

Bachelorarbeit

Aufbau und Charakterisierung von Prototyp-Detektoren für das CALIFA-Kalorimeter

Markus Dierigl

4. August 2011

Physik Department E12

Technische Universität München



Zusammenfassung

Das CALIFA-Kalorimeter wird ein wesentlicher Bestandteil des R^3B -Experiments sein, welches an der neu entstehenden "Facility for Antiproton and Ion Research" (FAIR) in Darmstadt aufgebaut wird. Der sogenannte "Barrel"-Teil dieses Kalorimeters wird aus fast 3000 einzelnen CsI(Tl) Szintillatorkristallen bestehen. Daher beschäftigen sich zahlreiche Gruppen mit der Entwicklung und Optimierung der einzelnen Detektorkomponenten. Speziell die Kombination von CsI(Tl) und Plastikszintillatoren in sog. Phoswich-Detektoren erlaubt dabei ein völlig neues Anwendungsspektrum, insbesondere für hochenergetische, geladene Teilchen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde eine reproduzierbare Methode zur Fertigung solcher Phoswich-Detektoren entwickelt. Dank neuer Falstechniken der Reflektorfolie, neuer Klebetechniken, intensivem Studium optionaler Materialien als auch individuell entwickelter Hilfsmittel wurde hierbei eine sehr gute und homogene Lichtausbeute erzielt. Es gelang, trotz der komplexen Form der Detektoren und der Verwendung relativ kleiner Auslesesensoren (10mm x 10mm APD) eine Energieauflösung von 6.4% (bei 1.332 MeV γ -Quanten) zu erreichen. Ungeachtet der Reduzierung der Dicke der reflektierenden Schichten und zusätzlicher Verbundstellen im Vergleich zu den alten Prototypen konnte deren relative Auflösung (6.7%) sogar weiter verbessert werden. Neben zahlreichen Tests mit Gammastrahlung aus radioaktiven Quellen wurden auch Versuche mit leichten, geladenen Teilchen am Tandem Beschleuniger des Maier-Leibnitz-Laboratoriums erfolgreich durchgeführt.

Darüberhinaus wurde im Zuge dieser Arbeit ein Experimentaufbau zur Identifikation einer möglichen Zeit-Wellenlängen-Korrelation der spektralen Emission von CsI(Tl) entwickelt und damit erste Tests im Optiklabor des Instituts durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	1
2. Der Phoswich-Detektor	3
2.1. Aufbau eines Phoswich-Detektors	3
2.2. Anwendung am CALIFA-Kalorimeter	5
3. Fertigung eines Phoswich-Detektors	7
3.1. Lagerung des CsI(Tl)	7
3.2. Auswahl der Komponenten	7
3.2.1. Auswahl des Klebers	8
3.2.2. Auswahl der Reflektorfolie	11
3.2.3. Faltformen der Reflektorfolie	13
3.2.4. Reflektivität mit Luftschicht zwischen ESR und Szintillatorkristall	14
3.3. Anleitung zur Anfertigung des Phoswich-Detektors	16
3.3.1. Optische Anbindung der APD-Sensoren	16
3.3.2. Aufeinanderkleben der Szintillatoren	18
3.3.3. Schneiden der Reflektorfolie	19
3.3.4. Einpacken des Phoswich	21
4. Test der Detektoren am MLL	23
4.1. Anordnung der Detektoren	23
4.2. Energieauflösung	26
4.3. Messung mit hochenergetischen Photonen	28
4.4. Beurteilung der Testergebnisse	29
5. Thallium dotiertes Cäsiumiodid	32
5.1. Emissionsmechanismen von CsI(Tl)	32
5.2. Spektrale Untersuchung der zeitabhängigen Lichtemission	34
5.3. Aufbau des Experiments	34
5.4. Tests mit Natrium-Quelle	35
5.5. Ausblick für weitere Experimente	36
6. Zusammenfassung und Ausblick	39
A. Anwendungen für Phoswich-Detektoren	41
B. Eigenschaften des verwendeten Plastiksintillators	42

Inhaltsverzeichnis

C. Experiment zum Test der Lichtsammlung	43
D. Auswertung der Fresnelschen Gesetze für Reflexionen mit Luftschicht	48
E. Anordnung der Detektoren	50

Abbildungsverzeichnis

1.1. Lageplan der Beschleunigeranlage FAIR	1
2.1. Schematischer Aufbau eines Phoswich-Detektors	3
2.2. Schematische Pulsform eines Phoswich-Detektors	4
2.3. Photos der angefertigten Detektoren	5
2.4. Schematische Darstellung der Energiedeposition in einem Phoswich	6
3.1. Photo der institutseigenen Handschuhbox	8
3.2. Photo der gefederten Platte zur Kristall-Lagerung	8
3.3. Photo der Klebproben	9
3.4. Wrapping der spanischen Prototypen	12
3.5. Schematische Darstellung des Effekts verschiedener Kristallformen	12
3.6. Photo der erstellten Faltmuster	14
3.7. Schematische Darstellung der für die Reflexion wichtigen Größen	15
3.8. Verlorene Intensität bei vorhandener Luftschicht	16
3.9. Aufbringen des Spiegelband-Rähmchens	17
3.10. Anmischen des Klebers	19
3.11. Angefertigter Klebewinkel	20
3.12. Photo des Phoswich auf der Wrappingfolie	21
3.13. Photos der fertigen Detektoren	22
4.1. Angefertigte Detektorbox	24
4.2. Anordnung der Detektoren in der Vakuumkammer (Experiment am MLL)	25
4.3. Aufgenommene Eichspektren von ^{22}Na und ^{60}Co	30
4.4. Aufgenommenes Spektrum bei Beschuss einer deuterierten Plastikfolie mit 24 MeV Protonen	31
5.1. Energieniveauschema der "Relaxed Exited States" in CsI(Tl)	33
5.2. Berechnetes Signal mit oder ohne Zeit-Wellenlängen-Korrelation	35
5.3. Technische Zeichnung des Experiments zur Bestimmung der Zeit-Wellenlänge- Korrelation in CsI(Tl)	36
5.4. Technische Querschnittszeichnung zur Visualisierung der Funktionsweise	37
5.5. Gemessenes Koinzidenz-Spektrum von CsI(Tl)	38
C.1. Referenzprobe zur Bestimmung der Lichtsammlung	43
C.2. Plexiglas-Probe zur Bestimmung der Lichtsammlung	44
C.3. Datenauswertung zur Effektivität der Lichtsammlung	46

Abbildungsverzeichnis

C.4. Vergrößerter Ausschnitt der Grafik zur Lichtsammlung	47
D.1. Verlorene Intensität der beiden Polarisationen	49
E.1. Lage der einzelnen Detektoren in der Detektorbox	50

Tabellenverzeichnis

3.1. Eigenschaften der getesteten Kleber	10
4.1. Energieauflösung der Detektoren aus Eichmessungen	27
4.2. Energieauflösung der Detektoren aus Messungen mit Protonenstrahl	29
5.1. Werte zum Energieniveauschema	33
B.1. Eigenschaften des BC400 Plastikszintillators	42
C.1. Ergebnisse zum Experiment der Lichtsammlung	45

Kapitel 1.

Einleitung und Motivation

In den kommenden Jahren wird am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (GSI) eine der größten Forschungseinrichtungen Deutschlands entstehen, die Facility for Antiproton and Ion Research, kurz FAIR.

Die im Bau befindliche Anlage umfasst unter anderem die beiden Schwerionensynchrotrons SIS100 und SIS200 mit einem Umfang von etwa 1100 Metern. Die darin beschleunigten, hochenergetischen Schwerionenstrahlen besitzen hervorragende Eigenschaften, vor allem was die Intensität und die Qualität des Strahls betrifft.

Die Lage und Verbindungen der einzelnen Beschleunigerelemente der Anlage sind in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt.

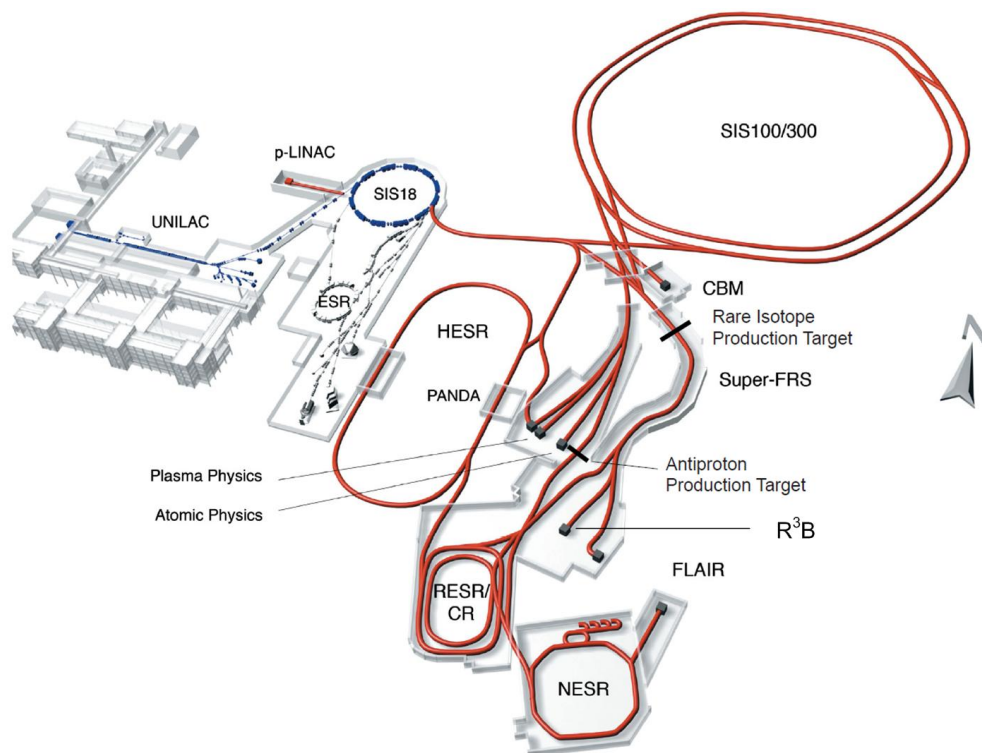


Abbildung 1.1.: Lageplan der Beschleunigeranlage FAIR. [Ben10]

Neben diesen Beschleunigungsringen wird außerdem noch eine verbesserte Version des

Kapitel 1. Einleitung und Motivation

"GSI Projectile Fragment Separator" (FRS) gebaut, der Super FRS. Dieser ermöglicht die Identifikation und Selektion von radioaktiven Sekundärstrahlen, die in Schwerionenkollisionen erzeugt wurden, und leitet diese an angegliederte Experimente weiter.

Eines dieser Experimente ist das R^3B -Experiment ("Reactions with Relativistic Radioactive Beams") zur kinematisch vollständigen Untersuchung radioaktiver Strahlen und deren Reaktionen. Die gesamte Targetregion ist bei diesem Aufbau von dem großvolumigen CALIFA-Kalorimeter umschlossen.

Das "CALorimeter for In-Flight emitted gAmmas and light charged particles" wird aus etwa 5000 einzelnen Szintillatorkristallen bestehen und soll sowohl γ -Quanten als auch leichte geladene Teilchen bis zu Energien von 300 MeV nachweisen können. Die große Anzahl von Kristallen ist erforderlich, da bei den im Experiment auftretenden Energien der Teilchenstrahlen eine Dopplerverschiebung (bis zu einer Verdreifachung der Photonenenergie) auftreten kann. Damit ist eine äußerst gute Bestimmung der Emissionsrichtung zur Realisierung eines hochauflösenden Kalorimetersystems notwendig. Dieser Umstand erfordert die feine Segmentierung und bedingt die hohe Anzahl einzelner Kristallen.

Mit diesem Aufbau soll für γ -Quanten mit einer Energie von 1 MeV eine relative Energieauflösung von 6% erreicht werden. Für Protonen mit 180 MeV soll die relative Auflösung sogar bei 1% liegen. Diese Werte sind dadurch zu begründen, dass ab entsprechender Genauigkeit die Auflösung durch die Dopplerverschiebung der Strahlung dominiert wird. Daher würde eine weitere Verbesserung der Kristall- und detektorbedingten Auflösung keine drastische Verbesserung in der späteren Auswertung bewirken.

CsI(Tl) ist für die Anwendung in einem derartigen Kalorimeter gut geeignet, da es sowohl gute physikalische Eigenschaften aufweist, als auch eine kostengünstige Alternative zu anderen Szintillatoren bietet. Deswegen wird es als Szintillator im "Barrel" (Bereich unter dem Winkel $42^\circ < \Theta < 136^\circ$ zur Strahlrichtung) des CALIFA-Kalorimeter verwendet.

Cäsiumiodid ist ein Alkalihalogenid, welches in kubischer Struktur kristallisiert. Es ist einfach verformbar und leicht hygroskopisch. Durch die hohe Dichte und die großen Kernladungszahlen ($Z_I = 53$, $Z_{Cs} = 55$) ist es sehr gut für die Absorption und Detektion von γ -Quanten geeignet. Weiterhin besteht bei dem Material die Möglichkeit durch gezieltes Dotieren mit Fremdatomen die Eigenschaften für spezielle Anwendungen anzupassen. So sind die hier verwendeten Kristalle mit Thallium dotiert, was interessante Eigenschaften bezüglich der Emission des Szintillationslicht im sichtbaren Spektrum zur Folge hat. Vor allem die hohe Lichausbeute (65000 Photonen pro MeV, siehe [Ben10] S. 10) und Effizienz machen es auch für den Nachweis niederenergetischer γ -Quanten geeignet.

Alternativ zu einfachen Szintillatoren wird eine Kombination aus zwei verschiedenen Materialien, ein sogenannter Phoswich, speziell für Winkel $\Theta < 42^\circ$ diskutiert.

Zu diesem Zweck sollen einerseits die Eigenschaften von CsI(Tl) sowie ein guter Weg zur Verarbeitung des Materials bis hin zum kompletten Detektorelement entwickelt und getestet werden.

Einige dieser Punkte wurden im Rahmen meiner Bachelorarbeit untersucht und zum Teil entscheidend vorgebracht.

Kapitel 2.

Der Phoswich-Detektor

Eine der Möglichkeiten zur Messung der Energie einfach geladener, schneller Teilchen, ohne ausreichend Material zur Verfügung zu haben um diese zu stoppen, ist der sogenannte Phoswich-Detektor (kurz für Phosphor-Sandwich). Es steht zur Diskussion beim CALIFA-Kalorimeter im Winkelbereich $\Theta < 42^\circ$ (zur Strahlrichtung) statt einfacher Szintillatoren aus CsI(Tl) eine Kombination aus zwei verschiedenen Materialien einzusetzen.

Daher werden die Art und die Funktionsweise dieses speziellen Detektortyps hier kurz dargestellt.

2.1. Aufbau eines Phoswich-Detektors

Der einfachste Aufbau eines Phoswich-Detektors mit APD (Avalanche Photodiode)-Auslese und zwei verschiedenen Szintillatoren ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt.

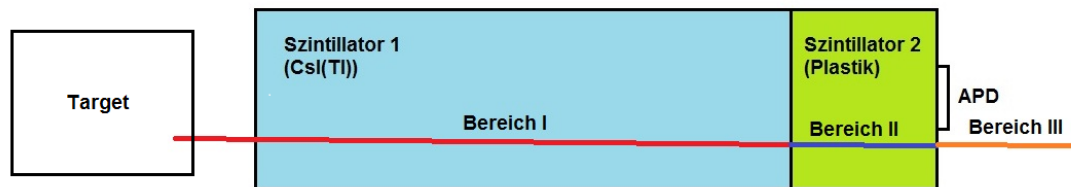


Abbildung 2.1.: Schematischer Aufbau eines Phoswich-Detektors aus zwei verschiedenen Szintillatoren. In Klammern sind die im durchgeführten Experiment verwendeten Materialien aufgeführt. Die Linie stellt eine mögliche Teilchentrajektorie dar, deren charakteristische drei Bereiche durch verschiedene Farben gekennzeichnet sind.

Das Entscheidende ist nun, dass man bei der Auslese die Lichtemission aus den beiden verschiedenen Materialien unterscheiden kann. Zum Beispiel können die beiden verwendeten Szintillatoren stark unterschiedliche Zerfallszeiten für die Lichtemission besitzen. So hat der vom Target abgewandte Teil in diesem Aufbau eine sehr kurze Zeitkonstante

τ_f , wobei hier ein organischer Szintillatoren zum Einsatz kommt. Der vordere Teil hingegen hat eine vergleichsweise lange Zeitkonstante τ_s , hierfür eignen sich Materialien wie Cäsiumiodid oder Natriumiodid.

Diese beiden Komponenten müssen nun möglichst gut optisch gekoppelt werden um unerwünschten Lichtverlust durch Absorption oder Reflexion an der Verbundstelle zu verhindern. Das ist notwendig, weil nur ein einziger Sensor, eine APD, das Szintillationslicht beider Materialien detektiert. Wie diese optische Kopplung optimiert werden kann, wird in folgenden Kapiteln ausführlich diskutiert. Weiterhin müssen die beiden Komponenten auch selbst gut durchlässig für das emittierte Licht sein.

Durch diese Konfiguration wird nun eine charakteristische elektrische Pulsform erzeugt. Da nur die Lichtmenge pro Zeit gemessen wird, müssen die Emissionen aus den beiden unterschiedlichen Materialien dem jeweils individuellen zeitlichen Verlauf entsprechend separiert werden. Selbst nach Faltung mit dem Ansprechverhalten der Vorverstärker-Elektronik ($\tau_{rise} \approx 30$ ns) kann die schnelle Emission aus dem Plasic ($\tau_f \approx 2$ ns) noch einfach von der sehr langsamen Emission des CsI(Tl) getrennt werden. Die typische Form eines derartigen Lichtpulses ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

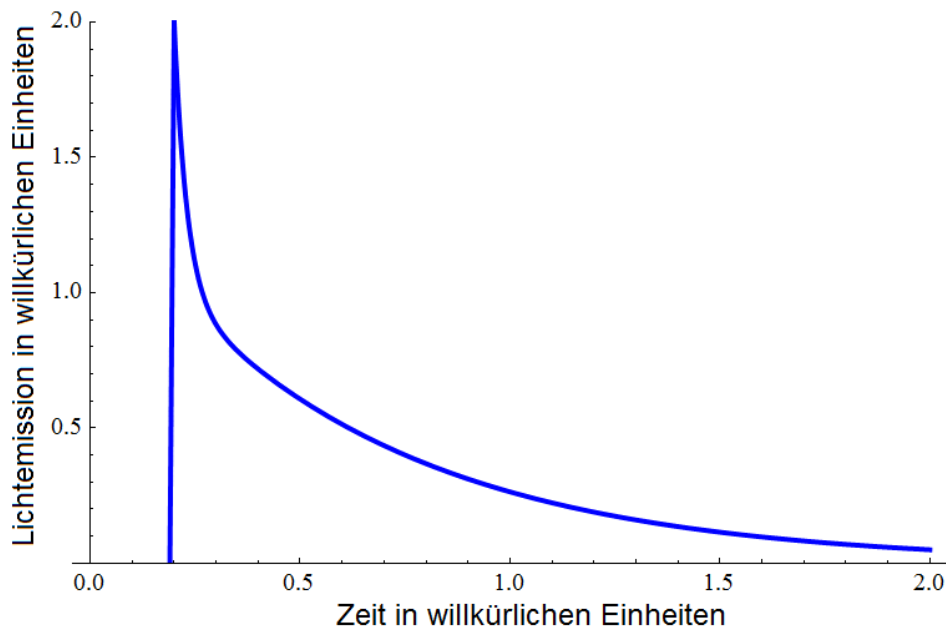


Abbildung 2.2.: Schematische Pulsform eines Phoswichdetektors. Auf der x-Achse ist die Zeit nach Wechselwirkung mit einem Teilchens in willkürlichen Einheiten, auf der y-Achse die Lichtemission der Szintillatoren, wiederum in willkürlichen Einheiten aufgetragen. Angefertigt mit Wolfram Mathematica 8.

Man sieht deutlich den schnellen Peak, welcher durch die Photonen aus dem schnell

emittierenden Material (Plastik) ausgelöst wird (Zeitkonstante τ_f) und darunter die langsam abfallende Komponente (Zeitkonstante τ_s) des anderen Materials (z. B. eine Komponente von CsI(Tl)). Die Unterscheidung der Energiedeposition in den unterschiedlichen Materialien erlaubt nun verschiedenartige Anwendungen, welche kurz in Anhang A angegeben sind.

Wie die Unterscheidung der beiden Signale im einzelnen geschieht wird zum Beispiel in [Wil51] diskutiert.

2.2. Anwendung am CALIFA-Kalorimeter

Die für das CALIFA-Kalorimeter angefertigten Prototypen sind wie oben beschrieben aufgebaut. Das langsam szintillierende und schwere CsI(Tl) ist zum Target orientiert und das leichte Plastik auf der Rückseite angebracht. Die Lichtsignale werden über eine "Large Area APD" (LAAPD)¹ ausgelesen, die auf der hinteren Seite des Plastiksintillators angebracht wurde (siehe Abbildung 2.1 und 2.3). Die Eigenschaften und Spezifikationen des verwendeten Plastiksintillators sind im Anhang B zusammengefasst, das CsI(Tl) wird hingegen in Kapitel 5 am Ende der Arbeit beschrieben.



Abbildung 2.3.: Links: Fertiger Phoswich-Detektor in Seitenansicht (der kurze Plastiksintilliator befindet sich auf der linken Seite, der lange CsI(Tl)-Kristall rechts). Rechts: Auf dem Plastiksintillator befestigte APD

Darüber hinaus ist die Plastikkomponente mit etwa zwei Zentimetern deutlich kürzer als der circa 13 Zentimeter lange CsI(Tl)-Kristall. Dies hat zur Folge, dass die meisten Teilchen wie auch γ -Quanten bereits im vorderen Teil gestoppt bzw. vollständig absorbiert werden. Hochenergetische Protonen lösen allerdings ein wie in Abbildung 2.2 gezeigtes typisches Signal aus.

Auf Grund der zweifachen Messung des Energieverlustes in den beiden Schichten kann die Gesamtenergie auch von denjenigen Protonen rekonstruiert werden, welche den ganzen Detektoraufbau durchqueren. Dies ist über einen weiten Energiebereich möglich. In Abbildung 2.4 ist das spezifische Verhalten des Signals bezüglich der Energie der einfallenden Protonen dargestellt.

Man kann drei verschiedene Bereiche unterscheiden:

¹LAAPD vom Typ S8664-1010 hergestellt von Hamamatsu mit einer aktiven Fläche von 10mm x 10mm, siehe auch [Ben10]

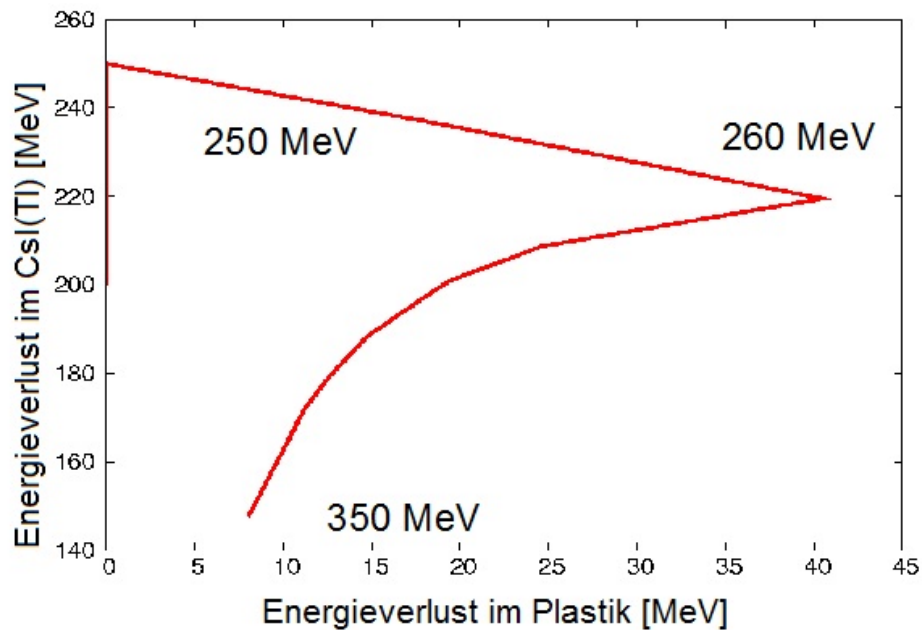


Abbildung 2.4.: Schematische Energiedeposition von Protonen im Energiebereich von 200 bis 350 MeV in den beiden Szintillatormaterialien. Deutlich sind die in Abbildung 2.1 definierten Bereiche zu erkennen. Auf der x-Achse ist die im Plastik (2cm dick) deponierte Energie in MeV aufgetragen, auf der y-Achse die im CsI(Tl) (13cm dick) deponierte Energie, ebenfalls in MeV.[Int11]

- Bereich I: Bis Energien von etwa 250 MeV wird das Proton komplett im CsI(Tl)-Kristall gestoppt. Im Signal sind also nur die langsamen Zeitkonstanten enthalten und die Gesamtenergie wird vollständig gemessen.
- Bereich II: Bei Energien zwischen circa 250 und 260 MeV dringt das Proton zusätzlich in den Plastikszintillator ein und löst dabei das typische schnelle Signal aus. Die Ermittlung der Gesamtenergie kann hierbei durch getrennte Summation der beiden unterschiedlich geeichten Lichtmengen und der zugehörigen Signale geschehen, da immernoch die gesamte Energie im Detektor deponiert wird.
- Bereich III: Bei Energien von mehr als 260 MeV kann das Proton schließlich auch nicht mehr im Plastik gestoppt werden und verlässt den Detektor wieder. Allerdings deponiert es dabei charakteristische Bruchteile der Energie in beiden Komponenten (Verlauf der Kurve in Abbildung 2.4). Aus diesen zwei Bruchteilen kann deshalb dennoch die Gesamtenergie berechnet werden.

Die Fertigung eines solchen Detektors erfordert allerdings besondere Vorsicht und spezielle Techniken, welche im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben werden.

Kapitel 3.

Fertigung eines Phoswich-Detektors

Der Umgang mit den verwendeten Materialien erfordert einiges an Vorsicht und im Rahmen der Arbeit wurden einige neue Techniken und Aufbauten entwickelt. Daher wird im Folgenden der genaue Ablauf der Anfertigung eines Phoswich-Detektors dargestellt.

Anzumerken ist, dass für erste Prototypen maßstabsgetreue Plexiglas-Formmuster (Dummies) hergestellt wurden um die Beschädigung der kostspieligen Szintillatoren zu vermeiden und die neu entwickelten Techniken testen und verbessern zu können.

3.1. Lagerung des CsI(Tl)

Da wie bereits erwähnt, das verwendete Szintillatormaterial leicht hygroskopisch ist und damit für eine längere Lagerung vor Wasser geschützt werden sollte, werden die neu bestellten ebenso wie die zuvor schon vorhandenen Kristalle in einer Handschuhbox aufbewahrt (Abbildung 3.1). Diese wird permanent mit Stickstoff durchspült und steht durchgängig unter einem leichten Überdruck, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Auch die angebrachte Schleuse ermöglicht eine saubere und sichere Art die Kristalle vor schädlichen Einflüssen zu schützen, da diese beim Einbringen von neuen Materialien in der Regel zuerst evakuiert und danach mit Stickstoff geflutet wird. Bei frisch geklebten Kristallen und anderen druckempfindlichen Vorrichtungen wird auf das Evakuieren verzichtet, aber die Schleuse dennoch mit Stickstoff durchspült. Durch diese Maßnahmen konnte die Luftfeuchtigkeit während des gesamten Lagerzeitraums auf konstant 6% gehalten werden.

Um eventuelle Schäden durch die Vibrationen der Handschuhbox zu vermeiden, wurde außerdem eine auf Metallfedern gelagerte Aluminiumplatte verwendet. Diese sorgt durch Dämpfung der Schwingungen für eine weitgehend ruhige und sichere Lagerung (Abbildung 3.2).

3.2. Auswahl der Komponenten

Um eine optimale Anfertigung des Phoswich-Detektors gewährleisten zu können, müssen die verwendeten Materialien wie Kleber, Reflektorfolie und Halterungen ausgiebig in ihren Eigenschaften untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Tests sind im Folgenden detailliert dargestellt.

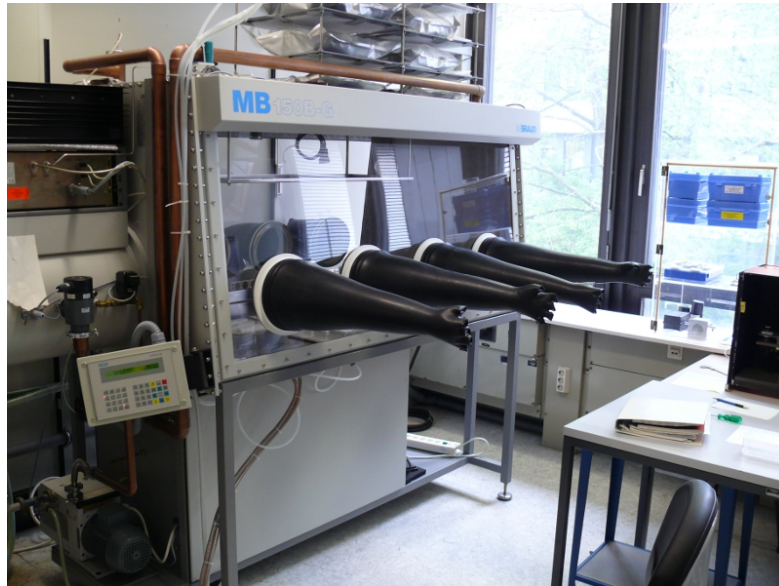


Abbildung 3.1.: Verwendete Handschuhbox im Reinraum des Instituts E12

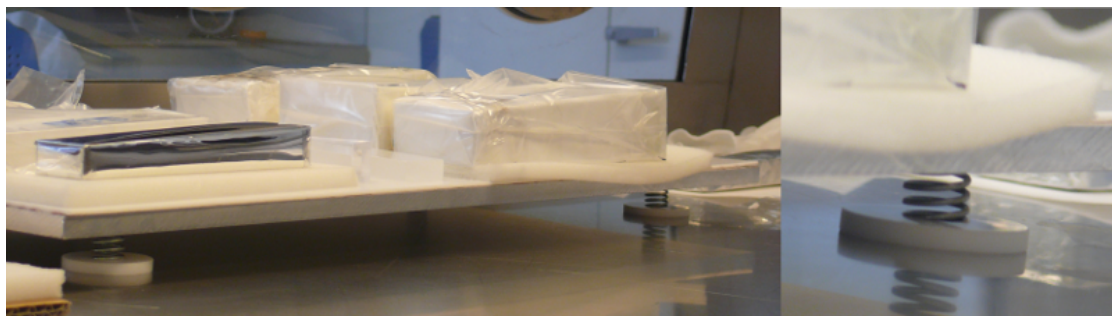


Abbildung 3.2.: Auf Federn gelagerte Aluminiumplatte zur Vermeidung von Vibrationen

3.2.1. Auswahl des Klebers

Die Auswahl eines geeigneten Klebers ist für die Fertigung von entscheidender Bedeutung, da sowohl die beiden Szintillatoren optisch gut gekoppelt werden müssen, als auch die LAAPD mit ihrer aktiven Fläche von 10mm x 10mm optimal auf dem Plastikszintillator befestigt werden muss. Ziel ist es möglichst das gesamte Licht aus dem Szintillator auf die aktive Fläche des Sensors zu bringen und Absorption an Verbundstellen zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden zahlreiche Tests durchgeführt.

Es wurde das Verhalten verschiedener Kleber-Material-Kombinationen erprobt. Weiterhin wurden sowohl großflächige Klebestellen, wie sie zwischen den Oberflächen der beiden Szintillatoren auftreten, als auch die speziellen Erfordernisse beim Ankleben der APDs untersucht. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Hilfsmittel benutzt. Beispielsweise wurden aus Plexiglas-Stückchen, Spiegelfolie und schnellhärtendem Kleber APD-Dummies

Kapitel 3. Fertigung eines Phoswich-Detektors

gefertigt, welche die typische Wölbung des Eintrittsfensters der echten APDs simulieren sollten. Als letzter Test und zur Übung der einzelnen Fertigungsschritte wurden schließlich auch zwei der Plexiglas-Formmuster, in exakter Kristallform, aneinandergeliebt. Abbildung 3.3 zeigt ein Bild der Fülle an verschiedenartigen, beschrifteten und kategorisierten Proben.

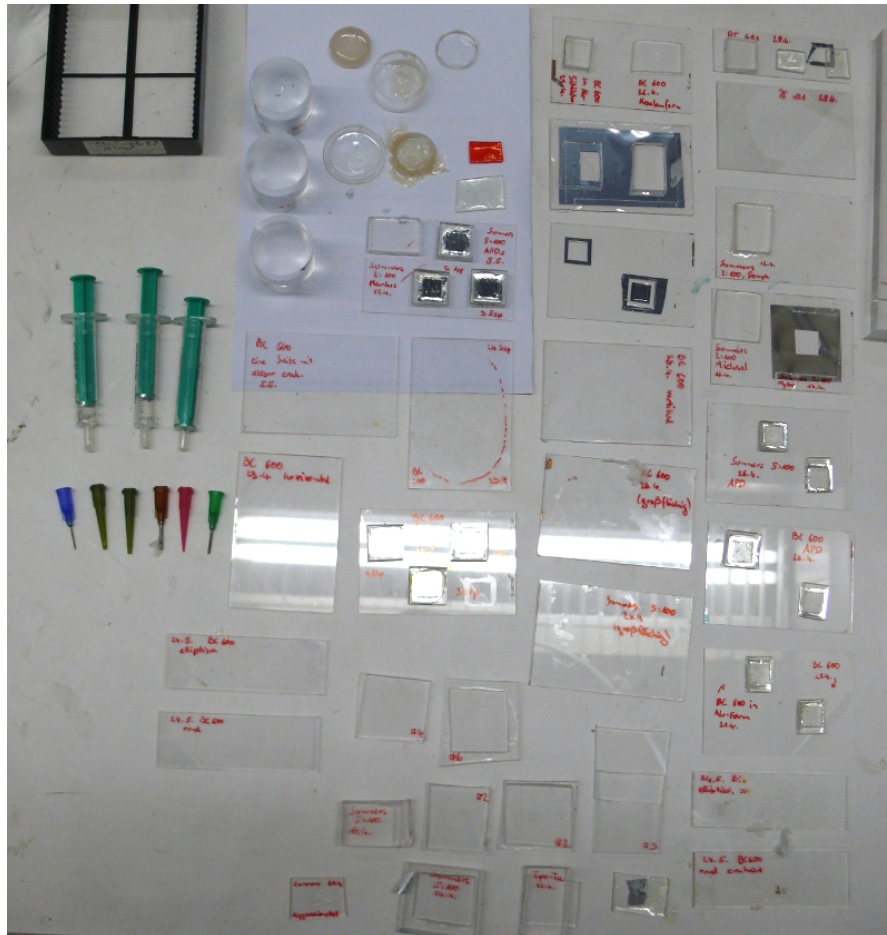


Abbildung 3.3.: Zur Untersuchung des Verhaltens und der Eigenschaften der vorhandenen Kleber angefertigte Proben

Im Wesentlichen wurden vier verschiedene Kleber getestet:

- BC600 von Saint-Gobain Crytals [BC600]
- Lens Bond F-65 von Summers Opticals [F65]
- EpoTek 301 von Epoxy Technology [Epo]
- Elastosil RT 601 von Wacker Silicone [Ela]

Kapitel 3. Fertigung eines Phoswich-Detektors

Die entscheidendsten Klebereigenschaften sind:

- Brechungsindex möglichst im Bereich von den verwendeten Szintillatormaterialien, zur Vermeidung von Reflexionen an Grenzschichten
- Transparenz im Spektralbereich des Szintillationslichts
- Verträglichkeit mit und gute Haftung auf den zu klebenden Stoffen
- Möglichkeit zur Evakuierung, um Luftblasen aus dem angemischtem Kleber zu extrahieren

Die allgemeinen physikalischen Eigenschaften der Kleber sind in Tabelle 3.1 tabellarisch zusammengefasst.

	BC 600	F-65	EpoTek 301	RT 601
Brechungsindex	1.56	1.55	1.52	1.41
Topfzeit in min	60	30-60	60-120	90
Viskosität	800 cPs ¹	etwa 300 cPs	etwa 150 cPs	3500 cPs
Transmission	>98%	>90%	>98%	>88%
Festigkeit	>1800 psi ²	5200 psi	>2000 psi	-

Tabelle 3.1.: Eigenschaften der getesteten und verwendeten Kleber: BC600 von Saint Gobain, Lens Bond F-65 von Summers Optical, EpoTek 301 von Epoxy Technology und Elastosil RT 601 von Wacker Silicone. Sowohl Brechungsindex als auch Transmission beziehen sich auf den optischen Bereich des Spektrums. [BC600],[F65],[Epo] und [Ela]

Die Kleber weisen allerdings auch spezifische, individuelle Eigenschaften auf, welche im Folgenden einzeln angeführt werden.

Der optische Kleber **BC600** ist im Vergleich zu den anderen im Test deutlich adhäsiver. Selbst wenn kurz nach dem Kleben beide betroffenen Flächen nicht komplett von Kleber benetzt sind, zieht sich dieser in den folgenden Minuten bis zum Rand und füllt so den Zwischenraum vollständig aus. Diese Eigenschaft ist vor allem beim Aneinanderkleben der beiden Szintillatoren nützlich und wünschenswert, da eine optisch gute Kopplung der beiden Materialien auch bei nicht perfekt dosierter Klebermenge ermöglicht wird. Dennoch ist die Adhäsion des Klebers nicht stark genug, um sich unter aufgebrachtes Klebeband zu ziehen, dies ist vor allem bei den Spiegelbandrähmchen (siehe unten) wichtig. Als Letztes ist anzumerken, dass BC600 innerhalb mehrerer Tage gut aushärtet und eine

¹cPs: Centi-Poise, 1 cPs = 1 mPa s

²psi: pound-force per square inch, 1 psi = 6.8948 10³ Pa

Kapitel 3. Fertigung eines Phoswich-Detektors

dauerhafte und stabile Bindung ermöglicht, aber das Abschneiden von möglichen, überstehenden Kleberresten erschwert. Nach einem bis zwei Tagen ist die Endfestigkeit aber noch nicht vollständig erreicht, was ein Schneiden in diesem Zeitraum erlaubt. Zur Schonung während der Lagerzeit wurde dieser Kleber in einem Kühlschrank aufbewahrt. Vor der Benutzung musste er allerdings wieder auf Zimmertemperatur gebracht werden.

Beim **Lens Bond F-65** gibt es zwei schwerwiegende Probleme. Zum einen ist es kein Kleber auf Epoxid-Basis sondern enthält Lösungsmittel, was ein Evakuieren der angemischten Klebermischung unmöglich macht und damit für mehr Blasen auf der fertigen Verbundstelle sorgt. Andererseits greifen die enthaltenen Chemikalien bestimmte Plastiksorten an, was eine Gelbfärbung des Klebers zur Folge hat und somit die spektrale Transmission drastisch reduziert. Im Laufe der Experimente wurde vermutlich das Klebergeäß mit einem Plastikspatel kontaminiert, wodurch die nachfolgenden F-65 Proben auch ohne den Einsatz von Plastikwerkzeug eine gelbe Trübung zeigten.

Ebenfalls anzumerken ist, dass der Kleber in zwei möglichen Verhältnissen angemischt werden kann, entweder 2:100 (Härter zu Basis, bleibt leicht elastisch), oder 5:100 (härtet vollständig aus).

Dennoch schließen die obigen Tatsachen den Einsatz des Klebers bei der Fertigung des Phoswichs aus.

Obwohl **EpoTek 301** eine gute Schneidbarkeit und eine lange Topfzeit aufweist, ist er auf Grund der schwierigeren Verarbeitung bedingt durch die schlechtere Adhäsion und starke Blasenbildung BC600 unterlegen.

Eine wichtige Alternative bietet **Elastosil RT 601**, da dieser Kleber elastisch bleibt und sich rückstandslos wieder vom Medium lösen lässt. Aus diesem Grund wurde der Kleber, trotz seiner nicht optimalen physikalischen Eigenschaften (niedriger Brechungsindex), für temporäre Verbindungen angewandt, um die Szintillatoren und die APDs wiederverwenden zu können.

Anzumerken bleibt, dass sowohl EpoTek 301 als auch Elastosil RT 601 zum Zeitpunkt der Tests das angegebene Haltbarkeitsdatum überschritten hatten (da sie als Reste im Labor vorhanden waren). Die Klebeleistungen waren dafür aber dennoch zufriedenstellend.

Nach Auflistung der Eigenschaften wird deutlich, dass der BC600-Kleber von Saint-Gobain Crystals alle Anforderungen erfüllt und das beste Ergebnis liefert. Deshalb wurde dieser auch für die Anfertigung des Phoswich verwendet.

3.2.2. Auswahl der Reflektorfolie

Die Optimierung eines Szintillations-Detektors bezüglich der Lichtsammlung und Effektivität ist schon seit langer Zeit Gegenstand von Diskussionen und Untersuchungen. Neben

Kapitel 3. Fertigung eines Phoswich-Detektors

der Form der Kristalle selbst ist auch Art und Material des Reflektors von entscheidender Bedeutung.

So wurden die ersten Prototypen der CALIFA-Kollaborateure an der "Universdade de Santiago de Compostela" (USC) zuerst mit Teflonband umwickelt, danach in eine Schicht "Vikuiti Enhanced Specular Reflector" (ESR) gehüllt und zum Abschluss noch einmal mit Teflonband umgeben (siehe Abbildung 3.4).



Abbildung 3.4.: Auswickeln des Prototypen von der USC, von links nach rechts die drei Schichten des Wrappings: äußeres Teflon, ESR, innere Teflonschicht

Die Teflonschicht direkt um den Kristall dient dabei zur diffusen Reflexion des Szintillationslichts was die Wahrscheinlichkeit der Detektion der Photonen erhöht. Dies ist verständlich, da geschlossene Lichtwege, wie sie vor allem bei quaderförmigen verspiegelten Geometrien auftreten können und die verhindern, dass das gesamte Licht zur APD gelangt, vermieden werden. Die beiden Möglichkeiten zu deren Vermeidung durch Form und Wrapping sind in Abbildung 3.5 schematisch angedeutet.

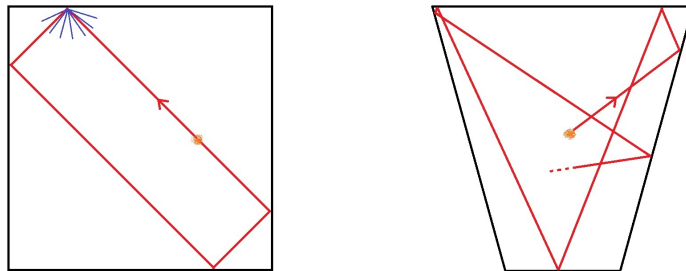


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung zur Vermeidung geschlossener Lichtwege, wie links angedeutet. Entweder durch diffuse Reflexion (blaue Linien in linker Skizze), oder durch abgeänderte Kristallform (rechts)

Diese Einwickeltechnik ist allerdings nicht für den fertigen Aufbau am CALIFA-Kalorimeter geeignet, da dort jeweils vier Kristalle in vorgefertigte Halterungen aus Carbon-

faser geschoben werden sollen und multiple Schichten von Reflektormaterial zu dick für diese Anordnung sind und die Effizienz des Detektors reduzieren.

Deswegen wurde beim späteren Anfertigen der neuen Prototypen nur eine einzige Lage der ESR-Folie verwendet, welche nicht diffus sondern spiegelnd reflektiert. Trotz der geringe Dicke von nur $65\ \mu\text{m}$ weist diese Folie eine Reflektivität von mehr als 98% im Wellenlängenbereich von 550 nm auf (siehe [ESR]).

Die Vorzüge dieses Wrappingmaterials, welches aus mehreren übereinanderliegenden Schichten aufgebaut ist um die Reflexion zu optimieren, sind schon in [Gas10] aufgefallen. Dort konnte eine Verwendung von ESR die relative Energieauflösung von etwa 7.5% (Teflon und aluminiumbeschichtete Mylar-Folie) bis auf etwa 6% verbessern.

Die Folie lässt sich darüberhinaus auch einfach handhaben, da beide Seiten von einer Schutzfolie bedeckt werden.

3.2.3. Faltformen der Reflektorfolie

Die Entwicklung neuer Faltmuster wurde durch die Veränderung der Kristallform und Reduzierung der Wrappingdicke erforderlich.

Die in vorherigen Prototypaufbauten teilweise noch nicht umgesetzten Voraussetzungen sind:

- Vermeidung mehrerer Einzelteile
- Stoßkanten der Folie nicht an Kanten sondern möglichenfalls in der Mitte der Flächen der Szintillatoren
- Minimierung offener Stoßkanten

Nach Anfertigung zahlreicher Muster wurden schließlich zwei Modelle ausgewählt, welche in Abbildung 3.6 dargestellt sind.

Ein Muster besitzt Stoßkanten ohne Überlapp, welches eine einlagige Schicht der Reflektorfolie um den gesamten Phoswich ermöglicht und daher Platz einspart sowie die inaktive Materie des Detektors reduziert. Die Länge der Stoßkanten an den Stirnseiten wurde hier unter Berücksichtigung vernünftiger Falzgrößen minimiert. Das Muster erfordert allerdings sehr hohe Präzision beim Schneiden der Folie, welche per Hand praktisch nicht zu erreichen ist. Das andere Muster besitzt Stoßkanten mit Überlapp. Hier kann man mögliche Lichtlecks und Fehler beim Anfertigen einfach kompensieren.

Diese beiden Faltmuster wurden auf ihre Fähigkeit zur Lichtsammlung getestet. Der Experimentaufbau und die Ergebnisse sind in Anhang C gegeben.

Die Ergebnisse des Experiments zeigen, dass die genaue Faltform der Reflektor-Folie relativ wenig Einfluss auf die Qualität der Lichtsammlung hat. Dennoch schneidet die Faltform mit Überlapp leicht besser ab als die anderen getesteten Varianten. Auch die deutlich leichtere Verarbeitung dieses Modells steht für dessen Einsatz, weshalb er beim Aufbau der Prototypen verwendet wird.

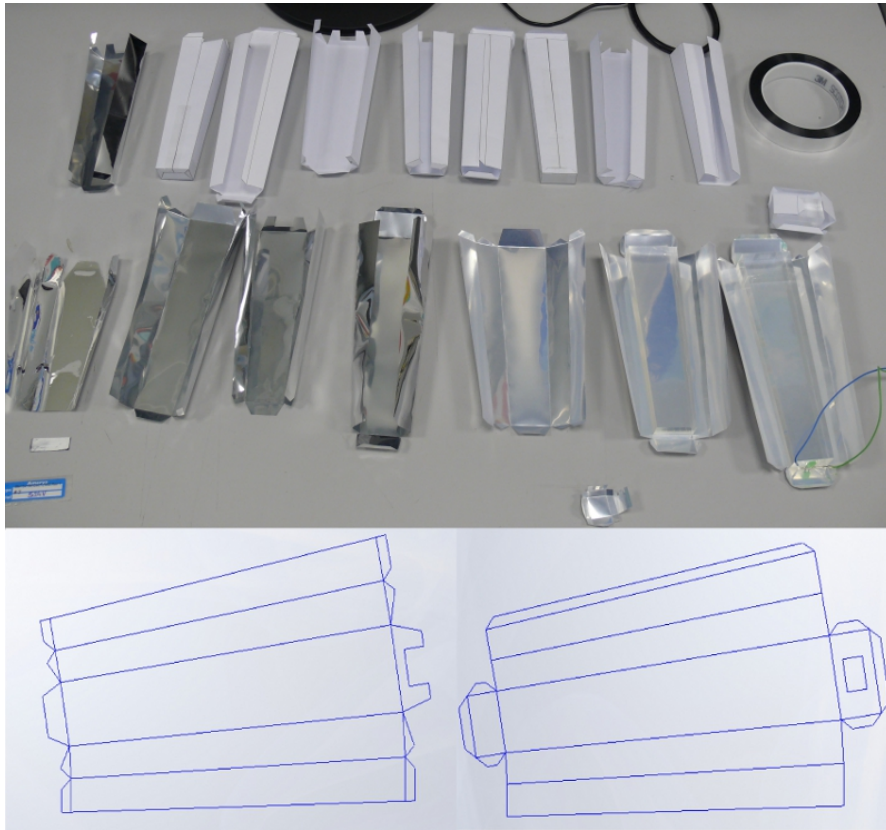


Abbildung 3.6.: Oben: Angefertigte Faltmuster, aus Papier, Mylar-Folie und ESR. Unten links: Faltvorlage ohne Überlapp. Unten rechts: Faltvorlage mit Überlapp

3.2.4. Reflektivität mit Luftschicht zwischen ESR und Szintillatorkristall

Es stellt sich die Frage, ob eine Luftschicht zwischen dem CsI(Tl)-Szintillatorkristall und ESR die Reflektivität beeinflusst. Daher wurden auf der Basis der Fresnelschen Gesetze Berechnungen zur Reflexion mit Luftspalt durchgeführt und diese mit der Reflektivität der ESR-Folie von 98% verglichen.

Da CsI(Tl) laut [CsI] einen Brechungsindex von $n_s = 1.79$ besitzt und Luft annähernd $n = 1$, tritt schon ab einem Einfallswinkel (gemessen zum Lot auf die Grenzfläche) von

$$\Theta_t = \arcsin\left(\frac{n}{n_s}\right) \approx 34^\circ$$

Totalreflexion auf.

Dies stellt einen großen Vorteil dar, da schon von vorneherein ein großer Winkelbereich abgedeckt wird, welcher quasi zu keinem Lichtverlust führt. Eine evaneszente Welle, welche den Luftspalt durchdringt, kann auf Grund der Dimension der Luftschicht, welche die Wellenlänge deutlich übersteigt, vernachlässigt werden.

Für die weitere Betrachtung, müssen also nur noch Winkel $\Theta < \Theta_t$ betrachtet werden.

Kapitel 3. Fertigung eines Phoswich-Detektors

Unter Aufteilung der Lichtintensität in Anteile senkrecht und parallel zur Grenzfläche und einer entsprechender Gewichtung dieser (exemplarisch für in der Einfallsebene polarisiertes Licht in Gleichung 3.1), ergibt sich eine verlorene Lichtintensität unter beliebigen Einfallswinkeln α (α' bezeichnet den Austrittswinkel aus dem CsI(Tl), siehe Abbildung 3.7) von:

$$I_{\text{Verlust}} = (\sin \alpha')^2 \cdot I_{\text{Verlust, senkrecht}} + (\cos \alpha')^2 \cdot I_{\text{Verlust, parallel}} \quad (3.1)$$

Die Formeln für die Reflektivität der beiden Polarisierungen sind im Anhang D aufgeführt. Dort sind auch (Abbildung D.1) die entsprechenden Graphen für ausschließlich parallele bzw. senkrechte Komponente auf die Grenzfläche dargestellt mit denen sich eine Welle beliebiger Polarisation beschreiben lässt.

In Abbildung 3.7 sind die entscheidenden Größen gekennzeichnet und die Reflexionswege schematisch dargestellt.

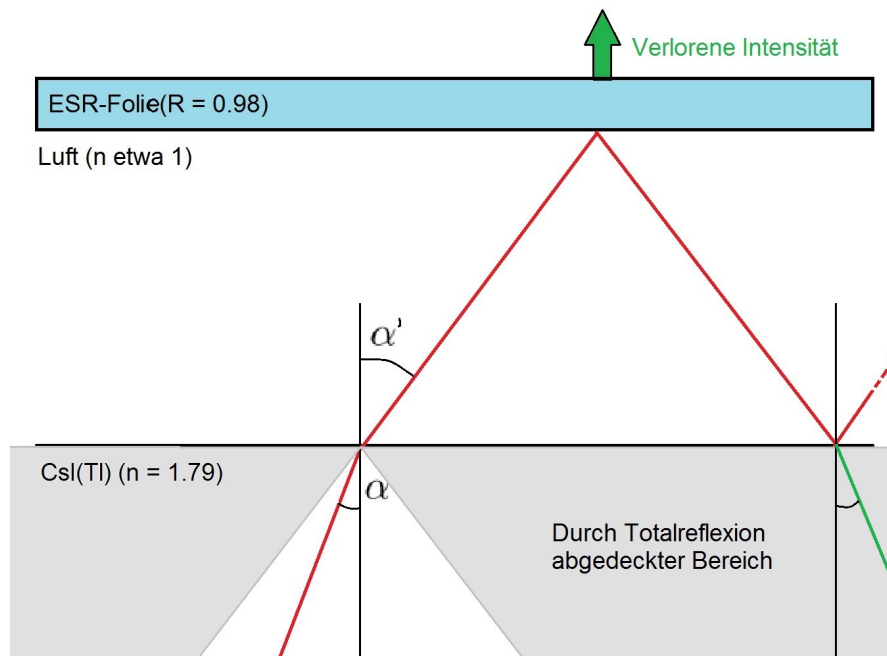


Abbildung 3.7.: Schematische Darstellung der Reflexionswege und entscheidender Größen. Für die Detektion verloren ist der Anteil des Lichts, welcher bei den mehrfachen Reflexionen von der ESR-Folie transmittiert wird. Im unteren Bereich ist außerdem der Bereich dargestellt, der rein durch die stark unterschiedlichen Brechungsindizes schon hinsichtlich der Totalreflexion abgedeckt wird (nicht winkeltreu). α' ist definiert durch $\alpha' = \arcsin(n_s \sin \alpha)$.

Trägt man nun die verlorene Lichtintensität gegen den Einfallswinkel auf, sieht man,

dass für beliebige Winkel $\alpha < 30^\circ$ die verlorene Intensität kleiner ist als 2% (siehe Abbildung 3.8).

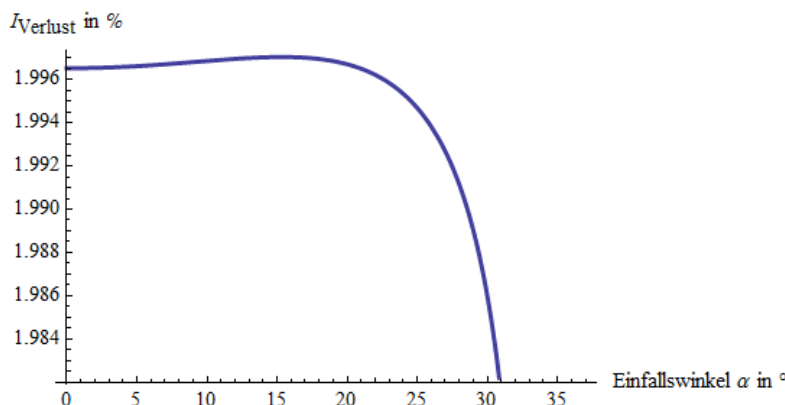


Abbildung 3.8.: Verlorene Intensität aufgetragen gegen den Einfallswinkel, berechnet mit Formel 3.1 für in der Einfallsebene polarisiertes Licht. Die verlorene Intensität bleibt dabei immer unterhalb der 2% der ESR-Folie.

Eine dünne Luftschicht zwischen Kristall und ESR-Folie verschlechtert daher nicht die Lichtleitung, sondern verbessert diese sogar.

Eine extrem eng anliegende Reflektorfolie zur Vermeidung von Lufteinschlüssen oder sogar ein Aufkleben des ESR würde den Detektor also verschlechtern.

Für den Plastiksintillator mit einem Brechungsindex von $n_{\text{Plastik}} = 1.58$ ist die Verbesserung nicht so stark ausgeprägt wie bei CsI(Tl), aber dennoch tritt auch dort keine Reduzierung des Reflexionskoeffizienten auf.

3.3. Anleitung zur Anfertigung des Phoswich-Detektors

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte und Techniken der Fertigung eines Phoswich-Detektors ausführlich beschrieben. Für alle Arbeitsschritte wurden dabei Latexhandschuhe getragen und bei Beteiligung von CsI(Tl)-Kristallen zusätzlich noch weiche Stoffhandschuhe, um den Kristall vor Kratzern und sonstigen Beschädigungen zu schützen.

3.3.1. Optische Anbindung der APD-Sensoren

Eine äußerst kritische Stelle bei der Herstellung des Detektors ist die optische Anbindung der APD an den Plastiksintillator.

Dies ist einmal darin begründet, dass die optische Kopplung möglichst lokal auf die aktive Fläche der APD beschränkt bleiben soll, um Situationen zu vermeiden in denen Licht über die Klebestelle aus dem Detektor entkommt. Die leicht gewölbte Epoxid-Schicht auf der APD verkompliziert diesen Umstand zusätzlich. Andererseits ist das Reflexionsvermögen der keramischen Fassung der APD nicht optimal, weshalb auch in diesem Bereich

Kapitel 3. Fertigung eines Phoswich-Detektors

eine zusätzliche Verspiegelung wünschenswert wäre. Die ESR-Folie kommt dafür allerdings kaum in Frage, da mit den hier verwendeten Mitteln und dem manuellen Schneiden der Folie die erforderliche Präzision nicht erreichbar ist.

Die Wichtigkeit dieser kleinen Details wird eindrucksvoll dadurch aufgezeigt, dass eine signifikante Verbesserung in der Energieauflösung der ersten Prototypen alleine mit dem Wechsel von schwarzer zu weißer Keramikfassung der APD erreicht wurde.

Aus diesem Grund kommt hierfür zusätzlich das "Scotch Brand"-Band von 3M zum Einsatz, ein beidseitig verspiegeltes Klebeband. Dieses wird mit dem Skalpell (mit möglichst dünner Spitze, z.B. Skalpell der Form 11) auf einer Teflonunterlage zu einem Rähmchen zurechtgeschnitten. Die anfänglich 2mm breiten Rähmchen wurden im Laufe der Untersuchungen auf eine Randstärke von 3-4mm erweitert um einen kompletten Überlapp mit der ESR-Folie zu erreichen. Die innere Aussparung wird an die aktive Fläche der APD angepasst und ist im optimalen Fall etwas kleiner als diese selbst.

Bevor nun die beiden Szintillatoren aufeinander geklebt werden wird der Plastikszintillator alleine in eine dafür angefertigte Teflonform versenkt um das zuvor geschnittene Spiegelband-Rähmchen aufbringen zu können (siehe Abbildung 3.9).

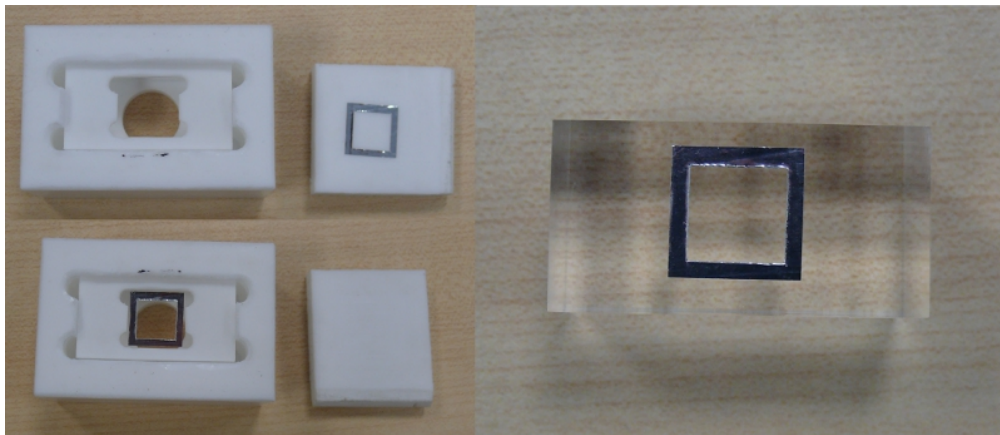


Abbildung 3.9.: Links: Aufkleben des Spiegelfolierähmchens mit Hilfe der angefertigten Teflon-Halterung (die Maße des Rähmchens im Photo stimmen nicht mit den endgültigen Maßen überein). Rechts: Ergebnis des derart angefertigten Plexiglas-Dummies

Daraufhin kann eine ebenfalls eigens dafür angefertigte passgenaue Teflonschablone, wie ebenfalls in Abbildung 3.9 dargestellt, aufgelegt werden. Diese soll eine zentrale, reproduzierbare Positionierung des Rähmchens gewährleisten.

Nun kann der Kleber (angemischt wie unten beschrieben) sorgfältig mit Hilfe eines kleinen Spatels innerhalb des Rähmchens verteilt werden (BC600 für permanenten, Elastosil für temporären Verbund). Die Klebermenge sollte auf keinen Fall zu knapp bemessen werden um eine einheitliche optische Kopplung zwischen APD und Szintillatoren sicherzustellen. Bei zu großer Klebermenge bildet das Rähmchen darüberhinaus auch eine Pufferzone um die Verschmutzung des Kristalls zu vermeiden. Eine genaue Bestimmung der erforderli-

chen Klebermenge ist wegen der variablen Wölbung des APD-Fensters nicht möglich. Die aktive Fläche der APD wird nun exakt über der freien, inneren Öffnung des Rähmchens justiert, was durch den durchsichtigen Plastikszintillator gut zu überprüfen ist. Zum Trocknen kann die Anordnung nun in der Teflonform verbleiben. Nach etwa einem Tag ist die Komponente bereit zur weiteren Verarbeitung.

3.3.2. Aufeinanderkleben der Szintillatoren

Wie schon erwähnt wurde das Verfahren zum Anmischen und Auftragen des Klebers in zahlreichen Klebproben verbessert.

So erwiesen sich Ansätze wie das Evakuieren frisch verklebter Teile als nicht geeignet, da sich kleine Blasen dabei stark ausdehnen, ohne jedoch die Klebestelle zu verlassen und auch beim Zurückführen auf Normaldruck die aufgeblähte Größe beibehalten. Auch das Aufbringen des Klebers auf das Medium ist entscheidend, da beispielsweise die erprobte Benutzung einer Spritze die Blasenbildung fördert. Weiterhin sollte der Kleber nicht in mehreren Punkten oder stark ausgefransten Formen aufgetragen werden, da Lufteinschlüsse dadurch ebenfalls vermehrt auftreten.

Um Verschmutzungen zu vermeiden wurden aus Vorsicht die zum Anmischen verwendeten Plastikschälchen zuvor mit Alufolie ausgeschlagen, was zusätzlich eine mehrfache Nutzung ermöglichte.

Auf einer Präzisionswaage wurden darin die Komponenten abgewogen und vermischt (eine Menge von 0.5 g war für die meisten Proben ausreichend). Je nach Viskosität der beiden Komponenten kamen dabei ein kleiner Metallspatel (für zähflüssige Anteile) oder eine Pipette (für dünnflüssige Anteile) zum Einsatz.

Die so gemischten Komponenten wurden daraufhin in einer Glasglocke über eine mechanische Pumpe für etwa 10 bis 15 Minuten evakuiert (Abbildung 3.10 links). Gerade zu Beginn dieses Vorgangs werden beim Anmischen entstandene Blasen effektiv extrahiert.

Nun wird der Kleber vorsichtig auf die Rückseite des CsI(Tl)-Kristalls aufgebracht. Dieser steht aus Schutz vor Kratzern oder anderen Beschädigungen auf einem Teflonblock. Der Plastikszintillator kann jetzt langsam von oben auf die Klebestelle gelegt werden, wobei großer Druck zu vermeiden ist, da bei dessen Nachlassen Lufteinschlüsse entstehen können.

Die Klebermenge für diese plane und großflächige Verbindung wurde mit Plexiglasproben auf etwa $4 \frac{mg}{cm^2}$ abgeschätzt und beim Kleben des ersten Phoswichs leicht nach oben korrigiert, da der Kleber sich etwas anders auf CsI(Tl) verhält und die Kanten des Kristalls nicht vollkommen eben sind. Etwa $5 \frac{mg}{cm^2}$ liefern ein gutes Ergebnis.

Auch wenn der Kleber anfangs nicht die ganze Fläche ausfüllt, sorgt die Adhäsion dafür dass er sich in den nächsten Minuten sehr gut verteilt, was durch geeignete Positionierung, durch die Schwerkraft unterstützt werden kann.

Eine Technik, die sich sehr bewährt hat, ist auch das vorsichtige Drehen des Plastikszintillators nach der Zusammenführung, da erstens Blasen, welche beispielsweise beim Auftragen des Klebers entstanden sind, nach außen gedrängt und somit entfernt werden können und zweitens auch eine komplette Benetzung der Grenzflächen unterstützt wird.



Abbildung 3.10.: Links: Evakuieren des angemischten Klebers unter Verwendung einer mechanischen Pumpe. Rechts: Auftragen des Klebers auf einen Plexiglas-Formmuster

Überschüssiger Kleber kann vorsichtig mit einem weichen Tuch abgewischt werden (dabei können allerdings Schmier Spuren entstehen).

Eine gänzliche Vermeidung von austretendem Kleber ist in den meisten Fällen nicht möglich, aber die Menge kann mit oben angegebener Kleberdosis relativ klein gehalten werden.

Schließlich wird der derartig geklebte Phoswich samt des Teflonblocks in den eigens dafür angefertigten Klebewinkel geschoben und zwar derart, dass der vorhandene rechte Winkel des Kristalls in der Ecke des Winkels plaziert wird und damit eine exakte Vulkanisierung des Klebers ohne Versatz der beiden Komponenten sichergestellt wird. Er kann auch noch durch den Einsatz von Adhäsionsfolie zusätzlich stabilisiert werden, wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist.

Zur Sicherheit wurde der geklebte Kristall zum Aushärten in der Handschuhbox gelagert, ohne allerdings die Schleuse zu evakuieren.

Nach der Aushärtung des Klebers kann der Phoswich mit ESR umgeben werden.

3.3.3. Schneiden der Reflektorfolie

Um ein reproduzierbares Ergebnis für die Reflektorfolie zu erzielen, wird zuerst die schon in Abbildung 3.6 dargestellte Vorlage ausgedruckt und mit Tesafilm auf dem ESR befestigt. Dabei sind jedwede Falten und Wellen zu vermeiden, da diese das Ergebnis verschlechtern. Danach werden die Falten im Inneren des Musters leicht mit der Rückseite des Skalpell nachgezogen um diese auch auf die obere Schutzfolie des ESR zu übertragen.

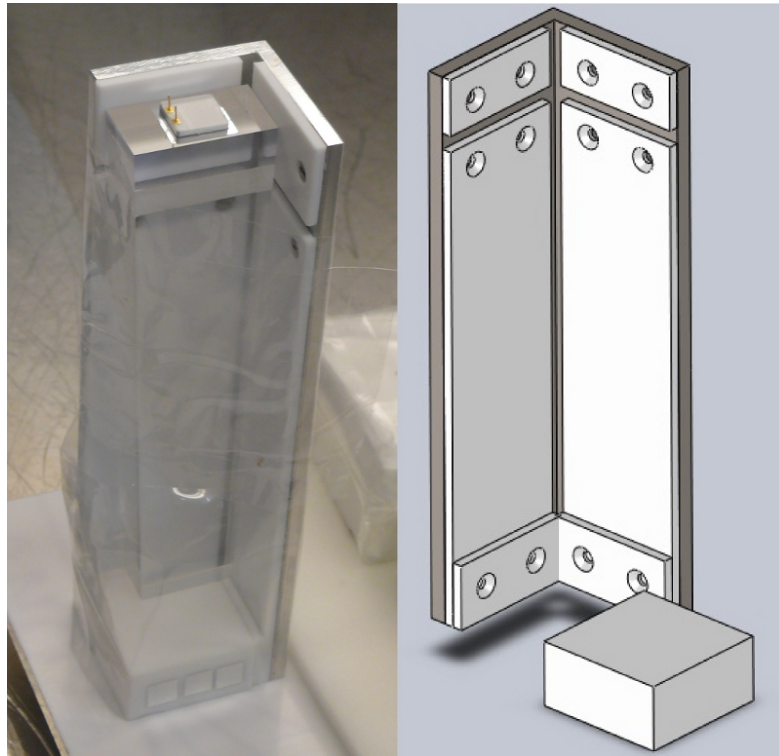


Abbildung 3.11.: Links: Mit Adhäsionsfolie fixierter frisch geklebter Phoswich-Detektor, Rechts¹: Darstellung des Entwurfs für den Klebewinkel.

Nun wird die Form vorsichtig mit Hilfe eines Skalpells und eines Metalllineals ausgeschnitten. Um eine Beschädigung der teuren Folie zu vermeiden, empfiehlt es sich das Lineal auf der Seite des Produkts anzulegen, dadurch sind beim Abrutschen nur die umgebenden Bereiche betroffen.

Mögliche Tesafilmreste können jetzt von dem fertigen Muster entfernt werden und die Form wird an den vorgerissenen Faltkanten (bei Bedarf unter Zuhilfenahme eines Lineals oder scharfkantigen Winkels) gefaltet.

Diese ganzen Vorgänge geschehen ohne dass die beidseitig aufgebrauchten Schutzfolien des ESR entfernt werden.

Unter Verwendung eines Plexiglas-Dummies kann nun die Passform getestet werden. Abbildung 3.12 zeigt einen Phoswich, welcher auf einer nach der vorgestellten Prozedur angefertigten Spiegelfolie liegt.

Da die APD in der manuellen Fertigung nicht immer an der selben Stelle befestigt ist, wird nun deren genaue Position bestimmt und auf den entsprechenden Teil des ESR (wieder durch prägen mit der Rückseite eines Skalpells) übertragen. Da das Spiegelband-Rähmchen noch ein Stück über die APD hinausragt, kann die Aussparung in der Folie

¹Zur Anfertigung der technischen Zeichnungen wurde in der gesamten Bachelorarbeit das Programm "SolidWorks 2010" verwendet.

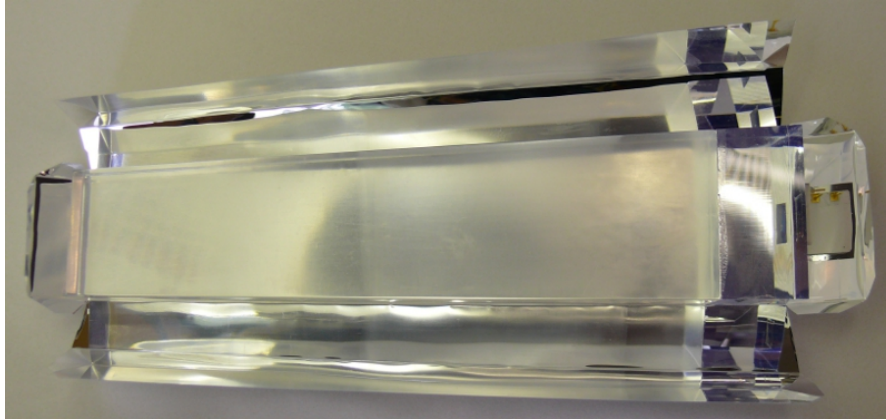


Abbildung 3.12.: Phoswich auf ausgeschnittener Wrappingfolie, obere Schutzfolie wurde hier schon entfernt.

durchaus etwas größer als die APD selbst bemessen sein.

Falls auf die APD noch eine Platine aufgebracht werden soll, ist es sinnvoll dies erst nach dem Einpacken durchzuführen.

Um für die vielen Kristalle des CALIFA-Kalorimeters eine gute Präzision zu erreichen und den Arbeitsaufwand zu minimieren, sollte sowohl für die Reflektorfolie als auch für die Spiegelband-Rähmchen eine Stanzform hergestellt werden.

3.3.4. Einpacken des Phoswich

Nachdem alle obigen Fertigungsschritte durchlaufen wurden, können die Schutzfolien des ESR entfernt werden und der Kristall in richtiger Orientierung aufgelegt werden.

Um ein möglichst reibungsloses Einpacken zu ermöglichen, ist es sinnvoll das M3 Scotch Brand Spiegelklebeband schon zuvor auf einer Teflonunterlage in passende Stücke zu schneiden, welche zur Verwendung dann nur noch vorsichtig abgelöst werden müssen.

Anfangen von der Längsseite des Kristalls kann als nächstes die Folie möglichst passgenau um den Kristall gefaltet und mit dem Klebeband fixiert werden. Wenn die Folie in der gewünschten Position hält, werden noch alle Überlapperegionen mit einem Streifen Klebeband versehen um letzte freie Stellen zu vermeiden. Gerade in den Ecken des Kristalls muss dabei mit besonderer Sorgfalt vorgegangen werden. Dort ist es möglich, dass auf Grund von Ungenauigkeiten beim Falten und Schneiden kleine freie Stellen entstehen, welche mit dem Spiegelklebeband korrigiert werden müssen.

Zuletzt wird eine Verbindung zwischen Spiegelband-Rähmchen und ESR hergestellt, was ebenfalls mit dem 3M-Band geschieht. Der Kristall ist nun von allen Seiten verspiegelt und sollte keine drastischen Lichtlecks mehr aufweisen. In Abbildung 3.13 ist ein verpackter CsI(Tl)-Kristall so wie ein einzelner Plastiksintillator mit APD dargestellt.

Auch die fertig gepackten Kristalle wurden in der Handschuhbox gelagert.

Kapitel 3. Fertigung eines Phoswich-Detektors

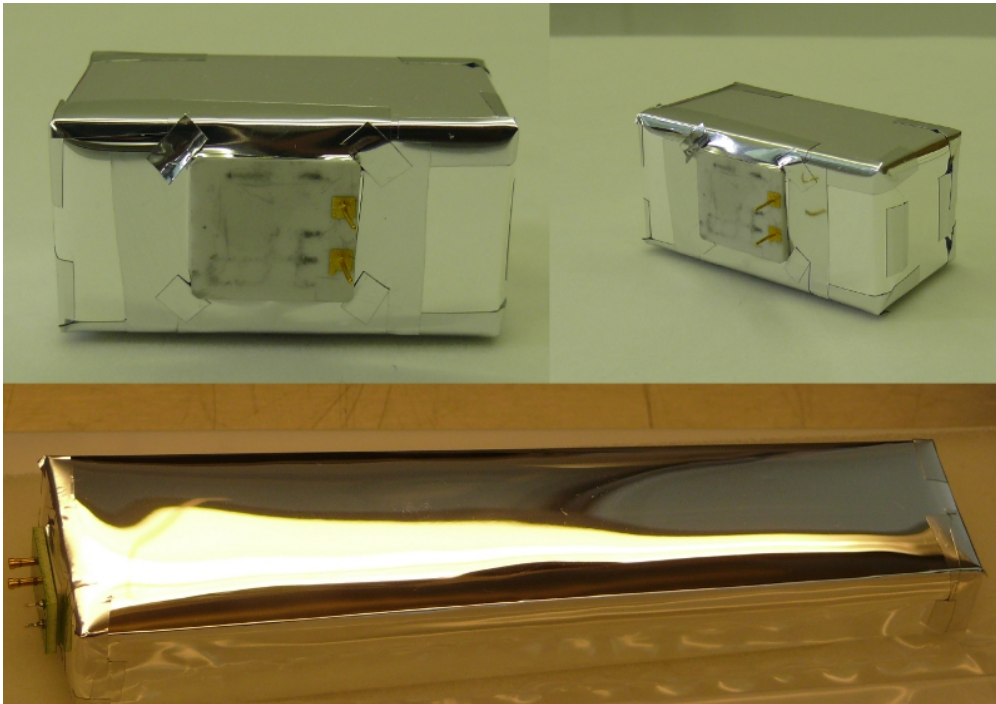


Abbildung 3.13.: Oben: Fertig eingepackter Plastikszintillator (ESR-Wrapping, befestigt mit Spiegelklebeband). Unten: Fertiggestellter Phoswich-Detektor

Die derartig hergestellten Detektoren wurden mit radioaktiven Stoffen und einem Protonenstrahl am Maier-Leibnitz-Laboratorium (MLL) getestet.

Kapitel 4.

Test der Detektoren am MLL

In einem Experiment vom 7. bis zum 11. Juli 2011 am MLL wurde unter anderem auch die Detektorqualität hinsichtlich des neuen Wrappingdesigns und der zusätzlichen Klebestellen überprüft.

Dafür stand ein Protonenstrahl mit kinetischer Energie von etwa 24 MeV zur Verfügung, welcher vor der Detektoranordnung an einem Kohlenstofftarget gestreut wurde. Durch diesen Aufbau konnte das Verhalten der Detektoren für einerseits Protonen aus elastischer und inelastischer Streuung und andererseits γ -Quanten aus Relaxation des angeregten Kohlenstoffs getestet werden.

Daneben wurden auch noch einige Messungen mit Eichquellen wie ^{22}Na (für 511 keV Paarvernichtungsstrahlung sowie 1.275 MeV- γ -Quanten) und ^{60}Co (für 1.332 MeV- und 1.173 MeV-Photonen¹) aufgenommen, mit deren Hilfe die relative Energieauflösung bestimmt werden kann.

Ein weiteres Target aus mit Deuterium angereicherter Plastikfolie, sorgte darüber hinaus auch für einen Beschuss mit Deuterium und Neutronen. Dieser Teil des Experiments hatte aber eine Zielsetzung, die von der hier vorgestellten Arbeit unabhängig ist.

4.1. Anordnung der Detektoren

Um eine geeignete Lagerung auch außerhalb der Handschuhbox zu erreichen wurden die Kristalle in einer luftdichten Aluminium-Guss-Box² gelagert. Innerhalb dieser Box befindet sich eine speziell angefertigte Halterung (innere Detektorbox) um die Position der Kristalle zu fixieren und somit auch vor Erschütterungen zu schützen. Diese Konfiguration ist aus Abbildung 4.1 sowohl durch ein Photo als auch einer technische Zeichnung ersichtlich.

Mit Hilfe von luftdichten Lemo-Steckern besteht die Möglichkeit, die Detektoren sowohl von der inneren als auch von der äußeren Detektorbox anzuschließen.

Die Kristalle werden seitlich durch Plastikschrauben fixiert, welche nicht direkt auf das Wrapping sondern auf eine unterlegte, dünne Teflonschicht gesetzt werden. Von oben stabilisiert eine über Schrauben und Muttern höhenverstellbare Plastikplatte die Detektoren. Wegen der leichten Verformbarkeit des CsI(Tl) werden weder die Platte oben noch

¹Energien übernommen aus [MPG06]

²Rose Aluminiumbox 01.182810 180mm x 280mm x 100mm

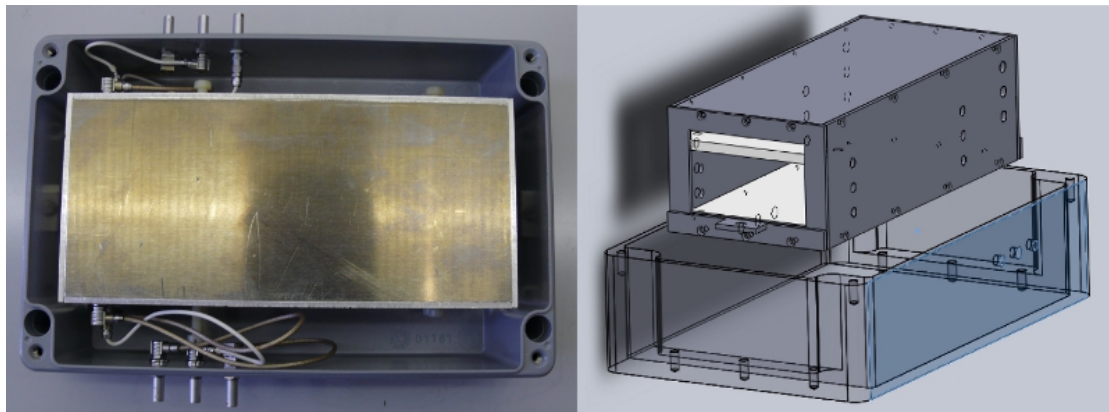


Abbildung 4.1.: Links: Photo des Aufbaus mit innerer und äußerer Detektorbox. Rechts: Technische Zeichnung des selben Aufbaus, die äußere Detektorbox wird zur Veranschaulichung transparent dargestellt und die innere Detektorbox aus der eigentlichen Position innerhalb verschoben.

die seitlichen Schrauben kraftvoll festgezogen.

Beim eigentlichen Test am MLL wurde die äußere Aluminiumbox entfernt und die Kristalle in der inneren Box auf einer Halterung fixiert. Diese Halterung befindet sich zusammen mit dem Kohlenstofftarget in einer Vakuumkammer (siehe Abbildung 4.2).

Um möglichst viele Vergleiche anstellen zu können wurden in der Detektorbox (Anschlüsse für 6 Detektoren) folgende Aufbauten verwendet:

- alter CsI(Tl)-Kristall mit einfacher LAAPD von der USC, [1]³
- alter CsI(Tl)-Kristall mit doppelter LAAPD (aktive Fläche von 10mm x 20mm), [2]
- neuer CsI(Tl)-Kristall mit oben beschriebenen Wrapping mit Überlapp und temporär befestigter APD (Elastosil), [3]
- Prototyp für Phoswich-Detektor (nach obiger Anleitung gefertigt), wie er im späteren Aufbau des CALIFA-Kalorimeters verwendet werden könnte (beide Klebestellen permanent mit BC600), [4]
- einzelner Plastikszintillator mit Elastosil-Verbindung zur APD
- Temperatursensor zur Stabilisation der temperaturabhängigen, internen Verstärkung des APD-Sensors

Die anfängliche Anordnung der Szintillatoren ist in Anhang E gezeigt.

Der Plastikszintillator war zentral auf der Plastikplatte (zur Fixierung der Kristalle) befestigt und somit über den übrigen Kristallen angeordnet. Der kleine, widerstandsbasierte

³bezieht sich auf Kennzeichnung in Abbildung E.1

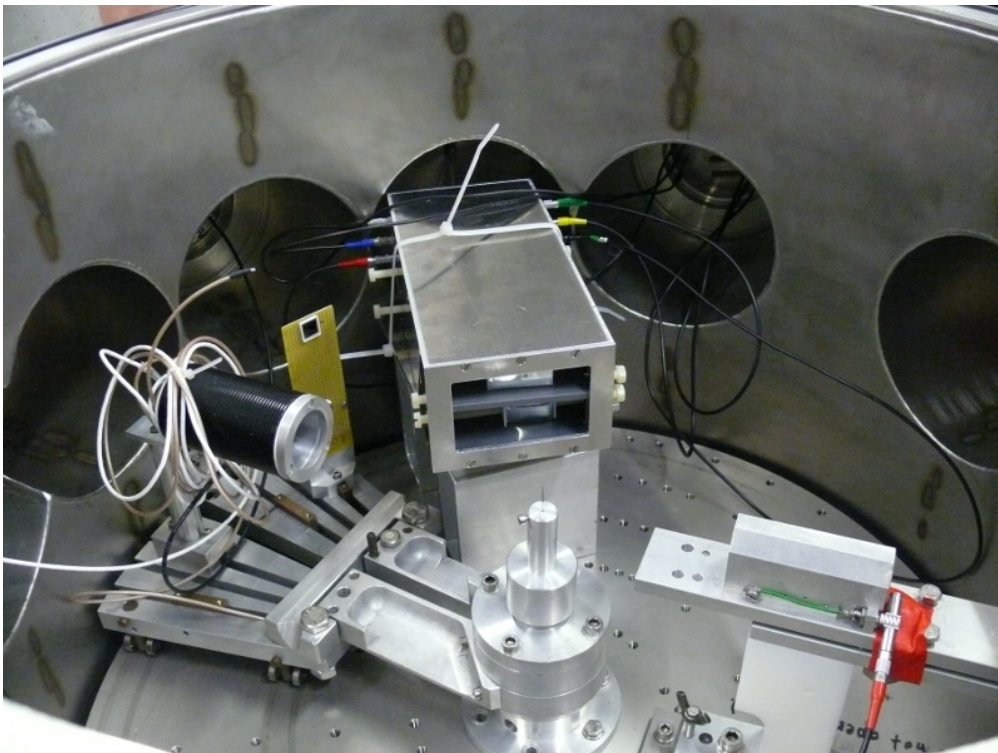


Abbildung 4.2.: Aufbau und Anordnung der Detektorkomponenten im Beschleuniger-Experiment am MLL. Rechts unten sieht man die Blende für den Protonenstrahl, welche im Moment des Photos auf den Kohlenstoff-Cup ausgerichtet war. Rechts neben dem Cup ist eine "nackte" APD auf einer Halterung und wiederum rechts davon, in der Bildmitte, die schon in Abbildung 4.1 dargestellte innere Detektorbox mit den Szintillatorkristallen.

Temperaturfühler befand sich im freien Raum hinter den APDs.

Da der alte CsI(Tl)-Kristall mit einfacher LAAPD kein vernünftiges Signal lieferte, wurde er am zweiten Tag des Experiments aus der innerern Detektorbox entfernt. Auch der Plastiksintillator wurde modifiziert, indem ein 10mm x 10mm großes und etwa 1mm dickes CsI(Tl)-Plättchen auf dessen Vorderseite geklebt wurde. Diese Modifikation wurde deshalb ausgewählt, um auch bei verfügbaren, geringen Strahlenergien die Phoswich-Eigenschaften des Detektors zu überprüfen und eventuell eine Implementierung in die Software zu testen. Mit dem eigentlichen Phoswich-Aufbau war dies bei den kurzen freien Weglängen der Protonen in CsI(Tl) nicht möglich.

Weiterhin wurden für einen Vergleich der Detektoreigenschaften die alten und neuen CsI(Tl)-Kristalle auf gleichen Abstand zum Target gebracht.

Eine weitere genutzte Option bestand in dem Austausch der Frontplatte der inneren Detektorbox. Zur Auswahl standen eine komplett geöffnete Platte (siehe Abbildung E.1) sowie jeweils eine seitlich und eine zentral geschlitzte Platte (Schlitzbreite 5mm) und eine

komplett geschlossene Platte (Platten aus jeweils 3mm dicken Aluminium). Der Verwendungszweck der geschlossenen Platte war beispielsweise die Abschirmung von geladenen Teilchen beim deuterierten Target was die Signalform bei Neutronenbeschuss aufdecken sollte.

Auf eine genaue Beschreibung der Strahldurchläufe soll verzichtet werden, da diese den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Im Weiteren werden also nur die Daten aufgeführt, welche spezifisch für einen Vergleich der alten mit den neuen Detektoren sind.

Es ist allerdings anzumerken, dass Unterschiede in dem Verhalten der Detektoren nicht alleine auf das veränderte Wrapping und die modifizierten Klebetechniken zurückzuführen sind, da sich daneben auch die Kristallform und das Alter der verwendeten Prototypen stark unterscheiden.

Die Datenaufnahme erfolgte mit Sampling ADCs, die alle Pulsformen mit 60 MHz abtasten und mit einer Auflösung von 12 bit digitalisieren. Dieses Datenaufnahmesystem wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Max Winkel entwickelt und wird dort näher beschrieben [Win11].

4.2. Energieauflösung

Anschließend an das Experiment mit dem Protonenstrahl wurden zahlreiche Eichmessungen mit radioaktiven Quellen durchgeführt, welche Aufschluss über die Energieauflösung der einzelnen Detektoren geben.

Verglichen werden hier jeweils der alte Prototyp mit doppelter APD, der angefertigte Phoswich-Detektor und der temporär geklebte neue CsI(Tl)-Kristall.

Die entsprechenden Energie-Spektren, die mit einer ^{22}Na - und einer ^{60}Co -Quelle aufgenommen wurden, sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Sie sind zum besseren Vergleich absolut normiert.

Man sieht deutlich, dass die neu gefertigten Kristalle trotz oben dargestellter Modifikationen vergleichbare oder bessere Auflösungen als die alten Prototypen der USC liefern. Der Phoswich-Detektor liefert sogar deutlich bessere Werte, obwohl in diesem eine zusätzliche Klebestelle vorhanden ist.

Die schlechte relative Auflösung beim 511 keV-Photopeak ist durch die stärkere Gewichtung des elektronischen Hintergrundrauschens im Vergleich zum eigentlichen Signal zu verstehen, welches bei geringeren Energien natürlich verhältnismäßig größer ist.

Dies soll nun verdeutlicht werden.

Da die Energieauflösung von idealen Szintillations-Detektoren durch die Poissonstatistik bestimmt wird, ist die Breite proportional zu $\frac{1}{\sqrt{N}}$ (N: Anzahl der emittierten Photonen). Die Anzahl der Photonen ist nun wiederum proportional zur im Detektor deponierten Energie E. Falls die Auflösung also nur durch die Detektoren bedingt wäre, sollte das Verhältnis $\frac{\Delta E}{\sqrt{E}}$ konstant bleiben. Tabelle 4.1 zeigt aber, dass dies im hohen Maße nicht erfüllt ist und die Auflösung vor allem im niederenergetischen Bereich von anderen Effekten (vornehmlich elektronischer Art) stark beeinflusst wird. Dieser Effekt

Kapitel 4. Test der Detektoren am MLL

γ -Energie in MeV		alter CsI(Tl)	neuer CsI(Tl)	neuer Phoswich
0.511	Position ¹	806.9	876.5	798.5
	σ ¹	54.6	62.0	49.7
	relative Auflösung ²	15.9%	16.6%	14.6%
	$\frac{\Delta E}{\sqrt{E}}$, ³	4.52	4.92	4.13
1.173	Position	1732.5	1909.4	1741.6
	σ	53.9	57.1	47.9
	relative Auflösung	7.3%	7.0%	6.5%
	$\frac{\Delta E}{\sqrt{E}}$	3.04	3.07	2.70
1.275	Position	1909.1	2132.3	1941.0
	σ	63.9	73.3	63.7
	relative Auflösung	7.8%	8.2%	7.7%
	$\frac{\Delta E}{\sqrt{E}}$	3.44	3.73	3.40
1.332	Position	1964.6	2169.7	1979.4
	σ	56.0	60.4	54.1
	relative Auflösung	6.7%	6.5%	6.4%
	$\frac{\Delta E}{\sqrt{E}}$	2.97	3.05	2.86

Tabelle 4.1.: Relative Energieauflösung der getesteten Detektoren (alter CsI(Tl) mit doppelter APD, neuer CsI(Tl) und Phoswich-Detektor). Kalibriert durch 0.511, 1.275 MeV-Linien aus ²²Na-Spektrum und 1.173, 1.332 MeV-Linien aus ⁶⁰Co-Spektrum. Die Daten wurden aus einem Gaußschen Fit durch das Programm ROOT gewonnen.

wird für höhere Energien kleiner, auch das ist durch die Werte in Tabelle 4.1 einzusehen.

Gerade bei Energien von mehr als einem MeV ist ersichtlich, dass die erwünschte Energieauflösung von 6% schon beinahe erreicht wird. Die neu entwickelte Anfertigung erlaubt also auch bei nur einer einzigen Schicht Reflektormaterial gute Ergebnisse und steht in Sachen Energieauflösung dem älteren Modellen in nichts nach.

Da die relative Auflösung mit zunehmender γ -Energie besser werden sollte, ist die geringfügige Verschlechterung bei der 1.275 MeV-Linie des ²²Na-Spektrums zuerst verwunderlich. Diese liegt aber vermutlich an der höheren Aktivität der ²²Na-Quelle. Daher

¹Die Zahlenwerte sind die Werte, welche von der Hardware (FPGA) vergeben wurden, die Position beschreibt das Maximum des Gaußschen Fits, σ die Standardabweichung

²Berechnet nach der Formel $\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{2.35 \cdot \sigma}{Position}$

³Berechnet nach der Formel $\frac{\Delta E}{\sqrt{E}} \approx \frac{2.35 \cdot \sigma}{\sqrt{Position}}$

kam es zu Wechselwirkungsraten von mehr als 10 kHz in den Detektoren und damit zu sogenannten pile-up Ereignissen: Dabei wird mehr als ein Photon in kurzer Folge detektiert und eine Energie registriert, die maximal der Summe der beiden Signale entspricht. Diese Ereignisse können nun den Peak bei 1.275 MeV künstlich verbreitern. Man sieht das Phänomen vor allem auf der linken Seite des entsprechenden Maximums im Spektrum. Die eigentlich deutlich wahrzunehmende Compton-Kante wird hier regelrecht verschmiert. Im Cobaltspektrum sind derartige Effekte hingegen kaum zu beobachten, da die verwendete Quelle hier deutlich schwächer war. Das wird anhand der Gesamtzahlen an Ereignissen deutlich, die bei der Natriummessung trotz kürzerer Messdauer von etwa 15 Minuten höher sind, als bei Aufnahme des Cobaltspektrums in circa 60 Minuten.

4.3. Messung mit hochenergetischen Photonen

Zum qualitativen Vergleich der Spektren der einzelnen Detektoren, wird in Abbildung 4.4 eine überlagerte Darstellung bezüglich der γ -Emission des angeregten Kohlenstoffs im Targetmaterial dargestellt. Die Reaktion $^{12}\text{C}(p, p\gamma)^{12}\text{C}$ eignet sich besonders zur Erzeugung von γ -Quanten mit 4.438 MeV, die durch Abregung des ersten 2^+ -Zustandes in ^{12}C zum Grundzustand entstehen.

Schön sind im Spektrum (Abbildung 4.4, oben) der Photopeak, der "single-escape"- sowie der "double-escape"-Peak zu sehen. Bei diesen entkommt entweder eines oder beide der nach Paarerzeugung und Annihilation des Positrons entstandenen 511 keV-Photonen aus der Detektoranordnung.

Darunter ist noch das Spektrum über den kompletten Energiebereich des Experiments (für den Phoswich-Detektor) dargestellt, welches beim Beschuss einer deuterierten Plastikfolie entstanden ist und daher sowohl das typische Spektrum der an Kohlenstoff gestreuten Protonen wie auch zusätzliche Maxima durch die Streuung der Protonen an Deuterium aufweist.

Für die exakte Beschreibung des Spektrums (ohne Deuteriumlinien), sei auf [Ben10] verwiesen. Die zugehörigen Energieauflösungen für den 4.438 MeV Photopeak sind in Tabelle 4.2 angegeben. Für den "single-escape"- und "double-escape"-Peak lassen sich die Energieauflösungen nur relativ ungenau mit einem einfachen Gaußschen Fit bestimmen, da sich die Strukturen mit der Compton-Kante des Photopeaks überlagern.

Der Vergleich der Detektorleistungen kann hier nur qualitativ und nicht quantitativ wie bei den Eichmessungen oben geschehen, da die an den APDs angelegte Hochspannung im Gegensatz zu den Eichmessungen unterschiedlich war. So wurde an den alten Prototyp 420 V, an den Phoswich 410 V und an den neuen CsI(Tl)-Kristall nur 400 V angelegt, was natürlich auch die aufgenommenen Spektren durch die spannungsabhängige, interne Verstärkung der APD beeinflusst. Bei den durchgeführten Eichmessungen betrug die angelegte Spannung für alle Detektoren 420 V. Gerade die weniger differenzierte Auflösung des neuen CsI(Tl)-Detektors ist auffällig, da sie bei entsprechenden Eichmessungen nicht aufgetreten ist. Hier spielt offensichtlich auch die relative Orientierung zum Target eine entscheidende Rolle.

γ -Energie in MeV		alter CsI(Tl)	neuer CsI(Tl)	neuer Phoswich
4.438	Position	6407	6947	6401
	σ	104	136	99
	relative Auflösung	3.8%	4.6%	3.6%

Tabelle 4.2.: Relative Energieauflösung der getesteten Detektoren (alter CsI(Tl) mit doppelter APD, neuer CsI(Tl) und Phoswichdetektor) bei einer γ -Energie von 4.438 MeV aus der Abregung des Kohlenstofftargets. Die Notation entspricht der in Tabelle 4.1. Die Daten wurden aus einem Gaußschen Fit mit dem Programm ROOT gewonnen.

Darüberhinaus stellt bei diesen Energien die Paarbildung den dominanten Prozess dar. Dadurch werden oft auch Bremsstrahlungsquanten erzeugt, die den Detektor verlassen können und damit die Energieverteilung verschmieren. Der oben angegebene Wert kann also als Obergrenze angesehen werden.

Dennoch zeigt der Vergleich von Phoswich und altem Prototypen, dass der neue Aufbau auch bei hochenergetischen γ -Quanten ein sehr gutes Ergebnis erzielt.

4.4. Beurteilung der Testergebnisse

Wie schon die Berechnung der Energieauflösung vermuten ließ, erkennt man sowohl in den Grafiken der Eichmessungen als auch in den Messungen mit Protonenstrahl, dass die neu angefertigten Kristalle ein sehr gutes Ergebnis liefern. Dies ist vor allem deswegen bemerkenswert, da einerseits die Schichtdicke der Reflektoren drastisch reduziert wurde und andererseits die Auslese nicht wie beim älteren Prototyp mit einer Doppel-APD mit einer aktiven Fläche von 10mm x 20mm, sondern mit einfacher APD und einer aktiven Fläche von nur 10mm x 10mm geschehen ist.

Gerade die hervorragende Leistung des Phoswich-Detektors ist auffällig, obwohl hier eine Grenzschicht mehr vorhanden ist als bei den anderen beiden Detektoren. Dieses gute Abschneiden ist vorzüglich auf den Einsatz des Klebers BC600 zurückzuführen, welcher die besten physikalischen Eigenschaften aufweist und für beide Verbundstellen im Phoswich zum Einsatz kam (im Gegensatz zu Elastosil beim neuen CsI(Tl)-Kristall). Der Vergleich der neuen und älteren Prototypen zeigt also, dass sich die neue Methodik beim Fertigen der Detektoren bewährt hat und ein sehr gutes Ergebnis liefert.

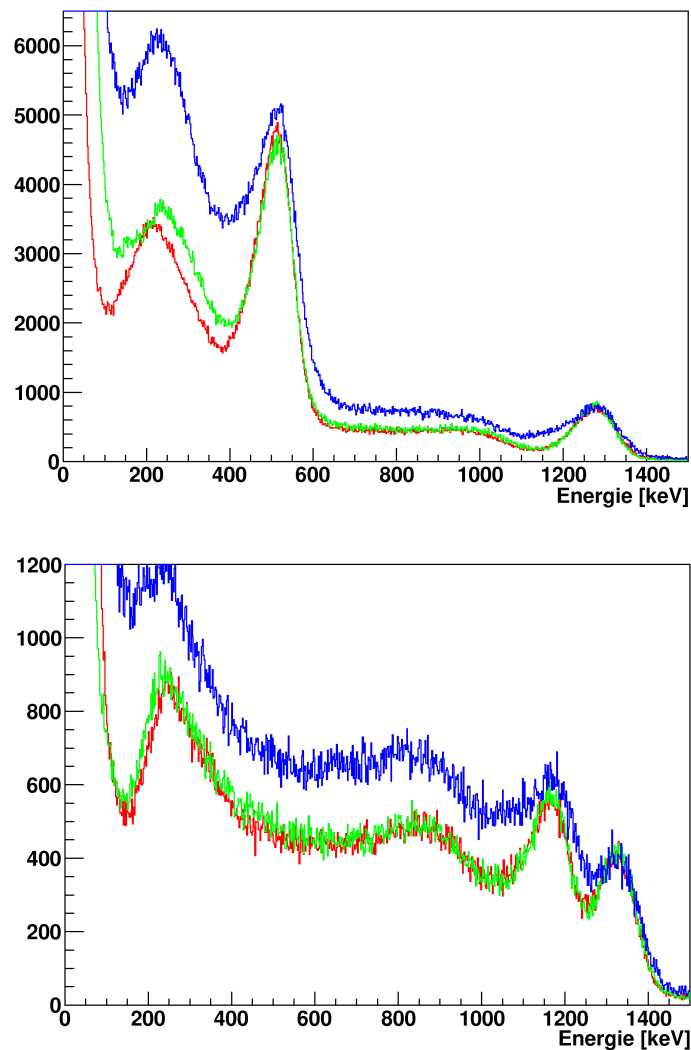


Abbildung 4.3.: Aufgenommene Spektren der angefertigten Detektoren, oben für die ^{22}Na -Quelle (normiert auf 1.275 MeV-Linie) und unten für die ^{60}Co -Quelle (normiert auf 1.332 MeV-Linie). Die Peaks bei den im Text genannten Energien sind deutlich zu identifizieren. Die Farben kennzeichnen die verwendeten Detektoren: Rot: neuer CsI(Tl)-Kristall, Grün: Phoswich-Detektor, Blau: alter CsI(Tl)-Prototyp. Von einer Beschriftung der y-Achse, welche die Eventzahl repräsentiert, wurde auf Grund der durchgeführten Normierung der einzelnen Spektren abgesehen. Angefertigt mit go4.

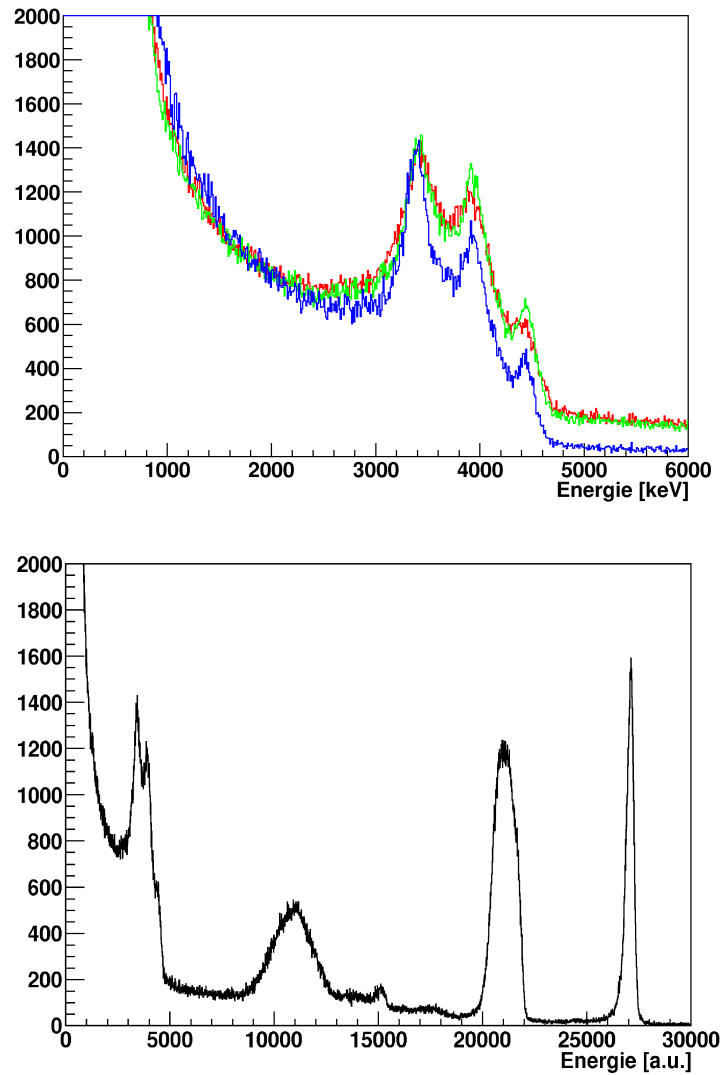


Abbildung 4.4.: Aufgenommenes Spektrum der angefertigten Detektoren bei Beschuss einer deuterierten Plastikfolie mit 24 MeV Protonen am MLL. Oben ist der Vergleich der Detektoren bezüglich des beobachteten γ -Spektrums dargestellt. Die Farben kennzeichnen die verwendeten Detektoren: Rot: neuer CsI(Tl)-Kristall, Grün: Phoswich-Detektor, Blau: alter CsI(Tl)-Prototyp. Unten ist das gesamte aufgezeichnete Spektrum des Phoswich-Detektors in ungeeichter Form dargestellt. Das breite mittlere Maximum bei etwa 11000 ist auf die Wechselwirkung mit Deuterium zurückzuführen. Angefertigt mit go4.

Kapitel 5.

Thallium dotiertes Cäsiumiodid

Obwohl CsI(Tl) schon lange als Detektormaterial eingesetzt wird, sind vor allem die Mechanismen zur Emission des Szintillationslichts im sichtbaren Bereich noch nicht vollständig geklärt. Gerade in den letzten Jahren wurde auf diesem Gebiet allerdings ein deutlicher Fortschritt erzielt.

5.1. Emissionsmechanismen von CsI(Tl)

Die Auswertung des Detektorsignals und die Identifikation der Teilchen (wie beispielsweise über die RPID [Ben10]) geschieht über die beiden sichtbaren Emissionslinien bei 2.25 eV (entspricht 551 nm) und 2.55 eV (entspricht 486 nm). Daher werden auch nur Modelle zur Erzeugung dieser beiden Linien diskutiert.

Bei Anregung des CsI(Tl) wird ein Elektron aus dem 5p-Orbital des I⁻-Ions in das 6p-Orbital des Tl⁺-Ions übertragen. Um dieses Thallium-Atom bildet sich in Folge dessen ein Elektronenzentrum (bezeichnet mit Tl⁰) und es wird darüberhinaus ein mobiles Loch im Valenzband erzeugt. Dieses Loch erzeugt ein sogenanntes V_k-Zentrum, was im Wesentlichen einem molekulartigen I₂⁻-Ion innerhalb des Kristallgitters entspricht. Dieses V_k-Zentrum bindet sich nun an ein Tl⁰-Elektronenzentrum und bildet mit diesem ein {Tl⁰, V_k}-Paar.

Dieser kurzlebige Zustand zerfällt durch Tunneln des Elektrons vom Tl⁰ zum V_k-Zentrum. Dies geschieht sehr schnell, weil die Wellenfunktionen der beiden Orbitale in solchen Paaren stark überlappen.

Durch die Rekombination und die darauf folgende Vibrationsabregung an das Gitter wird nun ein lokalisiertes Exziton erzeugt. Der Zerfall von diesem "Relaxed Exited State" (RES) führt schließlich zum bekannten Emissionsspektrum [NSZ⁺95].

Die Anregung der Ionen und der anschließende Zerfall bis hin zum RES nehmen nur etwa 50 ps in Anspruch [Zaz00], was eine schnelle Emission des Szintillationslichts zur Folge hat. Das unterschiedliche Verhalten der Emissionslinien ist bedingt durch die Tl⁺-Störstellen. Charakteristisch ist nun, dass CsI(Tl) neben den beiden Wellenlängen (551 nm und 486 nm) auch noch zwei verschiedene Zerfallskonstanten für das Szintillationslicht aufweist. Diese liegen bei Zimmertemperatur etwa bei $\tau_1 \approx 0.6 \mu\text{s}$ und $\tau_2 \approx 3.2 \mu\text{s}$. Genau diese beiden Zerfallskonstanten und die Energien, welche im jeweiligen Kanal deponiert werden, können nun zur Teilchenidentifikation dienen (siehe [Ben10]). Zu klären ist, ob die beiden Wellenlängen mit den beiden Zerfallskonstanten korreliert sind oder beide

Anregungen sowohl in der langen als auch in der kurzen Zeit zerfallen. Bei einer Temperatur von nur 0.35 K konnte gezeigt werden, dass beide Wellenlängen dominant mit eigener, spezifischer Zerfallszeit zerfallen ([NZZ⁺94]). Dies wird einsichtig wenn man das Energieniveauschema in Abbildung 5.1 betrachtet.

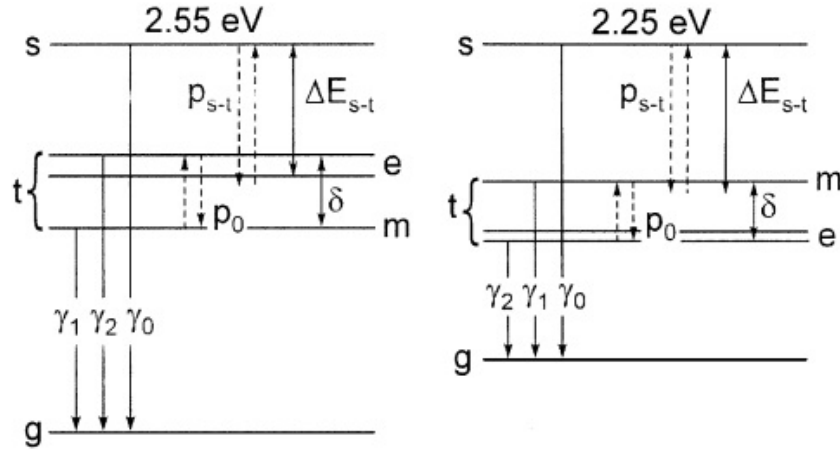


Abbildung 5.1.: Energieniveauschema der beiden RES-Konfigurationen, welche zur Emission der beiden optischen Linien bei 2.25 eV bzw. 2.55 eV beitragen. s bezeichnet dabei den Singlett-, t den Triplettszustand, m den metastabilen und e den emittierenden Zustand der Tripletts-Konfiguration. Die anderen Parameter sind in Tabelle 5.1 erklärt. [Zaz00]

Emission in eV	γ_1 in $10^3 s^{-1}$	γ_2 in $10^6 s^{-1}$	δ in meV	ΔE_{st} in meV
2.55	2.4	≈ 0.1	0.6-0.7	12-14
2.25	≈ 1.0	0.02	-0.6-0.8	35-37

Tabelle 5.1.: Werte zum in Abbildung 5.1 dargestellten Energieniveauschema. γ_1 und γ_2 bezeichnen die Übergangswahrscheinlichkeiten bezüglich der Emission elektromagnetischer Strahlung, δ die Energielücke zwischen emittierendem und metastabilen Triplettszustand und ΔE_{st} die Energielücke zwischen Singlett- und Triplettszustand. [Zaz00]

Es fällt auf, dass das niedrigste RES-Niveau entweder den emittierenden Zustand für die 2.25 eV-Emission oder den metastabilen Zustand für die 2.55 eV-Emission darstellt. Daraus resultiert bei sehr kleinen Temperaturen (keine thermische Anregung) eine eindeutige Zeit-Wellenlängen-Korrelation. Die Energielücke zwischen emittierendem und metastabilem Niveau beträgt weniger als 1 meV, so dass bei Zimmertemperatur beide

Niveaus bevölkert sind und damit die Korrelation verschwindet. Nun könnten allerdings andere Mechanismen für eine bei Raumtemperatur eindeutige Zeit-Wellenlängen-Korrelation sorgen. Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde ein Experimentaufbau entwickelt und getestet, um diese Möglichkeit abzuklären.

5.2. Spektrale Untersuchung der zeitabhängigen Lichtemission

Der Aufbau soll eine koinzidente und Wellenlängen-spezifische Detektion der im Szintillationsprozess emittierten Photonen ermöglichen. Die spektrale Auflösung wird dadurch erreicht, dass die Detektion über eine an ein Spektrometer gekoppelte "PhotoMultipliertube" (PMT) geschieht. Die Spaltbreite des Spektrometers ist dabei variabel einstellbar, um Wellenlängenauflösung und Lichtmenge festzulegen.

Die Zeitmessung erfolgt dadurch, dass zur Anregung des verwendeten CsI(Tl)-Kristalls eine radioaktive β^+ -Quelle dient. In dieser werden die beiden Paarvernichtungsphotonen annähernd in entgegengesetzte Richtung emittiert.

Ein Teil der so erzeugten Photonen wird nun in die Richtung des zu untersuchenden Szintillators ausgesendet. Um nun eine Koinzidenzmessung zu ermöglichen muss auf der anderen Seite der Quelle ein Detektor angebracht werden, welcher das zweite Photon nachweist. Die Detektion dieses Photons löst ein Koinzidenzfenster aus, in dessen Dauer im Spektrometer und der PMT detektierte Photonen aufgenommen werden.

Bei Messungen in den entsprechenden spektralen Bereichen von 551 nm und 486 nm kann so ein Zeitspektrum erstellt werden, das Aufschluss über die zeitabhängige Emission der beiden Wellenlängen gibt.

Falls es also eine eindeutige Zeit-Wellenlängen-Korrelation gibt, sollte dieses Spektrum demnach einer exponentiell abfallenden Kurve mit der entsprechenden Zeitkonstanten folgen, bei keiner Korrelation sollten die Spektren zwei überlagerte Exponentialfunktionen zeigen. Die beiden Extremfälle sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

Die Analyse des Zeitspektrums gibt somit Aufschluss über eine Korrelation.

5.3. Aufbau des Experiments

Die beste Möglichkeit für die Detektion der γ -Quanten für das erste Zeitsignal wäre ein Germanium-Detektor. Da aber die dafür nötige Kühlung das Setup unnötig verkomplizieren würde, wird stattdessen ein weiterer CsI(Tl)-Kristall mit APD verwendet (ein Temperaturfühler ist ebenfalls in der Anordnung enthalten).

Um eine Variation der Positionen der einzelnen Komponenten zu ermöglichen soll der Aufbau darüberhinaus möglichst modular gestaltet werden.

Zudem soll eine Flexibilität bezüglich der Positionierung der radioaktiven Quelle sowie des Szintillationskristalls zueinander und zum Spektrometer durch die Anordnung gegeben sein. Daher werden sowohl die Quelle als auch der zu untersuchende, würfelförmige (10mm x 10mm x 10mm) CsI(Tl)-Kristall auf individuellen Halterungen gelagert, welche

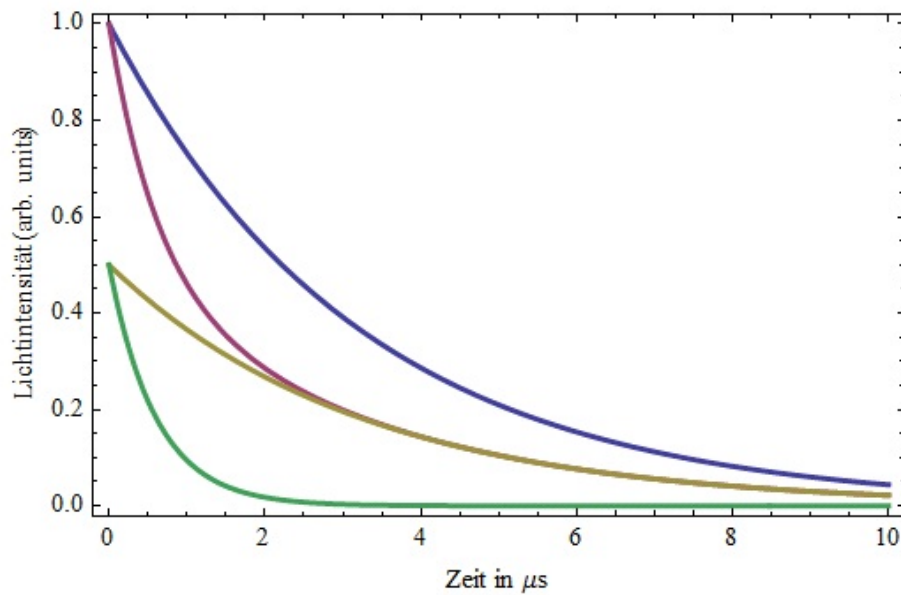


Abbildung 5.2.: Beide möglichen Spektren, mit oder ohne Zeit-Wellenlängen-Korrelation. Blaue Kurve: Ausschließliche Emission mit einer Zeitkonstanten von $3.2 \mu\text{s}$, Lila Kurve: Überlagerung einer Emission zu gleichen Teilen mit der Zeitkonstante $\tau_1 \approx 0.6 \mu\text{s}$ und $\tau_2 \approx 3.2 \mu\text{s}$, die beiden Anteile sind als gelbe und grüne Kurve dargestellt. Angefertigt mit Wolfram Mathematica 8.

über stabilisierende Führungsstangen und eine justierende Gewindestange einzeln verstellbar sind (siehe Abbildung 5.3).

Zum Verstellen der Abstände ist es nicht nötig die Halterung komplett zu demontieren, es genügt den hinteren Detektor abzunehmen und von dort über die in der Zeichnung leicht dicker dargestellten Gewindestangen die gewünschte Lage einzustellen. Dies erleichtert eine mehrfache Justierung deutlich.

Dem CsI(Tl) steht prinzipiell die komplette Länge der Gewindestange von etwa 7 cm zur Verfügung. Die Positionierung des CsI(Tl) wird nur von der Halterung und Position der radioaktiven Quelle beeinflusst. Eine Querschnittszeichnung veranschaulicht dies in Abbildung 5.4.

5.4. Tests mit Natrium-Quelle

Als erster Test dieser Konfiguration, wurde eine ^{22}Na -Quelle eines Praktikumsversuches der Universität ausgeliehen. Deren Aktivität von etwa 9 kBq reichte allerdings nicht um

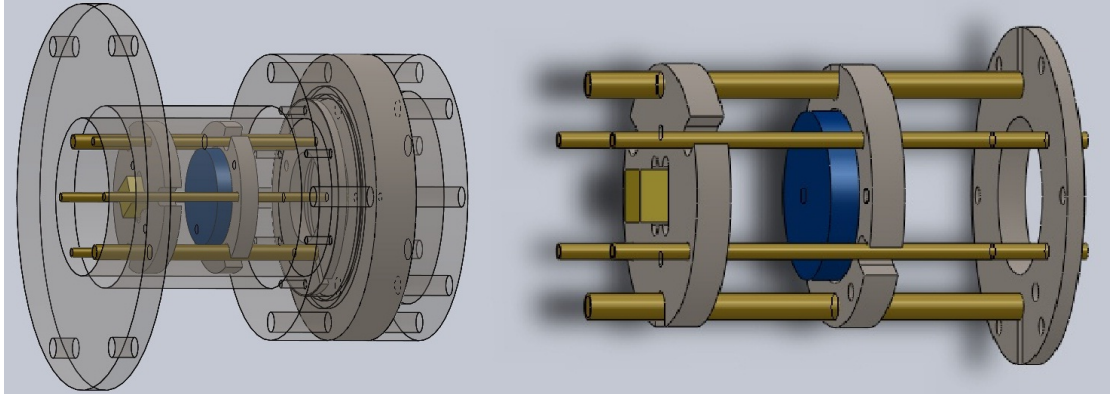


Abbildung 5.3.: Links: Gesamter Aufbau (die äußere Halterung wird zur Visualisierung transparent dargestellt). Rechts: Innere Halterung mit individuell verstellbaren Lagerungen für CsI(Tl)-Kristall und Quelle.

eine vernünftige Zählrate zu erhalten (weniger als ein Hertz).

Daraufhin wurde eine deutlich aktivere ^{22}Na -Probe mit 260 kBq, welche freundlicherweise vom FRM II zur Verfügung gestellt wurde, getestet. Leider war auch bei einem sehr langen Koinzidenzfenster von $20\ \mu\text{s}$ kein signifikantes Ergebnis zu erhalten, da sich die Daten mit geöffneten (2mm) Spalt praktisch nicht von denen mit ganz geschlossenem Spalt unterschieden.

Dies ist auf die geringe Transmission des Spektrometers sowie einen starken (teilweise direkt von der verwendeten Quelle verursachten) Hintergrund zurückzuführen. Die energiereiche Paarvernichtungsstrahlung konnte mit Blei-Platten zwar reduziert, aber nicht genügend abgeschirmt werden.

Die Ergebnisse der Spektren bei offenen und geschlossenem Spalt wie auch eine Darstellung der Differenz der beiden Signale befindet sich in Abbildung 5.5. Die zeitliche Auflösung der Messung betrug etwa 2.5 Nanosekunden. In der Differenzmessung wurden die beiden interessanten Peaks der Messung mit offenem und geschlossenem Spalt über die Position der Maxima angeglichen (Korrektur um 5 ns), um einen offensichtlichen Offset zu kompensieren. Auf Grund des großen Anteils des Hintergrunds ist auch eine Messung mit aktiveren Quellen nicht erfolgsversprechend.

5.5. Ausblick für weitere Experimente

Es ist klar, dass die Lichtmenge in dieser Messung deutlich erhöht werden muss um ein eindeutiges Signal zu erkennen. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten.

Zunächst kann statt einem β -Strahler eine gepulste Elektronen-Kanone verwendet werden, welche deutlich mehr Photonen im CsI(Tl) auslöst. Außerdem wird durch die elektronische Steuerung der Elektronenpulse eine Koinzidenzmessung überflüssig, was ebenfalls die Zählrate steigert. Die diesbezüglich erforderlichen Bauelemente wurden bereits angefertigt und stehen jederzeit zur Verfügung.

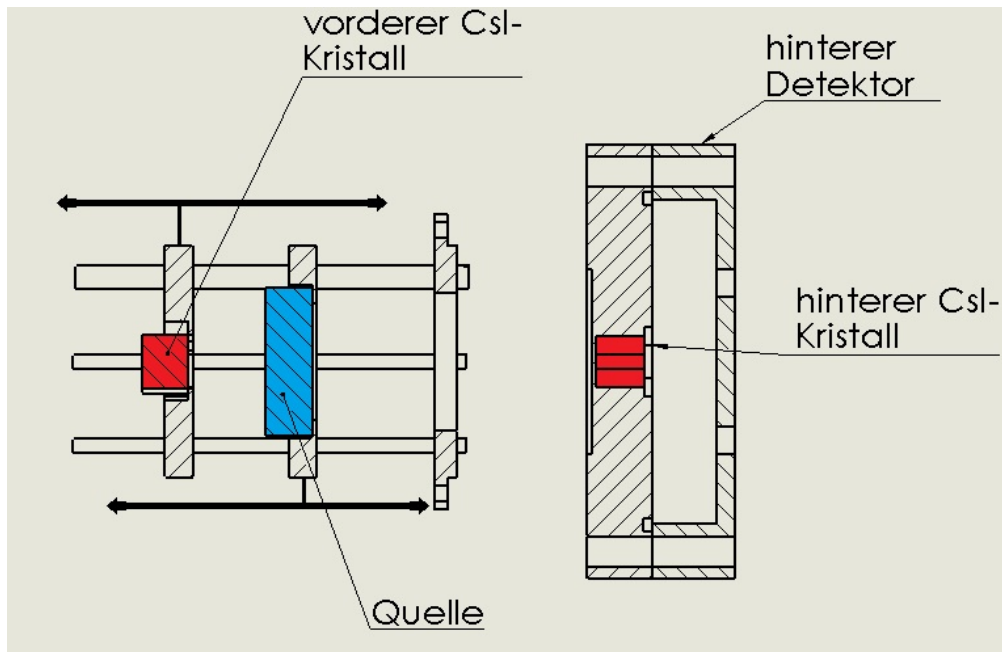


Abbildung 5.4.: Technische Querschnittszeichnung des Aufbaus ohne äußere Halterung. Sowohl der vordere als auch der hintere CsI(Tl)-Kristall wurden rot angefärbt, die Quelle ist blau dargestellt. Die jeweiligen Reichweiten der Komponenten auf den Gewindestangen sind durch die Pfeile angedeutet.

Außerdem könnte statt dem optischen Gitter-Spektrometer mit sehr kleiner Transmission eine optische Filterfolie zum Einsatz kommen. Dies würde ebenfalls das Signal zu Untergrund Verhältnis erhöhen.

Auch eine Kombination der beiden vorgestellten Verbesserungen wäre denkbar. Unglücklicherweise konnten diese beiden Ansätze im Laufe der Bachelor-Arbeit nicht mehr verfolgt werden, bieten aber vielversprechende Ansätze für weiterführende Experimente.

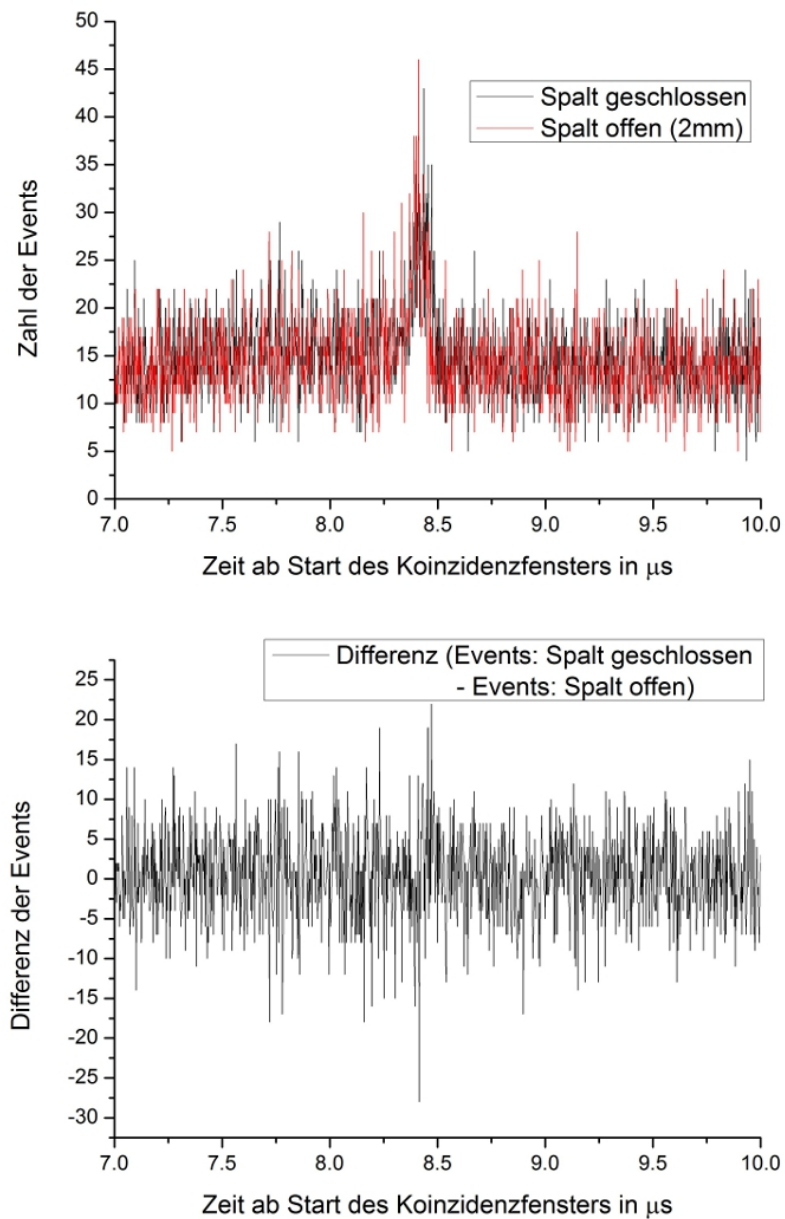


Abbildung 5.5.: Oben: Aufgenommenes Koinzidenzspektrum (rot: Spalt offen, schwarz: Spalt geschlossen), Unten: Differenzmessung Events bei geschlossenem Spalt minus der Events bei 2mm geöffnetem Spalt (korrigiert um etwa 5ns). Auf der x-Achse ist die Zeit nach Start des Koinzidenzfensters in μs aufgetragen, auf der y-Achse die Zahl der gemessenen Events (bzw. Differenz der Events). Angefertigt mit OriginPro 8.5.1G.

Kapitel 6.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine reproduzierbare Methode zur Fertigung von Phoswich-Detektoren, welche als Alternative zu einfachen CsI(Tl)-Kristallen für bestimmte Bereiche des CALIFA-Kalorimeters entwickelt werden, erarbeitet. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche neue Hilfsmittel konstruiert und zugehörige Techniken etabliert.

Das Ergebnis sind Detektoren, welche mit nur einer einzigen Reflektor-Schicht die Energieauflösung älterer Prototypen (mit drei Schichten), sogar übertreffen. Sie weisen bei einer γ -Energie von 1332 keV eine Energieauflösung von 6.4% (für den gefertigten Phoswich), sowie 6.5% für einen einfachen CsI(Tl)-Kristall auf. Dies ist vergleichbar oder sogar besser als die Werte, welche bei den kleineren Kristallen mit deutlich dickerer Reflektorschicht der bisher verwendeten Prototyp-Detektoren (identische Ausleseketten) erreicht wurden (6.7%).

Dieser Erfolg ist vor allem auf die in zahlreichen Tests und Experimenten getroffene Auswahl an Arbeitsmaterialien und die geeignete Handhabung zurückzuführen. So bildet der Kleber BC600 eine optisch hervorragend koppelnde Verbindung sowohl zwischen den Kristallen des Phoswich als auch zwischen Szintillator und APD selbst. Daneben fördern auch der Einsatz neuer Falstechniken und Anwendung des Spiegelbandes die für die Energieauflösung wichtige Lichtsammlung.

Das bei Experimenten am Maier-Leibnitz-Laboratorium überprüfte Verhalten bei Beschuss mit leichten geladenen Teilchen (Protonen, Deuteronen) steht demjenigen der älteren Prototypen ebenfalls in nichts nach (siehe dazu Abbildung 4.4).

Als folgendes wichtiges Experiment steht nun die Überprüfung der eigentlichen Phoswich-Eigenschaften an, welche es erlauben über eine zweistufige Energieverlustmessung auch die gesamte Energie für Protonen über 260 MeV zu rekonstruieren. Diese Energien waren am verfügbaren Beschleuniger nicht erreichbar. Darüberhinaus besteht die Aufgabe, die hier vorgestellten Methoden für die Massenfertigung der Kristalle anzupassen. Dies kann unter anderem durch den Einsatz von Stanzformen und die Herstellung ähnlicher Hilfsmittel (Klebewinkel, Teflonformen) für mehrere Kristalle erreicht werden.

Neben der Anfertigung der eigentlichen Detektoren wurde auch ein Experiment zur Bestimmung der Zeit-Wellenlängen-Korrelation der spektralen CsI(Tl)-Emission entwickelt und angefertigt. Obwohl CsI(Tl) bereits seit vielen Dekaden in mannigfaltigen Anwendungen eingesetzt wird, gibt es keine exakten Daten zu den elementaren Prozessen im Material.

Erste Tests dieses Aufbaus mit einer radioaktiven ^{22}Na -Quelle zeigten die prinzipielle

Kapitel 6. Zusammenfassung und Ausblick

Funktionalität. Die geringe Transmission des zur Verfügung stehenden Gitter-Spektrometers ließ allerdings keine Schlussfolgerung zu. Die Mittel zur Verbesserung und Verfeinerung der verwendeten Konfiguration hinsichtlich eines Beschusses mit Elektronen liegen bereits vor und können in nächster Zeit in weiteren Testläufen angewandt werden. Weiterhin kann das Spektrometer durch eine spektrale Filterfolie ersetzt werden.

Durch die geleisteten Vorarbeiten könnte diese Untersuchung daher in einer weiteren Bachelorarbeit abgeschlossen werden.

Anhang A.

Anwendungen für Phoswich-Detektoren

Eine Anwendung von Phoswich-Detektoren ist die Rekonstruktion der Flugrichtung geladener Teilchen auf Grund einer Koinzidenzmessung, da nur Teilchen mit Trajektorien wie in Abbildung 2.1 den Phoswich zu dessen typischen Lichtemission mit schnellem Peak zu Beginn anregen. Seitlich einfallende Teilchen erzeugen hingegen entweder nur langsam oder nur schnell abfallende Signale. Durch mehrere Lagen oder andere geometrische Anordnungen kann diese Richtungsaufösung weiter verbessert werden (siehe [Wil51]).

Andererseits kann man durch gänzliche Einbettung eines langsamen in einen schnellen Szintillator einen Detektor erzeugen, welcher gerade auf neutrale Strahlung sensitiv ist. Ionisierende Strahlung würde nämlich schon zuvor eine Lichtemission im umgebenden, schnell szintillierenden Medium auslösen und damit ein Vetosignal erzeugen (siehe [Wil51]). Signale mit ausschließlich langsamer Zeitkonstante wurden dementsprechend durch neutrale Strahlung verursacht, da sie den äußeren Szintillator wechselwirkungsfrei durchdrang und nur im inneren Material Sekundärteilchen auslöste.

Auch eine Teilchenidentifikation über die gesamte im jeweiligen Material deponierte Energie ist bereits erfolgreich erestet worden (siehe [PBC83]). Diese Anwendung in Verbindung mit der "Reconstructive Particle Identification" (RPID aus [Ben10]) zeigt ebenfalls vielversprechende Möglichkeiten.

Anhang B.

Eigenschaften des verwendeten Plastikszintillators

Für die Anfertigung des Phoswich-Detektors wurde ein BC400 Plastikszintillator von Saint Gobain Crystals verwendet, dessen Eigenschaften hier tabellarisch dargestellt sind:

Material	Polyvinyltoluen
Dichte	1.032 g pro cm^3
Brechungsindex	1.58
Lichtausbeute	65% von Anthrazen
Ansteigzeit	0.9 ns
Zeitkonstante	2.4 ns
Wellenlänge maximaler Emission	423 nm
Absorptionslänge für Licht ¹	160 cm

Tabelle B.1.: Eigenschaften des BC400 Plastikszintillators. Aus [BC400].

¹Typische $1/e$ Absorptionslänge eines 1x20x200cm Gussteils mit polierten Kanten, gemessen mit einem an einer Seite angebrachten, bikalkischen Photoelektronenvervielfacher.

Anhang C.

Experiment zum Test der Lichtsammlung

Um die Lichtsammlung der einzelnen Faltformen für das Reflektormaterial zu testen, wurde ein Experiment entwickelt und aufgebaut. Dieses besteht aus einem Gate-Generator, welcher Spannungspulse variabel einstellbarer Länge (minimal 80 ns) erzeugt. Diese werden an eine SMD-Leuchtdiode weitergegeben und sorgen darin für definierte Lichtpulse. Diese Lichtpulse werden nun wie im echten Detektor von einer APD registriert und mit der angegliederten Hard- und Software in ein Energieäquivalent umgerechnet.

Da die Energie direkt proportional zur Anzahl der gesammelten Photonen ist, kann die registrierte Energie des Lichtpulses zur Bestimmung der Qualität der Lichtsammlung dienen.

Dazu wird die SMD-Diode zuerst mit BC600 auf ein Plexiglasstück aufgeklebt. Dieses Plexiglasstück mit Photodiode wird nun mit Elastosil temporär direkt auf der APD befestigt und möglichst dicht mit ESR Folie umschlossen (siehe C.1).

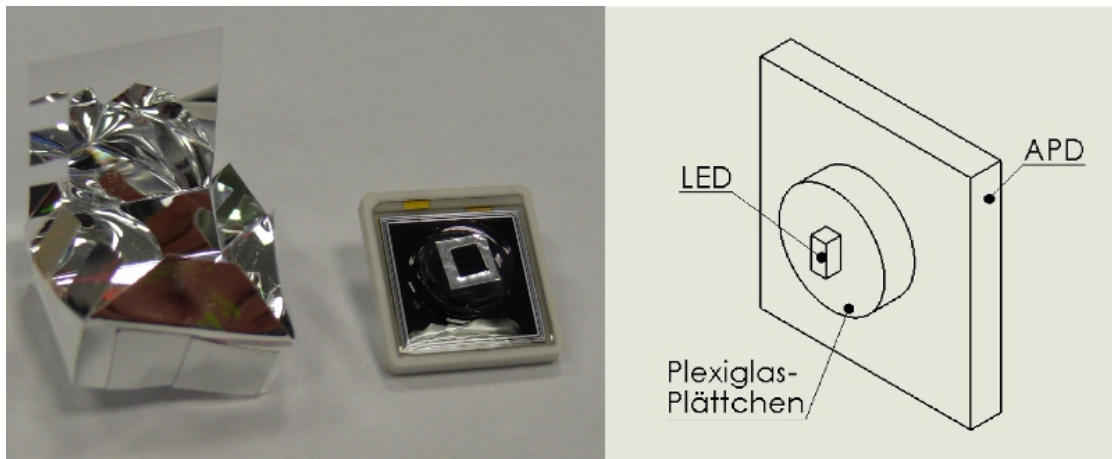


Abbildung C.1.: Links: Photo der APD mit aufgeklebten Plexiglas-Plättchen und kleinem Spiegelband-Rähmchen, links daneben liegt die passgenau angefertigte ESR-Reflektorfolie. Rechts: Technische Zeichnung der Referenzprobe.

Dieser Aufbau dient als Referenzmessung für die folgenden Proben und soll durch die kurze Distanz der Elemente eine möglichst vollständige Lichtsammlung ermöglichen. Dazu wird das Plexiglas-Scheibchen wieder von der APD abgelöst und nun sowohl dieses als auch die APD mit Elastosil auf einem Plexiglas-Dummie (gleiche Größe und Form

Anhang C. Experiment zum Test der Lichtsammlung

wie neuer CsI(Tl)-Kristall) befestigt. Dies ist in Abbildung C.2 zu sehen.

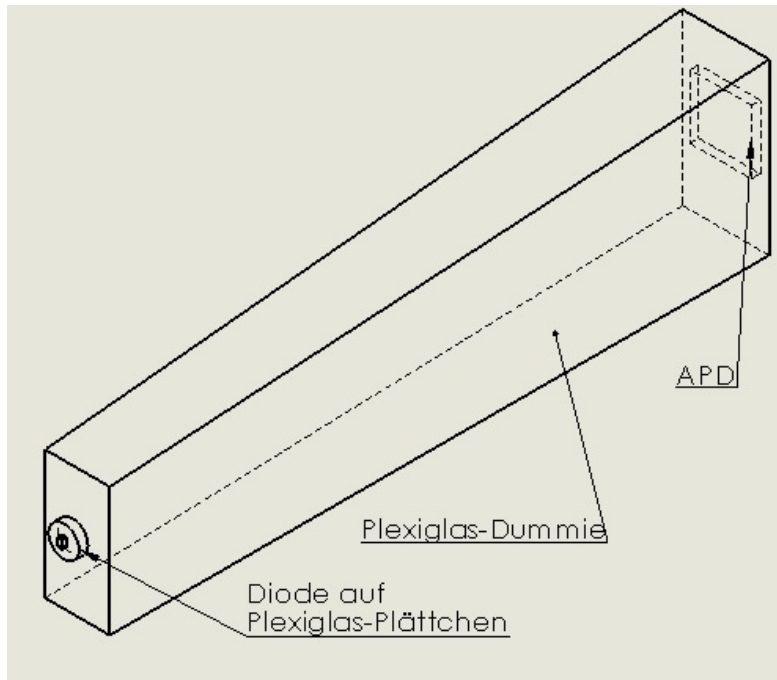


Abbildung C.2.: Technische Zeichnung des Experimentaufbaus mit Plexiglas-Formmuster und den daran befestigten Komponenten.

Dieser wird nun einmal ohne Reflektor, mit ESR-Faltmuster ohne Überlapp, mit ESR-Faltmuster mit Überlapp, mit ESR-Folie ohne Überlapp aber zusätzlichem Teflonband-Streifen unter der langen Stoßkante und mit beiden ESR-Mustern übereinander (zusätzlich Teflon wie zuvor) bei verschiedenen Pulslängen getestet. Mit der Pulslänge wird auch die Lichtmenge variiert. Da die Position der APD und der LED im Verlauf des Experiments fixiert bleibt, kann über die gemessenen Energien ein Vergleich zwischen den Faltmustern angestellt werden.

Um eine Verfälschung der Messung durch von außen einfallendes Licht zu vermeiden, wird das Experiment in einer lichtdichten Box aus Aluminium-Guss durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle C.1 zusammengefasst.

Man sieht, dass der Unterschied zwischen der Referenzprobe und den Proben mit Plexiglas-Formmuster sehr stark ausgeprägt ist. Dies ist nicht nur eine Folge der schlechteren Lichtsammlung sondern auch der Absorption des Plexiglases selbst. Alleine dieser Vergleich zeigt, dass das Licht sehr große Weglängen im Material zurücklegt und folglich auch eine große Anzahl an Reflexionen erfährt. Insbesondere ist aber der direkte Vergleich der Proben mit Plexiglas untereinander sowie ein Vergleich der Steigungen (auch in Bezug auf die Referenzprobe) interessant. Dieser ist in Abbildung C.3 gegeben.

Weiterhin fallen die fehlenden Werte für den Durchlauf ohne Reflektor-Folie auf: Unterhalb der 100 ns fällt das damit verbundene Signal unter die Triggerschwelle und wird

Anhang C. Experiment zum Test der Lichtsammlung

Pulsdauer in ns	Referenz- Probe	ohne ¹	Überlapp ²	ohne Überlapp ³	ohne Überlapp ⁴ plus Teflon	2x ESR ⁵
80	2859	-	539	542	766	699
86	4383	-	808	809	905	1020
102	6028	300	1730	1837	1609	2138
104	7301	304	2063	2070	1740	2282
122	11276	1040	3636	3832	3513	3825
142	16372	1634	5700	5538	5437	5950
162	22045	2351	8350	7819	7760	8242
186	28731	3013	11483	11052	11297	11103
Steigung	245 ± 10	33 ± 1	104 ± 6	98 ± 5	99 ± 7	99 ± 4

Tabelle C.1.: Ergebnisse des Experiments zur Lichtsammlung für die fünf verschiedenen Konfigurationen. Der Wert entspricht der mit einem Gaußschem Fit (Programm: ROOT) bestimmten FPGA-Energie. Zum Vergleich: der 4.438 MeV-Peak des Kohlenstoffspektrums wies im MLL-Experiment eine FPGA-Energie von 6975 auf (Phoswich-Detektor im Durchlauf, aus dem auch die Daten in Kapitel 4 extrahiert wurden). Werte mit OriginPro 8.5.1G berechnet.

somit nicht mehr richtig registriert. Auch Werte unter 104 ns sind vermutlich durch diese Schwelle verfälscht und werden deshalb in der Berechnung der Steigung nicht mehr berücksichtigt.

Die Ausgleichsgeraden für die Proben mit Reflektorfolie liegen im Wesentlichen übereinander (siehe C.4). Dies entspricht einem relativ kleinen Effekt, was die genaue Umsetzung des Faltmusters anbelangt. Dennoch ist die Steigung für das Faltmuster mit Überlapp größer als die Steigungen der anderen Varianten, was für dessen leicht bessere Leistung spricht. Die berechneten Standardabweichungen deuten allerdings an, dass mit der in diesem Experiment erreichten Genauigkeit kein eindeutiges Resultat erzielt werden kann. Die Probe mit beiden Faltmustern übereinander schneidet hingegen überraschend schlecht ab, was darauf zurückzuführen ist, dass keine äußere Folie individuell angefertigt wurde. Stattdessen wurde die Folie mit Überlapp aus dem vorherigen Versuch verwendet, welche nicht die optimale Form besaß. Da der Einsatz von zwei Lagen ESR schon in [Gas10] ausgeschlossen wurde, ist die exakte Überprüfung dieser Möglichkeit nur von systematischem Interesse.

¹Komplett ohne Umhüllung

²Faltform mit Überlapp (siehe Abbildung 3.6 unten rechts)

³Faltform ohne Überlapp (siehe Abbildung 3.6 unten links)

⁴Faltform ohne Überlapp mit Teflonband-Streifen unter langer Stoßkante

⁵beide zuvor verwendeten Faltsformen übereinander Teflonbandstreifen weiterhin enthalten

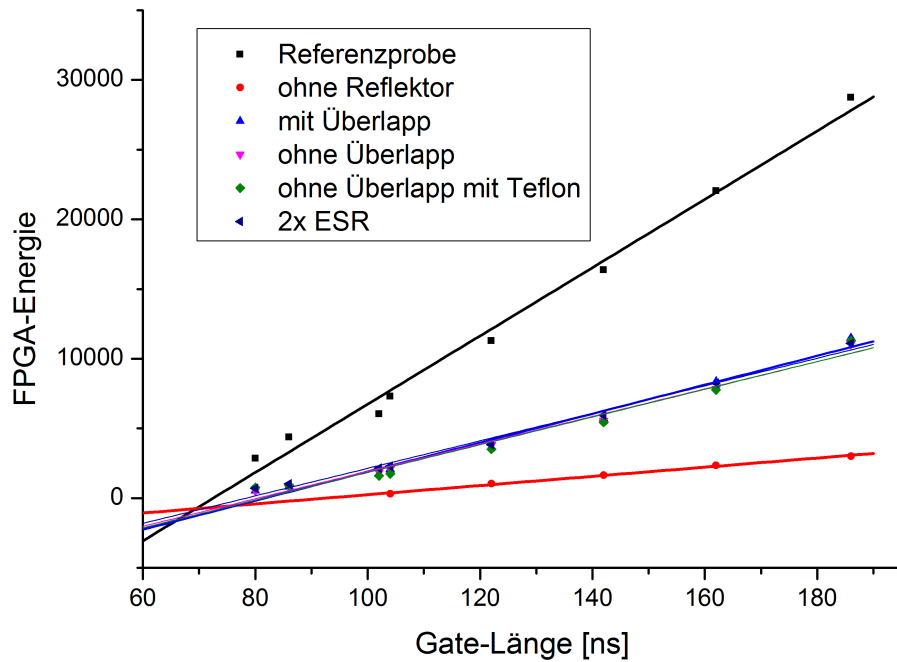


Abbildung C.3.: Plot der Daten aus Tabelle C.1 und lineare Fits. Die Farben sind in der Legende im Bild erklärt, die Bezeichnungen beziehen sich auf die Bezeichnungen in Tabelle C.1. Erstellt mit OriginPro 8.5.1G.

Dieses Experiment liefert damit eine erste Abschätzung zur Lichtsammlung der einzelnen Faltpattern, deren exakte Bestimmung Gegenstand weiterer Experimente sein kann.

Wie zu erwarten fällt der Vergleich zwischen den Wrappingmustern und einer Variante ganz ohne Reflektorfolien deutlich aus.

Die in diesem Experiment erzielten Ergebnisse rechtfertigen also den Einsatz des Faltpatterns mit Überlapp für die Prototyp-Detektoren. Trotzdem sollten die Messungen noch mit einem echten CsI(Tl)-Kristall wiederholt werden um eine realistischere Zahl für die absolute Lichtsammlung zu ermitteln.

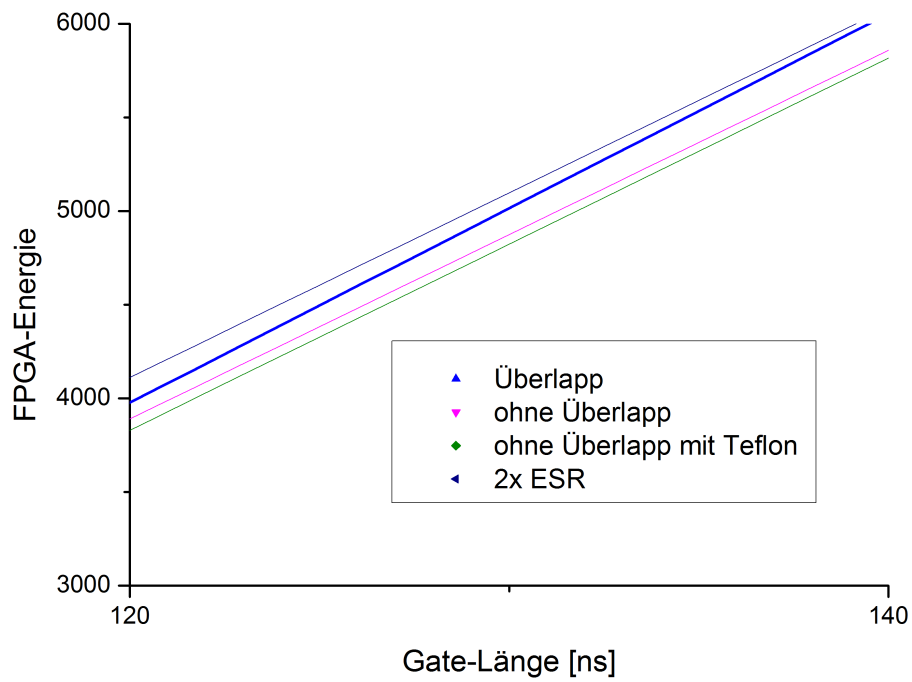


Abbildung C.4.: Vergrößerte Darstellung der Ausgleichsgeraden aus Abbildung C.3, um die einzelnen Linien der verschiedenen Faltpattern unterscheiden zu können (Datenpunkte werden nicht dargestellt). Erstellt mit OriginPro 8.5.1G.

Anhang D.

Auswertung der Fresnelschen Gesetze für Reflexionen mit Luftschicht

Im Folgenden steht s für die senkrechte und p für die parallele Polarisation bezüglich der Grenzschicht. Der Einfallswinkel wird mit α bezeichnet. Die Fresnelschen Gesetze wurden aus [Dem09] übernommen.

$$I_{Verlust,s} = \sum_{i=1}^{\infty} 0.02 \cdot I_{i,s}$$

mit

$$I_{i,s} = (1 - R_s) \cdot (0.98 \cdot R_s)^{i-1} \cdot I_{0,s}$$

und

$$R_s = \frac{\sin^2[\arcsin(n_s \sin \alpha) - \alpha]}{\sin^2[\arcsin(n_s \sin \alpha) + \alpha]}$$

Damit ergibt sich unter Einsatz der geometrischen Reihe, da $(0.98 \cdot R_s) \leq 1$:

$$\begin{aligned} I_{Verlust,s} &= 0.02(1 - R_s) \cdot I_{0,s} \sum_{i=0}^{\infty} (0.98 \cdot R_s)^i = \\ &= 0.02(1 - R_s) \frac{1}{1 - (0.98 \cdot R_s)} \end{aligned}$$

und analog:

$$\begin{aligned} I_{Verlust,p} &= 0.02(1 - R_p) \cdot I_{0,p} \sum_{i=0}^{\infty} (0.98 \cdot R_p)^i = \\ &= 0.02(1 - R_p) \frac{1}{1 - (0.98 \cdot R_p)} \end{aligned}$$

Anhang D. Auswertung der Fresnelschen Gesetze für Reflexionen mit Luftschicht

mit

$$R_p = \frac{\tan^2[\arcsin(n_s \sin \alpha) - \alpha]}{\tan^2[\arcsin(n_s \sin \alpha) + \alpha]}$$

Die verlorenen Intensitäten der einzelnen Polarisationen sind in Abbildung D.1 dargestellt.

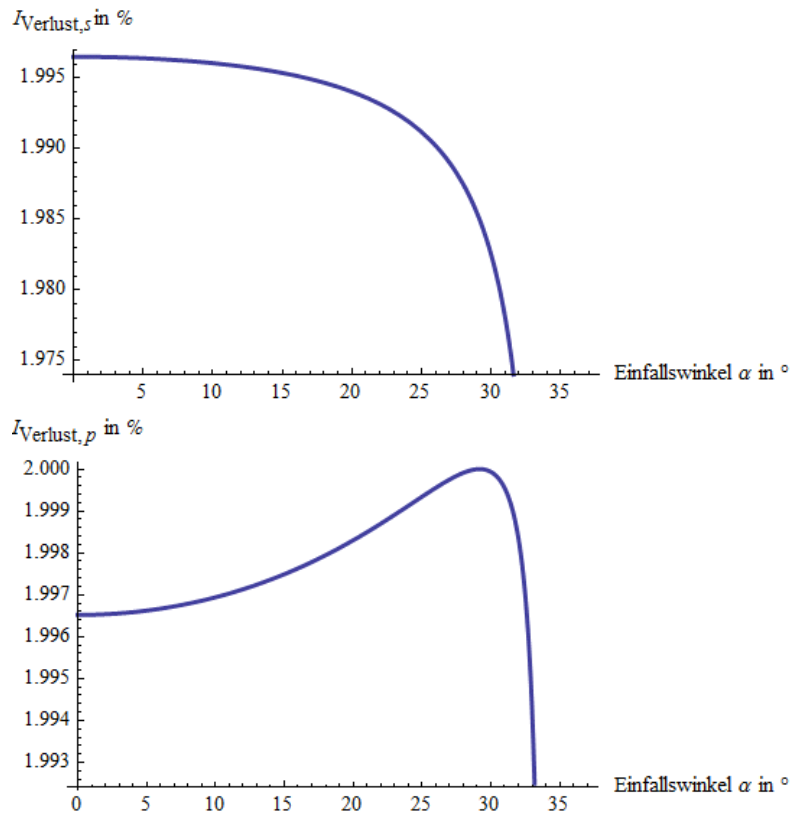


Abbildung D.1.: Plots der verlorenen Lichtintensitäten unter verschiedenen Einfallswinkel α für Polarisation senkrecht (oben) und parallel (unten) zur Grenzfläche. Erstellt mit Wolfram Mathematica 8.

Anhang E.

Anordnung der Detektoren

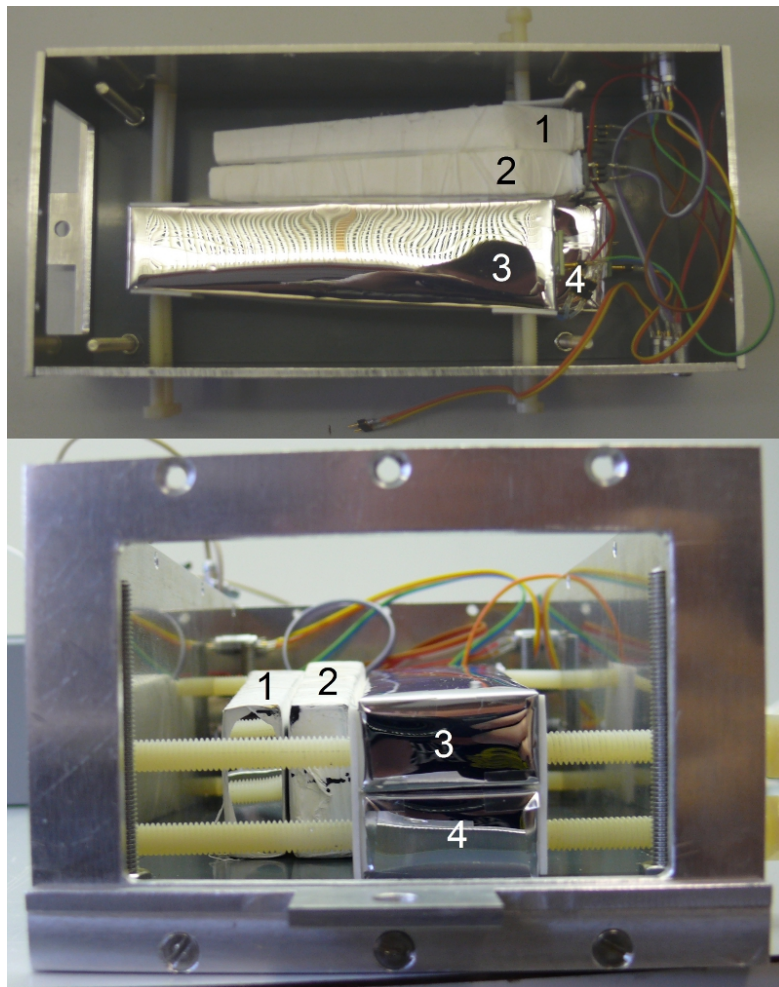


Abbildung E.1.: Anfängliche Anordnung der Kristalle in der inneren Detektorbox, die Nummerierung wird durch die Ausflistung im Text ersichtlich. Oben: Sicht von oben auf den Detektor. Unten: Frontalansicht (Photos noch ohne Plastiksintillator)

Literaturverzeichnis

- [BC400] Saint-Gobain Crystals, Technical Data Sheet for BC400,
http://www.detectors.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGdetectors/Documents/Product_Data_Sheets/BC400-404-408-412-416-Data-Sheet.pdf,
abgerufen am 13.7.2011
- [BC600] Saint-Gobain Crystals, Technical Data Sheet for BC600,
http://www.detectors.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGdetectors/Documents/Product_Data_Sheets/BC600-Data-Sheet.pdf, abgerufen am
5.7.2011
- [Ben10] M. Bendel, 2010. Diplomarbeit: Entwicklung und Test einer digitalen Auslese für das CALIFA-Kalorimeter
- [BKK⁺01] V. Babin, K. Kaleder, A. Krasnikov, S. Zazubovich, 2001. Luminescence and defects creation under photoexcitation on CsI:Tl crystals in Tl^+ -related absorption bands. *Journal of Luminescence* 96 (2002) 75-85
- [Cal08] Technical Status Report for: CALIFA: The R^3B Calorimeter for Photons and High Energy Charged Particles, 2008.
http://www.iem.cfmac.csic.es/departamentos/nuclear/fnexp/r3b/CALIFA_TSR.pdf, abgerufen am 15.7.2011
- [CsI] Amcrys-H, Physical Properties of CsI(Tl).
http://www.amcrys-h.com/Main_Frame.htm, abgerufen am 15.7.2011
- [Dem09] W. Demtröder, 2009. Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik. 5. Auflage, Springer-Verlag, S.239
- [Ela] Wacker Silicone, Technical Data Sheet for Elastosil RT 601,
http://www.kahmann-ellerbrock.de/tradepro/cms/site/wacker_silicones/pdf/rtv2/ELASTOSIL_RT_601_DE.pdf
- [Epo] Epoxy Technology, Technical Data Sheet for EpoTek 301,
http://www.polytec-pt.de/ger/_files/DBepo301%282%29.pdf#
- [ESR] Vikuiti, Technical Data Sheet for Enhanced Specular Reflector,
<http://www3.3m.com/dmrweb/servlet/DmrWeb?>, abgerufen am 15.7.2011
- [F65] Summers Optical, Technical Data Sheet for F-65,
<http://www.optical-cement.com/cements/cements/cements.html#anchor178999>, abgerufen am 5.7.2011

Literaturverzeichnis

- [FCS99] Chun-Rong Fu, Ling-Fu Chen, K. S. Song, 1999. Self-trapped excitons in pure and Na- and Tl-doped caesium halides and the recombination luminescence. *J. Phys.: Condens. Matter* 11 (1999) 5517-5532
- [Gas10] Martín Gascón, 2010. Prototype of a new calorimeter for the studies of nuclear reactions with relativistic radioactive beams. Universidade de Santiago de Compostela
- [Int11] Interne Kommunikation, R. Gernhäuser, 2011. R3B-Meeting im Mai 2011, Vortrag: Discussion on Munichs Activities
- [MPG06] J. Magill, G. Pfennig, J. Galy, 2006. Karlsruher Nuklidkarte (7. Auflage 2006)
- [NSZ⁺95] V. Nagirnyi, A. Stolovich, S. Zazubovich, V. Zepelin, E. Mihokova, E. Nikl, G. P. Pazzi, L. Salvini, 1995. Peculiarities of the triplet excited-state structure and luminescence of a CsI:Tl crystal. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 7(18):3637
- [NZZ⁺94] V. Nagirnyi, S. Zazubovich, V. Zepelin, M. Nikl, G. P. Pazzi, 1994. A new model for the visible emission of CsI:Tl crystal. *Chemical Physics Letters*, 227(4-5):533-538
- [PBC83] C. Pastor, F. Benrachi, B. Chambon, D. Drain, A. Dauchy, A. Giorni, C. Morand, 1983. Detection of charged particles with a Phoswich counter. *Nuclear instruments and methods* 212, 209-215
- [Wil51] D. H. Wilkinson, 1952. The Phoswich - A Multiple Phosphor. *The Review of scientific instruments*, Volume 23, Number 8, 414-417
- [Win11] Max Winkel, 2011. Diplomarbeit: Implementierung und Erprobung einer digitalen Pulsformanalyse zur Auslese von Kalorimetern
- [Zaz00] Svetlana Zazubovich, 2000. Physics of halide scintillators. *Radiation Measurements* 33 (2001) 699-704

Danksagung

Zuerst möchte ich dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr. Reiner Krücken für die Vergabe dieses interessanten Themas danken. Meinem Betreuer Dr. Roman Gernhäuser danke ich dafür, dass er jederzeit zu neuen Denkansätzen und Techniken Anstoß gab als auch unermüdlich und geduldig zahlreiche Fragen meinerseits beantwortete.

Einen besonderen Dank bin ich meinem persönlichen Betreuer Michael Bendel schuldig, welcher sich immer die Zeit nahm, mir in problematischen Situationen zu helfen und dringende Fragen zu beantworten. Auch wenn er als Doktorand selbst viele Aufgaben zu erfüllen hatte, war er dabei stets geduldig und hilfsbereit.

Auch den anderen Mitgliedern der R^3B Kooperation, vornehmlich Max Winkel und Tudi Le Bleis, sei für ihre Hilfsbereitschaft gedankt.

Vielen herzlichen Dank auch an Ralf Lang sowie Michael Klöckner aus der Institutswerkstatt, welche alle meine Entwürfe in höchster Präzision und kürzester Zeit angefertigt haben und auch bei vielen anderweitig anstehenden Arbeiten immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatten.

Wichtig ist es mir darüberhinaus, mich bei den anderen Mitarbeitern des Lehrstuhls E 12 für die Verbreitung einer hervorragenden Arbeitsatmosphäre zu danken. Vor allem sind hier Josef (Sepp) Lichtinger, Katharina (Kathi) Nowak, Stefanie Klupp als auch Konrad Steiger anzuführen.

Zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihre ausdauernde und hilfreiche Unterstützung.