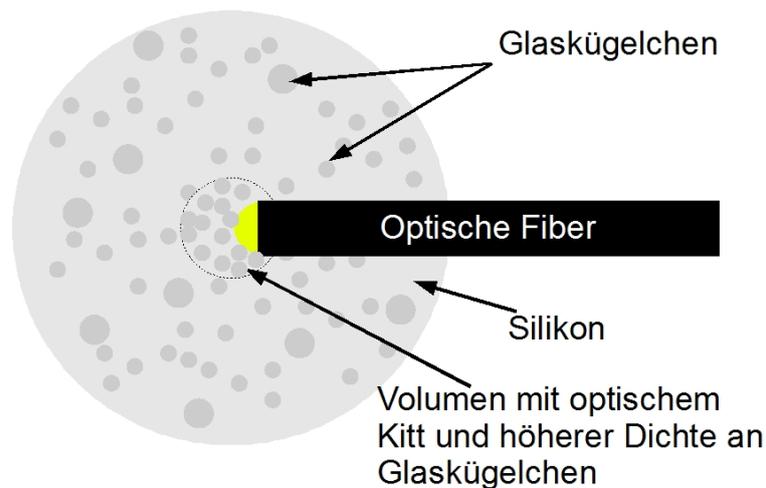


Abbildung 71: Schema eines Diffusorballs.

Um sicherzustellen, dass das Myonveto als Ganzes funktioniert, werden in dem Wassertank mehrere Diffusorbälle montiert. Dabei handelt es sich um Silikonbälle, in denen winzige Glaskügelchen¹ eingebracht werden (siehe Abbildung 71). Diese haben einen Durchmesser von 20 bis 80 Mikrometer. In einem Diffusorball wird es zwei Bereiche mit unterschiedlich hoher Dichte an Glaskügelchen geben. Im Zentrum des großen Balls mit niedrigerer Dichte befindet sich ein kleinerer Ball, in den eine optische Fiber eingeführt ist. In diesem inneren Ball ist die Konzentration an Glaskügelchen deutlich höher als im äußeren Ball. Dadurch wird das Licht möglichst isotrop von dieser optischen Fiber abgestrahlt und dann durch den großen Diffusorball in dem Wassertank verteilt. So ist es möglich, Koinzidenzen zwischen ganzen Gruppen von Photomultipliern zu erzeugen und somit ein durchfliegendes Myon zu simulieren.

Insgesamt wird es fünf dieser Bälle geben, welche jeweils über eine Leuchtdiode mit Licht versorgt werden. Vier von ihnen befinden sich im Hauptteil des Wassertanks, um diesen auszuleuchten und den Schatten des Kryostaten zu kompensieren. Ein Weiterer befindet sich in der Pillbox. Hier genügt ein einzelner Ball, um diese vollständig auszuleuchten, da sie klein ist und keine Hindernisse enthält.

¹Glaskugeln vom Typ S32 von 3M.

2.3 Überwachung der Plastikszintillatorpaneele

Das letzte System dient der Überwachung der Plastikszintillatorpaneele über dem Reinraum. In Abbildung 35 ist eine Leuchtdiode zu sehen. Wird diese angesteuert, emittiert sie ultraviolette Photonen, welche über den Wellenlängenschieber und die optischen Fasern zu dem Photomultiplier geleitet werden. Auf Grund der bekannten Leuchtstärke der Diode ist es möglich, Licht bekannter Helligkeit in das System einzukoppeln, und so den Photomultiplier, der das Paneel ausliest, zu kalibrieren.

3 Montage des Myonvetos

Die Montage des Myonvetos lief in mehreren Phasen ab. Zuerst wurde die Reflektorfolie VM2000 (siehe Kapitel V.6) montiert. Danach wurde ein Kabelkanal im oberen Bereich des Wassertanks angebracht, um die Kabel der gekapselten Photomultiplier aus dem Wassertank zu führen. Als nächstes wurden die Photomultiplier platziert und die Kabel verlegt. Außerdem wurde das Kalibrierungs- und Überwachungssystem der Photomultiplier eingebaut. Der letzte Schritt der Montage ist der Einbau der Plastikszintillatorpaneele oberhalb des Reinraums.

Während der Montage wurden immer wieder zwei Senkrechtthebühnen vom Typ A1 von AVV² verwendet. AVV hat auch einen Kurs zur Erlangung einer Fahrerlaubnis für die Hebebühnen angeboten. Dieser wurde von jedem absolviert, der die Hebebühnen vor Ort bedient.

3.1 Reinheitsanforderungen

Nachdem die Hebebühnen im Inneren des Wassertanks waren, wurde, um das Innere des Wassertanks möglichst sauber zu halten, vor dem Zugang des Wassertanks ein Zelt mit zwei Räumen aufgebaut. Im äußeren Bereich befanden sich Reinraumkleidung zum Wechseln, sowie diverse Werkzeuge. Der innere Bereich diente einzig als Schleuse, um den Wassertank vom äußeren Bereich abzuschotten.

Nach einer ersten Reinigung wurde der Wassertank nur noch in Reinraumkleidung betreten. Insbesondere nachdem die Reflektorfolie montiert war, hat sich dies als sinnvoll erwiesen, da so verhindert wurde, dass es Fettabdrücke auf den Folien gab.

Bevor man die Reflektorfolie auf den Boden geklebt hat und die Boden-Photomultiplier montiert wurden, musste der Boden ein letztes mal gereinigt werden. Nach der Montage durfte der Wassertank nur noch mit weichen Reinraumschuhen betreten werden, um die Folie nicht zu beschädigen.

²AVV Hebebühnen, 74523 Schwäbisch Hall

3.2 Einbau der Reflektorfolie

Nach dem Aufbau des Zelttes und dem Transfer der Hebebühnen ins Innere des Wassertanks war der erste Schritt bei der Montage des Myonvetos der Einbau der Reflektorfolie VM2000. Hierbei war darauf zu achten, dass die Folie sehr gut befestigt wurde, damit sie auch einen Notablass des Wassers übersteht. Sollte sie in einem Notfall³ abgerissen und vom Sog der Pumpen nach unten gezogen werden, würde sie unweigerlich den Abfluss verstopfen. Um dies zu verhindern, wurde die Folie dreifach gesichert.

In einem Unterwassertest (siehe Kapitel V.6.3) hat sich gezeigt, dass der Klebstoff auf der Rückseite der Folie auch geeignet ist, diese unter Wasser auf Edelstahl zu befestigen. Dies hat einen großen Vorteil: Kommt es zu einer Notentwässerung, befindet sich kein Wasser hinter der Folie. Aus diesem Grund sind die Kräfte, die auf die Folie wirken, deutlich geringer. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Folie abgerissen wird, sinkt somit.

Um die Folie an der Wand des Wassertanks zu befestigen, wurde zuerst ein acht Meter langes Stück der Folie vorbereitet und mit Hilfe einer Halterung an zwei Seilen, welche über Ösen direkt unter der Decke laufen, nach oben gezogen. Dort wurde sie von einem Mitarbeiter auf einer der Hebebühnen an zwei bereits vorhandene Bolzen befestigt.

Im Folgenden wurde die Schutzfolie auf der Rückseite der Folie, welche den Klebstoff bedeckte, langsam vom Bodenpersonal mit Hilfe zweier Seile, nach unten gezogen. Gleichzeitig strich der auf der Hebebühne befindliche Mitarbeiter die Folie mit Hilfe eines weichen Schwammes an die Wand und befestigte sie an mehreren Bolzen, unter anderem an den Bolzen, welche für die Montage der Photomultiplier vorgesehen waren..

Als letzte Sicherung wurde noch ein Stahlkabel entlang der Wassertankwand gezogen. Dieses befindet sich auf mittlerer Höhe und wurde durch an Bolzen befestigte Ösen geführt und fixiert. Falls sich die Folie doch lösen sollte, wenn es zu einer Notentwässerung kommt, wird sie sich in diesem Stahlseil verfangen und nicht weiter in Richtung Auslass gezogen.

3.3 Einbau der Photomultiplier

Vor der Montage der Photomultiplier musste der Kabelkanal eingebaut werden. Dieser bestand aus 15 Segmenten mit jeweils etwa zwei Metern Länge. Der Kanal war, wie die Kapselungen selbst, aus Edelstahl gefertigt und wurde wie diese von Raff & Grund⁴ hergestellt. Der Kabelkanal wurde etwa 20 cm unterhalb der Decke des Wassertanks positioniert. Für die Montage des Kabelkanals kamen, genau wie für die Montage der VM2000 und den Einbau der Kapselungen, Hebebühnen zum Einsatz. Auf Grund der Größe des Kabelkanals war es erforderlich, dass beide Hebebühnen bei einem Segment des Kanals zum Einsatz kommen mussten.

Nach dem Einbau des Kabelkanals begann die Montage der Photomultiplierkapselungen.

³Im Fall eines Lecks im Kryostaten, ist es wichtig, möglichst schnell das Wasser abzulassen, damit das flüssige Argon nicht mit dem Wasser in Kontakt kommt. Hierbei wird das demineralisierte Wasser über ein spezielles Pumpsystem sehr schnell aus dem Tank abgelassen. Dies kann zu hohen Fließgeschwindigkeiten im Wassertank führen. Pro Kubikmeter abfließendes Wasser sinkt der Pegel um 1,5 Zentimeter.

⁴Raff & Grund GmbH, Edelstahltechnik, Behälter+Apparatebau, 71691 Freiberg am Neckar

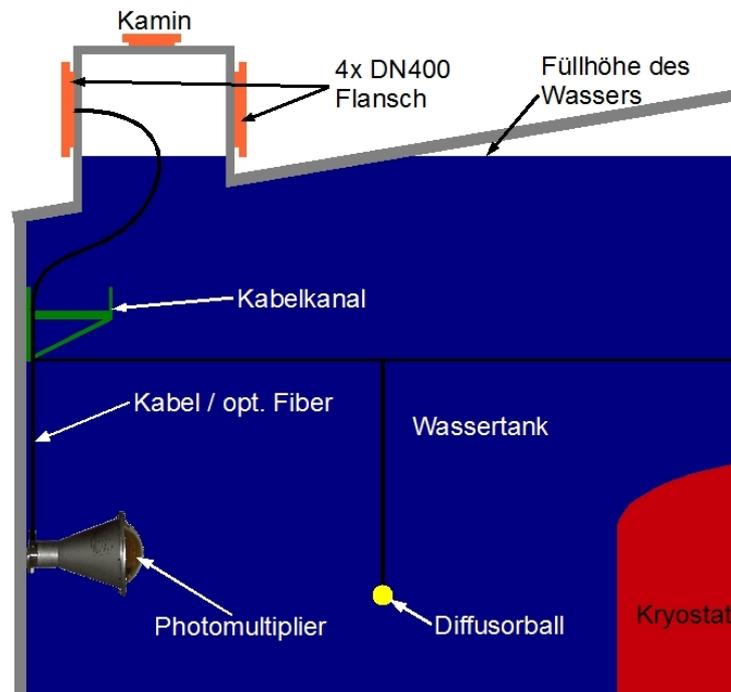


Abbildung 72: Zeichnung des Kamins mit Flanschen für die Kabeldurchführungen und des Kabelkanals für das Cherenkov-Veto.

Diese war sehr einfach gehalten. Zuerst wurde das Kabel durch die dafür vorgesehenen Kabeldurchführungen⁵ in drei DN400 Flanschen⁶ in einem Kamin auf der Decke des Wassertanks geführt und zu der Position der Datennahme-Elektronik gelegt. Dabei werden die Kabel durch in den Flanschen eingeschraubeten speziellen Kabeldurchführungen geleitet, welche die IP 68⁷ Norm erfüllen. Danach werden die Kabel über den Kabelkanal im Wassertank bis zu der Position der Photomultiplier gebracht.

Nun wurde der Photomultiplier an der Wand befestigt. Sein Stahlbecher wurde mit einer Stahlscheibe als Fuß gedreht. In dieser befanden sich zwei Löcher, wodurch es ermöglicht wurde, die Kapselung auf zwei bereits an der Wand angebrachte Bolzen zu stecken und mit Muttern zu fixieren. Dann wurde das Kabel der Kapselung über Klammern nach oben geführt. Der letzte Schritt war es, das restliche, nicht verlegte Kabel aufzurollen und über die Haken des Kabelkanals zu hängen.

Gleichzeitig mit den Kabeln der Wand-Photomultiplier wurden die Kabel der Boden-

⁵Die Kabeldurchführungen vom Typ Skintop von Lapp Kabel erfüllen die IP 68 Norm, was bedeutet, dass sie wasser- und staubdicht sind.

⁶Flansche mit etwa 40 Zentimeter Durchmesser aus Edelstahl.

⁷Die Buchstaben IP stehen für Schutz gegen Berühren und gegen Eindringen von Fremdkörpern und von Wasser. Die Zahl 6 bedeutet Vollständiger Schutz gegen Berührung. Schutz gegen Eindringen von Staub. Die letzte Zahl 8 gewährleistet Schutz gegen Druckwasser für unbestimmte Zeit.

Photomultiplier verlegt. Diese Kapselungen wurden danach an der Seite des Wassertanks vorläufig positioniert, um sie im letzten Schritt dann nur noch an den Bolzen befestigen zu müssen.

3.4 Montage des Kalibrierungssystems

Direkt nach den Photomultipliern wurden die Überwachungssysteme eingebaut. Zuerst wurden die optischen Fibern zur Überwachung der einzelnen Photomultiplier verlegt. Dabei wurde in der anderen Richtung vorgegangen und die Fibern zuerst am Photomultiplier mit den dafür vorgesehenen Halterungen festgeschraubt und danach über die Klammern entlang der Kabel nach oben zum Kabelkanal gebracht.

Über diese wurden sie dann zum Kamin und über spezielle Einsätze in den Kabeldurchführungen durch die Flansche aus dem Tank geführt. Auch diese erfüllen die IP 68 Norm. Danach wurden Stahlseile, welche an vier gegenüberliegenden Bolzen des Kabelkanals befestigt sind, gespannt und an diesen die vier Diffusorbälle des zweiten Kalibrierungssystems auf mittlere Höhe des Wassertanks gehängt.

3.5 Der Abschluss des Aufbaus des Cherenkov-Vetos

Bevor der Kryostat mit VM2000 verkleidet werden kann, muss er vom MPI Heidelberg mit einer Isolationsschicht umhüllt werden. Danach kann die Folie auf die Isolation geklebt werden. Nach diesem Schritt werden auch die Photomultiplier der Pillbox, sowie die Reflektorfolie in der Pillbox montiert.

Danach kann mit dem letzten Schritt der Montage begonnen werden. Hierfür werden aber zuerst die Hebebühnen aus dem Wassertank gebracht und danach der Boden ein letztes Mal geputzt werden müssen. Danach wird der Boden sukzessive mit VM2000 verkleidet und gleichzeitig die Photomultiplierkapselungen des Bodens auf die dafür vorgesehenen Bolzen geschraubt.

3.6 Einbau der Plastikszintillatorpaneele

Die Plastikszintillatorpaneele werden erst gegen Ende der Konstruktion des GERDA Experiments oberhalb des Reinraums eingebaut. Ihre Montage ist nur dadurch erschwert, dass der Platz zwischen Reinraumdecke und Hallendecke ziemlich eng ist. Auch die Montage durch den Kran an der Decke der Halle ist nicht vollständig möglich. Man wird voraussichtlich die Paneele anheben bis sie auf Höhe der Reinraumdecke sind und sie dann von Hand positionieren müssen. Dabei kann man jedoch nicht alle Paneele auf Vorrat auf dem Dach lagern und erst danach montieren, da die Decke des Reinraums diese lokale Belastung wahrscheinlich nicht aushalten kann.

Die Kabel der Paneele werden ebenfalls zu dem GERDA-Gebäude zur Ebene des Raums der Myonvetoelektronik geführt.

4 Überblick über die Datennahme des Myonvetos

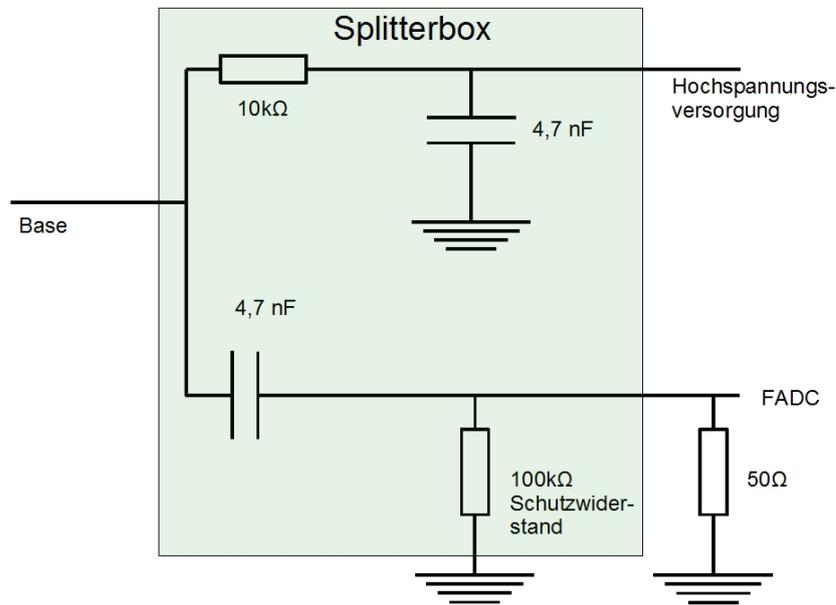


Abbildung 73: Vorläufiges Diagramm der Splitterbox für die Photomultiplier des Cherenkov-Vetos [Rit10].

Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Dissertation befand sich die Datennahme noch in der Entwicklungsphase, weshalb es noch zu Änderungen der einzelnen Komponenten kommen kann. Bevor die Signale der Photomultiplier verarbeitet werden können, müssen sie in einer Splitterbox von der Hochspannung getrennt werden. Die Splitterbox (Diagramm siehe Abbildung 73) ist in der Wand des GERDA-Gebäudes montiert. Sie befindet sich direkt in der Wand des Raums, in dem die Module der Datenerfassung des Myonvetos untergebracht sind. Von dort werden die nun getrennten Signale in die Module der Datennahme des Myonvetos geleitet.

Das Prinzip der Box ist relativ simpel. Sie besteht zum einen aus einem Tiefpass mit $R = 10\text{ k}\Omega$ und $C = 4,7\text{ nF}$, welcher die Hochspannung auf Grund seiner Zeitkonstante von $290\text{ }\mu\text{s}$, durchlässt. Der zweite Teil der Box besteht aus einem Hochpass mit $C = 4,7\text{ nF}$. Außerdem sind zwei Widerstände zu berücksichtigen. Zum einen der Schutzwiderstand mit $100\text{ k}\Omega$, welcher verhindern soll, dass sich im Fall eines nicht eingesteckten Signalkabels ein Kurzschluss mit der Erde bildet, zum anderen der Abschlusswiderstand am Eingang des FADCs von $R = 50\text{ }\Omega$. Damit ergibt sich für diesen eine Zeitkonstante von $1,5\text{ }\mu\text{s}$. Dies bedeutet, dass zwar die Gleichspannung der Hochspannungsversorgung nicht durchgelassen wird, jedoch die schnellen Signale mit etwa 20 ns Länge der Photomultiplier problemlos passieren können.

Die Datennahme selbst basiert auf den Flash ADCs⁸ (FADC) SIS 3301 von Struck Systems. Die gleichen FADCs werden für die Datennahme der Germaniumkristalle verwendet. Dies erlaubt eine leichtere Kommunikation zwischen den beiden Datennahmesystemen. Ein mögliches Flussdiagramm der Myonveto Datennahme ist in Abbildung 74 dargestellt. Die Signale der Myonveto-Detektoren, der Photomultiplier der Pillbox, des Wassertanks und der Plastiksintillatorpaneele werden in die FADCs gegeben. Die Auswahl dieser Gruppen wurde mittels Monte-Carlo-Simulationen in Kapitel IV.5.4 bestimmt. Die sechs Photomultiplier der Pillbox werden jeweils auf den ersten Kanal von sechs verschiedenen FADCs gelegt. Die übrigen Photomultiplier des Wassertanks werden auf diese sechs und vier weitere FADCs verteilt.

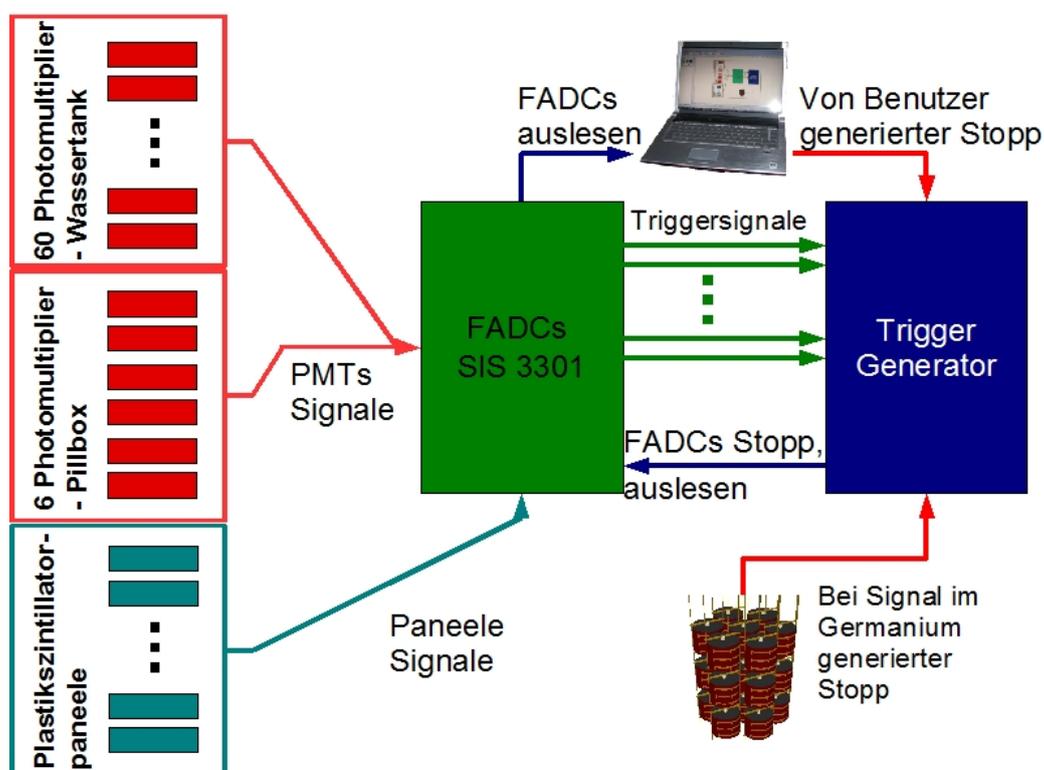


Abbildung 74: Flussdiagramm der GERDA-Datenerfassung.

Es gibt nun vier Bedingungen, im Triggeregenerator ein Stoppsignal zu erzeugen. Dabei werden zwei durch externe Bedingungen ausgelöst und zwei weitere durch die FADCs intern generiert. Alle vier erzeugen ein Signal, das die FADCs stoppt und dafür sorgt, dass die Daten aufgezeichnet werden. Das Programm für diese Datenauslese wird in der Dissertation von Florian Ritter [Rit10] geschrieben.

⁸Bei einem Flash ADC handelt es sich um einen besonderen Typ eines Analog Digital Wandlers. Dieser erlaubt schnellere Verarbeitung von digitalen Signalen und Aufzeichnung der Spuren der Signale.

4.1 Externes Stoppsignal

Es gibt zwei Möglichkeiten, ein externes Stoppsignal zu generieren. Das Erste ist ein vom Benutzer gesendetes Stoppsignal. Es ist dazu da, das Myonveto zu einem beliebigen Zeitpunkt auslesen zu können, um zum Beispiel Tests der Datenerfassung durchzuführen.

Das zweite Signal wird von den Germaniumdetektoren gesendet. Wenn diese ein Signal detektieren, soll das Myonveto ausgelesen werden, damit man ausschließen kann, dass das Signal durch ein Myon erzeugt wurde und das Triggersystem des Myonvetos versagt hat.

4.2 Internes Stoppsignal

Auch durch die FADCs werden zwei verschiedene Stoppsignale erzeugt. Zum einen werden die FADCs, welche die Paneele auslesen, über ein logisches ODER miteinander verknüpft. Dies bedeutet, dass die Datennahme des Myonvetos ausgelöst wird, wenn ein Myon in einem beliebigen Paneel detektiert wird.

Die zweite Bedingung ist die, dass immer mindestens drei der FADCs, welche die Signale des Cherenkov-Vetos verarbeiten, ein Triggersignal senden. Dies bedeutet, dass mindestens drei beziehungsweise vier Photomultiplier in drei beziehungsweise vier verschiedenen FADCs ein Photon detektiert haben, da die Kanäle eines FADCs über ein logisches ODER verknüpft sind. Die endgültige Anzahl wird erst, wenn das Myonveto fertig gebaut ist, festgelegt. Es ist notwendig, dass mindestens drei FADCs ein Triggersignal generieren, da ansonsten die Rate an zufälligen Koinzidenzen (siehe nächstes Kapitel) zu hoch ist.

5 Status des Myonvetos

Zum Abschluss dieses Kapitels wird in diesem Abschnitt der Status des Myonvetos zusammengefasst, wie er sich zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Dissertation dargestellt hat. Außerdem wird noch kurz der Status der Datenerfassung umrissen.

5.1 Cherenkov-Veto

Der Großteil des Cherenkov-Vetos war zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Dissertation einsatzbereit. Die Wand des Wassertanks ist mit der Reflektorfolie VM2000 verkleidet. Auf Grund von nachträglich notwendigen Arbeiten an der Außenseite des Kryostaten konnte dieser noch nicht mit der geplanten Superisolation und VM2000 verkleidet werden. Deshalb wurde auch auf die Verkleidung des Bodens des Wassertanks mit VM2000 vorerst verzichtet, bis der Einsatz der Hebebühnen nicht mehr notwendig sein wird.

Die Photomultiplier an der Wand sind vollständig montiert und deren Kabel und optische Fasern für die Einzelphotomultiplieransteuerung sind verlegt und über den Kamin aus dem Tank geführt. Die Photomultiplier, welche auf dem Boden montiert werden sollen, wurden vorerst an der Seite des Wassertanks abgestellt, wobei ihre Kabel und Fasern bereits verlegt sind. Diese müssen, nachdem der Boden mit VM2000 verkleidet wurde, nur noch an den entsprechenden Positionen fixiert werden.

Die Pillbox ist noch nicht fertiggestellt, da sie sich direkt unterhalb des Kryostaten befindet, und in ihr ebenfalls noch gearbeitet werden muss. Die Photomultiplier und die notwendige VM2000 befinden sich jedoch vor Ort und können jederzeit montiert werden.

Abgesehen von den optischen Fibern für die Photomultiplier in der Pillbox sind auch die beiden Kalibrations- und Überwachungssysteme montiert worden. Allerdings wurden die Diffusorbälle vorerst noch auf die Kabelkanäle gelegt, damit sie bei der Arbeit am Kryostaten nicht beschädigt werden können.

Alle noch notwendigen Arbeiten sollten innerhalb von zwei Wochen problemlos durchzuführen sein und vorraussichtlich kurz nach Ende der Abgabe dieser Arbeit erledigt werden.

5.2 Plastikszintillator-Veto

Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Doktorarbeit war leider immer noch nicht vollständig geklärt, in welcher Form das Plastikszintillator-Veto aufgebaut werden soll. Es hat sich jedoch eine ziemlich wahrscheinliche Variante hervorgetan. Diese wird aber noch nicht eingebaut sein, wenn diese Arbeit fertig ist.

Vorraussichtlich werden zwei Lagen mit jeweils 14 Plastikpaneelen oberhalb des Reinraums plaziert. Es sind bereits mehrere dieser Paneele produziert und getestet. Drei Paneele befinden sich zum aktuellen Zeitpunkt im Untergrundlabor des Physikalischen Instituts der Universität Tübingen. Sie werden als Myonveto für einen Germaniumdetektor des Institutes für Experimentalphysik verwendet.

Sieben weitere sind bereits nach Italien ans LNGS geliefert worden und warten dort auf ihren Einsatz. Zusammen mit den dreien in Tübingen kann damit die erste von zwei Lagen des Plastikszintillator-Vetos eingebaut werden.

5.3 Datenerfassung

Die Datenerfassung des Myonvetos durch die FlashADCs ist entworfen und für einige einfache Anwendungen bereits getestet worden. Sie kam zum Beispiel zur Anwendung bei einer Zulassungsarbeit [Oss07], welche am Physikalischen Institut angefertigt wurde. Dabei wurde deren Datennahme über die auch für das Myonveto verwendeten SIS3300 FADCs betrieben und funktionierte einwandfrei.

Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Dissertation befand sich die Software für die Datennahme noch in der Optimierung. Insbesondere ihre Geschwindigkeit sollte noch verbessert werden. Desweiteren war noch nicht endgültig geklärt, in welcher Form die Daten gespeichert werden sollten. Es standen ASCII, binäre oder ROOT-Dateien zur Verfügung. Für den Vergleich mit den Simulationen würde sich das ROOT-Dateisystem anbieten, da die gesamten Simulationsdaten als ROOT-Daten vorliegen. Allerdings wäre es auch möglich, binäre Daten direkt mit ROOT zu verarbeiten. Für einen späteren Vergleich der Daten des Myonvetos mit den Simulationen sollte auf jeden Fall eine Schnittstelle in die Software der Datennahme integriert werden.

Ebenfalls noch in der Entwicklung befindet sich ein Stretcher, welcher die in Abbildung 73

vorgestellte Splitterbox ergänzen soll und das Signal etwas verlängern wird, damit es von den FADCs besser verarbeitet werden kann.

Kapitel VI

Ausblick und Zusammenfassung



Abbildung 75: Das GERDA-Experiment am LNGS.

Ziel dieser Arbeit war es, ein möglichst effizientes Myonveto für das GERDA-Experiment zu entwerfen. Dieses muss in der Lage sein, den durch Myonen erzeugten Untergrund unter die notwendige Rate von $10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}}$ zu reduzieren. Hierfür wurden umfangreiche Monte-Carlo-Studien angefertigt, sowie die Komponenten des Myonvetos entworfen und getestet. Außerdem wurde das Myonveto in Italien am LNGS in das GERDA-Experiment integriert und aufgebaut.

1 Status des GERDA-Experimentes

Obwohl es auf Grund eines schweren Erdbebens in der Region der Abbruzzen zu einigen Verzögerungen beim Aufbau des Experimentes kam, steht das GERDA-Experiment kurz vor seiner Fertigstellung. Zum aktuellen Zeitpunkt wurden sowohl Kryostat als auch Wassertank aufgebaut und vorläufig getestet. Einige abschließende Tests stehen zwar noch aus, sollten aber nicht viel zusätzliche Zeit benötigen.

Neben dem Wassertank wurde ein mehrstöckiges Gebäude errichtet in welchem sich später die Elektronik und Unterstützungssysteme, wie die Wasserpumpen, befinden werden. Dieses wird zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit gerade bezogen und eingerichtet. Außerdem ist der Reinraum oberhalb des Wassertanks größtenteils fertiggestellt und kann bezogen werden.

Mit der wichtigste Teil des Reinraums, die Detektorschleuse wurde ebenfalls bereits nach Italien geliefert und es wird zur Zeit in einer Halle des INFN in Assergi ein Testaufbau für die Schleuse aufgebaut, wo diese dann getestet werden kann.

2 Zusammenfassung der Untergrundanalyse und Simulationen zum Myonveto

Die Simulationen lassen sich in zwei große Teilprojekte gliedern, die Monte-Carlo Campaign I und II.

In der Monte-Carlo-Campaign I wurde eine optimale Platzierung und Anzahl der Photomultiplier des Cherenkov-Vetos ausgewählt. Dabei hat sich gezeigt, dass es unnötig ist, Photomultiplier an der Decke des Wassertanks unterzubringen, was daran liegt, dass die Cherenkov-Lichtkegel im Normalfall nach unten gerichtet sind. Schließlich wurde eine Geometrie gewählt, bei der 40 Photomultiplier an der Wand und 20 weitere Photomultiplier am Boden des Wassertanks platziert wurden. Sechs Photomultiplier unterhalb des Kryostaten in der Pillbox vervollständigen das Cherenkov-Veto.

Neben der verschiedenen Anzahl und Platzierung der Photomultiplier in den einzelnen Verteilungen wurde auch der Einfluss der Reflektorfolie VM2000 von 3M untersucht. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Anzahl an detektierbaren Photonen durch die Verkleidung des Wassertanks und des Kryostaten des GERDA-Experimentes, nahezu verdoppelt werden konnte.

In der Monte-Carlo-Campaign II wurden in dieser Geometrie 40 Millionen Myonen simuliert, was etwa vierzehn Jahren Laufzeit des GERDA-Experimentes entspricht. Mit den so gewonnenen Daten sollten verschiedene Triggervarianten und -schwellen untersucht werden. Insgesamt deponierten bei diesen Simulationen 56252 Myonen eine Energie in den Germaniumkristallen, was etwa 10 Myonen am Tag entspricht. Dies überschreitet bereits die geforderte Untergrundrate von $10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{Jahr}}$.

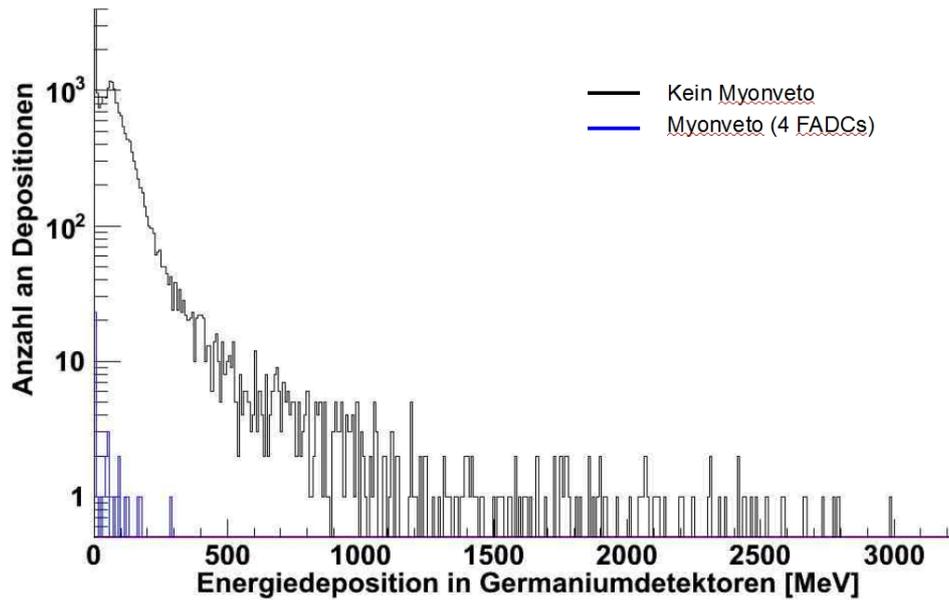


Abbildung 76: Gesamte Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Phase II Geometrie des GERDA Experiments, nachdem das Myonveto mit einer Schwelle von 4 FADCs eingesetzt wurde für die simulierten 14 Jahre für den Bereich bis 3000 MeV.

Es hat sich schließlich gezeigt, dass die Triggervariante, welche den internen Trigger der verwendeten FADCs benützt, ausreicht und es nicht nötig ist, zusätzliche Elektronik anzuschaffen. Dies erhöht die Stabilität des verwendeten Systems enorm. Es hat sich hierbei eine Triggerschwelle von vier FADCs hervorgetan. Dies bedeutet, dass mindestens vier Photomultiplier in mindestens vier verschiedenen FADC-Modulen ein Signal erzeugen müssen, wenn ein Myon detektiert werden soll. Ein weiterer Vorteil dieser Variante ist die sehr geringe Rate an zufälligen Koinzidenzen von

$$R = 5,78 \cdot 10^{-4} \text{ Hz.}$$

Aus den Monte-Carlo-Simulationen wurde für diese Triggervariante eine Effizienz von

$$\eta = (99,56 \pm 0,42) \%$$

erreicht. Dies entspricht einer Untergrundrate von

$$(8,93 \pm 0,04) \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}}, \quad (\text{VI.1})$$

was deutlich unterhalb der geforderten Schwelle von $10^{-3} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Jahr}}$ für die Phase II des GERDA-Experimentes liegt. Das dabei erzielte Spektrum ist in Abbildung 76 dargestellt. Man erkennt, dass nahezu der gesamte Untergrund im gesamten Energiebereich bis drei GeV unterdrückt wurde.

3 Status des Cherenkov-Myonveto-Detektors



Abbildung 77: Ein Foto des GERDA-Cherenkov-Myonvetos [Kai Freund].

Das Cherenkov-Veto wurde größtenteils in das GERDA-Experiment integriert. Hierfür wurde bereits die Reflektorfolie VM2000 an die Wand des Wassertanks geklebt. Außerdem wurde der Kabelkanal im oberen Bereich des Wassertanks montiert, auf welchem die Kabel der Photomultiplier zum Kamin in der Decke des Wassertanks geführt werden.

Die Photomultiplier an der Wand des Wassertanks wurden montiert, während die Photomultiplier des Bodens bisher nur in speziellen Halterungen auf dem Boden stehen, da vor der endgültigen Montage noch die VM2000 Folie auf den Boden geklebt werden muss. Trotzdem wurden alle Kabel und optischen Fasern dieser Photomultiplier verlegt und bereits bis zu ihrer endgültigen Position im Messraum geführt.

Zwar wurden die Photomultiplier nach dem Transport nach Italien noch vor dem Einbau getestet, allerdings steht ein Test des Myonvetos noch aus, da die Datennahme für sämtliche Photomultiplier noch nicht aufgebaut ist und der Wassertank seit dem Einbau der Photo-

multiplier nicht mehr mit Wasser gefüllt wurde. Die Tests der einzelnen Photomultiplier zeigen jedoch, dass alle funktionsbereit sind.

4 Weitere Schritte

Obwohl zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit, ein großer Teil des Myonvetos für das GERDA-Experiment einsatzbereit und aufgebaut ist, gibt es noch ein paar Dinge zu tun. Diese sollen zum Schluss noch kurz aufgeführt werden:

- **Fertigstellung des Cherenkov-Vetos:**

In Kürze müsste das Cherenkov-Veto fertig gestellt werden. Hierfür müssen noch der Kryostat, der Boden und die Pillbox mit VM2000 verkleidet werden. Bevor dies jedoch möglich ist, muss der Kryostat von Mitarbeitern des MPI für Kernphysik in Heidelberg mit einer Isolationsschicht ummantelt werden. Danach kann die Reflektorfolie aufgeklebt werden.

Schließlich müssen noch die Photomultiplier des Bodens auf ihren endgültigen Positionen platziert, sowie die Photomultiplier der Pillbox montiert werden. Bei letzteren müssen zusätzlich noch die Kabel der Photomultiplier und die optischen Fasern des ersten Kalibrationssystems verlegt werden. Dies kann jedoch erst kurz vor Ende der Arbeiten erledigt werden, da die Hebebühnen danach nicht mehr über den Boden des Tanks bewegt werden können.

Ebenfalls müssen noch die Diffuserbälle des zweiten Kalibrationssystems aufgehängt werden, sowie die Stahlseile als Sicherung für die VM2000 gezogen werden.

- **Plastikveto oberhalb des Reinraums:**

Kurz vor Abgabe dieser Arbeit wurde eine neue Konfiguration für die Plastikpaneele oberhalb des Reinraums vorgeschlagen. Diese sieht zwei Lagen an Plastikpaneelen mit insgesamt 36 Paneelen vor. Diese werden eine Gesamtfläche von 3,5 Metern Breite und etw 4,5 Metern Länge abdecken. Eine Darstellung eines Paneels ist in Abbildung 35 in Kapitel III.7.1.3 zu sehen.

In Abbildung 78 ist schematisch die Positionierung der einzelnen Paneele gezeigt. In jeder Lage befinden sich 18 Paneele, wobei, um das tote Volumen zwischen den Längsseiten der Paneele zu vermeiden, die Paneele einer einzelnen Lage versetzt zueinander angeordnet werden. Außerdem sind im Zentrum noch zwei zusätzliche Paneele quer zu den restlichen angebracht, um das tote Volumen entlang der Kopfseiten der Paneele abzudecken.

Sollte diese Konfiguration gewählt werden, muss sie noch in die Simulationen zu der Effizienz des Myonvetos beziehungsweise für den Vergleich von Simulationen und Daten eingebaut werden.

Auch dieser Teil des Myonvetos muss noch vor Ort in Italien aufgebaut sowie mit der Datennahme des restlichen Myonvetos verknüpft werden.

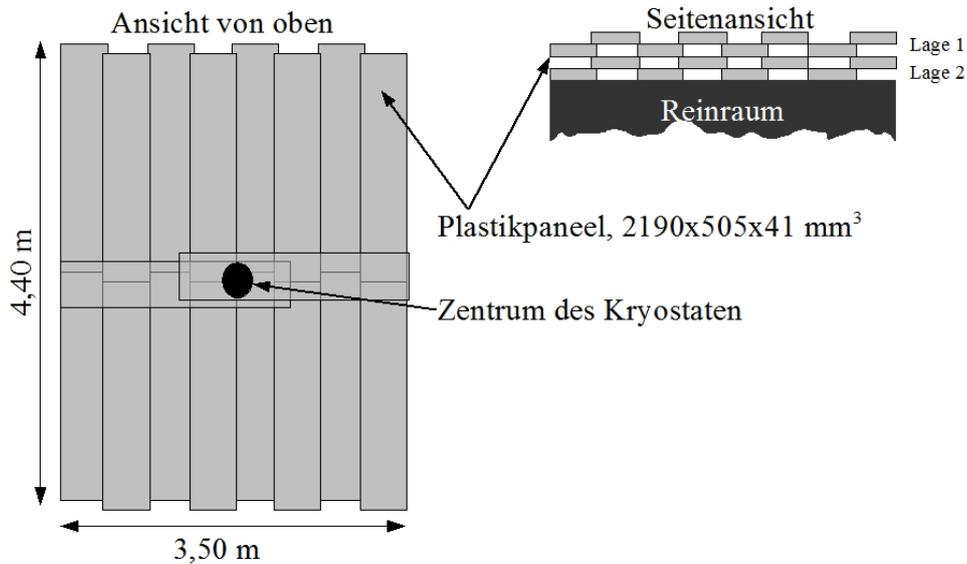


Abbildung 78: Konfiguration der Plastikpaneele oberhalb des Reinraums.

- **Datennahme:**

Momentan befindet sich die Datennahme des Myonvetos noch in ihrer Entwicklung. Sie wird, wie in Abschnitt V.4 erläutert, auf den FlashADCs SIS 3301 von Struck basieren, welche auch für die Auslese der Germaniumdetektoren verwendet werden. Es muss noch die Kommunikation zwischen den beiden Systemen programmiert und die Datenauslese des Myonvetos auf ihre Geschwindigkeit hin optimiert werden. Ebenfalls muss noch ein Datenformat sowie die entsprechenden Ausgaberoutinen für die Daten des Myonvetos ausgewählt und programmiert werden. Es wird voraussichtlich Anfang 2010 mit der Datennahme begonnen werden.

- **Analyse der Myonveto-Daten:**

GERDA wird voraussichtlich im Jahr 2010 mit der Datennahme beginnen. Wenn dann die ersten Daten gesammelt sind, müssen diese mit den angefertigten Simulationen verglichen werden. Außerdem müssen diese Daten mit den Daten aus den Germaniumkristallen abgeglichen werden, um die durch Myonen induzierten Untergrundereignisse zu identifizieren.

Kapitel VII

Anhang

1 Fertigung der Photomultiplier-Kapselungen

Um die Photomultiplier vor dem Wasser des Cherenkov-Myonvetos zu schützen, wurden diese in Edelstahlgehäusen eingekapselt. In den folgenden Kapiteln wird zuerst das allgemeine Design der Kapselungen erläutert, welches auf den Edelstahlkapseln des Borexino¹ Experimentes basiert und diese verbessert. Diese Verbesserungen werden auf den nächsten Seiten dargestellt.

Neben der eigentlichen Prozedur der Kapselung der Photomultiplier werden ebenfalls die verschiedenen Tests besprochen, welche die Funktionalität der Kapselung überprüfen sollten.

1.1 Konstruktion der Photomultiplierkapsel

Der gesamte Prozess der Fertigung einer Photomultiplierkapselung bestand aus sechs Schritten und dauerte etwa sechs bis acht Tage. Die einzelnen Schritte und Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

1.1.1 Die Borexino-Kapselung

Im Folgenden wird immer wieder die Borexino-Kapsel erwähnt. Deshalb soll hier kurz diese vorgestellt werden. Für eine ausführlichere Beschreibung sei auf [Len02] verwiesen.

Diese Kapselung bestand ebenfalls aus einem Edelstahlbehälter, der aus einem Stück gedreht wurde. In seinem Fuß wurde ein Verbinder eingebaut, ein sogenannter Jupiter Stecker vom Typ U-Boot. Dieser ist wasserdicht und ermöglicht ein Anschließen des Kabels auch unter Wasser an die Kapselung. Die Kapselung wurde mit einer PET-Haube abgeschlossen.

¹Borexino: BORon EXperiment [<http://borex.lngs.infn.it/>]

1.1.2 Schritt 1: Die Edelstahlkapsel

Das zentrale Element der Kapselung war das Gehäuse aus Edelstahl, welches von der Firma Raff & Grund² hergestellt wurde. Dieses bestand aus zwei Einzelteilen. Der erste Teil war ein kleiner Stahlbecher mit Fuß, der bereits mit Löchern für die spätere Montage im Wassertank versehen wurde. Auf diesen wurde der Hauptteil des Gehäuses, ein Stahlkegel, geklebt und mit diesem verschraubt. Dabei wurde ein spezieller zweikomponentiger Klebstoff, EP42HT-2 von Masterbond/USA³, verwendet. Dieser ist dafür ausgelegt, Stahlflächen miteinander zu verbinden und Wasser oder Hitze standzuhalten.

Neben den beiden Teilen der Kapselung wurden außerdem noch das Rohr der Kabeldurchführung und zwei Ölfüllröhrchen (eines davon kann in Abbildung 21 gesehen werden) mit Masterbond Klebstoff eingeklebt. Insbesondere bei den Ölfüllröhrchen musste eine größere Menge Masterbond aufgebracht werden, da dies die dünnste Stelle in der Stahlkapsel war. Um den Härtevorgang zu beschleunigen, wäre ein Ofen benötigt worden, der zehn dieser Kapselungen hätte aufnehmen können. Mit diesem wäre es möglich gewesen, den Klebstoff jeweils einer Serie Kapselungen schneller härten zu lassen. Da dieser nicht verfügbar war, musste der Masterbond Klebstoff zwei Tage bei Raumtemperatur aushärten. Danach wurde ein Test auf Wasserdichtigkeit durchgeführt, bei dem die Kapselung mit Wasser gefüllt wurde. War eine Stelle undicht, wurde diese nachträglich mit Masterbond versiegelt.

1.1.3 Schritt 2: Anschluss des Spannungsteilers

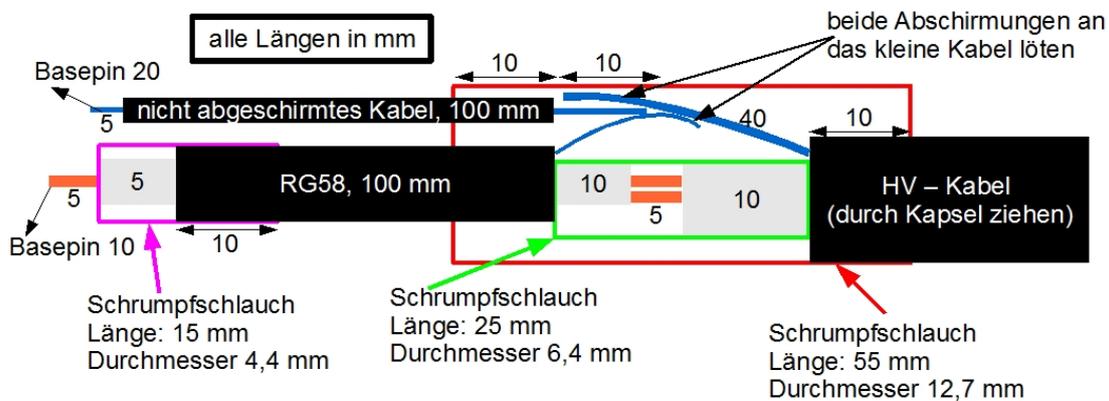


Abbildung 79: Skizze der Verbindung des RG213/U

Als nächstes wurde der Spannungsteiler (Base) positioniert. Hierfür musste als erstes das RG213/U Kabel, das die Kapselungen im Wassertank mit der Datennahme im GERDA-Gebäude verbindet, an die Base gelötet werden. Das RG213/U ist ein speziell angefertigtes Kabel, bei dem der normale Mantel eines RG213 Kabels entfernt und durch einen

²Raff & Grund GmbH, Edelstahltechnik, Behälter+Apparatebau, 71691 Freiberg am Neckar

³Master Bond Inc. Hackensack, New Jersey 07601 USA

wasserdichten Polyurethanmantel ersetzt wurde. Über dieses Kabel wird sowohl die Hochspannungsversorgung für die Photomultiplier als auch das Signal geführt. Sie werden erst in sogenannten Splitterboxen (siehe Kapitel V.4) voneinander getrennt. Insgesamt wurden 35 Meter des Kabels an jeder Kapselung angebracht. Das Kabel wurde zuerst durch das Rohr der Kabeldurchführung und einen speziellen Schrumpfschlauch (siehe nächstes Kapitel) gesteckt. Um die Verbindung von Kabel und Base mechanisch zu entspannen, wurden zwischen Schirm und Pin ein nicht abgeschirmtes Kabel und zwischen Kern und Pin ein RG58 Kabel gelötet (siehe Abbildung 79).

1.1.4 Schritt 3: Polyurethan füllen

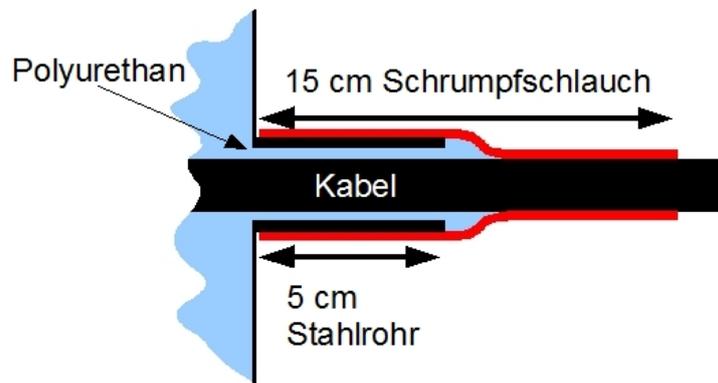


Abbildung 80: Skizze der Kabeldurchführung im Stahlbecher der Photomultiplier Kapselungen.

Nun wurde die Base mit einer speziellen Halterung auf die notwendige Höhe positioniert. Dies musste individuell abgestimmt werden, da die Photomultiplier um mehrere Millimeter, bis hin zu einem Zenitmeter, in ihren Längen voneinander abweichen und die Photomultiplier alle auf gleicher Höhe sein müssen. Danach wurde Polyurethan bis etwa einen Zentimeter oberhalb des unteren Randes der Base gefüllt (siehe Abbildung 21).

Um zu verhindern, dass bei diesem Schritt Polyurethan aus der Kabeldurchführung tropft, aber auch um diese noch zusätzlich gegen Wasser abzudichten, wurde das Kabelführungsrohr mit dem bereits erwähnten Schrumpfschlauch umgeben (siehe Abbildung 80). Dieser war 15 cm lang und hatte an der Innenseite einen speziellen Klebstoff, der beim Schrumpfen flüssig wurde und den Schlauch mit dem Kabel bzw. dem Rohr verband. Dieses Design

ersetzte den Jupiterstecker⁴ der Borexino Kapselung.

Auf diese Art in die Kapselung eingebracht umschloß das Polyurethan die Lötstellen der Base und schirmte diese so vor eindringendem Wasser ab. Neben diesem Schutz hatte das Polyurethan noch eine weitere Funktion. Es fing mechanische Spannungen in den Lötstellen der Kabel ab, indem es diese umschloß und so schützte. Insbesondere in der Kabeldurchführung fixierte es das Kabel und verhinderte, dass es herausgezogen wurde. Dabei wären die Lötstellen mit der Base zerstört worden.

Bei dem Vorgang musste darauf geachtet werden, dass das Polyurethan zum einen in die Kabeldurchführung eindringen konnte, um diese endgültig wasserdicht zu machen. Zum anderen durfte aber auch kein Polyurethan in die Kontakte der Base gelangen. Aus diesem Grund wurde die Oberseite der Base mit einer Plastikabdeckung verschlossen.

Das Polyurethan musste einen Tag lang aushärten, bevor die Halterung entfernt werden konnte und die Kapselung ein letztes Mal getestet wurde.

1.1.5 Schritt 4: Photomultiplier einsetzen

Als letzte Absicherung gegen eindringendes Wasser wurde eine ein bis zwei Zentimeter dicke Schicht Silikon in die Kapselung eingebracht. Diese umhüllte die Kontakte der Base mit dem Photomultiplier und schützte diese so für den Fall, dass Wasser in die Kapselung eindringen würde. Das Silikongel besteht aus zwei Komponenten, welche direkt vor dem Vergießen miteinander vermischt werden müssen. Es wurde noch im nicht-polymerisierten Zustand vergossen. Dabei war darauf zu achten, dass möglichst wenig Luft untergerührt wurde. Ebenfalls wurde, um ganz sicher zu sein, dass die im Silikon gelöste Luft entweichen konnte, das Silikon nach dem Vergießen einige Minuten stehen gelassen. Ansonsten bestand die Gefahr, dass sich diese Luft erst später lösen und dann Luftblasen in der Kapselung bilden würden (siehe Kapitel V.1.1.7).

Zusätzlich zum Schutz vor Wasser fixierte das Silikon den Photomultiplier auch noch in den Steckkontakten der Base. Damit wurde verhindert, dass der Photomultiplier, wenn er im Wassertank auf dem Boden steht, sich durch den eigenen Auftrieb aus der Base lösen und den Kontakt verlieren könnte. Der Auftrieb des Photomultipliers wird nahezu durch sein gesamtes Volumen bestimmt, da es sich um eine evakuierte Glasröhre handelt (siehe Kapitel V.4.2). Sollte sich der Photomultiplier aus der Base lösen, würde dies bedeuten, dass die gesamte Photomultiplier-Kapselung ausgetauscht werden müsste.

Nun wurde, um den Photomultiplier gegen das terrestrische Magnetfeld abzuschirmen, noch eine so genannte μ -Metall Abschirmung in die Kapselung eingebracht. Mehr zur Funktionsweise des μ -Metalls ist in Kapitel V.1.2.3 zu lesen.

Zuletzt wurde der Photomultiplier in die Base, welche von dem noch flüssige Silikon bedeckt war, gesteckt. Danach ließ man die Kapselung für zwei bis drei Tage stehen, damit das Silikon aushärten konnte.

⁴Bei dem Jupiter Stecker handelt es sich um einen speziellen Steckertyp, der normalerweise in U-Booten und Schiffen zum Einsatz kommt und über eine sehr gute Wasserdichtigkeit verfügt.

1.1.6 Schritt 5: Versiegeln der Einkapselung

Ebenfalls als Absicherung gegen den Auftrieb wurden unter den oberen Flansch und hinter das μ -Metall drei Metallklammern eingebracht, welche den Photomultiplier zusätzlich nach unten drücken sollten.

Das Gehäuse wurde durch eine transparente PET-Haube verschlossen, wodurch es Photonen ermöglicht wird, die Kathode des Photomultipliers (siehe Kapitel V.4.2) zu erreichen. Diese wurde zwischen den zwei Flanschen eingespannt und fest verschraubt. Um die PET-Haube nicht zu beschädigen, mussten die oben erwähnten Metallklammern mit einem Schrumpfschlauch umgeben sein, da ihre scharfen Kanten sonst die Haube einschneiden können.

Da die rein mechanische Kraft durch die Verschraubung des Flansches nicht ausreichte, um diese Stelle abzudichten, wurde zwischen dem unteren Flansch und der PET-Haube Silikon eingebracht. Dass dies notwendig war, hat sich bei den beiden Prototypen I und II gezeigt (siehe Kapitel V.5.2.1).

Nach dem Versiegeln des oberen Flansches musste die Kapselung einen weiteren Tag stehen, bevor mit dem letzten Schritt, dem Befüllen der Kapselung mit Öl, begonnen werden konnte. Während dieser Zeit härtete das Silikon aus.

1.1.7 Schritt 6: Befüllen der Kapselung mit Öl

Zum Schluss wurde das restliche Volumen zwischen Photomultiplier und Kapselung mit einem speziellen Mineralöl gefüllt, welches einen glatten optischen Übergang zwischen der PET-Haube und dem Glas des Photomultipliers ermöglicht. Es gilt:

$$n_{\text{PET}} \approx n_{\text{Öl}} \approx n_{\text{PMT Glas}} \quad (\text{VII.1})$$

Auf diese Weise findet nur wenig Reflektion an diesem Übergang statt.

Für das Befüllen mit Öl wurde die Kapselung zuerst umgedreht. Das Öl wurde durch eine der beiden im Stahlbecher angebrachten Ölfüllröhrchen in die Kapselung gefüllt, während die Luft im Inneren der Kapselung durch das andere entweichen konnte. Es war sehr wichtig, die Kapselung während des Füllens immer wieder umzudrehen und zu schütteln, um Luft, die sich in der Kapselung gesammelt hat, entweichen zu lassen. Zum Schluss wurden die beiden Röhrchen versiegelt. Hierfür wurde zuerst das bereits im vorhergehenden Schritt eingesetzte Silikon in die Röhrchen gespritzt und danach das Röhrchen mit einer mit Teflonband umwickelten Schraube verschlossen.

1.1.8 Die Einzelteile der Kapselung

Im Folgenden sind noch einmal alle einzelnen Bestandteile einer Kapselung aufgelistet:

- Stahlkapsel, hergestellt von Raff & Grund GmbH.
- Photomultiplier 9350KB/9354KB von Electron Tubes Limited.

- μ -Metall Abschirmung von Electron Tubes Limited.
- Schrumpfschlauch DERAY®IAKT von AUTECH GmbH.
- Base hergestellt in der Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts der Universität Tübingen.
- Kabeldurchführungsrohr hergestellt in der Feinmechanikwerkstatt des Physikalischen Instituts der Universität Tübingen.
- Zwei Öfüllröhrchen hergestellt in der Feinmechanikwerkstatt des Physikalischen Instituts der Universität Tübingen.
- 32 m RG213/U Kabel mit speziellem Polyurethanmantel von Jowo Systems.
- 10 cm RG58, um die Base mit dem RG213/U Kabel zu verbinden von Huber und Suhner.
- 10 cm eines nicht abgeschirmten Kabels um die Base mit dem Schirm des RG213/U Kabel zu verbinden aus der Elektronikwerkstatt der Universität.
- Drei Metallklammern hergestellt in der Feinmechanikwerkstatt des Physikalischen Instituts der Universität Tübingen.
- Ein spezieller Zwei-Komponenten Epoxid Kleber, EP42HT-2 von Masterbond/USA.
- Polyurethan, UR5041 von Electrolube.
- Silikongel, SilGel 612 von Wacker.
- Etwa zwei Liter Mineralöl für IR-Spektroskopie von Sigma Aldrich (161403-208L).
- PET-Haube von J. Schuechel, Maschinenbau.

1.1.9 Zusammenfassung der Konstruktion

Insgesamt ist es gelungen, eine wasserdichte Kapselung für die verwendeten Photomultiplier herzustellen. Dabei wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht hat, eine Kapselung innerhalb von sechs bis neun Tagen herzustellen. Außerdem war es möglich, bis zu zehn Photomultiplier parallel in einem Schritt einzukapseln. Zusätzlich konnten sich bis zu drei dieser Pakete gleichzeitig in verschiedenen Schritten des Produktionszyklus befinden.

So war es möglich die Produktion innerhalb von drei Monaten zu beenden, wobei zu Beginn nur in jeweils fünf Detektoren gleichzeitig eingekapselt wurden, um den Produktionsablauf zu testen. Insgesamt wurden 77 Kapselungen produziert, von denen jedoch vier Kapselungen als Prototypen (siehe Kapitel V.5.2.1) gefertigt wurden, die nicht im GERDA-Experiment zum Einsatz kommen werden.

1.2 Verschiedene Tests zu den Kapselungen

In diesem Abschnitt werden die Tests vorgestellt, welche durchgeführt wurden, um die Funktionstüchtigkeit der Kapselungen zu überprüfen. Im Vorfeld der Produktion wurden die Materialien, die zum Einsatz kommen sollten, auf ihre Verwendungstauglichkeit getestet. Dabei wurden sowohl verschiedene Polyurethanprodukte als auch verschiedene Silikontypen untersucht.

Ein ausführlicher Test der Kabeldurchführung war ebenfalls von besonderem Interesse, da diese Durchführung komplett anders war als bei dem ursprünglichen Borexino Design. Außerdem wurde der Einfluss der μ -Metall Abschirmung auf die Signale des eingekapselten Photomultipliers untersucht.

1.2.1 Tests der verschiedenen Materialien

Im Folgenden werden die Tests und Auswahlkriterien der einzelnen Materialien der Einkapselung vorgestellt.

- **Polyurethan:**

Bei der Wahl des Polyurethans steht an erster Stelle, dass seine elektrische Durchschlagsfestigkeit möglichst hoch ist. Dadurch wird sichergestellt, dass die Lötstellen des Kabels an die Base bzw. die verschiedenen Kontakte gut isoliert sind. Da die anliegende Spannung bis zu 2500 Volt beträgt, konnte es sonst während des Betriebs der Photomultiplier zu elektrischen Durchschlägen kommen.

Neben dem ausgewählten Polyurethan UR5041 von Electrolube wurden zwei weitere Typen getestet. Beides waren Produkte von der Firma Devcon. Zum einen „Flexan 60L“ und zum anderen das „Flexan 94L“. Beide haben eine Durchschlagsfestigkeit von 14 kV/mm, wären damit geeignet für die Kapselungen. Jedoch haben beide einen großen Nachteil.

Das Polyurethan wird eingebracht, wenn die Base bereits positioniert ist. Deshalb muss es in seiner nicht polymerisierten Form sehr flüssig sein und, was noch wichtiger ist, es muss möglichst lange flüssig bleiben, damit das Füllen reibungslos ablaufen kann.

Die beiden Polyurethantypen von Devcon sind zwar in ihrem nicht-polymerisierten Zustand flüssig genug, um verarbeitet zu werden. Auf Grund der großen Packungseinheiten konnte jedoch nicht die ganze Packung schnell genug verarbeitet werden, bevor sie fest zu werden begann.

Aus diesen Gründen wurde das Polyurethan UR5041 von Electrolube ausgewählt. Es bleibt für 40 Minuten flüssig, also deutlich länger als bei den beiden anderen Typen. Außerdem wird dieses Polyurethan in kleineren Päckchen geliefert, weshalb zwei Päckchen pro Kapselung verwendet werden können. Dies gibt noch einmal einen zusätzlichen Zeitbonus bei der Verarbeitung, da man erst das eine Päckchen vergießen kann bevor man ein zweite Päckchen öffnet. Auch die Durchschlagsfestigkeit des UR5041 von 20 kV/mm ist mehr als ausreichend, da die Abstände der einzelnen nicht zusätzlich isolierten Komponenten der Base mindestens 0,5 mm betragen.

- **Silikongel:**

Das Silikongel bedeckt die Kontakte des Photomultipliers mit der Base und fixiert den Photomultiplier damit. Deshalb muss es vor allem im verwendeten Mineralöl längere Zeit stabil bleiben. Bei verschiedenen Silikongelen zeigte sich eine deutliche Reaktion, wenn sie mit dem Öl in Kontakt kommen. Dabei absorbieren sie meist innerhalb weniger Tage das Öl und quellen auf.

Bei dem Silikongel SilGel 612 von Wacker ist dies auch nach über 2 Jahren nicht der Fall. Bei diesem handelt es sich um ein zweikomponentiges Silikongel, das erst kurz vor dem Vergießen gemischt wird. Es lässt sich leicht verarbeiten, da die beiden Komponenten sehr flüssig sind. Man muss nur darauf achten, dass sich nicht zu viel Luft beim Verrühren in dem Silikon sammelt.

- **Dichtungssilikon:**

Bei dem Silikon, das zur Abdichtung des oberen Flansches und der PET-Haube eingesetzt wird, handelt es sich um handelsübliche Dichtungsmasse der Globus Holding GmbH⁵. Dieses hat auch nach mehreren Monaten im verwendeten Öl kein Aufquellen gezeigt, wie einige der oben beschriebenen Silikontypen, die nicht verwendet wurden. Ebenfalls haben sich keine Partikel vom Silikon gelöst, während es im Öl war. Dies ist wichtig, da sonst die eintreffenden Photonen abgelenkt oder sogar reflektiert werden könnten.

1.2.2 Die Kabeldurchführung

Auf Grund der leichteren Verarbeitung und der deutlich geringeren Kosten wurde der Jupiter Stecker (≈ 300 Euro/Stück) der Borexino Kapselung durch die bereits in Abschnitt V.1.1 vorgestellte Kabeldurchführung ersetzt.

Um zu gewährleisten, dass auch die neu entwickelte Durchführung wasserdicht ist, war ein Test dieser von besonderer Bedeutung. Hierfür wurden insgesamt zwölf Widerstände am Ende eines RG213/U Kabels in kleinen Metallkammern mit Polyurethan vergossen. Das Kabel wurde über die verwendete Kabeldurchführung aus dieser Kammer herausgeführt. Dabei wurden verschiedene charakteristische Größen der Anordnung (siehe Abbildung 81) verändert. Hier definieren x , y und l die Strecke, welche das Wasser im Fall eines Eindringens überwinden muss. Diese wurden bei verschiedenen Kammern variiert. Ebenfalls wurden s und h verändert, da diese die Wasserdichtigkeit der Durchführung bestimmen.

Um die schlimmsten denkbaren Fälle zu berücksichtigen, wurden zwei der Kabel mit Kratzern und kleinen Schnitten im Mantel versehen. Dies sollte es dem Wasser ermöglichen, durch den Mantel in das Kabel und entlang des Kupferkerns in das Innere der Metallkammer zu gelangen. Sollte nun Wasser in die Testanordnung eindringen, würde dies einen deutlichen Abfall des Ohmschen Widerstandes oder gar einen Kurzschluss erzeugen.

Nach zwei Jahren Langzeittest zeigen sich noch keine Änderung des Ohmschen Wider-

⁵Globus Holding GmbH: Leipziger Str. 8, 66606 St. Wendel

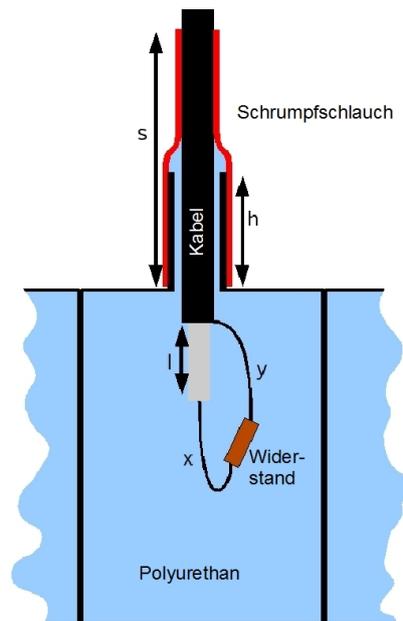


Abbildung 81: Ein Segment der Kabeldurchführungstestanordnung. Bei den verschiedenen Segmenten wurden verschiedene Parameter verändert. Diese waren die Längen des Schrumpfschlauchs s , des Kabeldurchführungrohres h und des abisolierten Kabels l . Außerdem wurden die Abstände des Widerstandes zum Kupferkern x und der Abschirmung des Kabels y verändert.

standes der Anordnung. Insbesondere der „schlimmste Fall Widerstand“⁶ blieb ohne Änderungen. Trotzdem wurden für alle Kabeldurchführungen konservative Größen gewählt: Ein Stahlrohr mit Länge $h = 5$ Zentimeter, sowie ein Schrumpfschlauch mit Länge $s = 15$ Zentimeter.

1.2.3 Die μ -Metall Abschirmung

Wie bereits erwähnt, beeinflussen Magnetfelder die Signale von Photomultipliern. Auch schwache Felder wie das Erdmagnetfeld ($30 \mu\text{T}$ bis $60 \mu\text{T}$) können das Signal stören. Um dieses Problem zu lösen, werden die Dynoden und die Anode des Photomultiplers von einem sogenannten μ -Metall umgeben. Bei diesem handelt es sich um eine Nickel-Eisen⁷ Legierung mit besonders hoher magnetischer Permeabilität. Auf Grund dieser hohen Permeabilität schirmt das μ -Metall äußerst gut gegen niederfrequente beziehungsweise statische äußere Magnetfelder ab.

Dies ist eine bekannte und vielfach eingesetzte Lösung. Tests zeigen, dass ein eingebrach-

⁶Hierbei handelt es sich um einen Widerstand, bei dem die Längen der einzelnen Parameter minimal gewählt wurden ($x \approx 1 \text{ cm}$, $y \approx 1 \text{ cm}$, $l = 0,5 \text{ cm}$, $s = 2 \text{ cm}$ und $h = 1 \text{ cm}$). Zusätzlich wurden noch Kratzer in das Kabel gemacht.

⁷81% Nickel, 19% Eisen

tes μ -Metall Änderungen des Signals deutlich reduziert, wenn der Photomultiplier im Erdmagnetfeld vertikal beziehungsweise horizontal gedreht wird. In Tabelle 14 ist aufgezeigt, inwieweit das μ -Metall die gesamte Variation in dem Abstand des Kanals des Einzelphotoelektronen- bzw. eines Mehrfachphotoelektronenpeaks vom Kanal des Pedestals reduziert. Dabei wird für Nord-Süd Variation die Änderung zwischen 35% und 8% unterdrückt. Für vertikal-horizontal Variation lag die Unterdrückung des Einflusses durch das Magnetfeld zwischen 36% und 16%.

An der Universität Madrid wurde im Rahmen der Messungen von Photomultipliern des Double Chooz Experimentes [Gre09] ebenfalls festgestellt, dass auf Grund des μ -Metalls bei einem anliegenden Magnetfeld von zwei Tesla das Signal nur um 50% schwächer wird.

Tabelle 14: Messung des Einflusses der μ -Metall Abschirmung auf die Signale der Photomultiplier. Abhängigkeit des Abstandes des Kanals (ch) des Pedestals (ped) und des Kanals des Einzelphotoelektronenpeaks (1 PE) beziehungsweise eines Mehrfachelektronenpeaks (25-30 PEs) von der Orientierung eines Photomultipliers im Magnetfeld der Erde. Einmal wurde der Photomultiplier mit μ -Metall Abschirmung betrieben, einmal ohne.

Orientierung	mit μ -Metall		ohne μ -Metall	
	1 PE [ch-ped]	25-30 PEs [ch-ped]	1 PE [ch-ped]	25-30 PEs [ch-ped]
NO	130	441	272	391
O	127	446	270	425
SO	142	472	280	528
S	139	476	280	559
SW	150	476	292	555
W	150	476	286	546
NW	146	461	277	495
N	135	456	263	416
Vertikal	131	404	225	385
Peak/Valley	2.5 - 3	n.a.	2 - 2.5	n.a.
N-S Variation	~16%	~8%	~10%	~35%
Vert.-Hor. Var.	~14%	~16%	~24%	~36%

2 Radioaktive Verunreinigungen des Myonveto

Die durch das Myonveto eingebrachte intrinsische Radioaktivität stellt für das GERDA-Experiment kein Problem dar, da die Komponenten des Myonvetos weit weg von den Kristallen untergebracht sind. Außerdem befinden sich immer mehrere Meter Wasser, die Kupferabschirmung des Kryostaten und mindestens zwei Meter flüssiges Argon zwischen den Germaniumdioden und den Photomultipliern.

Tabelle 15: Gemessene Radioaktivität von verwendeten Materialien des GERDA Myonvetos. Das Gewicht in Klammern hinter dem Namen bezieht sich auf die in einer Kapselung vorkommende Menge an Material.

Material	^{228}Th [mBq/kg]	^{228}Ra [mBq/kg]	^{226}Ra [mBq/kg]	^{40}K [mBq/kg]
9350KB Glas (0,4 kg)	1300 ± 100	1300 ± 100	2000 ± 200	11900 ± 2400
9354KB Glas (0,4 kg)	200 ± 100	300 ± 100	2000 ± 200	1800 ± 400
Edelstahl (2,0 kg)	$2,2 \pm 0,4$	$< 1,6$	$< 2,6$	$< 1,8$
Polyurethan (0,5 kg)	6000 ± 1200	6000 ± 1200	4000 ± 800	25000 ± 5000
Silikongel (0,2 kg)	9 ± 2	4 ± 4	6 ± 2	44 ± 20
Mineralöl (1,2 kg)	< 6	< 12	< 40	60 ± 36
Kabel (5,0 kg)	200 ± 100	200 ± 100	< 200	700 ± 200
VM2000	$< 1,2$	$< 2,2$	$< 1,6$	140 ± 10

Der Vollständigkeit halber wurden die verwendeten Materialien trotzdem alle auf ihre Radioaktivität hin untersucht. Dabei wurden Messungen sowohl in Heilberg am Max-Planck Institut für Kernphysik als auch im Untergrundlabor des Physikalischen Instituts der Universität Tübingen gemacht.

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Messungen zusammengefasst. Im Folgenden soll der Einfluss der Radioaktivität der einzelnen Komponenten diskutiert werden.

- **Edelstahl der Kapselung:**

Die 2,0 kg schwere Edelstahlkapsel ist neben dem Kabel die schwerste Komponente der Kapselungen. Um ihren Untergrund zu messen, wurde eine Probe von der Raff & Grund GmbH zur Verfügung gestellt. Diese wurde am Max-Planck Institut für Kernphysik in Heidelberg mit einem Germaniumdetektor vermessen. Die Probe zeigte einen sehr niedrigen Untergrund in den Anteilen von Thorium, Radium und Kalium.

- **Glas der Photomultiplier 9350KB:**

Die Photomultiplier vom Typ 9350KB von Electron Tubes Limited sind klassifiziert als Photomultiplier mit Glas mit niedrigerer Aktivität. Trotz allem wird deutlich, wenn man sich Tabelle 15 betrachtet, dass der Photomultiplier eine der beiden dominierenden Quellen für den Untergrund ist. Insbesondere die Werte für Kalium 40 sind sehr hoch.

- **Glas der Photomultiplier 9354KB:**

Bei den Photomultipliern mit extrem niedrigem Untergrund vom Typ 9354KB von Electron Tubes Limited ist die gemessene Aktivität deutlich niedriger. Bei dem durch Kalium 40 eingebrachten Untergrund ergibt sich eine Reduktion um einen Faktor sechs und auch die ^{228}Th ist reduziert.

- **Polyurethan:** Neben dem Glas der Photomultiplier ist das Polyurethan die andere dominierende Untergrundquelle. Auf Grund der etwas höheren Masse wird durch das Polyurethan sogar deutlich mehr Untergrundstrahlung induziert als durch das Glas der Photomultiplier. Diese Probe wurde in Tübingen im Untergrundlabor des physikalischen Institutes untersucht.
- **Silikongel:** Bei nur knapp 200 Gramm Silikongel pro Kapselung und einer recht niedrigen Aktivität ist der radioaktive Untergrund pro Kapselung vernachlässigbar.
- **Mineralöl:** Trotz seiner recht großen Menge und damit einem hohen Anteil an der Masse einer einzelnen Kapselung ist der radioaktive Untergrund, welcher durch das Mineralöl eingebracht wird, äußerst gering. Auch diese Probe wurde in Tübingen untersucht.
- **RG213/U Kabel:** Mit fünf Kilogramm, stellt das Kabel die größte Masse dar, welche bei einer Kapselung in das Experiment eingebracht wird. Aber selbst dieser recht große Wert sollte kein Problem darstellen, da der größte Teil der Kabel weit von den Germaniumkristallen entfernt geführt wird.
- **VM2000:**
Ein Quadratzentimeter der Folie wiegt 0,016 Gramm. Bei einer gesamten Fläche von etwa 380 Quadratmetern entspricht dies etwa 60 Kilogramm. Bei der gemessenen Radioaktivität sollte dies überhaupt kein Problem darstellen.

Insgesamt kann man festhalten, dass der Untergrund, der durch die Photomultiplierkapselungen eingebracht wird, vernachlässigbar ist. Sie befinden sich zum Einen weit entfernt von den Germaniumdetektoren. Deshalb ist nahezu die ganze passive Abschirmung des GERDA Experiments (siehe Kapitel 3.3) zwischen den Kapselungen und den Germaniumkristallen. Zum Anderen ist ihre Masse im Vergleich zu anderen Massen verschwindend gering.

Literaturverzeichnis

- [Abt] I. Abt et al., GERDA: *The GERmanium Detector Array, Proposal*, <http://www.mpi-hd.mpg.de/GERDA>.
- [Ahl93] S. Ahlen et al., *MACRO Collaboration*, *Astrophys. J.* **412**, 301 (1993).
- [Ard06] F. Ardellier et al., *Proposal: Double Chooz, a Search for the neutrino mixing angle Θ_{13}* .
- [Arn05] R. Arnold et al., *First Results of the Search for Neutrinoless Double-Beta Decay with the NEMO 3 Detector*, *Physical Review Letters* **95** (2005).
- [Arn08] C. Arnaboldi et al., *Physical Reviews C* **78** (2008).
- [Bir53] J.B. Birks, *Scintillation Counters*, Pergamon Press, London, (1953).
- [Bud08] D. Budj aš, *Update on BEGe measurements*.
- [CD03] H.V. Klapdor-Kleingrothaus Ch. D orr, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A513**, 596 (2003).
- [CK06] A. Caldwell und K. Kr oninger, *Signal discovery in sparse spectra: A Bayesian analysis*, *Physical Review D* **74** (2006).
- [Daw09] J.V. Dawson et al., *An Investigation into the 113-Cd Beta Decay Spectrum using a CdZnTe Array*, arXiv:0901.0996v1 [nucl-ex] (2009).
- [Dem98] W. Demtroeder, *Experimentalphysik 4, Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, 1 Aufl., Springer, (1998).
- [Dem04] W. Demtroeder, *Elektrizit at und Optik*, 3.,  uberarb. u. erw. Aufl., Springer, (2004).
- [Eid04] S. Eidelman et al., *Review of Particle Physics*, *Physics Letters B* **592**, 1 (2004).
- [EV02] S.R. Elliott und P. Vogel, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **52**, 115 (2002).
- [Fae07] A. Faessler et al., *Nuclear Physics* **A 793**, 213 (2007).

- [Fer03] F. Feruglio et al., Nuclear Physics **B659**, 359 (2003).
- [FM02] S-O Flyckt und C. Marmonier, *Photomultiplier Tubes principles and applications*, Photonis, (2002).
- [Gou06] A. de Gouêva, *On Determining the Neutrino Mass Hierarchy*.
- [Gre09] D. Greiner, *Design, Simulation and Construction of the Double Chooz Myonveto*, Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen, (2009).
- [Gru93] C. Grupen, *Teilchendetektoren*, 1 Aufl., Wissenschaftsverlag Mannheim, (1993).
- [Hag09] A. Hagen, *Aufbau eines Flüssigszintillator-Testdetektors*, Diplomarbeit, Eberhard Karls Universität Tübingen, (2009).
- [Jac99] J.D. Jackson, *Klassische Elektrodynamik*, de Gruyter, (1999).
- [KK04] H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al., *Data acquisition and analysis of the ^{76}Ge double beta experiment in Gran Sasso 1990-2003*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A522**, 371 (2004).
- [Kno00] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3 Aufl., John Wiley & Sons, (2000).
- [Kod08] K. Kodama et al., Physical Review **D78** (2008).
- [Law88] J.D. Lawson, *The Physics of Charged-Particle Beams*, Oxford Science Publications, (1988).
- [Len02] C. Lendvai, *Photomultiplier-Einkapselung für das Myon-Veto des Borexino-Experiments und messung myoninduzierter Neutronen in der CTF II*, Diplomarbeit, TU München, (2002).
- [Leo92] W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, (1992).
- [Oss07] C. Oßwald, *Die Szintillationseigenschaften von einkristallinem CaWO_4 bei unterschiedlichen Temperaturen*, Zulassungsarbeit, Universität Tübingen, (2007).
- [PDG08] C. Amsler et al., (*Particle Data Group*), *Physics Letters*, **B667**, (2008).
- [Pov04] B. Povh, K. Rith, C. Scholz und F. Zetsche, *Teilchen und Kerne*, 6 Aufl., Springer-Verlag, (2004).
- [Rit10] F. Ritter, *Die Datenerfassung des GERDA Myonvetos*, Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen, 2010.
- [Sch97] N. Schmitz, *Neutrino-Physik*, 1 Aufl., Teubner Studienbücher, (1997).

- [Suh07] J. Suhonen, *Nuclear Matrix Elements for Double Beta Decay*.
- [UB02] A. Unsöld und B. Baschek, *Der neue Kosmos*, 7. Auflage, Springer-Verlag, (2002).
- [Wri09] D.H. Wright et al., *GEANT4 - User's Guide: For Application Developers*.

Abbildungsverzeichnis

1	Zur Massenhierarchie der Neutrinos	8
2	Grundzustände für Isobare mit $A=76$	11
3	Feynmandiagramm des doppelten Betazerfalls	12
4	Feynmandiagramm des neutrinolosen doppelten Betazerfalls	12
5	Spektrum des neutrinolosen doppelten Betazerfalls des ^{76}Ge	13
6	Massenmatrixelemente des neutrinolosen doppelten Betazerfalls für verschiedene Elemente	15
7	Das LNGS Untergrund Labor	21
8	Das GER manium DE tector AR ray E xperiment	22
9	Der GERDA-Kryostat mit Kupferabschirmung und flüssigem Argon	23
10	Sensitivität des GERDA-Experimentes für verschiedene Untergrundraten	24
11	Einige Beispiele für Pulsformen von verschiedenen Signalen in den Germaniumdetektoren	27
12	Segmentierter Germanium Kristall der Phase II des GERDA-Experiments	28
13	Schematische Darstellung der Entstehung eines atmosphärischen Schauers.	36
14	Feynmandiagramm des Myonzerfalls.	37
15	Feynmandiagramm der Wechselwirkung von Myonen mit Nukleonen.	38
16	Schema des Cherenkov-Effekts für Myonen in Wasser	41
17	Funktionsprinzip eines Photomultipliers	43
18	Typische Quanteneffizienz $\rho(\lambda)$ für Photomultiplier vom Typ 9354KB	44
19	Das Dunkelpulshöhenspektrum des Referenz-Photomultipliers des GERDA-Myonvetos	45
20	Typisches Einzelphotoelektronenspektrum für einen Photomultiplier vom Typ 9350KB	46
21	Querschnitt durch eine der Photomultiplier Edelstahlkapseln	49
22	Signal des Prototypen IV bei 1700 V nach zwei Jahren unter Wasser	50
23	Prototyp I in seinem Behälter für den Unterwassertest	51
24	Der Tank für Drucktests mit den Prototypen III und IV	52
25	Doppelpeak und ein normales Signal eines Photomultipliers	53
26	Diagramm der Base der verwendeten Photomultiplier	54
27	Fertig gestellte Photomultiplierkapselungen des GERDA-Myonvetos	55
28	Zwei Proben der Reflektorfolie VM2000 von 3M	56

29	Spektrum für totale Reflektion für verschiedene Proben der Reflektorfolie VM2000 von 3M	57
30	Spektrum für diffuse Reflektion für verschiedene Proben der Reflektorfolie VM2000 von 3M	57
31	Anregungs- und Emissionsspektren einer unbeschädigten Probe der Reflektorfolie VM2000	58
32	Anregungs- und Emissionsspektren einer beschädigten Probe der Reflektorfolie VM2000	59
33	Simulationsgeometrie des Myonvetos, visualisiert mit Dawn, einem Programm zur Visualisierung für Geant4	61
34	Aufriß des GERDA-Wassertanks zur Position der Photomultiplier	62
35	Schematische Zeichnung der Plastik-Szintillatorpaneele	63
36	Foto des Flüssigszintillator-Testdetektors	64
37	Ein einfaches Beispiel für Monte Carlo Methoden	67
38	Struktur des MaGe-Frameworks	73
39	Schematische Skizze der implementierten Photomultiplierkapselung	76
40	Vergleich der Energiedeposition in den Germaniumkristallen für die Monte Carlo Campaign I und II	79
41	Mit Dawn erzeugte Visualisierung der in der Simulation für Phase II verwendeten Kristallgeometrie	80
42	Simuliertes Energiespektrum der Myonen am LNGS	82
43	Simuliertes Spektrum des Azimutwinkels der Myonen in Halle A des LNGS	82
44	Simuliertes Spektrum des Elevationswinkels der Myonen am LNGS	83
45	Skizzen einer Energiedeposition eines gefährlichen Myons und eines extrem gefährlichen Myons	84
46	Anzahl an extrem gefährlichen Myonen für verschiedene Energiefenster	86
47	Anzahl an extrem gefährlichen Myonen für ein Energiefenster von 10 keV	88
48	Photonintensitäten für die Wand des Wassertanks	89
49	Photonintensitäten für den Boden des Wassertanks	90
50	Photonintensitäten für die Pillbox	91
51	Mögliche Lücken in der Abschirmung durch das Myonveto	92
52	In der Simulation registriertes Photonenspektrum mit und ohne VM2000	93
53	Entwicklung der verschiedenen verwendeten Testverteilungen für die Photomultiplier in den Simulationen	95
54	Pfade von Klasse 2 gefährlichen Myonen	97
55	Spektrum der Energiedeposition von kosmischen Myonen für den Bereich bis drei GeV	99
56	Spektrum der Energiedeposition von kosmischen Myonen für den Bereich bis drei MeV	100
57	Energiedeposition von kosmischen Myonen in der Umgebung der 2039 keV Linie des neutrinolosen doppelten Betazerfalls	100

58	Intensität der von allen Photomultiplier detektierten Photonen in Abhängigkeit von der Zeit	104
59	Intensität der detektierten Photonen in Abhängigkeit von der Zeit eines einzelnen PMTs	105
60	Zur Generierung von Zeitfenstern für die Triggeregenerierung	106
61	Zwei Gruppen an Photomultipliern welche in den FADCs 1 und 10 verarbeitet werden	110
62	Beispiel der Triggerung des Myonvetos	111
63	Spektrum um 2039 keV ohne Myonveto	112
64	Das Spektrum um die 2039 keV Linie nach einem Myonveto mit einer Schwelle von 3 FADCs	114
65	Das Spektrum um die 2039 keV Linie nach einem Myonveto mit einer Schwelle von 4 FADCs	114
66	Das Spektrum um die 2039 keV Linie nach einem Myonveto mit einer Schwelle von 5 FADCs	115
67	Das Spektrum um die 2039 keV Linie nach einem Myonveto mit einer Schwelle von 6 FADCs	115
68	Das Spektrum um die 2039 keV Linie nach einem Myonveto mit einer Schwelle von 7 FADCs	116
69	Gesamtes Energiespektrum der Germaniumdetektoren nach einem Myonveto mit einer Schwelle von 3 FADCs	116
70	Schema der Überwachung einzelner Photomultiplier mittels Leuchtdioden	120
71	Schema eines Diffusorballs	121
72	Zeichnung des Kamins mit Flanschen für die Kabeldurchführungen und des Kabelkanals für das Cherenkov-Veto	124
73	Die Splitterbox für die Photomultiplier des Cherenkov-Vetos	126
74	Flussdiagramm der GERDA-Datenerfassung	127
75	Das GERDA-Experiment	131
76	Gesamtes Energiespektrum der Germaniumdetektoren nach einem Myonveto mit einer Schwelle von 4 FADCs	133
77	Foto des GERDA-Myonvetos	134
78	Konfiguration der Plastikpaneele	136
79	Skizze der Verbindung des RG213/U	138
80	Skizze der Kabeldurchführung im Stahlbecher der Photomultiplier Kapselungen	139
81	Ein Segment der Kabeldurchführungstestanordnung	145

Tabellenverzeichnis

1	Eigenschaften der drei Neutrinoarten	7
2	Die Phasen des GERDA-Experiments	27
3	Eigenschaften des Referenz-Photomultipliers des GERDA-Myonvetos	47
4	Zusammenfassung der verwendeten Hard- und Software für die abschließen- den Simulationen	74
5	Anzahl an simulierten Myonen der Monte Carlo Campaign I und II des GERDA-Experiments	85
6	Untergrund durch Myonen für verschiedene Orts- und Energieauflösungen der Germaniumdioden	87
7	Effizienz der Myonendetektion für die vier verschiedenen Testverteilungen der Simulationen	94
8	Raten in Hz für zufällige Koinzidenzen bei verschiedenen Triggerbedingun- gen für die sechs Pillbox Photomultiplier	103
9	Raten in Hz für zufällige Koinzidenzen bei verschiedenen Triggerbedingun- gen für zehn verwendete Flash ADCs	104
10	Einzelne Photomultipliersignale als Triggerbedingung mit $\Delta t = 50$ ns . . .	108
11	Einzelne Photomultipliersignale als Triggerbedingung mit $\Delta t = 30$ ns . . .	108
12	Zusammenfassung: Mehrere FADCs als Triggerbedingung für verschiedene Zeitfenster des GERDA-Myonvetos	109
13	Untergrund durch kosmische Myonen für verschiedene Triggerschwellen . .	113
14	Messung des Einflusses der μ -Metall Abschirmung auf die Signale der Pho- tomultiplier	146
15	Gemessene Radioaktivität von verwendeten Materialien des GERDA Myon- vetos	147

Danksagung

Erst beim Schreiben dieser Zeilen wird deutlich, wie viele Leute dabei mitgeholfen haben, dass das GERDA-Myonveto letzten Endes fertig gestellt worden ist.

- Zuallererst möchte ich meinen Betreuern Prof. Dr. Josef Jochum und Prof. Dr. Peter Grabmayr, ohne die diese Arbeit niemals statt gefunden hätte, geschweige denn erfolgreich gewesen wäre, bedanken.
- Als nächstes möchte ich dem Leiter der Taskgroup 10, Dr. Luciano Pandola danken. Wenn ich Probleme bei der Arbeit mit MAGE hatte, konnte ich immer darauf bauen, dass er eine Lösung wusste.
- Meinem langjährigen Freund, Dipl. Phys. Daniel Greiner möchte ich einfach für seine Hilfe danken, denn alles aufzuzählen, bei dem er mir geholfen hat, würde diese Danksagung sprengen. Ganz besonders möchte ich mich für seine Freundschaft bedanken.
- Dr. Ludwig Niedermeier möchte ich für seine Hilfe beim Entwurf und dem Design des Myonvetos und der Photomultiplierkapselungen danken.
- Prof. Dr. Tobias Lachenmaier möchte ich für viele anregende Gespräche und viele hilfreiche Tipps danken.
- Dr. Bayarto Lubsandorzhev möchte ich für seinen Rat und seine Hilfe bei allen Dingen, die mit Photomultipliern zu tun hatten, danken.
- Den Systemadministratoren Dr. Arthur Erhart und Dipl. Phys. Marcel Kimmerle möchte ich dafür danken, dass sie bei Hard- und Softwareproblemen immer zur Stelle waren und immer eine Lösung wussten.
- Florian Ritter und Georg Meierhofer möchte ich für viele anregende Gespräche und ihre Hilfe beim Einbau des Myonvetos in Italien danken.
- Dennis Dietrich möchte ich für den Bau der Diffusorbälle und die Hilfe beim Einbau des Myonvetos in Italien danken.
- Dr. Kevin Kröniger, Dipl. Phys. Daniel Lenz, Dr. Jing Liu und Dr. Xiang Liu möchte ich für ihre Hilfe bei der Arbeit mit MAGE danken.

- Stefano Gazzana, Luca Ioannucci und Dr. Matthias Junker vom INFN möchte ich für ihre Hilfe vor Ort und bei der Organisation des Einbaus des Myonvetos in Italien danken.
- Dr. Peter Peiffer und Dr. Christian Buck möchte ich für ihre Hilfe bei der Messung der spektralen Eigenschaften der VM2000 Reflektorfolie danken.
- Herrn Brodbeck und der Feinmechanikwerkstatt des Physikalischen Institutes möchte ich für die vielen Dinge danken, die sie, teilweise in sehr kurzer Zeit, für das Myonveto gebaut haben.
- Herrn Schreyer und der Elektronikwerkstatt des Physikalischen Institutes möchte ich für die vielen Dinge danken, die sie, teilweise in sehr kurzer Zeit, für das Myonveto gebaut haben.
- Dipl. Phys. Michael Bauer und Dipl. Phys. Stefan Scholl möchte ich für ihre Hilfe beim Programmieren mit GEANT4 danken.
- David Auwärther, Stefan Christmann, Kai Freund, Tina Oexle, Rainer Schmidt und Christofer Schmitt möchte ich für ihre Hilfe beim Einbau des Myonvetos in Italien und für die Hilfe bei der Fertigung und der Verpackung der Photomultiplierkapselungen danken.
- Ganz besonders möchte ich Dipl. Phys. Gerhard Deuter, Dipl. Phys. Andrea Hagen, Dipl. Phys. Annette und Dipl. Phys. Sebastian Pricking und Dipl. Phys. Markus Röhling für all die tollen DSA-Abende und -Wochenenden danken.
- Brunhilde Eiskant, Dr. Günter Lang, Sonja Schimmel, Sabine Schulze und Anja Walz möchte ich ganz besonders dafür danken, dass sie mir in Fragen der Verwaltung, Beschaffung und Organisation der Universität geholfen haben.
- Claudia und Tina Oßwald möchte ich einfach dafür danken, dass sie immer da waren und mir durch manche Krise während der Arbeit an dieser Dissertation geholfen haben.
- Und zum Schluss möchte ich noch meinen Eltern für ihre Unterstützung und ihren Rückhalt während meinem ganzen Studium danken.