

Interner Bericht
DESY F14-03
Oktober 1984

UNTERSUCHUNG AN BGO KRISTALLEN IN HINBLICK AUF IHRE EIGNUNG
ALS KLEINWINKEL-SCHAUERZÄHLER FÜR DEN CELLO-DETEKTOR

von

Kay Wittenburg

Eigentum der Property of	DESY	Bibliothek library
Zugang: Accessions:	- 6. NOV. 1984	
Leihfrist: Loan period:	7	Tage days

DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of filing application for or grant of patents.

“ Die Verantwortung für den Inhalt dieses
Internen Berichtes liegt ausschließlich beim Verfasser “

Interner Bericht
DESY F14-03
Oktober 1984

Untersuchungen an BGO Kristallen in
Hinsicht auf ihre Eignung als Kleinwinkel-
Schauerdetektor für den CELLO-Detektor

Experimentell physikalische Diplomarbeit
an der Universität Hamburg
durchgeführt in der DESY Gruppe F14

von

Kay Wittenburg

Hamburg
August 1984

ABSTRACT

In 1982 the DESY-group F14 had proposed to build a large-angle-tagger (LAT) with BGO crystals for the Cello-detector at the e^+e^- storage ring PETRA. The light output of the crystals was to be read out by photodiodes. In this diploma thesis several experiments concerning the properties of BGO and the readout system were performed:

Optimization of the signal-to-noise-ratio and a detailed examination of the radiation resistance. Moreover the possibility to calibrate the crystals and the long-time-stability of BGO-crystal with photodiode readout were examined.

ÖVERBLICK

As ik mit disse G'schicht von BGO bi dat DESY-Gewees F14 anfangen bün, da gäävt dat n' groodn Plan för n' CELLO Detektor. Se wull 'n sogenannten large-angle-tagger (LAT) ut BGO-Stücken tosomschustern. Dat Licht von de BGO-Stücken schull mit Photodioden ankieken warrn. För disse Arbeit heff ik rutfunn, wat för'n Puulkraam allens mit BGO un de Photodioden to doon wer, domit dat Ding ok keen Klöterkraam ward:

Toerst warr test, mit wat för'n Tüüch man de BGO umtüddeln schall, dat dor noch oordlich veel Licht rutkomm deit. 'N anner Sach is, wo und weveel Photodioden op 'n BGO Stücken to bakken hebben, dat se nich to veel Gedröons moken. Dat de BGOs von Licht schietich warrn, weet wi all schon lang, aver wi wulln dat noch penibler weeten. So is dann noch een Versöök dormit makt warrn un ik heff kiekt wo süch de BGO verhalen. So 'n schwattes BGO-Stücken is för de LAT 'n goodes Mallöör. Man muß jümmers nokieken, wi dull dat mit 'n Schiet in de Stücken so is. Nokieken könt wi dat mit lütt Deels de ut 'n Kosmos rünnerkomm und ok mol in'n BGO rinknallt. Een Versöök dormit heff ik över 'n lang Tiet macht. Ik wull weeten wo genau dat mit den Schiet in Griff to kregen is.

Abstract

INHALT

1.0	EINLEITUNG	1
1.1	Inhaltsübersicht	6
2.0	BGO - SCHAUERZÄHLER UND IHRE AUSLESE MIT PHOTODIODEN	7
2.1	Arbeitsprinzip und Materialkonstanten eines Schauerzählers	7
2.2	Eigenschaften von BGO	9
2.2.1	Vergleich mit NaJ(Tl)	9
2.2.2	Optische- und Fluoreszenzeigenschaften	10
2.3	Die Photodiode	11
2.3.1	Aufbau von Photodioden	11
2.3.2	Funktion einer Photodiode	12
2.3.3	Vergleich zwischen Photodiode und Photomultiplier	14
2.4	Anwendung von Photodioden in der Hochenergiephysik	15
2.4.1	Die Ausleseelektronik	15
2.4.2	Rauschen von Photodiode und Vorverstärker	17
2.4.3	Halbleiterzählereffekt von Photodioden	19
2.4.4	Die Auslese von BGO mit Photodioden	19
2.4.5	Zur Energieauflösung	20
3.0	VERPACKUNGSTEST	22
3.1	Einleitung	22
3.2	Reflexionseigenschaften von BGO-Verpackungen	23
3.2.1	Material	23
3.2.2	Versuchsaufbau und Durchführung	24
3.2.3	Ergebnisse	26
3.2.4	Diskussion der Ergebnisse	27
3.3	Übersprechttest	29
3.3.1	Material	29
3.3.2	Versuchsaufbau und Durchführung	29
3.3.3	Ergebnis	31
3.3.4	Diskussion	31
3.4	Zusammenfassung	32
4.0	ÜBERDECKUNGSTEST	33
4.1	Einleitung	33
4.2	Überdeckungstest an einem hexagonalen BGO-Kristall	33
4.2.1	Material	33
4.2.2	Versuchsaufbau und Durchführung	34
4.2.3	Ergebnisse	35
4.2.4	Diskussion	36
4.3	Überdeckungstest an einem langen dünnem BGO-Kristall	36
4.3.1	Material	37
4.3.2	Versuchsaufbau und Durchführung	37
4.3.3	Ergebnisse	37

4.3.4	Diskussion	38
4.4	Zusammenfassung	38
5.0	STRAHLENRESISTENZ VON BGO	40
5.1	Einleitung	40
5.2	Kurzzeitbestrahlung verschiedener BGO-Kristalle	41
5.2.1	Material	41
5.2.2	Versuchsaufbau und Durchführung	42
5.2.3	Ergebnisse	46
5.2.4	Diskussion	48
5.3	Langzeitbestrahlung eines BGO-Kristalls bei PETRA	52
5.3.1	Material, Versuchsaufbau und Durchführung	52
5.3.2	Strahlendosis und Energiespektrum	55
5.3.3	Ergebnisse	57
5.3.4	Diskussion	59
5.4	Zusammenfassung	59
5.5	Lichtschädigung von BGO	60
5.5.1	Einleitung	60
5.5.2	Versuchsbeschreibung	60
5.5.3	Ergebnisse	61
5.5.4	Diskussion	61
6.0	EICHMÖGLICHKEIT EINES BGO DETEKTORS	64
6.1	Einleitung	64
6.2	Eichung mit einem γ -Präparat	64
6.2.1	Material	65
6.2.2	Versuchsaufbau und Durchführung	65
6.2.3	Ergebnisse	66
6.2.4	Diskussion	67
6.3	Eichung durch minimalionisierende Teilchen	68
6.3.1	Material	68
6.3.2	Versuchsaufbau und Durchführung	69
6.3.3	Ergebnisse	70
6.3.4	Diskussion	72
6.4	Zusammenfassung	75
7.0	KONSTANZTEST	77
7.1	Einleitung	77
7.2	Material, Versuchsaufbau und Durchführung	77
7.3	Ergebnisse und Diskussion	78
8.0	ZUSAMMENFASSUNG	80
ANHANG 1		82
ANHANG 2		87

FIRMEN, LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	92
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	94
VERZEICHNIS DER TABELLEN	96
NACHWORT	97

1.0 EINLEITUNG

In den Experimenten der Hochenergiephysik an e^+e^- Speicherringen stehen zwei Typen von Reaktionen im Vordergrund des Interesses:

1) Anihilationsprozesse von Typ:

$$e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow X$$

wobei γ^* ein virtuelles Photon und X ein Lepton- und/oder Hadronsystem ist.

2) Zwei-Photon-Prozesse vom Typ:

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-X$$

Dabei streuen ein Positron und ein Elektron unter kleinen Winkeln aneinander und strahlen je ein virtuelles Photon ab. Wechselwirken diese Photonen, können Lepton- und/oder Hadronsysteme erzeugt werden (vergl. Abbildung 1)

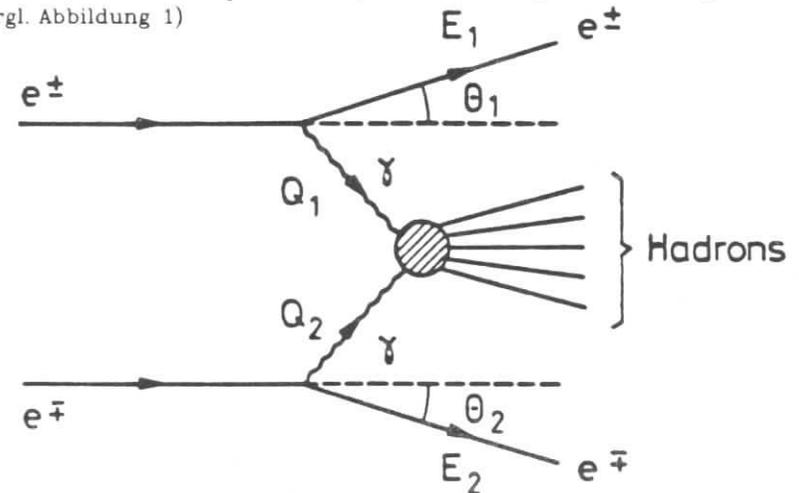


Abbildung 1. Feynmangraph eines Zwei-Photon-Prozesses

Das Interesse an Zwei-Photon-Prozessen nimmt ständig zu. Dabei sind einige Punkte zu beachten:

- Die Rate der Zwei-Photon-Prozesse nimmt mit der Energie (E) der e^+e^- Strahlen logarithmisch zu, während die Rate der Anihilationsprozesse mit $1/E^2$ abnimmt.
- Der Nachweis eines oder beider gestreuter Elektronen (Taggen) hilft die Nachweisrate von Zwei-Photon-Prozessen zu erhöhen.

- Bei Untersuchungen von Zwei-Photon-Prozessen ist eine Bestimmung des Impulsübertrags q^2 wichtig. Man erhält ihn aus einer genauen Messung der Energien und des Winkels θ der gestreuten Elektronen und Positronen.

$$-q^2 = 2m^2 - 2EE' + 2EE' \cos \theta$$

E=Energie des einlaufenden, E'=Energie des auslaufenden Teilchens;
m=Elektronmasse.

Für $\theta \gg m/E$ (LAT-Bereich) wird: $q^2 \approx EE' \cos \theta$.

- Bei einigen Prozessen mit Endzustand 2γ

$$\text{z.B. } e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta_c \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$$

läßt sich die invariante Masse des $\gamma\gamma$ -Systems mit einem guten elektromagnetischen Kalorimeter bestimmen. Da solche Ereignisse einen starken Lorentz-boost in Vorwärts- (Rückwärts-) Richtung haben können, ist es wünschenswert, bis herunter zu sehr kleinen Winkeln ein Kalorimeter mit sehr guter Energie- und Ortsauflösung zu haben.

Um eine verbesserte Untersuchung von Zwei-Photon-Prozessen zu ermöglichen, soll am CELLO Detektor (PETRA Speicherring; Hamburg) ein Tagging System aus einem SAT (Small Angle Tagger) und einem geplanten LAT (Large Angle Tagger) eingesetzt werden. (siehe [CEL 83] und Abbildung 2 auf Seite 4 und Abbildung 3 auf Seite 5)

Der LAT deckt einen Winkelbereich von 50-110 mrad ab. Er wird sich direkt am Strahlrohr, ca. 1.50m vom Wechselwirkungspunkt entfernt befinden. An dieser Position müssen einige Randbedingungen beachtet werden:

- In einem engen Raum von 10 cm Höhe und 45 cm Länge sollte ein möglichst fein segmentiertes elektromagnetisches Kalorimeter guter Orts- und Energieauflösung untergebracht werden.
- Die q^2 -Auflösung des Zählers soll mindestens so gut sein, wie in den benachbarten Flüssig-Argon-Endcapschauerzählern ($\sigma(q^2)/q^2 \approx 6\%$).
- Starke Streufelder von der supraleitenden Magnetspule des Detektors erschweren eine Photomultiplierauslese.
- Es ist mit einer Stahlenbelastung des LAT-Materials von 10^2 - 10^3 rad/Monat zu rechnen.

- Zur Unterscheidung geladener und ungeladener Teilchen, sowie zur genauen Ortsbestimmung geladener Teilchen sollten sich vor dem Kalorimeter kleine Driftkammern befinden.

Auf die Problematik der Driftkammern wird im folgenden nicht weiter eingegangen. Dies wird in der Arbeit von [SCHÜ 84] nachzulesen sein.

Eine gute Möglichkeit, die oben genannten Randbedingungen zu erfüllen, ist die Verwendung von Wismut-Germaniumoxid ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), kurz BGO genannt. BGO ist ein Schauerzählermaterial mit kurzer Strahlungslänge und einer hohen Szintillationslicht-Ausbeute. Es eignet sich daher zur Auslese mit Photodioden, was den Vorteil eines geringen Platzbedarfs und der Magnetfeldunempfindlichkeit hat.

Über die Energie- und Ortsauflösung einer BGO Testmatrix ist in den Arbeiten von [BIE 84, RIE 84] nachzulesen. Diese Arbeit untersucht weitere Eigenschaften von BGO, die für einen kompletten BGO-Detektor (LAT) wichtig sind:

Zu Beginn dieser Arbeit lagen sehr wenig Erfahrungen mit langen schmalen BGO-Kristallen vor, d.h. mit Kristallen der Größe $1 \times 1 \times 15 \text{ cm}^3$ bzw. $1.5 \times 1.5 \times 20 \text{ cm}^3$. Insbesondere das Verhalten von BGO-Kristallen in der Strahlung am Strahlrohr eines Speicherringes und die Langzeitkonstanz von BGO Signalen waren bis dahin noch nicht untersucht worden. Für die Zwecke des geplanten Schauerzählers stellte sich außerdem die Aufgabe, die Lichtausbeute durch Anwendung geeigneter Reflektorfolien zu optimieren und die Eichmöglichkeiten eines kompletten BGO-Detektors zu untersuchen.

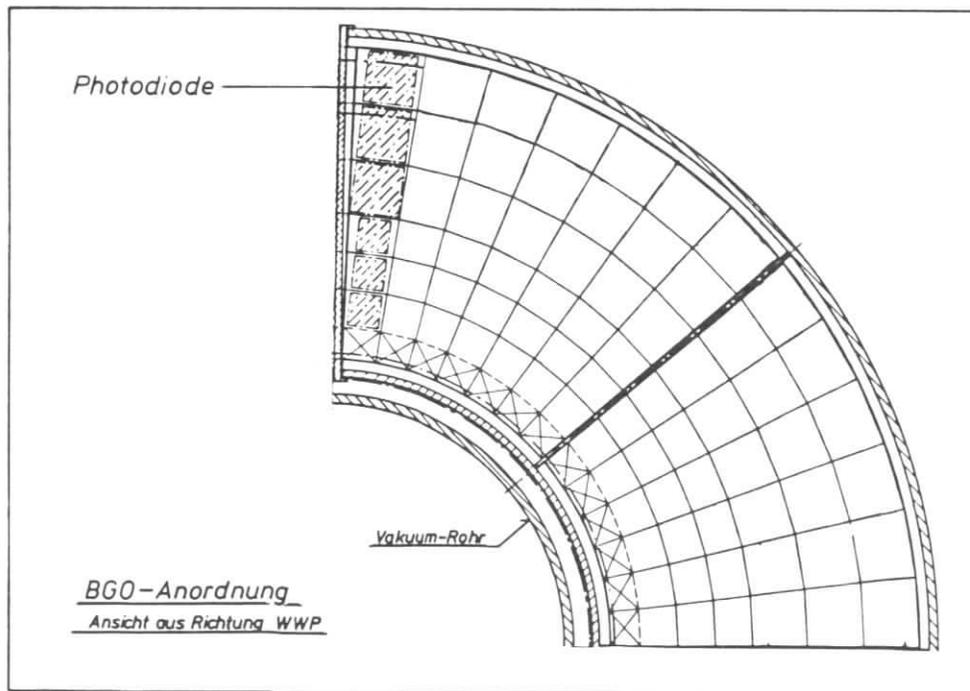
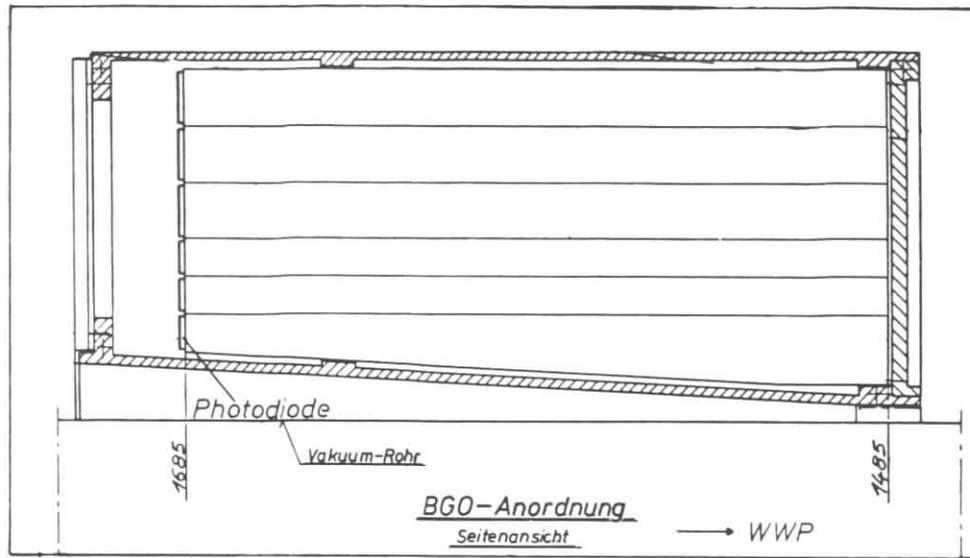


Abbildung 2. Ansicht der BGO-Kristalle im LAT

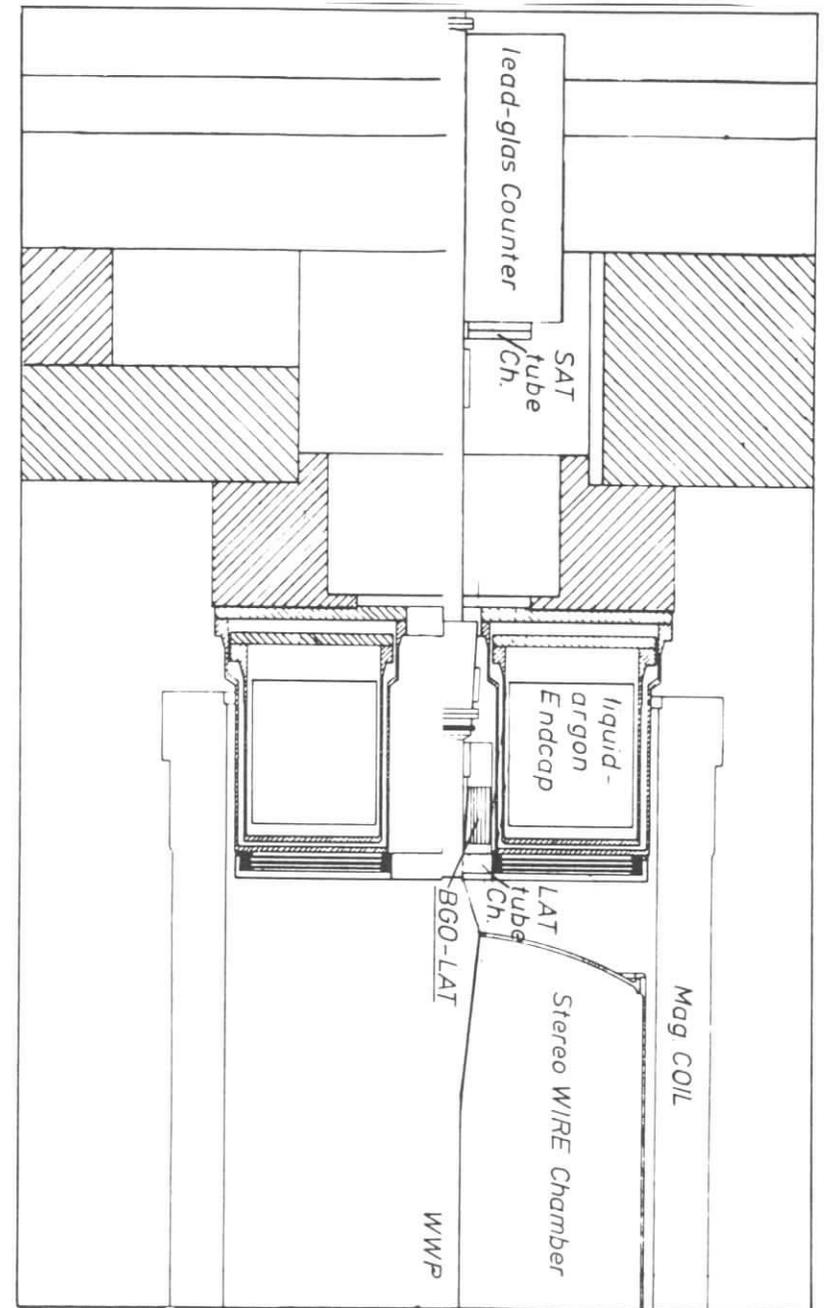


Abbildung 3. Ansicht des CELLO-Vorwärts-Bereichs

1.1 INHALTSÜBERSICHT

Der erste Teil dieser Arbeit befaßt sich mit dem Material BGO für die Anwendung in der Hochenergiephysik, sowie der Funktion von Photodioden und der Auslese von BGO-Kristallen mit Photodioden. Der folgende experimentelle Teil setzt sich aus fünf Untersuchungen zusammen, wobei die Experimente in Hinblick auf den geplanten LAT ausgewertet werden:

- Test einer Optimierung der Lichtausbeute durch eine möglichst gut reflektierende und gleichzeitig dünne Verpackung der einzelnen BGO-Kristalle.
- Optimierung des Signal-zu-Rausch Verhältnisses durch eine angepaßte Überdeckung der Kristall-Auslesefläche mit Photodioden.
- Strahlenresistenz von BGO.
- Untersuchungen über eine ständige Eichmöglichkeit eines BGO-Detektors mit Photodiodenauslese.
- Untersuchungen der Langzeitkonstanz des Systems BGO + Photodiode.

Im letzten Teil der Arbeit werden die Ergebnisse der Experimente zusammengefaßt. Im Anhang 1 werden einige vergleichende Messungen an einem CsJ(Tl)-Kristall beschrieben. Im Anhang 2 werden die für diese Untersuchung verwendeten Verstärker zur Photodioden-Auslese vorgestellt, sowie deren Eichung über einen Testpuls beschrieben.

2.0 BGO - SCHAUERZÄHLER UND IHRE AUSLESE MIT PHOTODIODEN

2.1 ARBEITSPRINZIP UND MATERIALKONSTANTEN EINES SCHAUERZÄHLERS

Bevor auf die Eigenschaften von BGO als Schauerzähler eingegangen wird, seien hier kurz das Arbeitsprinzip eines Schauerzählers umrissen und die wichtigsten Materialkonstanten erläutert.

Die Energie von hochenergetischen Elektronen (Positronen) und Photonen kann mit einem Schauerzähler (Kalorimeter) gemessen werden: Das einfallende Elektron¹ wird in einem Kernfeld abgelenkt. Dabei verliert es Energie in Form von Bremsstrahlung. Ist die Bremsstrahlung energiereich genug ($E_B \geq 2m_0c^2$), so können aus ihr durch einen Paarbildungseffekt ein Elektron und ein Positron entstehen. Diese können wiederum Bremsstrahlung aussenden, so daß es durch die abwechselnde Folge dieser Prozesse zu einer Vielzahl von Teilchen (Schauer) kommt. Innerhalb eines Schauers verlieren die Teilchen ihre Energie hauptsächlich durch Strahlenverluste, sowie durch Ionisation und Anregung der Atome des Materials. Haben die Schauerteilchen nicht mehr genügend Energie, um durch Bremsstrahlung neue Teilchen zu produzieren, überwiegt der Energieverlust durch Ionisation und Anregung. Der Schauer stirbt dann aus.

In einigen Materialien geben die angeregten Atome Energie in Form von Photonen wieder ab. Diesen Prozess nennt man Szintillation. Die Intensität des Szintillationslichtes ist direkt proportional zur Anzahl der erzeugten Sekundärteilchen und zur Energie des eingefallenen Teilchens. Somit ist durch eine Intensitätsmessung des Szintillationslichtes eine Messung der Energie von Elektronen, Positronen und Photonen möglich.

Die Messung wird umso genauer, je mehr Schauerteilchen im Zähler bleiben. Die räumliche Ausdehnung des Schauers hängt von der Kernladungszahl Z und der Dichte des Schauerzählers ab.

Die longitudinale Ausdehnung des Schauers wird dabei von der Strahlungslänge X_0 bestimmt. Sie gibt an, nach welcher mittleren Weglänge die Anfangsenergie des Elektrons auf den e -ten Teil abgesunken ist:

$$X_0^{-1} = 4 N \alpha Z^2 r_0^2 \ln(183 Z^{1/3})$$

mit N =Elektronendichte des Zählers,

α =Feinstrukturkonstante,

r_0 =klassischer Elektronenradius.

¹ Die Betrachtung gilt für Elektronen und Positronen. Photonen reagieren zuerst mit Paarbildung, ansonsten analog.

Die Breite eines Schauers gibt der Moliere-Radius r_m an. Innerhalb von r_m liegen 90% der Schauerteilchen.

$$r_m = (21 \text{ MeV}/E_k) X_0$$

mit E_k = kritische Energie.

E_k ist eine weitere wichtige Materialkonstante. Haben Schauerteilchen eine höhere Energie als E_k , geben sie ihre Energie hauptsächlich durch Strahlenverluste ab, darunter durch Anregung und Ionisation. Das bedeutet, daß unterhalb von E_k keine Vervielfachungsprozesse stattfinden, ein Schauer entwickelt sich nicht mehr weiter, er stirbt aus.

$$E_k = (dE/dx_{\min}) X_0$$

Da minimalionisierende Teilchen (z.B. kosmische Müonen) im Schauerszähler ausschließlich ihre Energie durch Ionisation und Anregung abgeben, gibt die kritische Energie auch den Energieverlust minimalionisierender Teilchen innerhalb einer Strahlungslänge an. Daraus läßt sich der Energieverlust pro cm (spezifischer Energieverlust) für minimalionisierende Teilchen (dE/dx_{\min}) berechnen.

Die Vorteile eines solchen Kalorimeters sind:

- Die Anzahl der Teilchen in einem Schauer wächst proportional zur Energie des einfallenden Teilchens. Damit wird, wegen statistischer Schwankungen der Teilchenzahl, mit höheren Energien eine immer genauere Energieauflösung möglich.
- Die für eine vollständige Absorption aller Schauerteilchen notwendige Größe des Kalorimeters braucht nur proportional $\ln E$ zu wachsen.
- Ein Schauerszähler reagiert auf geladene und neutrale Teilchen (Elektronen und Photonen).
- Bei bekannter Schauerverteilung läßt sich mit einem fein segmentierten Kalorimeter eine gute Ortsauflösung erreichen.
- Durch das unterschiedliche Verhalten von Leptonen und Hadronen ist eine Teilchenidentifizierung möglich.
- Schauerszähler reagieren schnell. Damit wird eine hohe Nachweisrate möglich.

2.2 EIGENSCHAFTEN VON BGO

2.2.1 Vergleich mit NaJ(Tl)

Einen Vergleich von BGO mit dem Schauermaterial NaJ(Tl) zeigt Tab.1.

Eigenschaften	BGO	NaJ
kalorimetrische Eigenschaften		
Strahlungslänge X_0	1.12 cm	2.56 cm
Molière-Radius	2.24 cm	4.4 cm
Kritische Energie E_k	10.5 MeV	12.5 MeV
$dE/dx(\min)$	9.2 MeV/cm	4.8 MeV/cm
hadronische Absorptionsl. Λ	23 cm	41 cm
optische Eigenschaften		
Brechungsindex n	2.13	1.85
Emission λ_{\max}	480 nm	420 nm
Abklingzeit	300-350 ns	230-250 ns
Anstiegszeit	20 ns	50 ns
Lichtausbeute mit Photomultiplier	≈ 10 %	100 %
Temperaturgradient der Lichtausbeute	≈ -1.2 %/°C	-0.6%/°C
allgemeine Eigenschaften		
Dichte ρ	7.13 g/cm ³	3.67 g/cm ³
Härte	5 MOHS	2 MOHS
mechanische Stabilität	wie Glas	spröde
chemische Stabilität	gut	hygroskop.
Strahlenresistenz	vergl. Kap 5.0	schlecht

Tab.1 Vergleich von BGO und NaJ

Wesentliche Vorteile hat BGO in seinen kalorimetrischen Eigenschaften. Durch die um den Faktor 2.3 geringere Strahlungslänge läßt sich ein sehr kompaktes Kalorimeter bauen.

Durch die geringe Hadronische Absorptionslänge Λ eignet sich BGO auch als gutes Hadron-Kalorimeter. Das günstige Verhältniss von X_0/Λ läßt eine gute Hadron - Elektron Trennung in einem gegliederten BGO-Kalorimeter zu.

In den optischen Merkmalen hat BGO den Nachteil einer ca. 10-fach geringeren Lichtausbeute. Sie ist allerdings hoch genug, um BGO-Kristalle mit Photodioden auslesen zu können. Bei der Auslese mit Photodioden wird dieser Nachteil zum Teil dadurch wieder ausgeglichen, daß die Emissionslinie λ_{max} vom BGO-Szintillationslicht der Wellenlängenempfindlichkeit einer Photodiode besser angepaßt ist (vergl. Abbildung 9 auf Seite 20).

In den mechanischen und chemischen Eigenschaften erlangt BGO weitere Vorteile. Es ist mechanisch wie Glas zu bearbeiten und chemisch sehr stabil. Dementsprechend ist es einfach zu handhaben.

2.2.2 Optische- und Fluoreszenzeigenschaften

Experimente zur Untersuchung der optischen- und Fluoreszenzeigenschaften von BGO wurden erstmals von [WEB 73] durchgeführt. Die Fluoreszenz wurde bestimmt als ein $^3p_1 \rightarrow ^1s_0$ Übergang des Bi^{+++} Ions. Die große Stokes'sche Verschiebung zwischen der Anregungslinie (≈ 290 nm) und Emissionslinie (≈ 480 nm) macht BGO nahezu transparent für sein eigenes Szintillationslicht (vergl. Abbildung 4 auf Seite 11).

Der hohe Brechungsindex von BGO ($n = 2.13$) erleichtert den Lichttransport durch den Kristall. Er erschwert allerdings die Auskopplung des Lichtes auf einen Photomultiplier oder eine Photodiode, weil deren Fenster einen kleineren Brechungsindex ($n \approx 1.4$) haben. Um die Lichtauskopplung zu erleichtern, wurden die im "Experimentellen Teil" ab Seite 21 beschriebenen Messungen ausschließlich mit einem optischen Kontaktfett (oder Kleber) mit hohem Brechungsindex ($n \approx 1.4$) zwischen BGO und Ausleseinstrument durchgeführt.

[WEB 73] beobachteten eine Abhängigkeit der Szintillationslichtintensität von der Temperatur. Unterhalb von 200 K ist die Lichtausbeute temperaturunabhängig. Hier erfolgt die Relaxation der angeregten Atomzustände hauptsächlich durch Luminiszenz. Oberhalb von 200 K fällt die Intensität mit der Erhöhung der Temperatur. Es treten dann andere Relaxationsmechanismen in den Vordergrund [MAR 83]:

- Energietransport durch Ion-Ion-Wechselwirkung

- Multiphononprozesse

Durch diese Temperaturabhängigkeit (im Bereich $10^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}$ ungefähr -1.2% / $^\circ\text{C}$) ist eine ständige Temperaturkontrolle der BGO-Kristalle erforderlich.

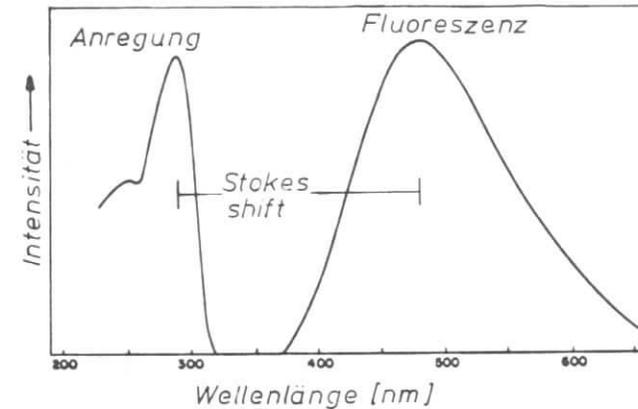


Abbildung 4. Anregungs- und Emissionsspektrum von BGO

2.3 DIE PHOTODIODE

Seit einigen Jahren existieren großflächige Photodioden von einigen cm^2 Fläche mit hoher Empfindlichkeit². Für die Zwecke der Hochenergiephysik ist für einige Experimente geplant, rauscharme Photodioden als Ersatz für Photomultiplier zum Lichtnachweis in Szintillationskristallen zu verwenden.

2.3.1 Aufbau von Photodioden

Die von uns verwendeten Photodioden sind sogenannte Si-PIN-Photodioden. Sie bestehen im Wesentlichen aus Silizium, wobei durch verschiedene Dotierungen ein p-n-Übergang geschaffen wird.

Das Silizium fungiert als Trägermaterial (Substrat) und ist mit einer geringen n-Dotierung versehen. Auf der unteren, lichtabgewandten Seite der Photodiode ist das Silizium zusätzlich mit Bor (p-leitend) dotiert, um

² Empfindlichkeit = Diodenstrom/eingestrahlte Leistung

einen möglichst guten Ohm'schen Kontakt mit dem dort angebrachten metallischen Kontakt zu erzielen (in Abbildung 5 auf Seite 12 mit N⁺ bezeichnet).

Auf der oberen, lichtzugewandten Seite wird eine hochdotierte dünne p-leitende Schicht erzeugt. Sie ist zum Schutz der Photodiode und zur Reduktion von Dunkelströmen mit einer dünnen SiO₂ Schicht bedeckt.

An dem p-n-Übergang entsteht eine sogenannte Verarmungsschicht. Die dort vorhandenen freien Ladungsträger rekombinieren, und es bildet sich eine Zone ohne freie Ladungsträger (Verarmungsschicht). Zurück bleiben ortsfeste Ionenrümpfe.

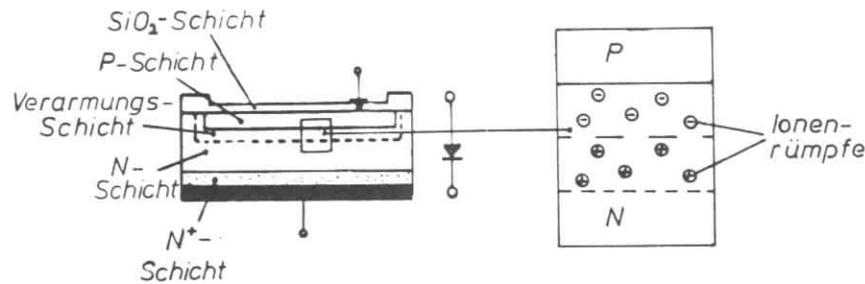


Abbildung 5. Aufbau einer Photodiode

2.3.2 Funktion einer Photodiode

In der Verarmungsschicht herrscht durch die unterschiedlich geladenen p- und n-Schichten ein elektrisches Feld E. Fällt Licht auf die Photodiode, so erzeugt es im Silizium Elektron-Loch-Paare. Außerhalb der Verarmungsschicht rekombinieren diese sofort wieder³, innerhalb der Verarmungsschicht trennen sich Elektron und Loch auf Grund des elektrischen Feldes und driften zur n-Schicht (Elektronen) bzw. p-Schicht (Löcher). Dort erscheinen sie als überschüssige Ladungen, die an metallischen Kontakten abgegriffen werden können.

³ Daher sollte die p-Schicht möglichst dünn sein (0.2-0.5 μm)

Durch Anlegen einer in Sperrichtung wirkenden Vorspannung (Bias) werden die freien Ladungen weiter in die p- bzw. n-Schicht gezogen. Die Dicke der Verarmungsschicht vergrößert sich auf 100-200 μm. Von einer vollständig verarmten Photodiode spricht man, wenn die Verarmungsschicht die N⁺-Schicht erreicht.

Dies hat drei wesentliche Vorteile:

1. Der empfindliche Raum der Photodiode wird vergrößert, das heißt, sie besitzt einen höheren Wirkungsgrad.
2. Die Ansprechzeit der Photodiode ist kürzer: Die Driftgeschwindigkeit der erzeugten Ladungen hängt von der Stärke des elektrischen Feldes in der Verarmungsschicht ab. Eine Vorspannung erhöht das elektrische Feld, wodurch die Ladungen stärker beschleunigt werden. Dadurch werden die Driftzeiten kürzer (kürzere Ansprechzeit) und die Wahrscheinlichkeit einer Rekombination wird vermindert (höherer Wirkungsgrad).
3. Die Kapazität⁴ der Photodiode wird verkleinert. Dadurch vermindert sich das Rauschen des Vorverstärker-Photodioden-Systems.

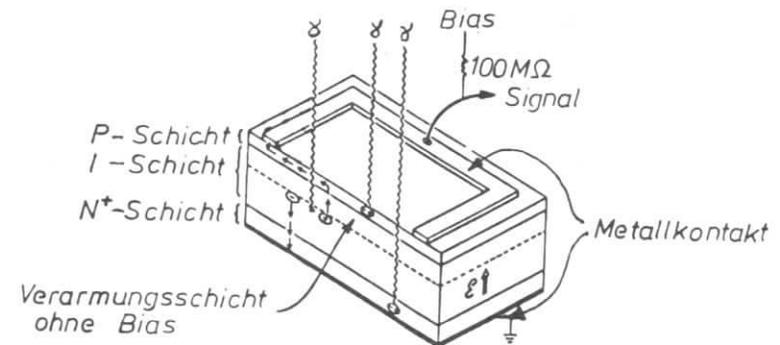


Abbildung 6. Funktion einer völlig verarmten Photodiode (Aus [GRA 84]). I=Intrinsic-Zone, sie besteht aus hochohmigem Silizium. Damit wird das Anlegen höherer Vorspannungen möglich.

Mit der Erhöhung der Vorspannung erhöhen sich allerdings auch die Dunkelströme in der Diode, was wiederum zu einer Erhöhung des

⁴ Kapazität ∝ Diodenfläche/Dicke der Verarmungsschicht

Rauschens führt. Auf diese Tatsache wird im Kap.: "Rauschen von Photodiode und Vorverstärker" auf Seite 17 eingegangen.

2.3.3 Vergleich zwischen Photodiode und Photomultiplier

Tabelle 2 zeigt einen Vergleich zwischen Photodiode und Photomultiplier.

Eigenschaften	Photodiode	Photomultiplier
Quantenausbeute bei 480 nm	60 - 70 %	10 - 15 %
Signalanstiegszeit	15 ns - 3µs	2 - 50 ns
dynamischer Bereich	10 ⁸	10 ⁴
Rauschäquivalent ⁵	0.3 - 3 MeV	20 - 50 keV
Anzahl Photoelektronen für durchgehende geladene Teilchen	≈100/µm	≈10
Nachverstärkung	mit Verstärker hoher Güte	nicht notwendig
Empfindliche Fläche	< 3cm ²	Max 12'' ∅
Bauhöhe	< 1 cm	> 6 cm
Magnetfeldabhängigkeit	nein	ja
Stabile Hochspannung erforderlich	nein	ja
Handhabung	einfach	Lichtschäden

Tab.2 Vergleich zwischen Photomultiplier und Photodiode

⁵ Bei Photodiode mit nachgeschaltetem Verstärker.

Die wichtigsten Vorteile der Photodiode sind:

- Ihre geringe Größe
- Sie ist im Magnetfeld zu betreiben
- Sie besitzt einen großen dynamischen Bereich
- Ihre Handhabung ist denkbar einfach

Dafür müssen allerdings auch einige Nachteile gegenüber dem Photomultiplier hingenommen werden:

- Photodioden sind langsamer als Photomultiplier. Die von uns verwendeten Photodioden haben eine Anstiegszeit von 15 nsec, was für Speicherringexperimente völlig ausreichend ist. (Bunch crossing Zeit: 3µsec bei PETRA). Wichtiger ist
- das hohe Rauschen der Photodioden und des dazu notwendigen ladungsintegrierenden Verstärkers. Es können dadurch kleine Lichtsignale (Teilchen geringer Energie) im Rauschen untergehen. Ein weiterer Nachteil ist
- die hohe Anzahl von Photoelektronen für durch die Photodiode gehende Teilchen (Halbleiterzählereffekt). Dies Problem wird im Kap.: "Halbleiterzählereffekt von Photodioden" auf Seite 19 näher behandelt. Zum Abschluß des Vergleiches sei noch bemerkt, daß [DRI 83] die Linearität von Photodioden bei Energien zwischen 70 MeV bis 80 GeV bestätigt fanden⁶.

2.4 ANWENDUNG VON PHOTODIODEN IN DER HOCHENERGIEPHYSIK

Photodioden können in Hochenergieexperimenten an ausgezeichneten Stellen Photomultiplier ersetzen. Vor allem bieten sie sich für eine Auslese lichtstarker Szintillationskristalle wie z.B. NaJ(Tl), BGO oder CsJ(Tl) an. Sie sind dabei den Photomultipliern mindestens ebenbürtig. Es sind jedoch einige Probleme zu lösen, die im folgenden beschrieben werden.

2.4.1 Die Ausleseelektronik

Die Elektronik zur Auslese von Photodioden hat den gleichen Aufbau wie Schaltungen, die zur Auslese von Flüssig-Argon-Zählern oder Halbleiterzählern verwendet werden. Abbildung 7 auf Seite 16 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

⁶ Die Photodiode war auf einem NaJ(Tl) Kristall befestigt, der mit Elektronen bis zu 80 GeV und kosmischer Strahlung beschossen wurde.

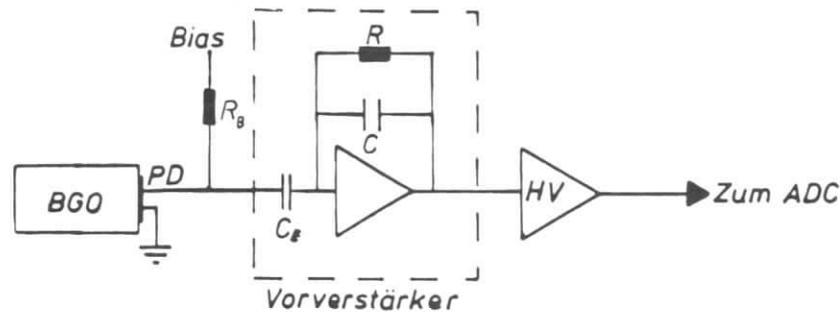


Abbildung 7. Elektronik zur Auslese von Photodioden

Drei Bereiche der Signalübermittlung sind zu erkennen:

1. Szintillator + Photodiode:
Das im Szintillator entstandene Licht gelangt zur Photodiode. An ihr liegt über einen Schutzwiderstand (R_B) eine Sperrspannung (Bias) an.
2. Der Vorverstärker (VV):
Die in der Photodiode erzeugten Ladungen gelangen auf einen ladungsintegrierenden Vorverstärker. Dieser hat zwei grundsätzliche Forderungen zu erfüllen:
 - Geringes Eigenrauschen
 - Auch für Frequenzen bis zu einigen kHz (Ereignisrate in Speicherringen) muß der Verstärker ein mit der Beleuchtungsstärke der Photodiode proportionales (lineares oder logarithmisches) Verhalten zeigen.

Die von uns verwendeten linearen Verstärker sind gegengekoppelte Verstärker mit FET - Eingang und erfüllten die oben genannten Anforderungen. Nähere Untersuchungen solcher Verstärker sind in der Arbeit von [STR 84] nachzulesen.

3. Der pulsformende Hauptverstärker (HV):
Das von dem Vorverstärker ausgegebene Signal (schneller Anstieg und über einige μsec abfallend) gelangt auf einen pulsformenden

Verstärker. Dieser formt das Vorverstärkersignal um zu einem gaußförmigen Puls, der von einem pulshöhenempfindlichen ADC analysiert werden kann. Die Pulshöhe ist dabei proportional zu der von der Photodiode empfangenen Lichtmenge.

Mit einer langen Zeitkonstante (shaping time) des Hauptverstärkers erreicht man einen guten Filtereffekt für kurzweiliges Rauschen. Durch die vorgegebene Bunch-crossing Rate in Speicherringen ist die Größe der Zeitkonstante begrenzt. Das Signal des Verstärkers sollte, um Überlagerungen zu vermeiden, nach $3 \mu\text{sec}$ (bunch crossing Zeit bei PETRA) vollständig abgeklungen sein. Die in dieser Arbeit beschriebenen Experimente wurden daher ausschließlich mit einer Zeitkonstante von $1 \mu\text{sec}$ durchgeführt.

2.4.2 Rauschen von Photodiode und Vorverstärker

Bei der Photodiodenauslese von Szintillationszählern begrenzt das Rauschen der elektronischen Bauteile das minimal nachweisbare Signal (Energie).

Es wird hier kurz auf die Ursachen des Rauschens eingegangen. Nähere Untersuchungen dazu sind in der Arbeit von [STR 84] nachzulesen.

Der hauptsächliche Anteil des Rauschens entsteht vor der eigentlichen Verstärkung des Signals, alle nachfolgenden Beiträge sind auf Grund der ersten sehr hohen Verstärkung zu vernachlässigen. Es kommen somit nur die Rauschbeiträge vor und in dem FET zur Geltung:

1. Thermisches Rauschen in einem Widerstand, wobei die Photodiode mit einem inneren Widerstand R_{PD} und der FET mit einem Eingangswiderstand R_i beitragen.
2. Leckströme I_L von Photodiode und FET führen zu einem Strom- oder Schrotrauschen, da dieser Strom statistischen Schwankungen unterworfen ist.
3. Serienrauschen an einem Kondensator, wenn seriell ein Widerstand anliegt. Die Kapazität ist in diesem Fall die Summe der Kapazitäten von Photodiode (Sperrschichtdicke) und FET ($C = C_{PD} + C_{FET}$), die Diode liefert einen Serienwiderstand (R_S).
4. Frequenzabhängiges Rauschen A_r/f : Das Rauschen wird durch langsam ablaufende Rekombinationsprozesse in Halbleitergrenzschichten verursacht. Im Speicherringbetrieb ist dieses Rauschen wegen der hohen Ereignisrate von einigen kHz zu vernachlässigen.

Das Rauschen läßt sich dann allgemein ausdrücken als:

$$\text{Rauschstrom}^2 = R_g C^2 / \tau + \tau (2kT / R_p + e I_L)$$

τ ist die Zeitkonstante des Verstärkers,

k = Boltzmannkonstante

T = Temperatur,

$$R_p = R_1 R_{PD} / (R_1 + R_{PD})$$

Zwei Kompromisse sind bei der Minimierung des Rauschens einzugehen:

1. Es treten jeweils eine τ und eine $1/\tau$ Abhängigkeit auf. Die Wahl der Zeitkonstante ist allerdings durch die Ereignisrate in Speicherringen begrenzt.
2. Durch eine Erhöhung der Sperrspannung erniedrigt sich die Kapazität der Photodiode und das Rauschen wird geringer. Gleichzeitig erhöht sich der Leckstrom, was zu einer Verstärkung des Rauschens führt. Dies zeigt Abbildung 8

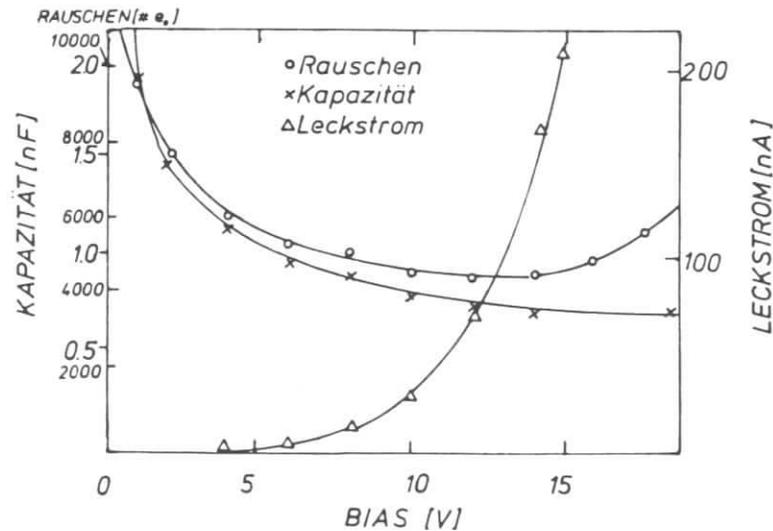


Abbildung 8. Kapazität, Dunkelstrom und Rauschen einer Photodiode in Abhängigkeit der Sperrspannung (aus [LOR 82])

Bei den für diese Arbeit verwendeten Photodioden ergab sich ein Optimum bei einer Sperrspannung von 12 V.

2.4.3 Halbleiterzählereffekt von Photodioden

In einem Schauerzähler endlicher Strahlungslänge treten Leckeffekte auf. Es werden bei hohen Energien der nachzuweisenden Teilchen immer einige Schauerteilchen hinten aus dem Zähler austreten und das Ausleseinstrument durchqueren. Bei einer Photodiode müssen daher Halbleiterzählereffekte berücksichtigt werden, da sie ein Szintillationslichtsignal vortäuschen können.

Der Effekt tritt innerhalb der Photodiode in der Verarmungsschicht auf. Der Energieverlust $(dE/dx)_{\min}$ ist im Silizium = 3.74 MeV/cm. Bei einer notwendigen mittleren Energie von 3.6 eV zur Erzeugung eines Elektron - Loch - Paares führt dies zu etwa 100 $e_0/\mu\text{m}$ Verarmungsschichtdicke. Bei einer Verarmungsschichtdicke von ca. 100 μm erhält man ein Signal von ca. 10000 e_0 .

Bei der Auslese von langen turmförmigen BGO-Kristallen (LAT Geometrie) mit Photodioden entspricht dieses Signal einem "echten" Signal von ca. 15 MeV im Kristall deponierter Energie. Der Halbleiterzählereffekt ist daher bei der Auslese lichtstarker Szintillationskristalle mit genügend vielen Strahlungslängen ($\approx 20 X_0$) zu vernachlässigen.

2.4.4 Die Auslese von BGO mit Photodioden

In der Hochenergiephysik werden Szintillatormaterialien zur Energiemessung verwendet. Sie wurden bisher mit Photomultipliern ausgelesen. Das Streben nach besserer Energieauflösung verlangte nach lichtstärkeren Materialien (NaJ, BGO). Zur Lösung der bekannten Probleme bei einer Auslese dieser Zähler mit Photomultipliern wurden die Photodioden für die Hochenergiephysik entdeckt. Nun bietet die Kombination aus dem kompakten Schauerzählermaterial BGO mit einer Photodiodeauslese einige wesentliche Vorteile:

1. Die Größe: BGO ist wegen seiner kurzen Strahlungslänge, verbunden mit der geringen Größe von Photodioden, ideal im Einsatz bei beschränkten Platzverhältnissen.
2. Die Magnetfeldunempfindlichkeit: Ein Zähler aus BGO mit Photodiodeauslese kann innerhalb starker Magnetfelder betrieben werden.
3. Die Lichtausbeute: Sie ist für BGO so groß, daß Energien ab ca. 1 MeV (bei Zimmertemperatur) nachgewiesen werden können.

- Die Handlichkeit: Ein Kalorimeter mit BGO + Photodiode muß nur gegen Licht von außen und gegen elektromagnetische Störungen⁷ abgeschirmt werden.
- Die Wellenlänge: Die spektrale Empfindlichkeit von Si-Photodioden paßt gut zur emittierten Wellenlänge des BGO Szintillationslichtes und liegt in diesem Wellenlängenbereich ca. 5-6 mal höher als die Empfindlichkeit der Bialkali-Kathode eines Photomultipliers (vergl. Abbildung 9)

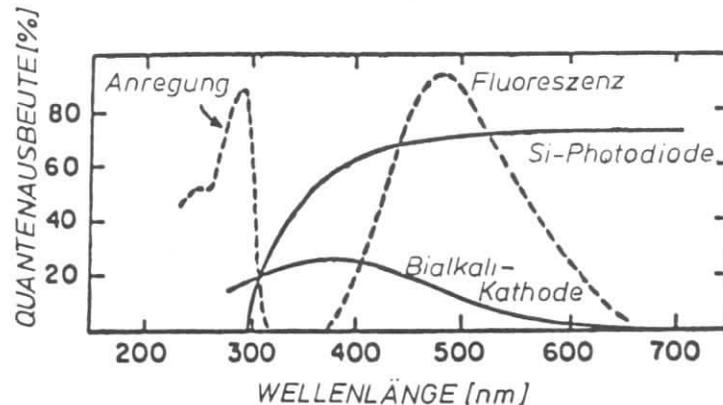


Abbildung 9. Spektrale Empfindlichkeit einer Si-Photodiode und eines Photomultipliers. Gestrichelt ist die Anregungs- und Fluoreszenzlinie von BGO aufgetragen.

Diese Vorteile lassen einen mit Photodioden ausgelesenen BGO Zähler auch in solchen Gebieten zum Einsatz kommen, in denen bisherige Zähler versagen mußten. Beispiele dafür sind, neben dem LAT im CELLO Detektor, die geplanten Detektoren UPSTATE für CESR (Cornell, [UPS 83]) und L3 für LEP (CERN, [LEP L3]).

2.4.5 Zur Energieauflösung

Im folgenden experimentellen Teil dieser Arbeit wird häufig die Energieauflösung von BGO-Kristallen erwähnt. Daher wird kurz darauf eingegangen, welche Eigenschaften von Schauerzähler und Photodiode zur Auflösung beitragen.

⁷ Gegen elektromagnetische Störungen reicht eine geerdete Metallplatte auf der Diodenrückseite.

Allgemein ist die Energieauflösung für homogene Schauerzähler gegeben durch [FAB 82]:

$$\sigma_E/E = A_1^2/\sqrt{E} + A_2^2 \ln E + A_3^2/\sqrt{E} + A_4^2$$

mit den einzelnen Koeffizienten A_i :

A_1 : Innere Auflösung der Kristalle (Schauerfluktuationen, abhängig von Photonenstatistik).

A_2 : Leckfluktuationen des Schauers bei einer endlichen Ausdehnung der Kristalle.

A_3 : Rauschen der Elektronik (Photodiode oder Photomultiplier).

A_4 : Weitere Einflüsse, wie z.B. Interkalibrationsfehler, Konstanz der Ausleselektronik, Halbleiterzählereffekte (quadratisch addiert).

Zu A_1 und A_3 : Diese beiden Faktoren sind bei Energien bis ca. 100 MeV dominant und begrenzen die Energieauflösung. Das Rauschäquivalent der Photodiode bei der Auslese von BGO liegt bei 0.2-1 MeV und überwiegt bei niedrigen Energien.

Zu A_2 und A_4 : Diese Effekte werden bei hohen Energien dominant. Dabei werden die hauptsächlichen Beiträge von Leckeffekten und Interkalibrationsfehlern (bei der Auslese von mehreren Kristallen) geleistet [BIE 84]. Das Lecken nach hinten kann durch eine ausreichende Länge ($\approx 20 X_0$) begrenzt werden. Dabei braucht die Länge des Schauerzählers mit den immer höheren Energien der Experimente nur mit $\ln E$ zu wachsen. Das Seitenlecken kann bei einer Matrix aus turmförmigen Schauerzählern zur Bestimmung des Einschubortes verwendet werden [RIE 84].

Interkalibrationsfehler nehmen mit der Anzahl der ausgelesenen Zähler zu und beschränken bei hohen Energien die Auflösung.

3.0 VERPACKUNGSTEST

In den folgenden Kapiteln 3 - 7 werden die einzelnen Untersuchungen zur Eignung von BGO als Schauerzählermaterial beschrieben⁸. Begonnen wird mit der Untersuchung zur Optimierung der Lichtausbeute durch eine geeignete Verpackung: Es ist notwendig (siehe weiter unten), die eng nebeneinander liegenden-BGO Kristalle im LAT einzeln zu verpacken. Dazu muß die Verpackung einige Randbedingungen erfüllen. Gesucht wurde die Verpackung, die diese Bedingungen am besten erfüllt.

3.1 EINLEITUNG

BGO hat einen sehr hohen Brechungsindex von $n=2.13$. Daher wird der größte Teil des Szintillationslichts total reflektiert und bleibt im Kristall. Nur das Licht, welches unter einem Winkel kleiner 27.8° auf die Oberfläche trifft, verläßt den Kristall. Dieses Licht sollte durch eine gut reflektierende Verpackung wieder in den Kristall zurückgeworfen werden, damit es ebenfalls zur Auslese gelangt. Die so erzeugte höhere Lichtausbeute führt zu einer Verbesserung der Energieauflösung. Damit lassen sich Teilchen noch niedrigerer Energien nachweisen, da mit einer höheren Lichtausbeute das Signal früher aus dem Rauschen austritt.

Eine gute optische Isolierung der Kristalle innerhalb der Schauerzählermatrix des LAT muß gewährleistet sein, da ein Übersprechen des Szintillationslichts von einem Kristall in den anderen eine Schauer- ausbreitung vortäuschen kann. Es sollte daher weniger als 1% des auf die Verpackung fallenden Lichts durch diese hindurch und somit in einen anderen Kristall gelangen.

Eine raue Oberfläche der Verpackung ist nötig, damit bei übereinander gestapelten Kristallen die Verpackung nicht an den Kristallen klebt. Das würde dort die Totalreflexion stören, was zu einem Verlust an Lichtausbeute führen würde.

Die Lücke zwischen zwei Kristallen, bedingt durch die Verpackung, sollte nicht größer als ca. $100 \mu\text{m}$ sein, damit dort nicht zu viele nachzuweisende Teilchen verloren gehen [vergl. RIE 84 und BIE 84]. Für den LAT ist dies für die ϕ -Richtung zu beachten, da hier die Lücken zum Wechselwirkungspunkt hin gerichtet sind. Eine Verpackungslage darf daher nicht dicker sein als $50 \mu\text{m}$.

⁸ Die genauen Adressen der Hersteller der verwendeten Materialien sind am Anfang des Literaturverzeichnisses aufgelistet.

Es wurde getestet, welche Verpackung die oben geforderten Eigenschaften am besten erfüllt. Dabei wurde zuerst die Dicke verschiedener Folien mit einer Mikrometerschraube bestimmt. Dann wurde die Lichtausbeute von BGO-Kristallen mit verschiedenen Verpackungen getestet sowie die Lichtdurchlässigkeit einiger Folien bestimmt.

3.2 REFLEXIONSEIGENSCHAFTEN VON BGO-VERPACKUNGEN

3.2.1 Material

Die Untersuchung erfolgte an drei BGO-Kristallen: Zwei BGO-Kristalle der Firma Harshaw (Nr. 100 und Nr. 105) mit den Maßen $1 \times 1 \times 15 \text{ cm}^3$ und einem Kristall vom 'Institute of Ceramics; Shanghai' mit den Maßen $1.5 \times 1.5 \times 20 \text{ cm}^3$. Der Shanghai-Kristall und der Harshaw-Kristall Nr. 105 wurden nacheinander in eine Lage reflektierender Folien verschiedener Firmen gewickelt. Dabei wurden folgende Folien untersucht:

Folie	Dicke $\pm 1 (\mu\text{m})$
Harshaw - Folie	350
Millipore HAWP 293	150
Scotch Farbfolie 3650b	90
Aluminiumfolie	50
Schreibmaschinenpapier	75
Tedlar 150 BL 30 WH	37.5
Tedlar 200 BS 30 WH	50
Tedlar 400 BS 30 WH	100
ohne Folie	0

Tab.3 Verpackungsfolien

Der Harshaw-Kristall Nr. 100 wurde von der Firma 'J.D.Möller Optische Werke GmbH', bis auf die Auslesefläche an einem Ende des Kristalls, vollständig durch Bedampfen mit Alu verspiegelt.

3.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Kristalle waren mit optischem Fett (Rhodorsil huile 47V) an je einen Photomultiplier (Hamamatsu R 268) gekoppelt. Sie standen, durch eine Schablone ständig an der gleichen Position gehalten, senkrecht auf ihrem Photomultiplier. Die vorgefertigten Folien wurden über die Kristalle gestülpt. Der Wechsel der Verpackungen erfolgte unter schwachem Rotlicht⁹. Für jede Messung wurden der Photomultiplier und der Kristall durch eine lichtdichte Haube gegen Außenlicht abgeschirmt sowie die Hochspannung des Photomultipliers wieder eingeschaltet.

Die Stabilität des Photomultipliers kontrollierte eine LED (CQY 66 von ITT), die neben dem Kristall auf dem Photomultiplier befestigt war. Die LED wurde abwechselnd durch zwei verschiedene Pulser angesteuert, um ein Driften der Pulser auszuschließen.

Das Photomultiplier-Signal gelangte über einen ladungsintegrierenden Vorverstärker (Canberra 2005) auf einen pulsformenden Hauptverstärker (Ortec 451). Das unipolare Signal wurde von einem Vielkanalanalysator (Le Croy 3001) ausgewertet. Das bipolare Signal wurde verwendet, um ein Triggersignal (Gate) für den Vielkanalanalysator zu erzeugen. Abbildung 10 auf Seite 25 zeigt den Elektronikaufbau.

Die Lichtausbeute der Kristalle wurde bestimmt durch das Maximum einer 662 keV- γ -Linie (Photopeak) eines ^{137}Cs Präparates (10 μCi). Das Präparat wurde entlang der BGO-Kristalle in kleinen Schritten versetzt und für die jeweilige Position der Photopeak aufgenommen. Dabei wurde die Strahlung durch ein Loch mit 6mm Durchmesser in einer 2.5 cm dicken Bleiplatte kollimiert. Außerdem wurde der Photopeak bei einem Einschub von oben (5 cm vom Kristallende) aufgenommen. Die Strahlung wurde hierbei nicht kollimiert. Abbildung 11 auf Seite 25 zeigt den Versuchsaufbau:

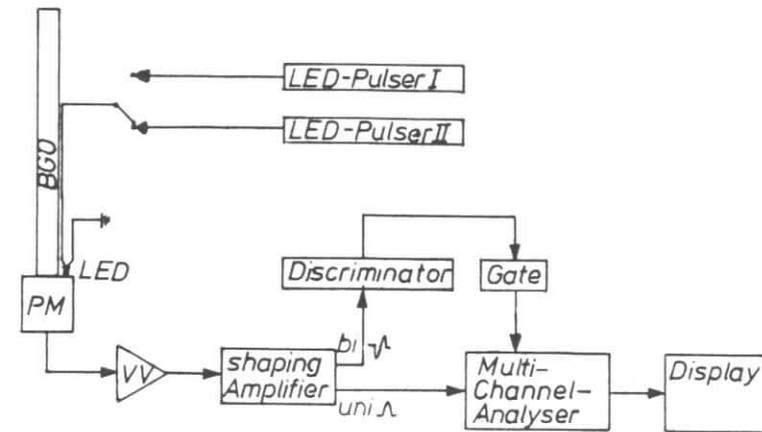


Abbildung 10. Elektronik Reflexionstest

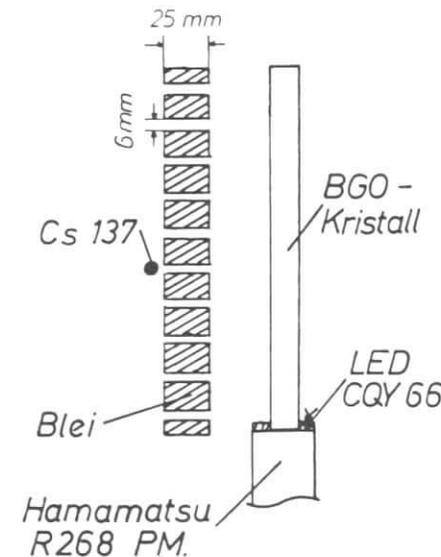


Abbildung 11. Versuchsaufbau Reflexionstest

⁹ [BOB 83] zeigt, daß Rotlicht kein Einfluß auf BGO-Kristalle hat. (Vergl. auch Kap.: "Lichtschädigung von BGO" auf Seite 60)

3.2.3 Ergebnisse

Tab.4 (S. 27) zeigt die Lichtausbeute normiert auf die Harshaw-Folie (=100 %) sowie die Energieauflösung bei Einschub von vorne mit 662 keV Photonen (¹³⁷Cs) für verschiedenen Verpackungen. Abbildung 12 auf Seite 28 zeigt die Lichtausbeute beider Kristalle in Abhängigkeit vom Einschubort bei verschiedenen Folien. Darin ist zu erkennen, daß die Harshaw-Folie die besten Reflexionseigenschaften besitzt, gefolgt von der Millipore-Folie. Die Millipore-Folie lässt sich allerdings sehr schlecht um den Kristall wickeln, da sie sehr brüchig ist. Daraus resultieren die starken Schwankungen bei beiden Kristallen. Es ist zu erwarten, daß bei geschickter Verpackung der Kristalle mit Millipore ähnliche Ergebnisse wie mit der Harshaw - Folie zu erreichen sind.

Die Uniformität sei definiert mit (PH=Lichtausbeute bei Einschub von der Seite):

$$U = (PH_{\max} - PH_{\min}) / PH_{\max}$$

Sie verbessert sich leicht mit besseren Verpackungen, auf Grund der höheren Lichtausbeute. Die Form der Uniformitätskurve wird durch eine gute Verpackung nicht verändert. Nur durch die schlechte Verpackung mit der brüchigen Millipore-Folie ist bei dieser Verpackung eine Änderung der Uniformität zu erkennen. Die Uniformität wird für die Eichung der Kristalle noch eine wichtige Rolle spielen (vergl. Kap. "Eichung durch minimalionisierende Teilchen" auf Seite 68).

Die Energieauflösung bei Einschub von vorne wird mit der Verbesserung der Lichtausbeute auf Grund der Photonenstatistik ebenfalls besser. Wieder fällt die Millipore-Folie wegen ihrer schlechten Wicklung um den Kristall zumindest beim Shanghai-Kristall etwas heraus.

Aus dem Vergleich der beiden Kristalle ist zu erkennen, daß bei einem dünnen Kristall die Lichtausbeute stärker von der Verpackung abhängt als bei einem dickeren Kristall. Der Unterschied zwischen den beiden Kristallgrößen beträgt bei der schlechtesten Verpackung ca. 7%.

Bei dem Harshaw BGO Nr. 100 konnte nach dem Verspiegeln kein Lichtsignal erkannt werden. Es gelangte kein Szintillationslicht mehr zur Auslesefläche.

Folie	Shanghai 15x15x200 cm ³		Harshaw 10x10x150 cm ³	
	Lichtausb.	Aufl. FWHM	Lichtausb.	Aufl. FWHM
Harshaw Folie	100.0 %	20.9 %	100.0 %	16.8 %
Millipore HAWP 293	97.6 %	23.0 %	100.6 %	15.7 %
Scotch Farb. 3650b	93.0 %	20.9 %	88.0 %	18.3 %
Tedlar 400 BS 30WH	89.9 %	22.1 %	81.4 %	17.6 %
Aluminium-Folie	88.3 %	22.5 %	78.2 %	17.4 %
Schreibm. Papier	88.3 %	22.3 %	74.3 %	20.4 %
Tedlar 200 BS 30WH	87.7 %	21.9 %	71.0 %	18.8 %
Tedlar 150 BL 30WH	83.7 %	21.9 %	70.0 %	21.6 %
ohne	73.7 %	25.4 %	-	-

Tab.4 Daten der getesteten Folien bei Einschub vorne in den Kristall. Der Fehler in der Auflösung beträgt ±1.5% bedingt aus Ablesefehlern am Vielkanalanalysator.

3.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Das meiste Szintillationslicht bleibt auch ohne Verpackung im Kristall. Dies zeigt der Versuch, in dem der Shanghai-Kristall ohne Verpackung unter der schwarzen lichtundurchlässigen Haube stand. Damit gelangte kein Licht, welches den Kristall verließ, zurück in den Kristall. Der Versuch zeigt eine Verschlechterung der Lichtausbeute um ca.25 % gegenüber der besten Verpackung. Das bedeutet, daß die Lichtführung hauptsächlich durch die Totalreflexion an der Kristalloberfläche geschieht. Diese sollte also nicht zerstört werden.

Die Auswirkungen einer Zerstörung der Totalreflexion zeigt das Ergebnis des Versuchs mit dem verspiegelten Kristall. Aluminium besitzt einen höheren Brechungsindex (n=2.5) als BGO (n=2.1). Es läßt dadurch bei direktem Kontakt mit der Kristalloberfläche keine Totalreflexion zu. Die

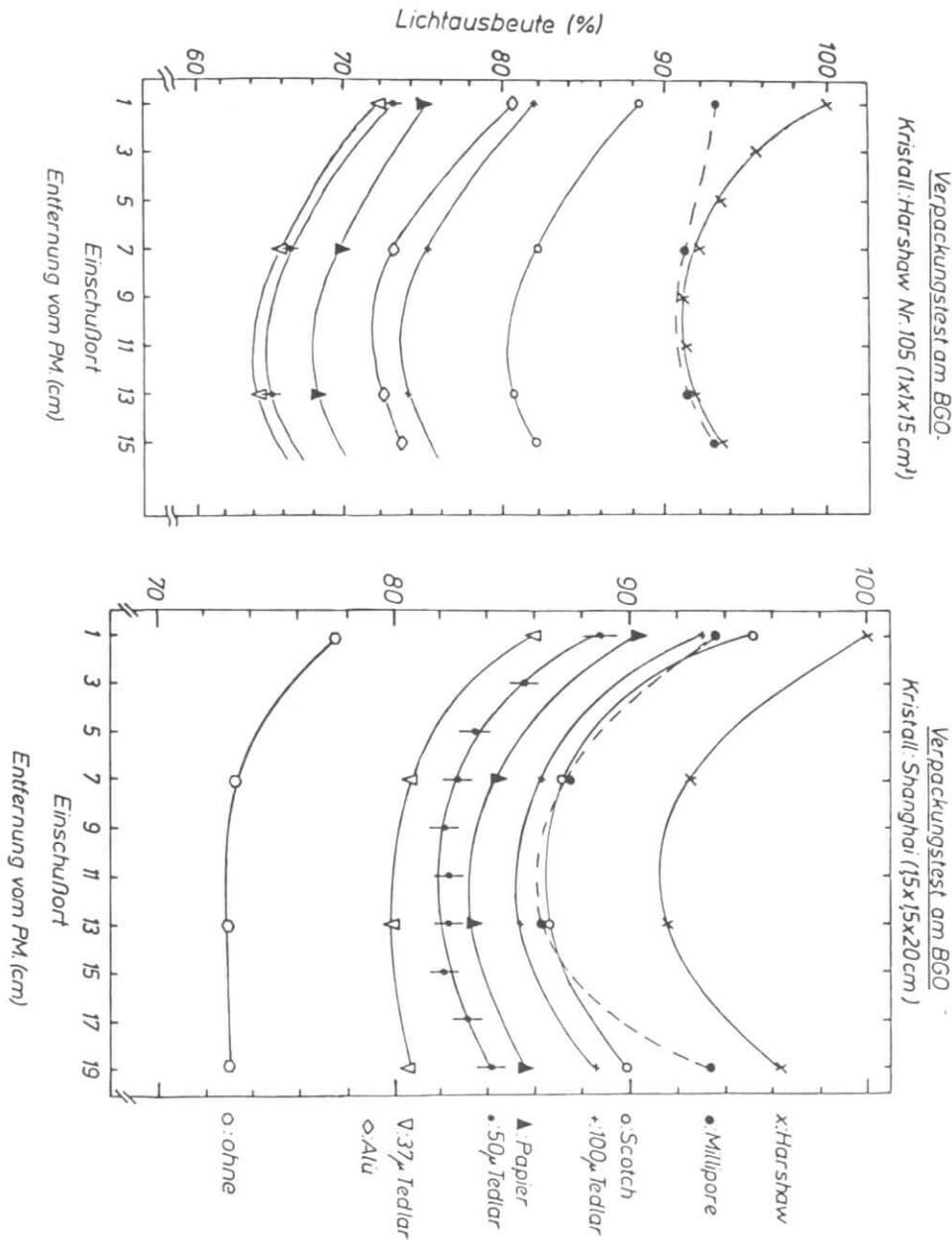


Abbildung 12. Lichtausbeute bei verschiedenen Folien in Abhängigkeit vom Einschubort

Reflexion übernahm das Aluminium. Aluminium reflektiert bei 480 nm 90 % des Lichtes, der Rest wird absorbiert.

Es konnte mit dem verspiegelten Kristall kein Photopeak gemessen werden, auch nicht bei Einschub nahe dem Photomultiplier. Daraus ist zu erkennen, daß das Szintillationslicht so häufig durch den gesamten Kristall reflektiert wurde, daß sämtliches Licht vom Aluminium absorbiert wurde.

Aus Tab.4 (S. 27) ist bei dünneren Kristallen eine stärkere Abhängigkeit der Lichtausbeute von der Verpackung zu erkennen. Dafür verantwortlich ist ebenfalls die häufige Reflexion des Lichtes durch den Kristall. In einem dünnen Kristall ist die mittlere freie Wegstrecke zwischen zwei Reflexionen kürzer als in einem dickeren Kristall. Bei gleichlangen Kristallen wird das Licht im dünneren Kristall häufiger reflektiert, bevor es zur Auslese gelangt. Das obige Ergebnis zeigt, daß dies sogar in einem 5 cm kürzeren Kristall der Fall ist. Einen Teil der Reflexionen übernimmt die Verpackung, die aber je nach Reflexionsvermögen einen Teil des Lichtes absorbiert. Bei einem 1x1x20 cm³ BGO-Kristall ist daher eine noch stärkere Abhängigkeit der Lichtausbeute von der Verpackung zu erwarten.

3.3 ÜBERSPRECHTEST

Eine der Forderungen an die Verpackung der Kristalle war, daß sie eine gute optische Isolierung (<1 %) der Kristalle voneinander erreichen sollte. Dies wurde für einige Folien getestet, deren Dicke eine Verwendung für den LAT zuließ.

3.3.1 Material

Zur Verfügung stand ein kleiner NaJ(Tl)-Kristall, dotiert mit radioaktivem ²⁴¹Am. Er wurde geliefert von der Firma Harshaw. Er lieferte Lichtpulse mit einem Energieäquivalent von 1.65 MeV bezogen auf NaJ(Tl) mit einer Energieauflösung von < 7 %. Abbildung 13 auf Seite 30 zeigt den Puls.

3.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Elektronikaufbau entsprach dem Aufbau des oben beschriebenen Reflexionstests. An die Position des BGO-Kristalls wurde der NaJ(Tl+Am) Puls gesetzt. Er wurde durch eine Schablone 1 mm über dem Photomultiplier befestigt. Unter den Puls wurden die verschiedenen Folien geschoben. Abbildung 14 auf Seite 30 zeigt den Versuchsaufbau.

Gemessen wurde der Photopeak des Pulsers für verschiedenen Folien zwischen Pulser und Photomultiplier. Der Photomultiplier wurde durch eine LED (CQY 68) auf Konstanz überwacht.

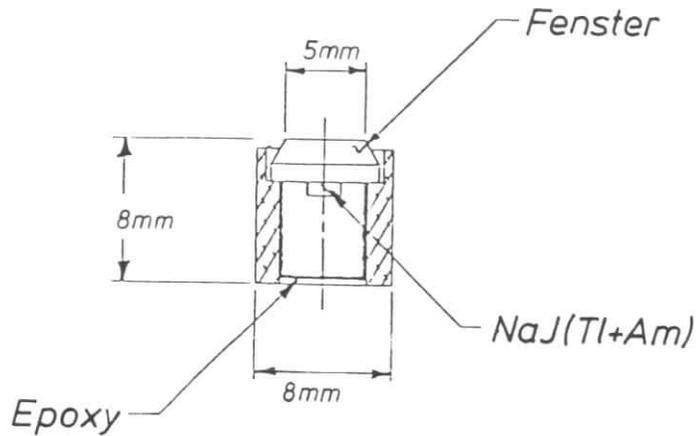


Abbildung 13. NaJ(Tl+Am) Lichtpulser

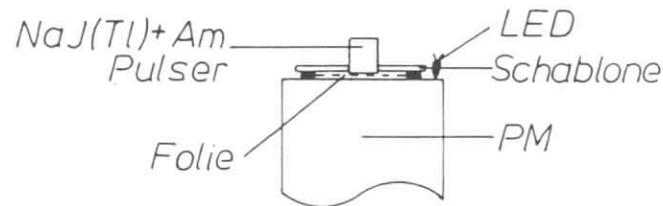


Abbildung 14. Versuchsaufbau Übersprechtst

3.3.3 Ergebnis

Tab.5 zeigt das Übersprechen des NaJ(Tl+Am) Pulser Lichtes durch verschiedene Folien. Die Werte sind bezogen auf das Signal des Pulsers ohne Folie zwischen Pulser und Photomultiplier (=100 %). Es zeigt sich, daß die Aluminiumfolie sowie die beiden dickeren Tedlarfolien unter der geforderten Grenze von 1 % Lichtübersprechen liegen.

Folie	Signal
keine	100 %
1 Lage Aluminiumfolie	0 %
1 Lage Schreibmaschinenpapier	(67±0.5) %
2 Lagen Schreibmaschinenpapier	(44±0.5) %
1 Lage Tedlar 150 BL 30 WH	(2.1±0.1) %
2 Lagen Tedlar 150 BL 30 WH	< 0.2 %
1 Lage Tedlar 200 BS 30 WH	(0.43±0.1) %
2 Lagen Tedlar 200 BS 30 WH	< 0.2 %
1 Lage Tedlar 400 BS 30 WH	(0.41±0.1) %
2 Lagen Tedlar 400 BS 30 WH	< 0.2 %

Tab.5 Übersprechen von Licht durch verschiedene Folien. Der angegebene Fehler resultiert aus Ableseungenauigkeiten von ±1 Kanal am Vielkanalanalysator.

3.3.4 Diskussion

Beim einzelnen Verpacken der Kristalle im LAT werden diese durch zwei Lagen Folie getrennt. Dies wurde im Test berücksichtigt, indem zwei Lagen

Folie unter den Pulser geschoben wurden. Das dabei noch empfangene Lichtsignal ging bei allen Tedlarfolien im Rauschen des Photomultipliers unter. Gleiches gilt auch für eine Lage Aluminiumfolie.

Schreibmaschinenpapier zeichnet sich durch ein sehr starkes Übersprechen negativ aus. Da es aber auch recht gut reflektiert bedeutet das, daß wenig Licht vom Schreibmaschinenpapier absorbiert wird. Bei den Tedlarfolien dagegen ist kaum ein Übersprechen festzustellen, die Reflexionseigenschaften sind aber nicht so gut, sie absorbieren das Licht stärker.

3.4 ZUSAMMENFASSUNG

Untersucht wurde die Eignung einiger Folien zur Verpackung der BGO-Kristalle für den geplanten LAT. Sie sollten gute Reflexionseigenschaften besitzen, wenig Licht durchlassen, eine raue Oberfläche haben und möglichst dünn sein.

Die geforderte Dicke der Folien von maximal 50 μm wurde von den am besten reflektierenden Folien (Harshaw, Millipore) überschritten. Die Scotch Farbfolie wird nur mit einer gummierten Seite geliefert und hat eine sehr glatte Oberfläche. Sie kann daher ebenfalls nicht für den LAT verwendet werden. Durch das Schreibmaschinenpapier gelangt zu viel Licht hindurch und isoliert somit die BGO-Kristalle im LAT nicht genügend voneinander.

Zum Verpacken der BGO-Kristalle sind noch zu verwenden: Aluminiumfolie und alle Tedlarfolien. Die Tedlarfolie 400 BS 30WH (100 μm) kann aber nicht zum Verpacken von einzelnen Kristallen verwendet werden (zu dick), sondern es darf sich nur eine Lage Folie zwischen den Kristallen befinden.

Neuere Versuche von [WES 84] haben ergeben, daß mit Titanoxyd bemalte dünne Mylar-Folie ähnlich gute Werte liefert wie Harshaw-Folie und den Anforderungen an die maximale Dicke genügt.

4.0 ÜBERDECKUNGSTEST

Die BGO-Kristalle des LAT im CELLO-Detektor sollten unterschiedliche Geometrien und damit verschieden große Ausleseflächen (Endflächen) bekommen. Um einen optimalen Rauschabstand bei der Signalauslese zu erhalten, müssen die Ausleseflächen der Kristalle und die Größen der Photodioden einander angepaßt sein.

4.1 EINLEITUNG

Das Rauschen eines Systems aus ladungsempfindlichem Verstärker und Photodioden ist abhängig von der Kapazität am Verstärkereingang. Da die Kapazität der Photodioden proportional zu ihrer aktiven Fläche steigt, erhöht sich das Rauschen des Verstärkers mit der Größe bzw. Anzahl der Photodioden. Andererseits gelangt durch eine größere aktive Fläche mehr Licht zur Auslese.

Zu untersuchen war, bei welcher Überdeckung der BGO-Auslesefläche mit Photodioden ein Minimum an Rauschen bei möglichst viel Lichtausbeute zu erlangen ist. Damit wird ein frühzeitiges Trennen des Signals vom Rauschen sowie eine bessere Energieauflösung im niederenergetischen Bereich gewährleistet.

Diese Untersuchung erfolgte an zwei BGO-Kristallen.

- Einem hexagonalen BGO-Kristall mit 5cm Schlüsselweite.
- Einem langen dünnen BGO-Kristall, der der Kristallgeometrie im LAT nahe kommt.

Im Weiteren wird "F = Lichtausbeute/Rauschen" gesetzt, wobei das Maximum von F in Abhängigkeit der Ausleseflächenüberdeckung gesucht wurde.

4.2 ÜBERDECKUNGSTEST AN EINEM HEXAGONALEN BGO-KRISTALL

4.2.1 Material

Der hexagonale BGO-Kristall der Firma Harshaw hatte eine Länge von 15 cm und eine Schlüsselweite von 5 cm. Das ergibt eine Stirnfläche (=Auslesefläche) von 16.56 cm^2 . Der Kristall war in Harshaw-Folie verpackt. Für die Auslese wurden insgesamt fünf Hamamatsu-Photodioden S 1337-1010BR mit einer aktiven Fläche von je 0.98 cm^2 verwendet.

4.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Die fünf Photodioden wurden mit optischem Fett an die Auslesefläche des BGO-Kristalls gekoppelt und durch eine Andruckplatte fest auf den Kristall gepreßt. Sie befanden sich ständig auf dem Kristall und konnten der Reihe nach zugeschaltet werden. Die nicht von den Photodioden abgedeckte Auslesefläche war nicht mit Reflektorfolie abgedeckt. Kristall und Photodioden befanden sich in einem lichtdichten Metallkasten.

Das Photodiodensignal wurde auf einen ladungsempfindlichen Verstärker (VV) [PLU 82] gegeben. Er besitzt einen integrierenden und einen pulsformenden Teil. Das geformte Signal wurde mit einem linearen Verstärker weiter verstärkt und auf einen Vielkanalanalysator (MCA) gegeben. Zur Eichung des Signals wurde nach jedem Versuch ein definierter Testpuls auf den Verstärker gegeben (vergl. Anhang 2). Zum Triggern des MCA diente ein zweiter Ausgang des linearen Verstärkers.

Die Photodioden wurden mit einer Vorspannung (Bias) von +12 V über einen Schutzwiderstand von 100 M Ω betrieben.

Abbildung 15 zeigt den Elektronikaufbau des Versuchs.

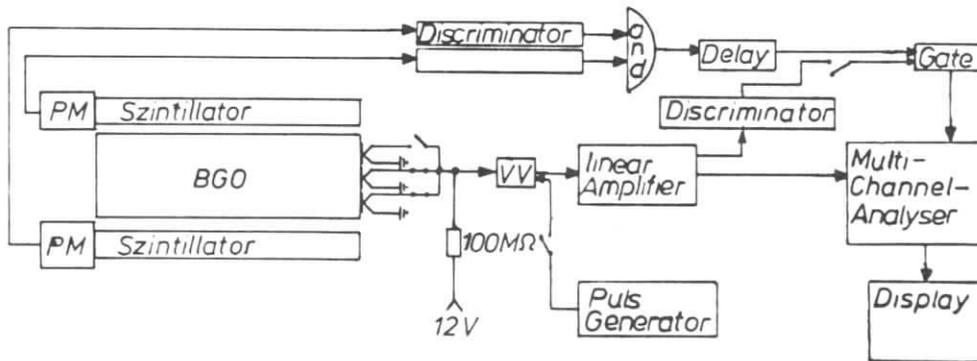


Abbildung 15. Elektronik Überdeckungstest

Ausgelesen wurde das Signal minimalionisierender kosmischer M μ onen bei Durchgang durch den BGO-Kristall. Als Trigger für die Auslese dienten zwei Plastikszintillatoren mit den Maßen 1x2,5x15 cm³, die mit Photomultiplier ausgelesen wurden. Sie befanden sich über und unter dem Kristall (vergl. Abbildung 16 auf Seite 35). Die Dioden wurden in der Reihe ihrer Numerierung zugeschaltet und jeweils eine Häufigkeitsverteilung der Lichtausbeute bei M μ onendurchgang aufgenommen (Cosmic-Peak). Durch

die Triggerung werden in der Hauptsache annähernd senkrechte Durchschüsse durch den BGO-Kristall erreicht. Mit $dE/dx_{\min}=9.2$ MeV/cm für BGO ergibt sich daher eine im Kristall deponierte Energie von 40 MeV. Für die Bestimmung des Rauschens wurde die Breite des Testpulses gemessen (siehe Anhang 2).

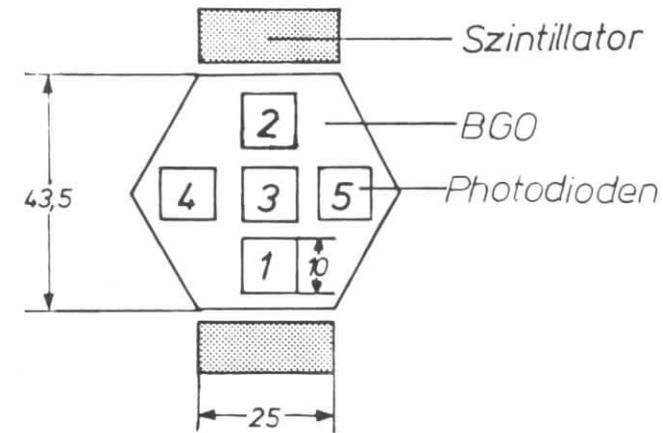


Abbildung 16. Versuchsaufbau Überdeckungstest

4.2.3 Ergebnisse

Abbildung 17 auf Seite 36 zeigt F als Funktion der mit angeschlossenen Photodioden überdeckten Fläche. Zu erkennen ist ein Maximum von F bei einer 20-25 %igen Überdeckung der Auslesefläche des Kristalls. Bei weiter zunehmender Flächenüberdeckung wird F wieder etwas kleiner. In der gleichen Abbildung ist auch das Maximum des Cosmic-Signals aufgetragen. Diese Kurve flacht mit zunehmender Diodenzahl ab. Die Zahlen an der Signalkurve geben die entsprechende Energieauflösung an. Da die Energieauflösung in diesem Energiebereich zum größten Teil durch das Rauschen bestimmt wird, ist die beste Auflösung beim Maximum von F zu erwarten. Der Fehler der Auflösung beträgt $\pm 1\%$, bedingt durch Ablesefehler.

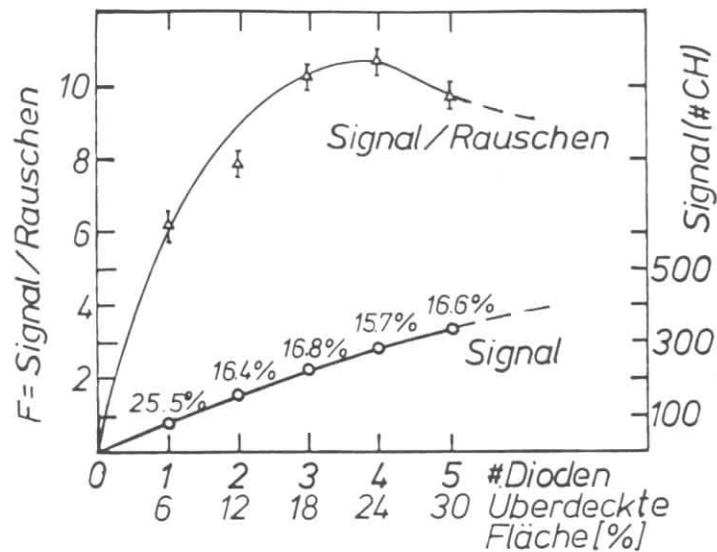


Abbildung 17. Ergebnisse Überdeckungstest

4.2.4 Diskussion

Bei den obigen Ergebnissen ist zu berücksichtigen, daß die nicht ausgelesene Fläche nicht mit reflektierender Folie abgedeckt war. Das Licht, welches an diesen Stellen aus dem Kristall trat, war für eine Auslese verloren. Bei sorgfältiger Abdeckung der nicht ausgelesenen Fläche mit guter Reflektorfolie wird sich die Lichtausbeute erhöhen. Das Rauschen der Photodioden wird sich durch die so gewonnene höhere Lichtausbeute nicht ändern. Daraus ergibt sich, daß F bei einer so optimierten Auslese ebenfalls einen schnelleren Anstieg und ein Maximum unter 20 % zeigen wird. Ebenso wird sich mit dem Anstieg von F auch die Energieauflösung verbessern.

4.3 ÜBERDECKUNGSTEST AN EINEM LANGEN DÜNNEM BGO-KRISTALL

Dieser Test untersucht den Verlauf von F in Abhängigkeit der Diodenanzahl an einem BGO-Kristall ähnlicher Geometrie, wie sie im LAT geplant war. Die von den Photodioden überdeckte Fläche betrug dabei 24-71% der Auslesefläche des Kristalls.

4.3.1 Material

Die Untersuchung wurde an einem BGO-Kristall der Firma NKK durchgeführt. Seine Maße betragen $1.2 \times 1.8 \times 12.0 \text{ cm}^3$. Der Kristall war in weiße Scotch-Farbfolie 3650b verpackt. Zur Auslese wurden Hamamatsu-Photodioden gleicher Bauart mit zwei verschiedenen Maßen verwendet.

- Zwei Photodioden S 1790(b) mit einer aktiven Fläche von 1 cm^2 .
- Eine Photodioden S 1790(a) mit einer aktiven Fläche von 0.53 cm^2 .

4.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Elektronikaufbau war identisch mit dem Aufbau aus Kap. 4.2.2 (vergl. Abbildung 15 auf Seite 34). Die Photodioden befanden sich bei diesem Versuch nicht ständig auf dem Kristall. Es wurden nacheinander eine kleine, eine große sowie eine große und eine kleine Photodiode mit optischem Fett an die Stirnfläche des BGO-Kristalls gekoppelt. Die jeweils nicht von Photodioden abgedeckte Fläche wurde mit weißer Scotch-Farbfolie abgedeckt.

Der Kristall wurde mit seiner Höhe von 1.8 cm zwischen die beiden Szintillatoren gestellt. Somit ergab sich ein Cosmic-Signal bei 16.2 MeV. Das Rauschen wurde wieder mittels Testpulsbreite bestimmt.

4.3.3 Ergebnisse

Tab.6 (S. 38) zeigt das Ergebnis des Versuchs. Die Lichtausbeute (Signal) und das Rauschen sind auf die Anzahl der von der Photodiode erzeugten Ladungen (e_0) normiert.

Diode Nr.	Diodenfläche	Überd. Fläche	Signal $\pm 150e_0$	Rauschen $\sigma; \pm 40e_0$	F
eine kleine (Nr 1a)	52.5mm ²	24.3%	7598e ₀	767e ₀	9.9
eine grosse (Nr. 1b)	100.0mm ²	46.5%	16441e ₀	947e ₀	17.4
(Nr. 2b)	100.0mm ²	46.5%	14638e ₀	917e ₀	16.0
gr.+kl. (1b+1a)	152.5mm ²	70.8%	18000e ₀	1220e ₀	14.8

Tab.6 Ergebnis:Überdeckungstest an einem langen dünnen BGO-Kristall. Der Unterschied der Dioden 1b und 2b ist begründet in bauartbedingten Toleranzen.

Das Maximum von F liegt im Bereich zwischen 40-50% überdeckter Fläche. Eine genauere Angabe ist nicht möglich, da ein exakter Verlauf von F nicht gemessen werden konnte. Die Photodiodenflächen waren dafür zu groß. Ein weiteres interessantes Ergebnis zeigt dieser Versuch: Auch für eine große Überdeckung der Auslesefläche mit Photodioden (70%) bleibt F noch recht groß. In diesem Bereich gleichen sich die Erhöhung des Rauschens und die höhere Lichtausbeute aus.

4.3.4 Diskussion

Das bestmögliche Verhältnis von Signal zu Rauschen erhält man bei dieser Kristallgeometrie zwischen 40-50% von Photodioden überdeckter Auslesefläche. Da die käuflich zu erwerbenden Photodioden nicht jeder Auslesefläche angepaßt werden können, sollte die Tendenz zu einer eher größeren Überdeckung der Auslesefläche gehen. In diesem Bereich verschlechtert sich F nur langsam, für kleinere Überdeckung dagegen recht schnell.

4.4 ZUSAMMENFASSUNG

Getestet wurde an zwei BGO-Kristallen unterschiedlicher Geometrie die Abhängigkeit des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses F von der mit Photodioden überdeckten Auslesefläche. An einem 15 cm langen hexagonalen BGO-Kristall mit 5 cm Schlüsselweite wurde der Verlauf von F zwischen 6-30 % überdeckter Fläche aufgenommen. Bei Berücksichtigung

aller Effekte ergab sich ein Maximum von F bei ca. 20% Überdeckung. An einem BGO-Kristall mit 2.16 cm² Auslesefläche und einer Geometrie ähnlich der Kristalle im LAT ergab sich ein Maximum bei 40-50 % Überdeckung. In Abbildung 18 ist die optimale Überdeckung der Auslesefläche als Funktion der gesamten Auslesefläche aufgezeigt. Punkt b) stammt aus einer Messung von [LOR 83] an einem BGO-Kristall mit den Maßen 3x3x20 cm². Die beiden weiteren Punkte a),c) stammen aus den oben beschriebenen Messungen. Die Kurve zeigt, daß auch für kleine Ausleseflächen eine 50%ige Überdeckung ausreicht. Für größere Flächen sollte die Überdeckung geringer werden.

Die BGO-Kristalle im geplanten LAT sollten auf Grund ihrer Geometrie eine Überdeckung von ca. 50% erhalten. Im hochenergetischen Bereich spielt die Optimierung von F keine wesentliche Rolle, weil die Energieauflösung durch Leckeffekte und Schauerstatistik begrenzt wird, aber für den niederenergetischen Bereich begrenzt das Rauschen und die Lichtausbeute das minimal nachweisbare Signal und die Energieauflösung.

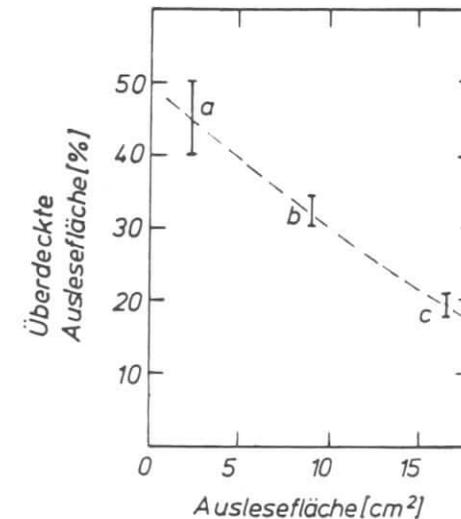


Abbildung 18. Optimale Überdeckung bei verschiedenen großen Ausleseflächen

5.0 STRAHLENRESISTENZ VON BGO

Das Material des LAT im CELLO Detektor muß eine gute Strahlenresistenz aufweisen, da es sich an einer strahlenexponierten Position befinden wird. Es ist dort mit einer Belastung mit 10^2 - 10^3 rad/Monat aus Synchrotronstrahlung und hochenergetischen Elektronen zu rechnen. Erfahrungen mit Strahlenschäden in e^+e^- -Speicherringen sind z.B. am CRYSTAL BALL mit NaJ(Tl)-Kristallen gemacht worden.

5.1 EINLEITUNG

Die Reaktion von kurzen (≤ 3 cm) BGO-Kristallen bei Strahlendosen von 10^3 - 10^6 rad sind von [LUC 77, KOB 83] gemessen worden. [UPS 83, BOB 83, CAV 82] haben Untersuchungen an 10-24 cm langen BGO-Kristallen bei Dosen zwischen 1-4000 rad vorgenommen. Aus diesen Arbeiten ist bekannt, daß:

- a) die Lichtausbeute von BGO nach einer kurzzeitigen Bestrahlung um bis zu $\approx 40\%$ absinkt,
- b) die Kristalle sich mit drei verschiedenen Zeitkonstanten wieder erholen. Die kürzeste Zeitkonstante liegt im Bereich weniger Stunden, die längste im Bereich von einigen Wochen,
- c) bei niedrigen Dosen von 1-4 rad ein linearer Zusammenhang zwischen Dosis und Schädigung festgestellt werden kann,
- d) bei Dosen über 100 rad Sättigungseffekte in der Schädigung zu beobachten sind,
- e) alle Effekte (a - d) bei verschiedenen Kristallen unterschiedlich stark auftreten.

Für einen Betrieb der Kristalle im Speicherring ist es wichtig zu wissen, welche durchschnittliche Dosis die Kristalle über längere Zeit erhalten dürfen, ohne daß sie zu stark ($\geq 1\%$) geschädigt werden. [UPS 83] gibt eine Vorhersage von 0.9-3.8 rad/Tag, [KOB 83] von 100 rad/Stunde. Um diese Daten näher einzuschränken wurde ein 15 cm langer BGO-Kristall in die Nähe des Strahlrohres des PETRA - Speicherringes gebracht und seine Lichtausbeute über einen längeren Zeitraum beobachtet. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im zweiten Teil dieses Kapitels beschrieben.

Der erste Teil des Kapitels beschäftigt sich mit der Reaktion von langen BGO-Kristallen auf kurzzeitige γ -Strahlung bei Dosen < 100 rad. Dabei wurde besonders die Erholung der Kristalle über einen langen Zeitraum nach Beendigung der Bestrahlung beobachtet (≈ 100 Tage). Messungen an BGO-Kristallen über so lange Zeiträume liegen anderswo nicht vor. Außerdem wurden die Energieauflösung und die Uniformität vor und nach der Bestrahlung miteinander verglichen.

Nebenher wurde die Strahlenresistenz eines 10 cm langen CsJ(Tl)-Kristalls überprüft. Die Ergebnisse des Tests sind im Anhang 1 beschrieben.

In Anschluß an die Kapitel über die Strahlenschädigung der Kristalle erfolgt eine Untersuchung der Energieauflösung und der Uniformität in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad der Kristalle. Sie wurde an einem von Tageslicht geschädigten BGO-Kristall während seiner Erholungsphase durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit Werten aus den Bestrahlungstests verglichen¹⁰.

5.2 KURZZEITBESTRAHLUNG VERSCHIEDENER BGO-KRISTALLE

5.2.1 Material

Neben dem Interesse an der langen Erholungskomponente und dem verbleibenden Restschaden stand auch die Frage nach der Reaktion von BGO-Kristallen unterschiedlicher Firmen und unterschiedlicher Ziehmethoden auf Bestrahlung. Daher wurden insgesamt fünf lange BGO-Kristalle verschiedener Hersteller getestet. Um einen Vergleich mit dem bekannten Material NaJ(Tl) zu erhalten, wurden ein NaJ(Tl)-Kristall der Größe $1 \times 1 \times 2$ cm und ein BGO-Kristall mit gleichen Maßen mitgetestet. Die Daten aller untersuchten Kristalle sind in Tab.7 (S. 42) wiedergegeben.

Der Harshaw Kristall hatte einen leichten gelben Schimmer, der Crismatec Kristall war an einem Ende sehr gelb, alle anderen Kristalle waren klar und farblos. Sie waren in eine $50 \mu\text{m}$ dicke Tedlar Folie (200 BS 30WH) verpackt. Der NaJ(Tl)-Kristall war nur an seinen beiden Schmalseiten poliert. Er befand sich in einem abgeschlossenen Aluminiumbehälter mit zwei Quarzfenstern zur Auslese.

¹⁰ Die beiden Teilkapitel "Kurzzeitbestrahlung verschiedener BGO-Kristalle" und "Langzeitbestrahlung eines BGO-Kristalls bei PETRA" sind veröffentlicht als DESY - Bericht 84/041 und eingereicht bei Nuclear Instruments and Methods.

Kristall	Hersteller	Grösse (mm ³)	Zieh- methode	Liefer- datum	Cs Aufl. $\Delta E/E$	Uniformi- tät
BGO	Harshaw Holland	15x15x200	Czoch- ralski	Juli 83	24.7 %	20 %
BGO	Crismatec	15x15x200	Czoch- ralski	Aug. 83	23.5 %	20.1 %
BGO	NKK	11x11x200	Czoch- ralski	Feb. 83	19.3 %	17 %
BGO	NKK	10x10x20	Bridge- man	Dez. 82	16.6 %	-
BGO	Inst of Ceramics Shanghai	15x15x200	Bridge- man	Juli 83	18.7 %	12 %
BGO	Scholz	15x15x100	Czoch- ralski	Aug. 83	17.3 %	2 %
NaJ	Korth	10x10x20		Nov. 83	8.2 %	-

Tab.7 Daten der getesteten Kristalle: Die Energieauflösung $\Delta E/E$ wurde mit einem ¹³⁷Cs Präparat (662-keV-Photonen) gemessen. Es befand sich 5 cm vom oberen Ende des Kristalls entfernt. Der Einschuss erfolgte von vorne.

5.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Kristalle wurden mit optischem Fett (Rhodorsil Huile 47V) auf Hamamatsu R268 Photomultiplier gesetzt. Der NaJ-Kristall war wegen seiner hohen Lichtausbeute nur mit Luft an den Photomultiplier gekoppelt. Die weitere Signalverarbeitung erfolgte, wie in Kapitel "Reflexionseigenschaften von BGO-Verpackungen" auf Seite 23 beschrieben, über einen ladungsintegrierenden Vorverstärker und einen pulsformenden Hauptverstärker auf einen Vielkanalanalysator.

Gemessen wurde die Lichtausbeute der Kristalle mit einem ¹³⁷Cs Präparat (662 keV). Das Präparat befand sich bei der Messung 5 cm vom oberen Ende des Kristalls entfernt und wurde nicht kollimiert. Zur Messung der Uniformität wurde das Präparat in kleinen Schritten entlang des Kristalls versetzt, wobei die Strahlung durch ein 6 mm durchmessendes Loch in einer 2.5 cm starken Bleiplatte kollimiert wurde.

Ein Driften der Photomultiplier und der Verstärker wurde überwacht durch LEDs (CQY 66), die neben den Kristallen auf den Photomultipliern festgeklebt waren. Die LEDs wurden durch drei verschiedene Pulser angesteuert, um ein Driften der Pulser auszuschließen.

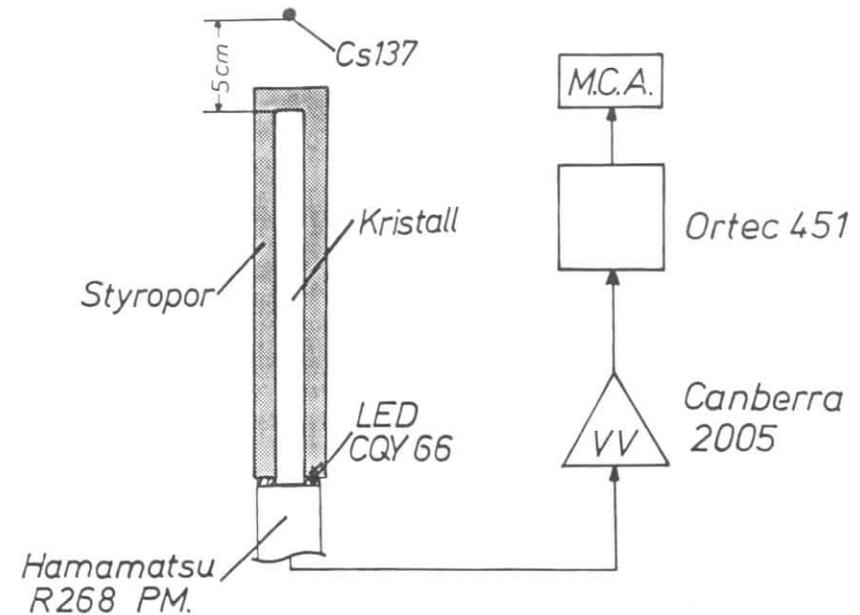


Abbildung 19. Versuchsaufbau Strahlungstest

Um Temperaturschwankungen zu vermindern, war jeder Kristall in 2 cm dickes Styropor verpackt. Die Umgebungstemperatur der Kristalle wurde durch einen Temperaturfühler (AD 590) in der Nähe der Kristalle gemessen. Bei BGO wurde ein Temperaturkoeffizient von $-1.5\%/K$, bei NaJ (Tl) von $-0.6\%/K$ berücksichtigt. Abbildung 20 auf Seite 49 (h) gibt den Temperaturverlauf für die Testzeit wieder. Um die Kristalle zu bestrahlen, wurden diese von den Photomultipliern genommen und in einem lichtdichtem Karton in unmittelbare Nähe einer starken ¹³⁷Cs-Quelle des DESY-Strahlenschutzes gestellt. Dabei wurden sie über ihre gesamte Länge gleichmäßig bestrahlt. Die Strahlendosis wurde mit Thermoluminenzdosimetern (TLD) bestimmt, von denen mehrere auf der Vorderseite der Kristalle, über ihre Länge verteilt angebracht waren. Die genauen Strahlendosen der TLDs an den Kristallen sind Tab.8 (S. 45) zu entnehmen.

Um Dosiswerte verschiedener Autoren vergleichen zu können, ist es notwendig zu wissen, auf welches Material sie sich beziehen. [KOB 83] gibt die Dosen in Röntgen (R) an, was sich auf eine Dosis absorbiert in Luft bezieht. Auch die weiteren oben genannten Autoren geben eine Dosis absorbiert in Luft an. Die hier angewendete Methode der Dosis-Messung durch TLDs ergibt auf Grund des höheren Energieabsorptionskoeffizienten von TLDs ($n/\rho(\text{TLD})=n/\rho(\text{H}_2\text{O})=0.034 \text{ cm}^2/\text{g}$) eine um Faktor 1.16 höhere Dosis als in Luft ($n/\rho(\text{Luft})=0.0293 \text{ cm}^2/\text{g}$)

Nach Ende der Bestrahlung wurden die Kristalle wieder auf ihren Photomultiplier gesetzt. Dabei gaben auf den Photomultiplier geklebte Schablonen den Kristallen ihre ursprüngliche Position wieder. Der systematische Fehler bedingt durch diese Prozedur betrug $\pm 1.5\%$ bei den BGO-Kristallen. Der Verursacher dieses Fehlers war die erneuerte Fettkopplung zwischen Kristall und Photomultiplier. Bei dem NaJ(Tl)-Kristall war der Fehler auf Grund der Luftkopplung $< 1\%$.

Es wurden zwei Bestrahlungen vorgenommen. Bei der ersten wurden die fünf langen BGO-Kristalle einer mittleren Dosis von 85 rad (TLD Werte Vorderseite) in 18 Stunden ausgesetzt. Bei der zweiten Bestrahlung, die 40 rad in 24 Stunden betrug, wurden auch die beiden kleinen Kristalle mit bestrahlt.

Der Zeitraum vom Ende der Bestrahlung bis zum Beginn der Messungen betrug ca. 15 min. Der erste Meßpunkt nach Ende der Bestrahlung wurde kurz nach dem Einschalten der Hochspannung der Photomultiplier aufgenommen und hat dadurch einen Fehler von $\pm 5\%$. Die Schädigung der Kristalle wurde erkennbar durch eine Verringerung der Lichtausbeute, gemessen durch die Lage der 662-keV-Linie des ^{137}Cs Präparates. Damit wurde gleichzeitig die Szintillationsintensität und die Transmission des Lichtes durch den Kristall beobachtet.

Jeder Meßwert wurde auf die gleichzeitig gemessenen Photomultiplierschwankungen (LED Peaks) sowie auf die Temperatur korrigiert.

	Kristall (Grösse)	TLD Dosis (rad)	Bestrahl. zeit(hrs)	
(a) erste Bestrah- lung	Harshaw (15x15x200)	85.5	18	
		87.8		
		82.9		
	Crismatec (15x15x200)	84.4	18	
		NKK (11x11x200)		87.5
				85.3
	Shanghai (15x15x200)	83.3	18	
		87.5		
		85.3		
	Scholz (15x15x100)	83.3	18	
84.0				
84.9				
(b) zweite Bestrah- lung	NKK (10x10x20)	81.4	24	
		39.4		
		37.5		
Harshaw (15x15x200)	40	24		
	Crismatec (15x15x200)		42	
			NKK (11x11x200)	37

Tab.8 Strahlungsdosen und Bestrahlungszeiten. Die Unsicherheit der TLD Dosismessungen beträgt etwa 10 %.

5.2.3 Ergebnisse

Abbildung 20 auf Seite 49 (a)-(g) zeigen die Schädigung und die Erholung der Kristalle, wobei 100% der jeweilige Wert der Lichtausbeute vor der ersten Bestrahlung ist.

Zu erkennen sind folgende Eigenschaften:

1. Nach der ersten Bestrahlung geht die Lichtausbeute um bis zu 40% zurück.
2. Alle langen BGO-Kristalle zeigen eine schnelle Erholungsphase und eine weitere langsamere Erholungskomponente. Diese Erscheinung ist in guter Übereinstimmung mit [BOB 83], der die Erholung durch drei Zeitkonstanten beschrieben hat. Bei dieser Messung ist die erste, sehr schnelle Erholung innerhalb der ersten paar Minuten nicht zu beobachten, da die Zeit zwischen Bestrahlungsende und Meßbeginn zu lang war.
3. Ein Restschaden zwischen 1% (Crismatec) und 13% (Scholz) bleibt bei den langen BGO-Kristallen zurück.
4. Anfangsschaden und Restschaden variieren von Kristall zu Kristall, wobei kein Zusammenhang zwischen dem Schaden und der Ziehmethode erkennbar ist.
5. Der kurze BGO-Kristall zeigt eine sehr schnelle Erholung innerhalb von 24 Stunden und keinen Restschaden.
6. Der NaJ(Tl)-Kristall zeigt eine ebenso schnelle Erholung wie der kurze BGO-Kristall. Allerdings bleibt ein Restschaden von 2% zurück. Der Anfangsschaden konnte wegen eines sehr intensiven Nachleuchtens nicht gemessen werden.
7. Tab.9 (S. 47) zeigt, daß sich die Energieauflösung der Kristalle mit ihrer Schädigung verschlechtert. Ebenso verschlechtert sich die Uniformität der Kristalle.

Es ist keine Uniformitätsmessung längere Zeit nach Bestrahlungsende gemacht worden. Aus Kap.: "Lichtschädigung von BGO" auf Seite 60 kann aber erkannt werden, daß sich die Uniformität entsprechend der Erholung ebenfalls wieder verbessert.

Kristall	$\Delta E/E$			Uniformität	
	vor 1. Bestr.	1 Tag nach 1. Bestr.	53 Tage nach 1. Bestr.	vor 1. Bestr.	1 Tag nach 1. Bestr.
Harshaw (15x15x200)	24.7 %	27.7 %	26.2 %	20.0 %	30.0 %
Crismatec (15x15x200)	23.5 %	26.9 %	23.4 %	20.1 %	23.7 %
NKK (11x11x200)	19.3 %	21.7 %	19.0 %	17.0 %	17.0 %
Shanghai (15x15x200)	18.7 %	23.9 %	19.2 %	12.0 %	16.7 %
Scholz (15x15x100)	17.3 %	20.7 %	18.4 %	2.0 %	2.3 %

Tab.9 Energieauflösung und Uniformität nach der ersten Bestrahlung. Der Fehler der Energieauflösung beträgt ± 1 % aus Ablesefehlern. Der Fehler der Uniformität ist < 1 %.

Die zweite Bestrahlung zeigt weiterhin:

1. Alle bestrahlten Kristalle werden erneut geschädigt. Der Crismatec Kristall zeigt eine Abhängigkeit der Anfangsschädigung mit der Dosis. Sein Anfangsschaden ist bei der geringeren 2. Dosis ebenfalls geringer. Die anderen Kristalle haben eine Anfangsschädigung, die mit der aus der ersten Bestrahlung übereinstimmt. Ein solcher Sättigungseffekt wurde von [BOB 83] für Dosen > 100 rad an einem Harshaw Kristall ebenfalls festgestellt.
2. Der Crismatec Kristall erreicht innerhalb der Fehler seine ursprüngliche Lichtausbeute wieder, der NKK und der Harshaw Kristall erleiden einen weiteren Restschaden.
3. Die Erholungszeiten der Kristalle sind kürzer als nach der ersten Bestrahlung.

Tab.10 (S. 48) gibt eine Übersicht über die Schädigungen der langen BGO-Kristalle.

Kristall	1. Bestrahlung (85 rad)		2. Bestrahlung (35 rad)	
	PH nach 15 min	PH nach 100 Tagen	PH nach 15 min	PH nach 30 Tagen
Harshaw (15x15x200)	74±4 %	89±0.5 %	70±3.5 %	82±0.5 %
Crismatec (15x15x200)	64±3.5 %	99±0.5 %	82±4 %	100±0.5 %
NKK (11x11x200)	62±3 %	91±0.5 %	60±3 %	81±0.5 %
Shanghai (15x15x200)	60±3 %	93±0.5 % ¹¹	-	-
Scholz (15x15x100)	75±4 %	87±0.5 %	-	-

Tab.10 Lichtausbeute (PH) nach zwei Bestrahlungen. PH=100 vor der 1. Bestrahlung.

5.2.4 Diskussion

Im Rahmen dieser Messungen wurden erstmals bleibende Restschäden auch 100 Tage nach einer Bestrahlung mit Dosen unter 100 rad beobachtet. Diese Restschäden sind von anderen Autoren übersehen worden, weil ihre Beobachtungszeiten wesentlich kürzer waren.

Die lange Erholungskomponente und der Restschaden ist hauptsächlich zurückzuführen auf eine Minderung der Transmissionsfähigkeit des Szintillationslichtes durch den Kristall. Dies zeigt der Vergleich zwischen dem kurzen und dem langen NKK-Kristall. Der kurze Kristall zeigt keinen Restschaden und keine lange Erholungskomponente, während beides deutlich an dem langen BGO-Kristall zu bemerken ist. Würde die Schädigung in

¹¹ Wegen eines Un(m)falls verlor der Shanghai Kristall eine kleine Ecke seiner Auslesefläche. Der Wert in der Tabelle ist extrapoliert.

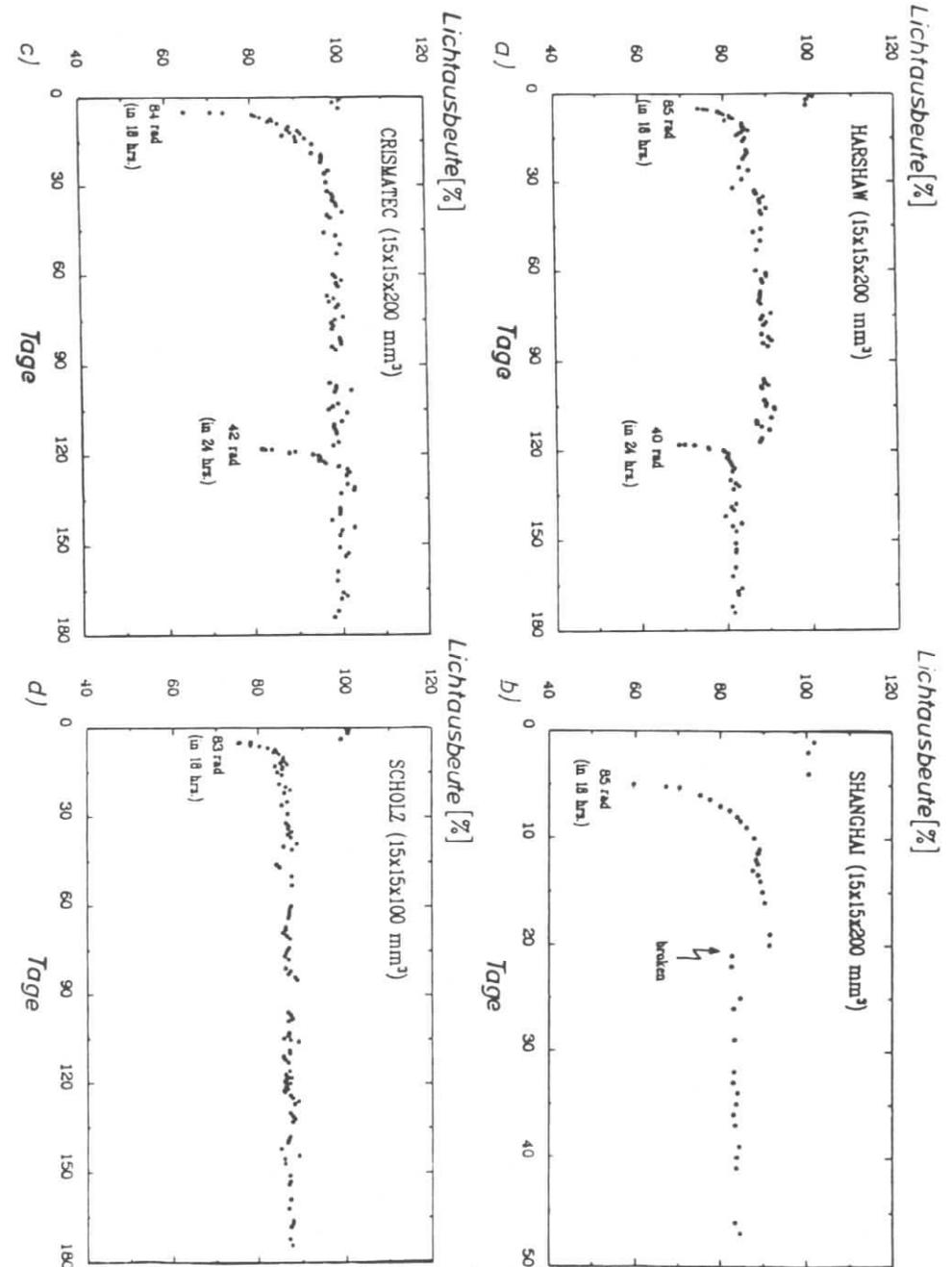


Abbildung 20. Lichtausbeute der bestrahlten BGO-Kristalle

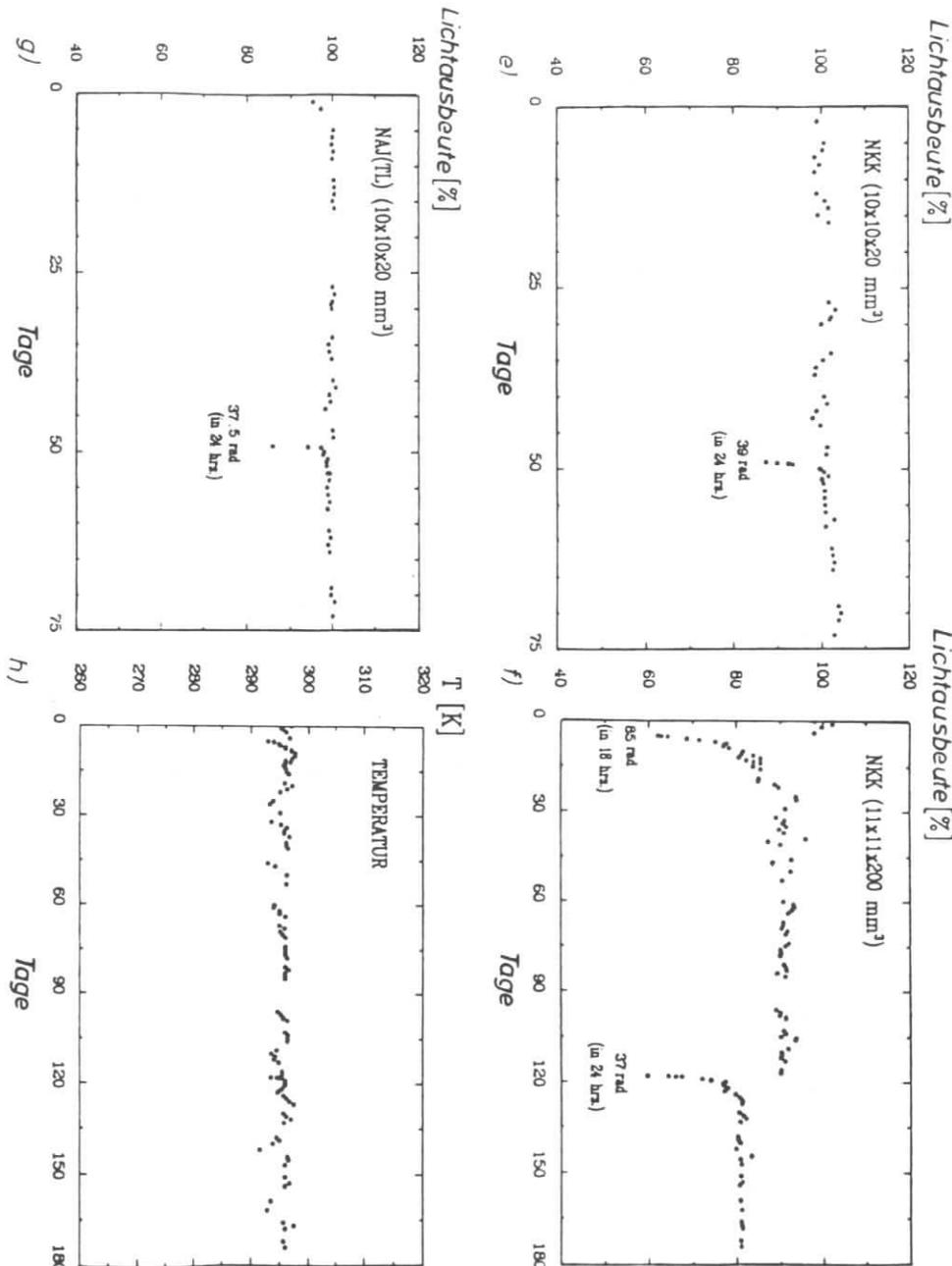


Abbildung 21. Lichtausbeute der bestrahlten BGO-Kristalle, Temperaturverlauf

einer Abschwächung der Szintillationsfähigkeit liegen, so würde auch bei dem kurzen BGO der Restschaden und die lange Erholung in gleicher Stärke auftreten. Aus Kapitel "Reflexionseigenschaften von BGO-Verpackungen" auf Seite 23 ist bekannt, daß das Szintillationslicht sehr häufig durch den Kristall reflektiert wird, bevor es zur Auslese gelangt. Daher genügt eine geringe Minderung der Transmissionseigenschaft von BGO-Kristallen, um eine starke Schädigung zu bewirken¹²

[KOB 82] hat gezeigt, daß die Minderung der Transmission durch Bestrahlung am stärksten bei kleinen Wellenlängen auftritt. Der von uns verwendete Photomultiplier hat seine maximale Empfindlichkeit (420 nm) unterhalb des Emissionspeaks von BGO (480 nm). Dagegen ist die Empfindlichkeit von Photodioden bei höheren Wellenlängen größer. Ein mit Photomultiplier ausgelesener BGO wird daher empfindlichere Reaktionen auf Strahlenschäden zeigen als ein mit Photodioden ausgelesener BGO-Kristall.

Die kürzeren Erholungszeiten nach der zweiten Bestrahlung sind einem teilweisen Heilungseffekt durch wiederholte Bestrahlung zuzuschreiben. Ebenso die Ausheilung des Restschadens des Crismatec Kristalls. [BOB 83] beobachtete eine Heilung eines Crismatec Kristalls durch Anleuchten des Kristalls mit dem Licht einer Glühbirne.

Von den bisher genannten Autoren wurden allerdings keine kürzeren Erholungszeiten nach wiederholter Bestrahlung gemessen. Da alle mit höheren Dosen bestrahlt hatten, läßt das den Schluß zu, daß dieser Heilungseffekt nur bei kleinen Dosen auftritt.

Da kein langer NaJ(Tl)-Kristall zur Verfügung stand, ist kein genauer Vergleich zwischen NaJ und BGO möglich. Der höhere Restschaden des NaJ-Kristalls von 2 % gegenüber dem gleichlangen BGO-Kristall (0 %) läßt aber darauf schließen, daß bei langen NaJ-Kristallen ein größerer Restschaden vorliegen wird, als bei BGO-Kristallen gleicher Länge. Noch stärker wird sich der Schaden bei gleichen Strahlungslängen bemerkbar machen.

Abschließend sei noch bemerkt, daß der Restschaden von BGO Kristallen durch Erhitzen des Kristalls auf ca. 80°C ausgeheilt werden kann [LAV 84].

¹² [LAV 84] haben in neuen Messungen ebenfalls festgestellt, daß die Schädigung eine Verschlechterung der Transmissionseigenschaft ist.

5.3 LANGZEITBESTRAHLUNG EINES BGO-KRISTALLS BEI PETRA

Um das Verhalten von langen BGO-Kristallen auf eine länger andauernde kontinuierliche Strahlung bei realistischen Detektorbedingungen kennenzulernen, wurde ein Kristall in die Nähe der LAT-Position auf dem PETRA Strahlrohr deponiert. Während eines Laufes von PETRA wurde die Lichtausbeute des Kristalls beobachtet.

5.3.1 Material, Versuchsaufbau und Durchführung

Untersucht wurde ein $10 \times 10 \times 150 \text{ mm}^3$ großer BGO-Kristall der Firma Harshaw. Der Kristall war optisch klar, allseitig poliert, in Harshaw Folie verpackt und hatte eine Energieauflösung (662 keV) von $\text{FWHM}=17.3\%$. Abbildung 23 auf Seite 53 zeigt die Testbox, in der sich der Kristall befand. Die Box bestand aus 1 mm Blei und war lichtdicht abgeschlossen. Der Kristall war mit optischem Kleber auf einen Photomultiplier (Hamamatsu R 268) geklebt. Um den Photomultiplier vor magnetischen Streufeldern zu schützen, war er durch mehrere mm Eisen und μ -Metall abgeschirmt¹³. Die Stabilität des Photomultipliers wurde durch einen auf den Multiplier geklebten LED (QCY 66) überwacht. Die Umgebungstemperatur des BGO wurde durch einen Temperaturfühler (AD 590) gemessen. Der Photomultiplier war direkt an einen Vielkanalanalysator (Tracor Northern TN-1705) angeschlossen.

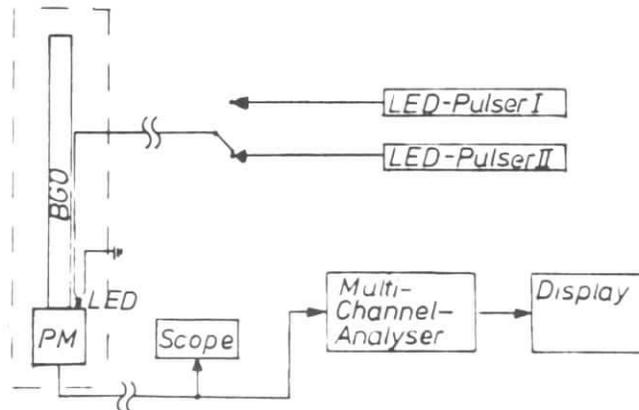


Abbildung 22. Elektronik Langzeitbestrahlung

Aufgenommen wurde die 662-keV-Linie eines ^{137}Cs Präparates ($10 \mu\text{Ci}$), das innerhalb der Box, ca. 3 cm oberhalb des Kristallendes angebracht war.

¹³ Magnetfelder an der Testposition: $B_x < 10 \text{ Gauß}$, $B_z = 10 \text{ Gauß}$, $B_y = 40 \text{ Gauß}$

Abbildung 24 auf Seite 54 zeigt die Position der Testbox während des Experiments. Sie befand sich auf dem Strahlrohr des PETRA Speicherrings innerhalb des CELLO Detektors nahe der geplanten LAT Position. Der Kristall hatte eine mittlere Entfernung vom Strahlrohr von ca. 15 cm.

Um niederenergetische Streustrahlung von dem CELLO-Detektor fernzuhalten, sind einige Schutzmaßnahmen ergriffen worden, die auch für die Testposition eine Verringerung der niederenergetischen Strahlung bewirken.

- In dem Strahlrohr befinden sich eine kreisförmige Absorberblende (p) und zwei linsenförmige Absorber (n,o) (Abbildung 25 auf Seite 54).
- Kurz hinter dem letzten Mini β -Quadrupol (l) steht eine 15 cm dicke Bleiwand (k).
- Zwischen den beiden linsenförmigen Absorbern (n,o) ist das Strahlrohr mit einer 4 mm dicken Lage Blei umwickelt.

Die weiteren Einzelheiten des CELLO Detektors in der Abbildung sind:

- Wechselwirkungspunkt
- Innere Driftkammer
- Supraleitende Magnetspule
- Flüssig Argon - Blei Schauerzähler
- Flüssig Argon Endcap Schauerzähler
- Eisen
- Müonkammern
- SAT (Bleiglas)
- Position des geplanten LAT

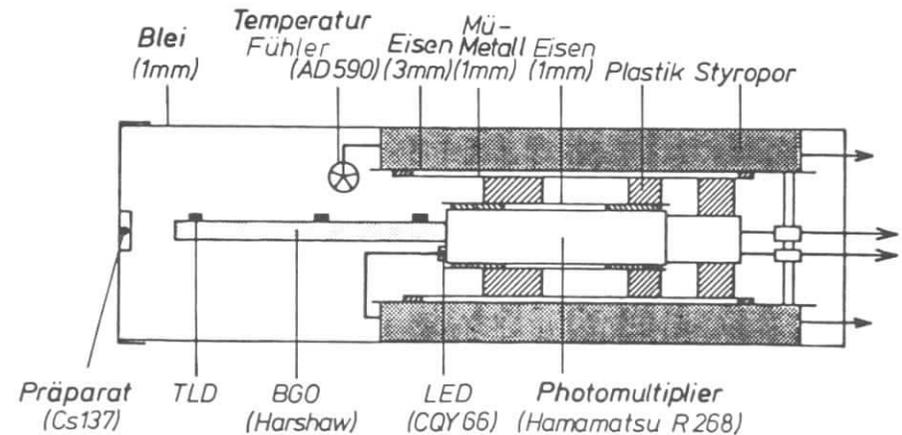


Abbildung 23. BGO Testbox

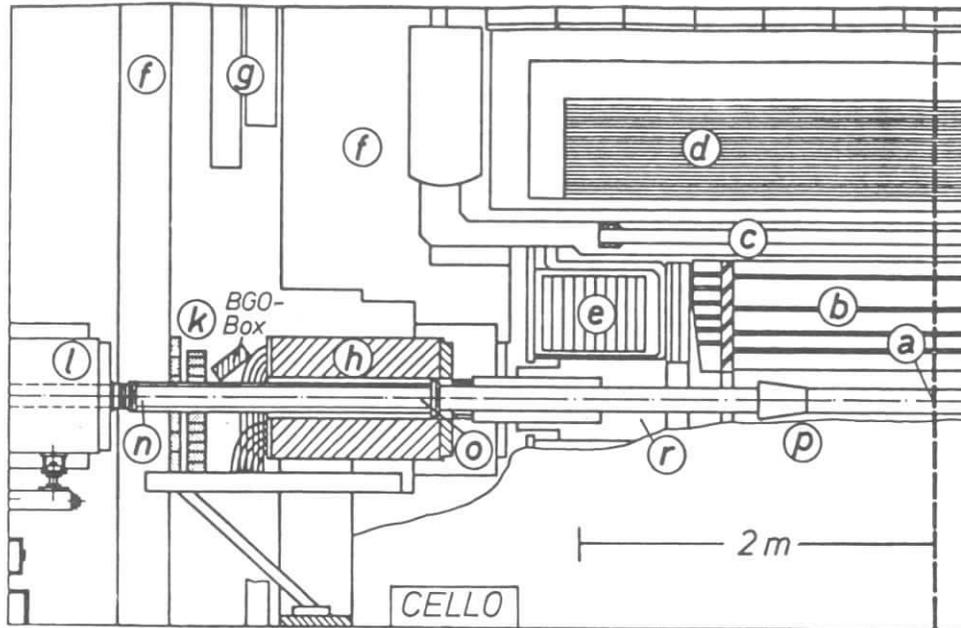


Abbildung 24. Testposition im CELLO Detektor

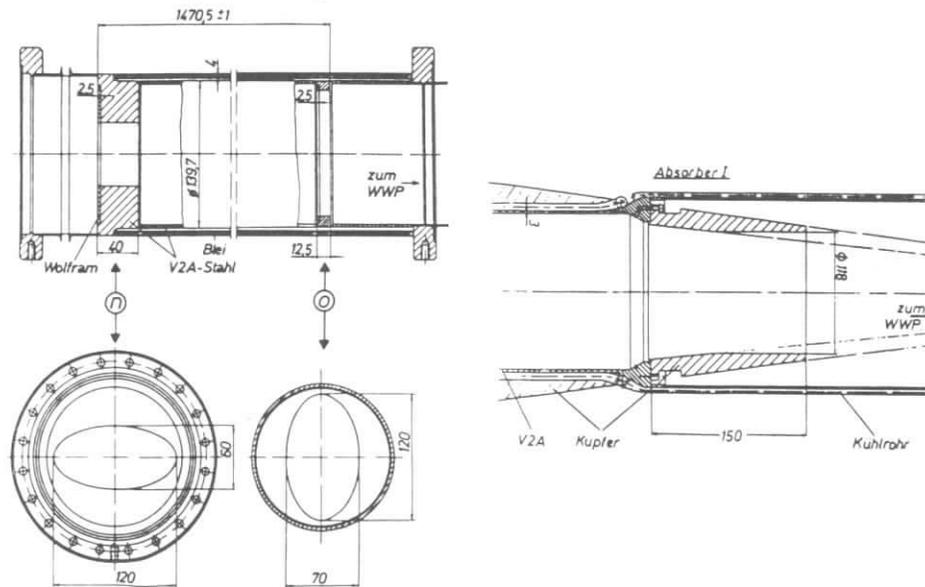


Abbildung 25. Absorberblenden im Strahlrohr

5.3.2 Strahlendosis und Energiespektrum

In der Testbox waren drei TLDs zum Strahlrohr hinzeigend über die Länge des Kristalls angebracht. Die gemessenen Dosen betragen nach Ende des Versuches: 119 rad, 75 rad, 114 rad, ($\pm 10\%$), gemittelt 100 rad¹⁴. Abbildung 26 auf Seite 56 zeigen die Energiespektren der Untergrundstrahlung bei verschiedenen Zuständen von PETRA: a) ohne Strahl, b) während einer normalen Injektion ($E_{\text{beam}} = 6.9 \text{ GeV}$), c) während eines typischen Luminositätslaufes ($E_{\text{beam}} = 23.3 \text{ GeV}$), d) während der Strahl sehr instabil war und ein starker Teilchenverlust vorlag.

Abb. 26 (a) zeigt die Aufnahme der 662-keV-Linie des ¹³⁷Cs Präparates. Die Linie ganz links im Bild ist das Pedestal. Bei den folgenden Aufnahmen wurde die Ansprechschwelle des Vielkanalanalysators soweit hochgedreht, daß diese Linie nicht mehr zu sehen war. Der kleine Peak zwischen beiden Linien entsteht durch rückgestreute Comptonelektronen des Präparates.

Abb. 26 (b) zeigt zwei ausgeprägte Maxima, die 662-keV-Linie des ¹³⁷Cs Präparates und eine Linie bei ca. 30 keV. Diese Linie ist eine k- α -Linie von Bariumatomen innerhalb des ¹³⁷Cs Präparates. Sie wird durch Synchrotronstrahlung angeregt. Da 30-keV-Photonen in den ersten mm BGO absorbiert werden, tragen sie kaum zur Schädigung des Kristalls bei. Zusätzlich ist eine leichte Erhöhung des Untergrundes unterhalb von 500 keV festzustellen.

Während eines normalen Luminositätslaufes (Abb. 26 (c)) erhöht sich der Untergrund weiter. Bei einem instabilen Zustand von PETRA erhöht sich der Untergrund sehr stark (Abb. 26 (d)). Es bildet sich eine Verteilung um 2 MeV. Die Untergrundstrahlung ist so intensiv, daß die ¹³⁷Cs Linie nicht mehr erkennbar ist.

Alle drei Spektren wurden innerhalb eines gleichlangen Zeitintervalls aufgenommen. Bei den Aufnahmen (a)-(c) beträgt im Maximum der 662-keV-Linie die Anzahl der Einträge ≈ 800 , bei (d) sind 16000 Einträge bei 2 MeV zu verzeichnen.

Um den hauptsächlichsten Verursacher der gemessenen Dosis festzustellen, wurden nachträglich an der Position der Testbox einige TLDs, in verschiedenen dicke Lagen Blei verpackt, angebracht. Abbildung 27 auf Seite 57 zeigt die Position der TLDs, wobei die Zahlen die unterschiedlichen Bleistärken angeben. Tab.11 (S. 57) zeigt die Meßergebnisse.

¹⁴ Neue Messungen haben ergeben, daß die Dosis den Kristall von allen vier Seiten, mit Abweichungen von $\pm 15\%$ erreicht.

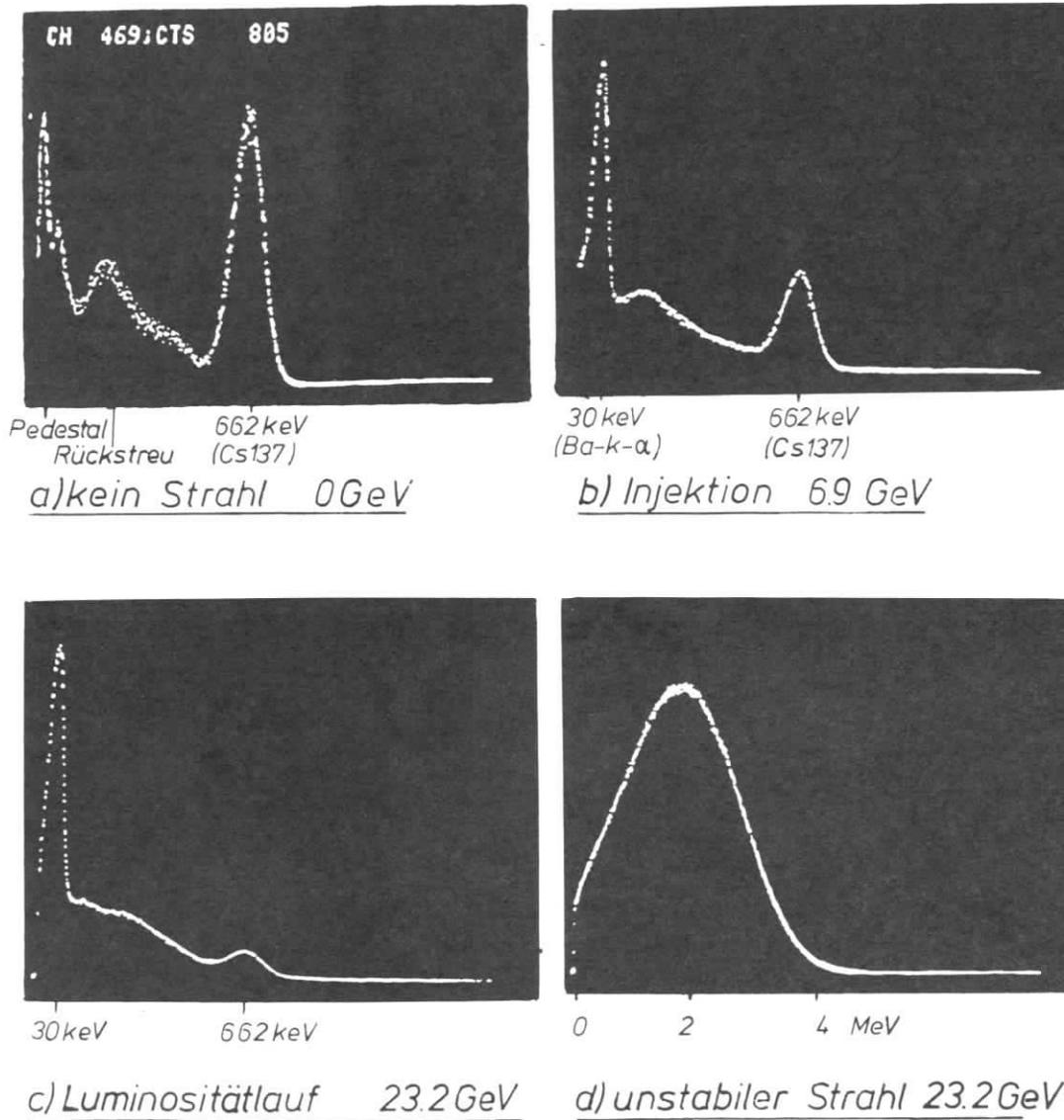


Abbildung 26. Untergrundstrahlung bei PETRA, gemessen mit dem BGO-Kristall

Pb mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D rad	173	278	299	67	122	273	94	73	138	80

Tab.11 Meßwerte der TLDs in verschiedenen Bleilagen

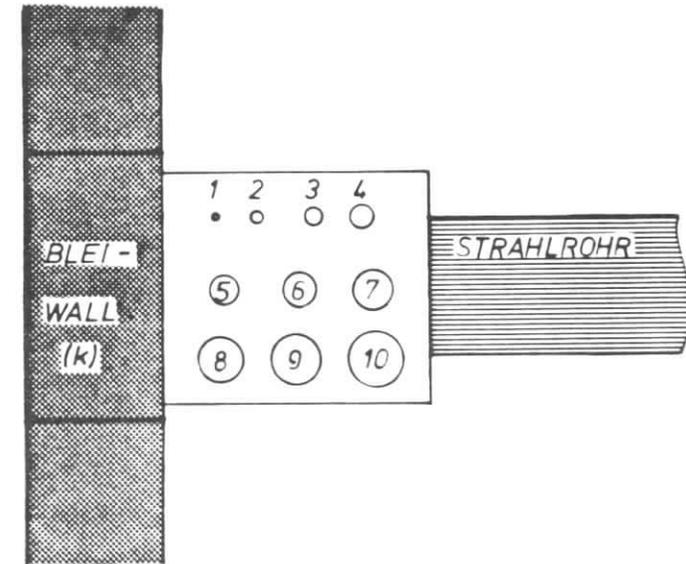


Abbildung 27. Position der TLDs in verschiedenen dicken Lagen Blei

Neben einer sehr starken Ortsabhängigkeit ist zu erkennen, daß auch durch 9 mm Blei noch viel Strahlung durchdringt. Daher kann für die gemessenen Dosen im wesentlichen der höherenergetische Untergrund bei instabilen Strahlverhältnissen verantwortlich gemacht werden.

5.3.3 Ergebnisse

Abbildung 28 auf Seite 58 zeigt die Abnahme der Lichtausbeute während der Bestrahlung sowie während der 38 Tage nach Ende der Bestrahlung. Nach dem Abschalten von PETRA (= Ende der Bestrahlung) war eine Verringerung der Pulshöhe um 8% festzustellen. Bei der Erholung des Kristalls sind die bereits bekannten zwei Zeitkonstanten zu erkennen. Zum Erkennen einer möglichen weiteren, ersten, sehr schnellen Erholung gleich nach

Ende der Bestrahlung liegen keine Meßwerte vor. Der Kristall hat sich 20 Tage nach Bestrahlungsende vollständig erholt¹⁵.

Die Schwankung der Meßwerte um $\pm 2\%$ innerhalb der 53 tägigen Bestrahlung hängen von dem jeweiligen Zustand von PETRA ab. Nach einem unruhigen Lauf mit viel Strahlung ist der Kristall stärker geschädigt, bei längerem Stillstand erholt sich der Kristall. Nach dem Abschalten von PETRA verringern sich die Fluktuationen auf $\pm 1\%$. Alle Werte sind auf Temperatur und Photomultiplierschwankungen korrigiert¹⁶.

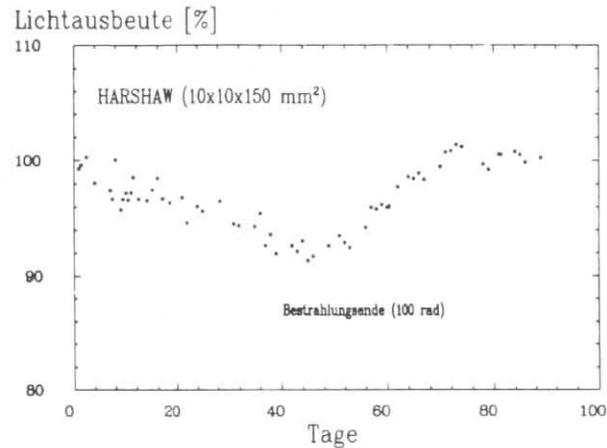


Abbildung 28. Strahlenschaden eines kontinuierlich bestrahlten BGO-Kristalls

¹⁵ In einer zweiten, 23 tägigen Bestrahlung des gleichen Kristalls mit einer (TLD) Dosis von 75 rad $\pm 15\%$ wurde ebenfalls eine kontinuierliche Pulsabnahme und ein Schaden von 7% nach 23 Tagen festgestellt.

¹⁶ Für die LED wurde ein Temperaturkoeffizient von $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$ dem Datenblatt entnommen.

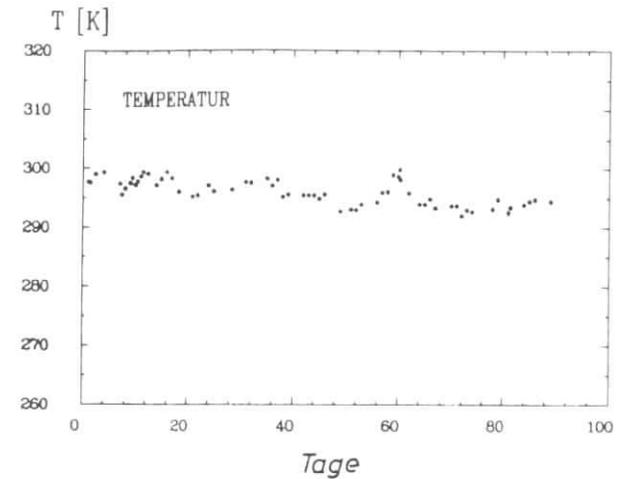


Abbildung 29. Temperaturverlauf während der Meßperiode

5.3.4 Diskussion

Die hier beobachtete kontinuierliche Pulshöhenabnahme bei einer täglichen Bestrahlung mit ca. 1.9 rad ist unerwartet. Sie deutet an, daß die Strahlenempfindlichkeit von langen BGO-Kristallen größer ist, als bisher angenommen. Auf Grund der Schätzung von [UPS 83] war bei Strahledosen von 0.9 - 3.5 rad/Tag ein asymptotischer Schaden von $\leq 1\%$ vorhergesagt worden.

Neue Dosismessungen von [WIN 84] an der LAT Position haben ergeben, daß, ohne weitere Abschirmmaßnahmen, am Strahlrohr eine Dosis von ca. 16 rad/Tag bei PETRA-Energien über 21 GeV erwartet werden kann. Diese Dosis reicht aus, um die Kristalle zu schädigen. Für die äußeren Kristalle des LAT ist zu erwarten, daß sie durch den Schutz der anderen Kristalle weniger geschädigt werden.

Es wird daher eine ständige Kalibration der einzelnen Kristalle des LAT mit einer Genauigkeit besser als 1% nötig werden, um:

- a) ständig eine genaue Energieeichung zu haben,
- b) Variationen der Kristalle untereinander auszugleichen.

5.4 ZUSAMMENFASSUNG

Getestet wurde die Strahlenresistenz von langen BGO-Kristallen bei niedrigen Strahledosen (40-85 rad). Es zeigt sich, daß BGO erheblich durch

die Bestrahlung geschädigt wird (Anfangsschaden 25-38 %). Die Kristalle erholen sich von ihrer Schädigung innerhalb von 10-30 Tagen wieder bis auf einen Restschaden von 0-13 %. Daß sich die Strahlenschäden von BGO auch bei kleinen Dosen akkumulieren, zeigt eine Langzeitbestrahlung eines BGO-Kristalls am PETRA Strahlrohr. Dabei war eine durchschnittliche Tagesdosis von 1.9 rad ausreichend, um einen Schaden von 8% ±1% nach 53 Tagen hervorzurufen. 20 Tage nach Ende der Bestrahlung hatte sich der Kristall auf 0% ±1% wieder erholt.

Allgemein ist bei einer Photodiodenauslese von BGO ein nicht so starker Schädigungseffekt zu erwarten. Die Schädigung liegt hauptsächlich in einer Minderung der Transmissionsfähigkeit des Szintillationslichts durch den Kristall. Die Minderung ist bei kurzen Wellenlängen am größten, worauf ein Photomultiplier empfindlicher reagiert als eine Photodiode.

Für den LAT bedeuten die Ergebnisse, daß die Schäden so groß sind und von Kristall zu Kristall unterschiedlich sein werden, daß eine ständige genaue Eichmöglichkeit der einzelnen Kristalle vorhanden sein muß.

5.5 LICHTSCHÄDIGUNG VON BGO

5.5.1 Einleitung

Die Schädigung von BGO-Kristallen durch Licht ist von [BOB 83] gemessen worden. Sie setzten einen 24 cm langen BGO-Kristall 180 sec dem Licht einer 60 W Wolframlampe aus. Es erfolgte eine ähnlich große Schädigung und ein gleicher Erholungsverlauf wie nach einer 300 rad Bestrahlung mit Photonen aus einer ^{60}Co Quelle. Dies läßt die Annahme zu, daß für die Strahlenschäden aus den beiden vorherigen Kapiteln und für Lichtschäden die gleichen Mechanismen im BGO-Kristall verantwortlich sind.

Hier wurde jetzt während der Erholungsphase eines vom Tageslicht geschädigten BGO-Kristalls dessen Energieauflösung und Uniformität gemessen. Dabei war das Ziel, Aussagen über die Abhängigkeit der Energieauflösung und der Uniformität von der Lichtausbeute (Schädigung) zu erhalten.

5.5.2 Versuchsbeschreibung

Die Untersuchung wurde an einem $1.5 \times 1.5 \times 20 \text{ cm}^3$ großen BGO-Kristall, geliefert vom 'Institute of Ceramics; Shanghai', durchgeführt. Er war in Tedlarfolie (200 BS 30WH) verpackt. Der weitere Versuchsaufbau, die Elektronik und die Durchführung waren identisch mit denen im ersten Teil

dieses Kapitels beschriebenen (vergl. Kap.: "Kurzzeitbestrahlung verschiedener BGO-Kristalle" auf Seite 41). Die Energieauflösung und die Uniformität wurden mit der Erholung des Kristalls im Abstand von einigen Tagen gemessen.

5.5.3 Ergebnisse

Die Erholung des Kristalls zeigt Abbildung 30 auf Seite 62. Die Meßpunkte sind auf Temperatur und Photomultiplierdrift korrigiert. Der Kristall befand sich schon zwei Tage unter Tageslicht, bevor der erste Meßwert aufgenommen wurde. Daher ist keine Angabe des Anfangsschadens möglich. Die Erholung entspricht dem Verlauf, der für die γ -Strahlung geschädigten Kristalle in Kap.: "Kurzzeitbestrahlung verschiedener BGO-Kristalle" auf Seite 41 gemessen worden ist. Damit entspricht sie ebenfalls dem von [BOB 83] gemessenen Verlauf und erhärtet die oben gemachte Annahme gleicher Schädigungsmechanismen im Kristall.

Die Energieauflösung (Zahl neben den Messpunkten) verbessert sich mit der Erholung des Kristalls bedingt durch die bessere Lichtausbeute. Der Fehler der Auflösung beträgt ±1% durch Ablesefehler.

Wie sich die Uniformität bei geschädigten Kristallen verhält, gibt Abbildung 31 auf Seite 62 wieder. Sie zeigt die Uniformität des Shanghai Kristalls während seiner Erholung vom Lichtschaden und die Uniformität des Crismatec Kristalls a) vor der ersten Bestrahlung und b) einen Tag nach Bestrahlungsende (vergl. Kap.: "Kurzzeitbestrahlung verschiedener BGO-Kristalle" auf Seite 41). Die Abbildungen geben folgendes Bild wieder:

- Die Uniformität verbessert sich mit der Lichtausbeute (aus Abbildung 30 auf Seite 62).
- Die Differenz ($\text{PH}_{\text{max}} - \text{PH}_{\text{min}}$) bleibt konstant.
- Die Form der Uniformitätskurve ändert sich nicht.

5.5.4 Diskussion

Zum Lichtschaden:

Auf Grund der Lichtschädigung von BGO müssen bei der Handhabung der Kristalle Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden. Bestrahlungsversuche von BGO mit schwachem Rotlicht ergaben keine Schädigung der Kristalle.

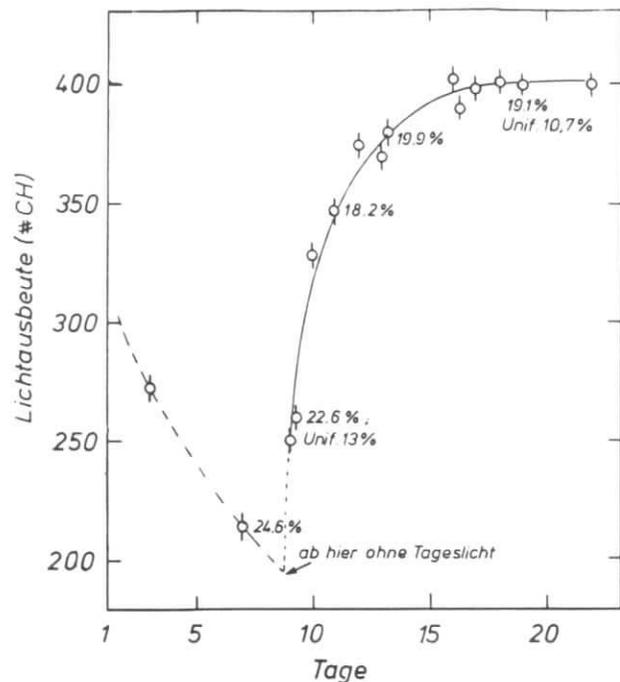


Abbildung 30. Erholung eines lichtgeschädigten BGO-Kristalls

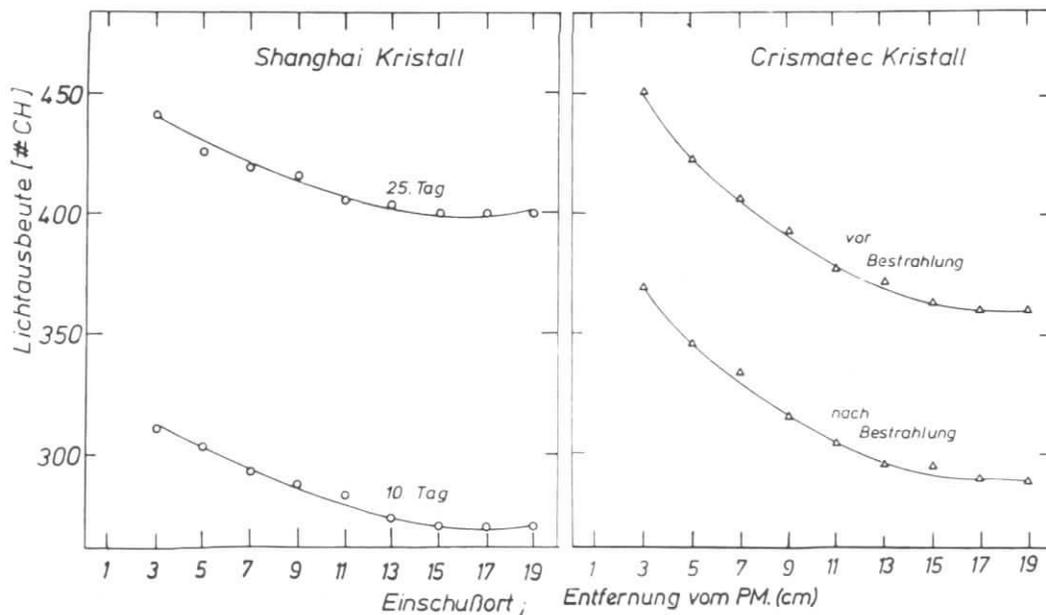


Abbildung 31. Uniformität bei geschädigten BGO-Kristallen
Strahlenresistenz von BGO

Daher wurden bei allen in dieser Arbeit beschriebenen Experimenten die Kristalle nur unter Rotlicht ausgepackt sowie dunkel gelagert¹⁷.

Zur Energieauflösung:

Wegen der Erhöhung der Lichtausbeute tritt mit der Erholung eine Verbesserung der Energieauflösung ein. Bei Strahlenschäden der BGO-Kristalle des CELLO-LAT wird dies ebenfalls der Fall sein. Die Energieauflösung der einzelnen Kristalle im Detektor kann jederzeit durch gemessene Bhabha-Ereignisse bestimmt werden. Dadurch können Änderungen der Auflösung ständig erfaßt und berücksichtigt werden.

Zur Uniformität:

Die in Abbildung 31 auf Seite 62 gezeigten Kurven wurden bei zwei unterschiedlichen Kristallzuständen aufgenommen: Bei dem Shanghai Kristall wurden die Kurven während seiner Erholung, beim Crismatec Kristall vor und nach einer starken Schädigung aufgenommen. Es ist kein Unterschied zwischen beiden Kristallen zu bemerken. Man kann daher davon ausgehen, daß eine Änderung der Uniformität nur von der jeweiligen Lichtausbeute des Kristalls abhängt.

Es ist $PH_{vor}(x)$ die Lichtausbeute an der Stelle x vor der Bestrahlung und PH_{nach} entsprechend nach der Bestrahlung. Gemessen wurde:

$$1) PH_{max\ vor}(x_1) - PH_{min\ vor}(x_2) = PH_{max\ nach}(x_1) - PH_{min\ nach}(x_2) = konst.$$

2) Die Form der Kurve blieb konstant.

Aus 1) und 2) kann allgemein geschlossen werden:

$$PH_{nach}(x) = PH_{vor}(x) - a$$

Und für die Uniformität U bei Bestrahlung gilt dann:

$$U = konst / (PH_{max\ vor}(x_1) - a)$$

mit $a=0$ ohne Strahlungsschaden, $a>0$ mit Schädigung.

Wie später in Kap.: "Eichung durch minimalionisierende Teilchen" auf Seite 68 gezeigt wird, muß a bei Detektorbetrieb (LAT) ständig bestimmt werden.

¹⁷ Neuere Messungen [STR 84/2] deuten an, daß die Schädigung hauptsächlich durch UV-Licht im Bereich 300 - 400 nm hervorgerufen wird.

6.0 EICHMÖGLICHKEIT EINES BGO DETEKTORS

Bei dem geplanten LAT im CELLO Detektor werden sich die Lichtausbeute, die Energieauflösung und die Uniformität der Kristalle durch die Strahlenschädigung und Erholung ständig ändern. Es wird daher, neben einer absoluten Energieeichung eine ständige Kontrolle der einzelnen BGO Kristalle auf ihre Energieauflösung und Uniformität notwendig sein.

6.1 EINLEITUNG

Für den CELLO - LAT stehen prinzipiell mehrere Eichmöglichkeiten zur Verfügung:

- Eichung durch ein in der Nähe der Kristalle angebrachtes Präparat. Die maximal erreichbare Energie ist ≈ 2 MeV
- Eichung durch minimalionisierende kosmische Müonen (Cosmics). Die deponierte Energie hängt dabei von der Dicke des einzelnen Kristalls ab. Im LAT waren Kristalle mit einer Dicke von ≈ 1.5 cm geplant, so daß die Eichlinie bei ca. 14 MeV liegen würde.
- Eichung mit Bhabha-Ereignissen. Die Energie hängt von der zur Verfügung stehenden Strahlenergie ab. (PETRA z.Z. 23.3 GeV)

Weitere Eichmöglichkeiten, wie z.B. Laserlicht durch Lichtleiter auf den Kristall zu geben (Transmissionsmessung) oder mit UV - Licht den Kristall zur Luminizenz anzuregen, sind, bedingt durch die engen Platzverhältnisse an der LAT Position, nicht weiter in Erwägung gezogen worden.

Im folgenden werden Versuche zur Eichung mit Präparat und mit kosmischer Strahlung beschrieben. Für Ergebnisse, die sich mit hochenergetischen Elektronen erzielen lassen (Bhabhas), sei auf die Arbeiten von [BIE 84 und RIE 84] verwiesen.

6.2 EICHUNG MIT EINEM γ -PRÄPARAT

Ein γ -Präparat kann während des Detektorbetriebes ständig eine Eichlinie liefern, wenn es sich in der Nähe der LAT Kristalle befindet. Besonders können damit auch Kurzzeitänderungen der Lichtausbeute im Bereich von wenigen Minuten überwacht werden, da dazu die Ereignisrate eines Präparates hoch genug ist. Es muß allerdings ein Präparat mit möglichst hoher Energie verwendet werden, um die Eichlinie vom Rauschen der Photodiode und des Verstärkers trennen zu können.

6.2.1 Material

Verwendet wurde für diesen Versuch ein BGO-Kristall der Firma SCHOLZ. Die Maße des Kristalls betragen $1 \times 1 \times 2$ cm³. Seine ¹³⁷Cs Energieauflösung mit Photomultiplier war FWHM 15%. Er war verpackt in Harshaw-Folie. Getestet wurde die Auslese der γ -Energien eines ⁸⁸Yt (0.89 MeV, 1.8 MeV) und eines ¹³⁷Cs (0.66 MeV) Präparates. Ausgelesen wurde mit einer Photodiode Hamamatsu S 1790 mit einer aktiven Fläche von 1 cm². CsJ(Tl) steht als Alternative zu BGO zur Diskussion. Daher wurde ebenfalls ein Test an einem CsJ(Tl)-Kristall durchgeführt. Die Ergebnisse des Tests sind im Anhang 1 aufgeführt.

6.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

An ein Ende des Kristalls wurde die Photodiode mit optischem Fett gekoppelt, der Rest des Kristalls war in Harshaw Folie verpackt. Kristall und Photodiode befanden sich in einer lichtdichten Abschirmbox. Das Photodiodensignal wurde über einen ladungsintegrierenden Vorverstärker (pre-amp; Canberra Modell 2003 BT) auf einen pulsformenden Hauptverstärker (shaping Amplifier; Canberra Modell 2022) gegeben. Das unipolare Signal des Hauptverstärkers gelangte zur Analyse auf einen Vielkanalanalysator, ein weiterer unipolarer Ausgang wurde zur Erzeugung eines Triggersignals für den Vielkanalanalysator verwendet. Zur Eichung konnte ein definierter Testpuls auf den Vorverstärker gegeben werden. Alle Versuche fanden bei Zimmertemperatur statt.

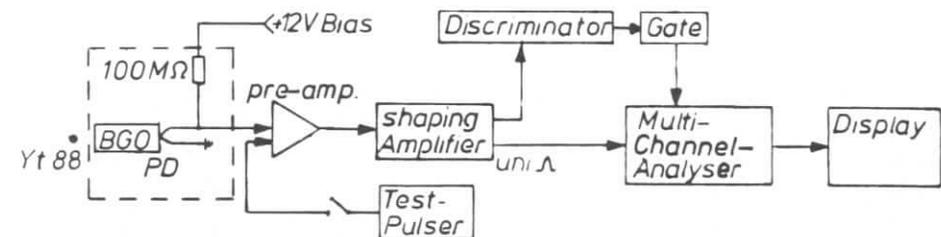


Abbildung 32. Elektronikaufbau: Eichung mit Präparat

6.2.3 Ergebnisse

Die Tab.12 zeigt die Meßresultate mit dem BGO-Kristall.

Präparat (keV)	Photopeak (e_0)	Rauschen $\gamma(e_0)$	Rauschäqu. $\gamma(\text{keV})$
Cs 137 (662)	2474 ± 300	736 ± 50	196 ± 13
Yt 88 (890)	3369 ± 300	"	"
Yt 88 (1800)	6818 ± 300	"	"

Tab.12 Ergebnisse: Eichung mit Präparat. Die angegebenen Fehler stammen aus den Ableseungenauigkeiten am Vielkanalanalysator.

Die Eichlinie und das Rauschen wurde auf Einheiten von e_0 normiert. Dies entspricht den von der Photodiode produzierten Photoelektronen bei Lichtempfang, bzw. durch Rauschen. Das Rauschen wurde aus der Breite des Testpulses bestimmt. Das Rauschäquivalent ergibt sich aus dem Rauschen, normiert auf die Energie der Eichlinie. Aus den Meßergebnissen geht hervor, daß auch bei niedrigen Energien eine lineare Beziehung zwischen Eichlinie und Photonenenergie besteht¹⁸. Abbildung 33 auf Seite 67 zeigt Photos der Energiespektren. Abb.(a) zeigt die beiden ⁸⁸Yt Linien bei 890 und 1800 keV. Abb.(b) zeigt die ¹³⁷Cs-Linie bei 662 keV. Diese Linie ist nicht klar vom Rauschen getrennt. Sie würde bei einer Schwächung der Lichtausbeute weiter im Rauschen untergehen und damit nicht mehr zur Eichung herangezogen werden können.

¹⁸ [BIE 84] weist eine Linearität der Lichtausbeute von BGO bei Elektronenbeschuß mit Energien zwischen 0.7 und 6 GeV nach.

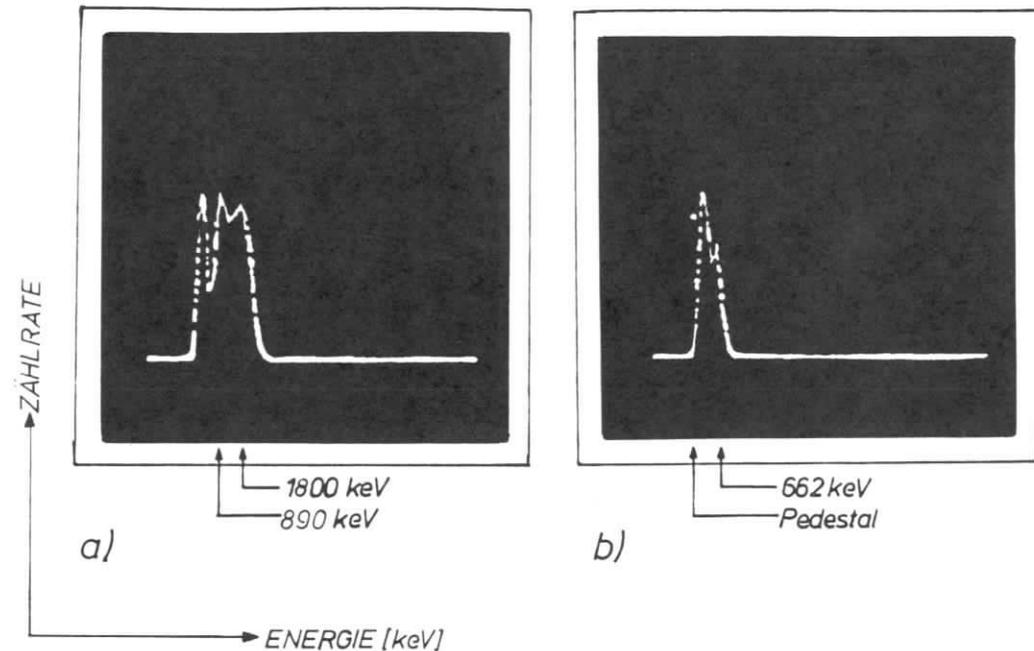


Abbildung 33. Energiespektren a) mit Yt 88 b) mit Cs 137

6.2.4 Diskussion

Für das Erzielen der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse war neben einer sehr rauscharmen Kombination von Verstärker¹⁹ und Photodiode auch ein BGO-Kristall mit hoher Lichtausbeute (kurzer Kristall) notwendig. Es ist bisher noch nicht gelungen, in diesem Energiebereich (bis 2 MeV) mit Photodiodeauslese an einem langen BGO-Kristall (LAT Geometrie), bei Zimmertemperatur, einen klar getrennten Photopeak aufzunehmen. Durch die häufigen Reflexionen des Szintillationslichtes in einem langen Kristall wird das Licht so abgeschwächt, daß keine ausreichende Menge zur Auslese gelangt. Erst bei Kühlung des Kristalls erhöht sich die Lichtausbeute so, daß eine Eichlinie erkennbar wird [DIE 83]. Für eine Kühlung wäre beim CELLO-LAT allerdings kein Platz vorhanden.

Es ist daher mit dem heutigen Entwicklungsstand von Photodioden und Verstärkern nicht möglich, die BGO-Kristalle im LAT mit einem γ -Präparat zu eichen.

¹⁹ Durch Wahl einer größeren Zeitkonstante läßt sich das Rauschen weiter unterdrücken.

6.3 EICHUNG DURCH MINIMALIONISIERENDE TEILCHEN

75% der kosmischen Teilchen sind minimalionisierende M μ onen. Ihr Einfallswinkel gehorcht einer $\cos^2\theta$ -Verteilung bei einer Ereignisrate von $1.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ in Meereshöhe. Ihre in BGO deponierte Energie beträgt 9.2 MeV/cm. Die Ereignisrate ist hoch genug, um tägliche Schwankungen der BGO-Kristalle zu erkennen. Die Kristalle im LAT sollten eine Dicke von durchschnittlich 1.5 cm bekommen, so daß der Eichpunkt, abhängig von der Kristalldicke, etwa bei 14 MeV liegt. Im CELLO-Detektor wird keine M μ glichkeit einer externen Triggerung des LAT auf M μ onendurchgange vorhanden sein. Daher sollte ein senkrechter Durchschuß durch übereinander liegende Kristalle für eine Energieeichung und für die Triggerung der Auslese verwendet werden k \ddot{u} nnen.

6.3.1 Material

Drei Kristalle von der Firma Harshaw wurden verwendet:

BGO	Gr \ddot{u} e	Cs Aufl. (FWHM)
Nr. 71	10x10x150mm 2	16.9%
Nr. 93	" "	18.2%
Nr. 97	" "	17.8%

Tab. 13 Kristalle im Eichtest

Verpackt waren alle Kristalle in Harshaw Folie. Jeder Kristall wurde durch eine Photodiode (Hamamatsu S 1790) ausgelesen. Um Einflüsse durch eine sich verändernde optische Kopplung zwischen BGO und Photodiode zu vermeiden, wurde die Kopplung mit einem Kleber bewerkstelligt. Da die Dioden eine leicht unebene Oberfläche haben, wurden diese zur Kontrolle erst auf ein gleich großes 2 mm dickes poliertes Plexiglasstuckchen geklebt. Bei gelungener Verbindung (keine Luftblasen) wurde das Plexiglas mit der Photodiode auf die Auslesefläche (kleine Endfläche) der BGO Kristalle geklebt.

6.3.2 Versuchsaufbau und Durchfurung

Die drei Kristalle mit den aufgeklebten Photodioden wurden in einer lichtdichten Metallbox gestapelt. Zwei Halterungen aus Styropor hielten die Kristalle senkrecht übereinander (vergl. Abbildung 35 auf Seite 70).

Die Photodioden wurden mit einer Vorspannung (Bias) von +12 V betrieben. Jede war an einen ladungsintegrierenden und pulsformenden Verstärker [PLU 82] angeschlossen. Aus dem Verstärkern gelangte ein unipolares Signal auf je einen linearen Verstärker. Je zwei BGO Signale wurden über eine Koinzidenz (AND) als Trigger verwendet. Das dritte Signal wurde zur Auswertung auf einen Vielkanalanalysator (MCA) gegeben. Abbildung 34 zeigt den Elektronikaufbau.

Bei einem Durchgang eines M μ ons durch die beiden zur Triggerung verwendeten Kristalle bestand eine hohe Wahrscheinlichkeit, daß auch der dritte Kristall von diesem M μ on getroffen wird. Somit bestand die M μ glichkeit, jeden Kristall auszulesen, wobei die jeweils anderen zur Triggerung dienten.

Auf jeden Verstärker konnte zur Eichung des Signals ein definierter Testpuls gegeben werden.

Die Temperatur wurde während des gesamten Versuchs ständig von einem Temperaturschreiber aufgezeichnet. Die Meßergebnisse wurden auf die über den jeweiligen Meßzeitraum von ca. 24 St. gemittelte Temperatur korrigiert.

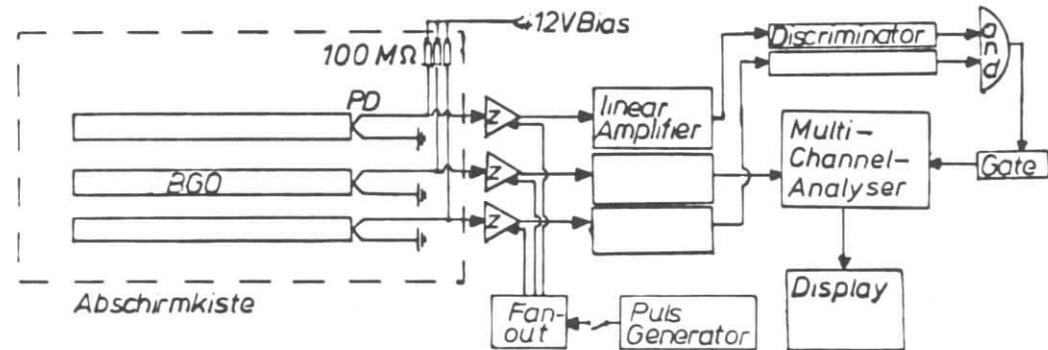


Abbildung 34. Elektronik: Eichung durch Cosmics

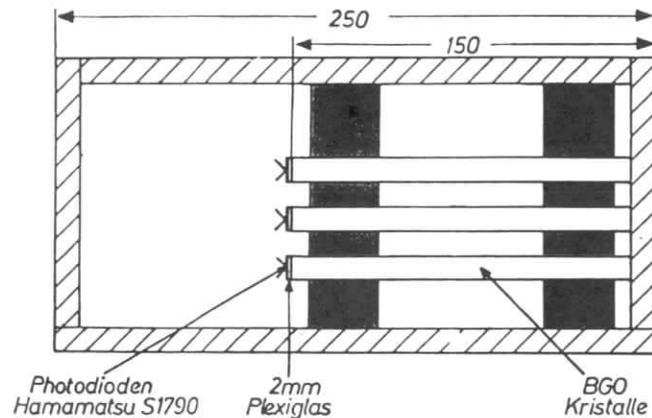
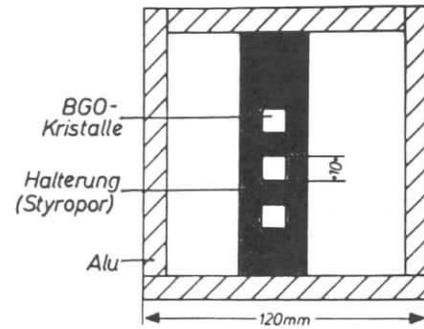


Abbildung 35. Versuchsaufbau: Eichung durch Cosmics

6.3.3 Ergebnisse

Abbildung 36 auf Seite 72 zeigt ein Photo des Energiespektrums für den mittleren Kristall. Zu erkennen ist neben einem kleinen Rauschpeak beim Pedestal eine typische Landauverteilung für minimalionisierende Teilchen. Die Einträge beim Pedestal entstehen durch Triggersignale, ohne daß der Kristall durch ein Müon getroffen wurde.

Das Cosmic-Signal war bei allen Kristallen gut vom Rauschen getrennt. Die Energieauflösung betrug bei dem mittleren Kristall $\sigma=16.9 \pm 1\%$, wobei das Rauschen einen großen Anteil an der Breite des Cosmic-Eichlinie hat.

Die hier gemessene Energieauflösung von $16.9 \pm 1\%$ läßt sich noch weiter verbessern:

1. Durch dickere Kristalle wird die deponierte Energie größer und die Lichtausbeute höher sein.

2. Das Rauschen ist bei niedrigen Energien der Hauptverursacher der Energieauflösung und läßt sich durch bessere Verstärker und Photodioden noch verbessern.
3. Durch das Plexiglasstückchen zwischen BGO und Photodiode geht ein Teil des Szintillationslichtes verloren. Eine direkt auf den Kristall geklebte Photodiode wird daher mehr Licht sehen und so die Auflösung verbessern²⁰
4. Die Temperatur variierte innerhalb des Zeitraumes zur Aufnahme einer Cosmic-Verteilung um $\pm 1^\circ\text{C}$. Dies entspricht einer Verschlechterung der Auflösung von ca. 1 % gegenüber einer stabilen Temperatur.

Tab.14 zeigt die Ergebnisse der Messungen aller drei Kristalle.

Kristall	Position	Signal (e_0)	Aufl. (σ)	Rauschen σ (e_0)
Nr 97	oben	6520±250	-	675±30
Nr. 71	Mitte	6830± "	16.9%	735± "
Nr. 93	unten	6002± "	-	642± "

Tab.14 Ergebnisse: Eichung durch Cosmics. Der Fehler ist bedingt durch Ableseungenauigkeiten am Vielkanalanalysator von ± 1 Kanal.

²⁰ Vergleichende Messungen an einem BGO-Kristall ergaben eine um 1.6-fach höhere Lichtausbeute ohne Plexiglas zwischen Photodiode und BGO.

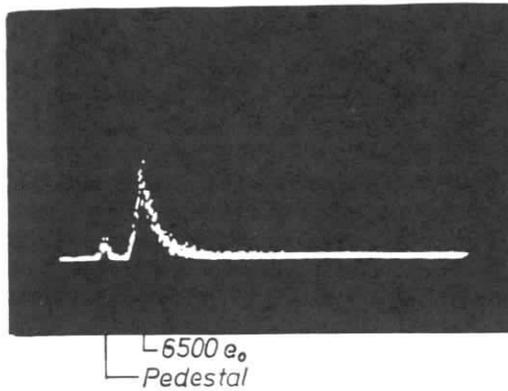


Abbildung 36. Energiespektrum der Cosmics

6.3.4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, daß eine ständige Kontrolle der BGO-Kristalle durch Cosmics auch bei langen Kristallen (LAT Geometrie) möglich ist. Durch das unabhängige Triggern mit den jeweils benachbarten Kristallen läßt sich das Grundrauschen (beim Pedestal) weitgehend unterdrücken.

Änderungen der Energieauflösung der BGO-Kristalle (z.B. durch Bestrahlung) lassen sich durch die Energieauflösung der Cosmic-Eichlinie beobachten und durch die in Kap: "Zur Energieauflösung" auf Seite 21 gegebene Formel über einen weiten Energiebereich berechnen. Weiterhin kann die Energieauflösung durch aufgenommene Bhabha-Ereignisse ständig kontrolliert werden.

Zwei wichtige Aspekte für die absolute Energieeichung der einzelnen BGO-Kristalle müssen noch berücksichtigt werden:

1) Die Schrägdurchschüsse:

Einträge zu höheren Energien sind durch Schrägdurchschüsse durch den Kristall zu verzeichnen. Aus diesen Grund wird das Maximum der Energieverteilung nicht genau bei (in diesem Fall) 9.2 MeV liegen, sondern geringfügig zu höheren Energien verschoben sein.

Es gilt für das Maximum E des gemessenen Cosmic-Energiespektrums:

$$E = 1/N \int \int L (1/\cos\vartheta) \cos^2\vartheta dF d\Omega$$

Dabei ist:

L eine Landauverteilung mit einem Maximum bei 9.2 MeV/cm,

l die Dicke des Kristalls und somit $l/\cos\vartheta$ die Weglänge der Cosmics durch den Kristall,

$d\Omega = d\cos\vartheta d\varphi$ der Raumwinkel und F die Fläche des obersten Triggers.

$1/N$ ist ein Normierungsfaktor der aus: $\int \int \cos^2\vartheta dF d\Omega = N$ folgt.

Die Grenzen der Integrale sind Funktionen der Variablen und lassen sich durch eine gegebene Geometrie berechnen.

Aus dieser Betrachtung wird ersichtlich, daß sich die genaue Energie der Cosmic-Eichlinie mit den Schrägdurchschüssen berechnen läßt.

2) Uniformität

Durchgänge von kosmischen Teilchen durch den Kristall erfolgen gleichverteilt über seine gesamte Länge. Bei einem von vorne in den Kristall fliegenden Elektron (Photon) liegt dagegen der Schauerschwerpunkt im ersten Drittel des Kristalls. Daher wird eine schlechte Uniformität des Kristalls eine absolute Energieeichung durch Cosmics verfälschen. Abbildung 37 zeigt zwei Beispiele:

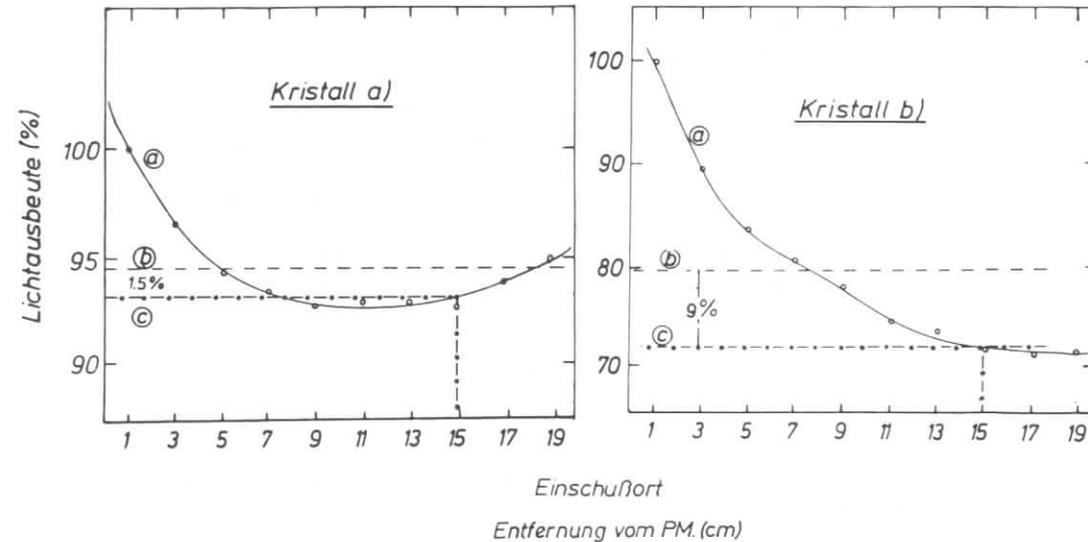


Abbildung 37. Eichfehler durch schlechte Uniformität: (a) Maximum bei kollimiertem Photon-Einschuß von der Seite, (b) Erwartetes Maximum bei gleichverteiltem Einschuß über die Länge, (c) Maximum bei Schauerschwerpunkt im ersten Drittel.

Alle drei Kurven in der Abbildung gelten für die gleiche im Kristall deponierte Energie:

- Die Uniformität U (Kurve (a)) ist begründet in Lichtführungseffekten und Szintillationsfähigkeit in bestimmten Kristallpositionen und somit energieunabhängig.
- Auf Grund des linearen Zusammenhangs zwischen Energie und Lichtausbeute kann mit dem gemessenen Wert bei gleichverteiltem Einschub die Lichtausbeute jeder beliebigen Energie berechnet werden (c).
- Der Schauerschwerpunkt verschiebt sich mit $\ln E$ und bleibt somit für einen weiten Energiebereich im ersten Drittel eines 20 cm langen BGO-Kristalls.

Auf den Unterschied in der Lichtausbeute zwischen Schauerteilchen und kosmischen Teilchen kann korrigiert werden:

Die Position, an der ein Schauer das Maximum an Licht erzeugt, läßt sich berechnen:

Die Schauerverteilung hat ein Maximum nach wenigen Strahlungslängen und einen langen Schwanz zu höheren Strahlungslängen. Aus Monte-Carlo-Rechnungen ist die Funktion der Schauerverteilung $f(E,x)$ bekannt. Aus den oben beschriebenen Uniformitätsmessungen ist auch die Uniformitätsfunktion $g(x)$ bekannt. Die ortsabhängige Lichtausbeute $L(x)$ wäre dann (bei bekannter Energie):

$$L(x) = f(x) g(x)$$

Mit:

$$dL(\hat{x})/dx = 0 = f(\hat{x}) g'(\hat{x}) + f'(\hat{x}) g(\hat{x})$$

(wobei L maximal an der Stelle \hat{x}) läßt sich die gesuchte Position \hat{x} berechnen.

Die Lichtausbeute über den gesamten Kristall (Länge x) ist:

$$L = \int L(x) dx = \int f(x) g(x) dx$$

Bei gleichverteiltem (Cosmic) Einschub ist $f(x) = \text{konstant}$. Mit der Berechnung der Lichtausbeute für Schauerteilchen L_{Schauer} und für Cosmics L_{Cosmic} kann auf den Unterschied zwischen L_{Cosmic} und L_{Schauer} korrigiert werden. Es gilt:

$$L_{\text{Schauer}}(E) = A(E) L_{\text{Cosmic}}(E)$$

Um die entsprechende Korrektur $A(E)$ durchführen zu können, muß L_{Schauer} durch z.B. Bhabhamessungen über einen weiten Energiebereich bekannt sein. Allerdings ist A ebenso wie L_{Cosmic} und L_{Schauer} auch eine Funktion von $g(x)$, und $g(x)$ ändert sich bei Bestrahlung der Kristalle. Aus Kap.: "Lichtschädigung von BGO" auf Seite 60 ist bekannt:

$$g(x) \rightarrow g_1(x,a) = PH_{\text{vor}}(x) - a$$

a läßt sich mit Hilfe der Änderung der Lichtausbeute aus der Cosmic-Eichung ständig berechnen mit:

$$L_{\text{Cosmic}} = \text{konst.} \cdot \int g_1(x,a) dx$$

Somit ist a und damit auch A zu berechnen und es wäre eine genaue Eichung möglich.

Leider ist nicht auszuschließen, daß sich die Form von $g(x)$ ändert, wenn ein Kristall über seine Länge ungleichförmig bestrahlt wird. Dies wird beim LAT wegen der ortsabhängigen Strahlung wahrscheinlich sein. Dann gilt:

$$g(x) \rightarrow g_2(x,a) = E(PH_{\text{vor}}(x) - a(S(x)))$$

$S(x) = \text{ungleichförmige Bestrahlung über die Kristalllänge } x$
 $a(S(x))$ ist im zusammengebauten Detektor nicht zu messen!

Damit wird eine genaue Eichung mit kosmischen Teilchen nur im Zusammenhang mit einer Eichung durch Bhabha-Ereignisse möglich. Nur mit den Angaben $L_{\text{Cosmic}}(E)$ und $L_{\text{Schauer}}(E)$ läßt sich die Korrekturfunktion $A(E, g_2)$ ständig berechnen.

Der Fehler, der entsteht, wenn an Stelle von g_2 die Funktion g_1 zur Berechnung von A verwendet wird, kann abgeschätzt werden, wenn bekannt ist, welchen Einfluß eine ungleichförmige Bestrahlung auf die Uniformitätsfunktion der Kristalle hat. Zur Zeit sind daraufhin noch keine Untersuchungen erfolgt.

6.4 ZUSAMMENFASSUNG

Untersucht wurde die Möglichkeit einer Eichung der einzelnen BGO-Kristalle im geplanten LAT durch ein ständig in der Nähe der Kristalle angebrachtes Präparat und durch minimalionisierende kosmische Müonen. Die Eichung mit einem Präparat ist bedingt durch das hohe Rauschen von Vorverstärker und Photodiode nicht möglich. In langen BGO-Kristallen sind die Lichtsignale bei Zimmertemperatur von Energien ≤ 2 MeV mit Photodiode nicht zu erkennen.

Dagegen ist eine Eichung durch kosmische Müonen gut möglich. Im LAT können als unabhängige Trigger senkrecht übereinander liegende Kristalle

verwendet werden. Damit läßt sich das Grundrauschen fast vollständig unterdrücken. Bei einer absoluten Energiekalibrierung müssen für das Maximum der Energieverteilung zwei wichtige Punkte beachtet werden:

1. Schrägdurchschüsse durch den Kristall verschieben das Maximum zu etwas höheren Energien. Diese Einflüsse lassen sich, bei Kenntnis der Lage der Trigger und damit der Wegstreckenverteilung der Müonen durch den Kristall, berechnen.
2. Eine schlechte Uniformität der Kristalle verfälscht die Energieeichung durch Müonen. Bei einem durchschnittlichen Kristall mit einer Uniformität von $\leq 14\%$ ist ein systematischer Fehler von $\leq 2\%$ zu erwarten. Dieser Fehler läßt sich nur berücksichtigen, wenn vorher die Uniformität der Kristalle ausgemessen worden ist. Änderungen der Uniformität durch eine ungleichförmige Bestrahlung der LAT-Kristalle verfälschen ebenfalls die Eichung mit kosmischen Müonen. Das kann nur durch einen ständigen Vergleich zwischen Cosmic-Eichung und Bhabha-Ereignissen korrigiert werden.

7.0 KONSTANZTEST

7.1 EINLEITUNG

Durch die Strahlenschäden werden die BGO-Kristalle im LAT im Laufe der Zeit ihre Lichtausbeute ändern (vergleiche Kapitel 5). Weitere Einflüsse, die die Konstanz von BGO, Photodiode und Verstärker beeinflussen könnten, sind:

- Veränderungen der Ausleseelektronik, insbesondere des Verstärkersystems
- Veränderungen der Photodioden (z.B. Quantenausbeute)
- Veränderungen der optischen Kopplung von Photodiode und BGO
- Veränderungen durch die Verpackung der BGO's
- Kristallveränderungen, die nicht auf Strahlenschäden zurückzuführen sind
- Das Verhalten von BGO-Kristallen bei Temperaturveränderung ist mit $\approx -1.2 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ bekannt. Der CELLO-LAT sollte durch ein Klimasystem auf einer konstanten Temperatur gehalten werden, um die Reaktionen der Kristalle auf Temperaturschwankungen gering zu halten.

Festzustellen war, welche der oben genannten Einflüsse im Laufe eines langen Zeitraumes auftreten und somit Auswirkungen auf die Auslese der LAT-Kristalle haben könnten.

7.2 MATERIAL, VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG

Für diesen Test wurden die gleichen Materialien und der gleiche Versuchsaufbau wie der in Kap: "Eichung durch minimalionisierende Teilchen" auf Seite 68 beschriebene verwendet (vergleiche auch Abbildung 32 auf Seite 65)

Ausgelesen wurde der mittlere Kristall, der obere und untere dienten zur Triggerung der Auslese. Aufgenommen wurde die Eichlinie bei Durchgang von Cosmics durch den BGO-Kristall. Gemessen wurde das Maximum der Verteilung von jeweils ca. 2500 Einträgen, über einen Zeitraum von 136 Tagen. Vor jeder Messung wurde der Verstärker durch einen definierten Testpuls geeicht. Während der Aufnahme der jeweils 2500 Einträge lief ständig ein Temperaturschreiber mit. Das Maximum der Eichlinie wurde

auf die über den Meßzeitraum von jeweils ≈ 24 Stunden gemittelte Temperatur korrigiert.

7.3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In Abbildung 38 auf Seite 79 (a) ist das Maximum der Eichlinie von jeweils ca. 2500 Einträgen gegen die Versuchsdauer aufgetragen. Das Maximum (Cosmic-Signal) ist dabei jeweils auf Temperatur und auf Elektroneinflüsse korrigiert.

In Abbildung 39 auf Seite 79 ist die Häufigkeit der gemessenen Maxima mit (1) und ohne (2) Testpulseichung des Verstärkers aufgetragen, um die Elektroneinflüsse zu verdeutlichen. Deutlich ist eine Verschmälerung der Verteilung mit Testpulseichung zu erkennen.

Abbildung 38 auf Seite 79 (b) zeigt den Temperaturverlauf über der Meßperiode (gemittelte Werte).

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse:

1. Die Ausleseelektronik unterliegt Schwankungen, wobei keine systematischen Effekte nachzuweisen waren. Dem ist durch eine ständige Kontrolle der Ausleseelektronik mit einem definierten Testpuls zu begegnen.
2. Die verbleibende Breite ($\sigma = 0.81\%$) in der Häufigkeitsverteilung der Maxima ist erklärbar durch Ablesefehler bei der Messung sowie durch eine ungenaue Temperaturkontrolle. Es wurde nicht die Kristalltemperatur, sondern die Umgebungstemperatur gemessen.
3. Außer den oben genannten Punkten wurden keine weiteren Effekte festgestellt. Auch die Testpulsbreite (Rauschen von Photodiode + Verstärker) blieb über den gesamten Versuchszeitraum konstant bei $735 \pm 40 e_0$.
4. Weitere Effekte, die innerhalb von $\sigma = 0.81\%$ liegen, können nicht ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse zeigen, daß bei einer ständigen Verstärkereichung mit Testpulsen ein BGO-Detektor mit Photodiodenauslese über einen langen Zeitraum auf besser als 1% konstant gehalten werden kann. Dann können auch die Strahlenschäden der BGO-Kristalle im LAT mit einer Eichung aus Cosmics und Bhabhas mit einer Ungenauigkeit von weniger als 1% genau bestimmt werden. Die Strahlenschäden verlieren damit ihre negative Bedeutung für einen BGO-Detektor in der Hochenergiephysik.

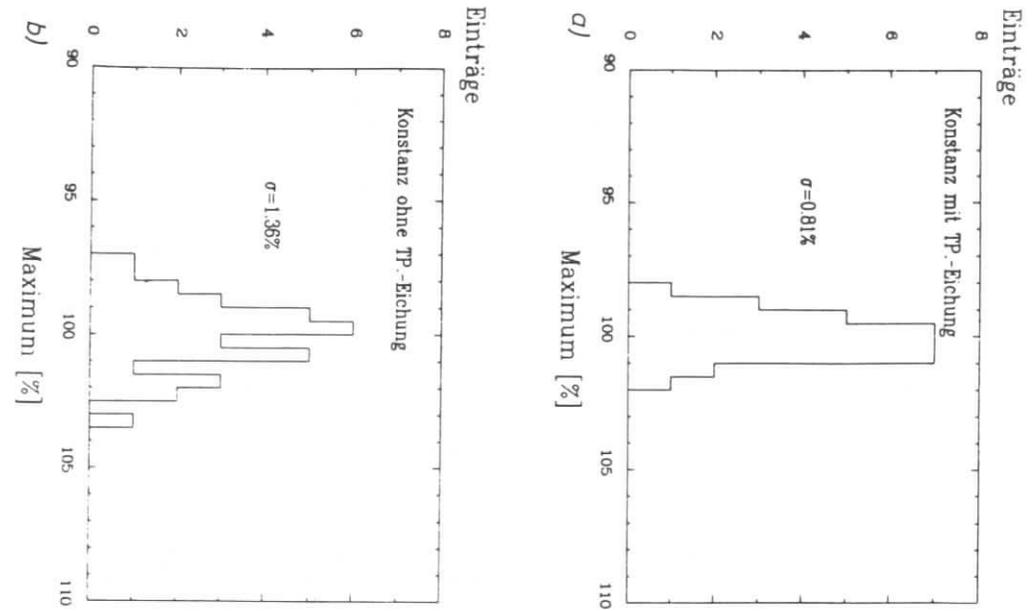


Abbildung 38. (a) Zeitlicher Verlauf der Eichlinie b) Temperatur

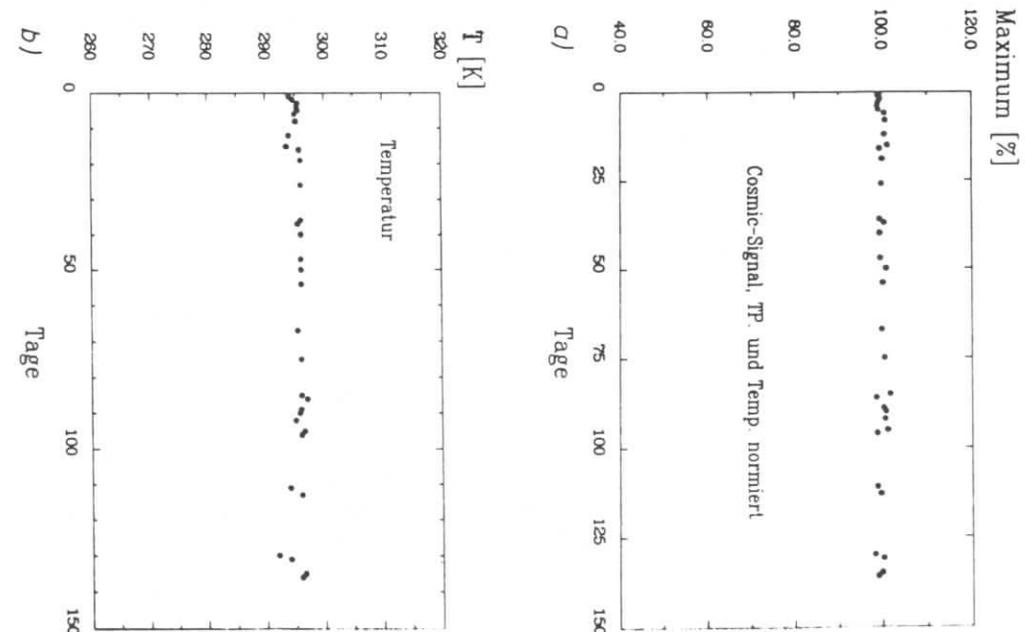


Abbildung 39. Häufigkeitsverteilung der gemessenen Maxima: (a) mit Testpulseichung (b) ohne Testpulseichung

8.0 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden einige Untersuchungen an BGO-Kristallen vorgestellt. Sie hatten zum Ziel, verschiedene Eigenschaften eines kompletten BGO Detektors (wie der zu Beginn dieser Arbeit geplante LAT des CELLO Detektors) zu erkennen und zu optimieren. Um die Ergebnisse der Untersuchungen darzustellen, soll an dieser Stelle zusammengefaßt werden, wie ein solcher Detektor auf Grund der obigen Messungen auszusehen hat:

Es war geplant, den CELLO-LAT aus turmförmigen BGO Kristallen zu bauen, die mit Photodioden ausgelesen werden. [BIE 84 und RIE 84] fordern zur Verbesserung der Orts- und Energieauflösung, daß die einzelnen Kristalle einen möglichst geringen Abstand voneinander haben. Weiterhin müssen die Kristalle optisch voneinander isoliert sein, um ein Übersprechen des Szintillationslichtes zu vermeiden. Beide Forderungen erfüllt eine entsprechend dünne Verpackung, die zusätzlich noch die Aufgabe erhält, durch gute Reflexionseigenschaften möglichst viel Szintillationslicht im Kristall zu halten und zur Auslese zu bringen. Die Anforderungen werden von den bisher untersuchten Folien von einer dünnen mit Titanoxyd bemalten Mylar-Folie am besten gelöst.

Die Photodiodenauslese der Kristalle wird das Problem eines erhöhten elektronischen Rauschens mit sich bringen. Das Rauschen wird das minimal nachweisbare Signal (=Teilchenenergie) begrenzen. Um diese Grenze möglichst niedrig zu halten, sollte bei einem optimalen Signal-zu-Rausch-Verhältnis ausgelesen werden. Der Optimierungsprozeß erfolgte über die von Photodioden überdeckte Auslesefläche der BGO-Kristalle. Durch eine größere aktive Fläche gelangt mehr Szintillationslicht zur Auslese, gleichzeitig erhöht sich das Rauschen. Für turmförmige Kristalle mit einer Länge von 15-20 cm und einer Auslesefläche von 1-2 cm² ist eine Überdeckung der Auslesefläche von 50% optimal, wenn der Rest der Fläche mit gut reflektierender Folie abgedeckt wird.

Das größte Problem eines BGO Detektors in Strahlrohrnähe wird die Strahlenbelastung der Kristalle sein. An der LAT Position ist eine Dosis von 10²-10³ rad/Monat zu erwarten. Die Kristalle verringern ihre Transmissionsfähigkeit des eigenen Szintillationslichtes schon bei geringen Dosen. Es wurde bei einer durchschnittlichen täglichen Dosis von 1.9 rad nach 53 Tagen eine Verringerung der Lichtausbeute um 8% festgestellt. Diese Messung erfolgte mit Photomultiplier. Bei einer Auslese mit Photodioden wird der Effekt der Schädigung wegen der Wellenlängenempfindlichkeit der Photodiode geringer sein. Weitere Effekte wurden festgestellt:

- Die Schädigung ist verbunden mit einer Verschlechterung der Energieauflösung und der Uniformität der Kristalle.
- Nach Beendigung der Bestrahlung erholen sich die Kristalle mit drei verschiedenen Zeitkomponenten: 1) einige Stunden, 2) einige Tage, 3) wenige Wochen. Vor allem die kurzen Erholungszeiten werden im laufenden Detektorbetrieb zu kurzzeitigen Schwankungen der Lichtausbeute führen.
- Die Größe der Schädigung und die Erholungszeiten variieren von Kristall zu Kristall.

Wenn möglich sollten aus diesen Gründen die BGO-Kristalle des LAT gut gegen Strahlung aus dem Strahlrohr abgeschirmt sein. Da aus Platzgründen im CELLO-Detektor keine ausreichende Abschirmung möglich ist, bedeutet dies, daß eine ständige Eichung jedes einzelnen BGO Kristalls im LAT notwendig wird.

Eine Eichung der Kristalle ist möglich mit einer Kombination aus Messungen mit minimalionisierenden kosmischen Müonen und aus aufgenommenen Bhabha-Ereignissen. Die Zylindergeometrie des LAT bietet eine interne Triggermöglichkeit für Müonendurchgänge an: Den Durchschuß eines Müons durch mehrere senkrecht übereinander liegende Kristalle. Je einer der Kristalle wird nicht mit in die Triggerbedingung mit einbezogen und steht dann zur Auswertung zur Verfügung.

Eine zeitliche Konstanz des Auslesesystems BGO mit Photodiode und dem dazugehörigen Verstärker von $\sigma=0.81\%$ wurde über einen Zeitraum von 136 Tagen gemessen. Innerhalb dieser Fehlerangabe sind Ablesefehler und Temperatureinflüsse enthalten. Damit erscheint eine Eichung jedes BGO-Kristalls im LAT mit einer Genauigkeit von besser als 1% möglich.

Im Zusammenhang mit den Arbeiten von [BIE 84 und RIE 84] läßt sich abschließend sagen, daß ein BGO Detektor mit Photodiodenauslese den Anforderungen an einen guten Large Angle Tagger (LAT) vollauf gerecht wird.

ANHANG 1

Es werden einige vergleichende Messungen an einem Thallium dotierten Cäsiumjodid-Kristall (CsJ(Tl)) vorgestellt. Der Anhang 1 gliedert sich in drei Teile:

A1.1 Allgemeines über CsJ(Tl)

A1.2 Auslese von CsJ(Tl)-Kristallen mit Photodiode

A1.3 Strahlenresistenz von CsJ(Tl)

A1.1 Allgemeines

CsJ(Tl) ist ein Einkristall und steht als Alternative zu BGO zur Diskussion. Es ist ebenfalls ein lichtstarkes Schauerematerial, das sich zur Auslese mit Photodioden eignet. Ein Vergleich beider Szintillatorkristalle ist in Tab.15 (S. 83) wiedergegeben.

Eigenschaften	BGO	CsJ
kalorimetrische Eigenschaften		
Strahlungslänge X_0	1.12 cm	1.86 cm
Moliere-Radius	2.24 cm	3.8 cm
Kritische Energie E_k	10.5 MeV	10.4 MeV
$dE/dx(\min)$	9.2 MeV/cm	5.6 MeV/cm
hadronische Absorptionsl. Λ	23 cm	36 cm
optische Eigenschaften		
Brechungsindex n	2.13	1.8
Emission λ_{\max}	480 nm	550 nm
Abklingzeit	300-350 ns	1000 ns
Anstiegszeit	20 ns	50 ns
Lichtausbeute mit Photomultiplier	$\approx 10\%$	45 %
Temperaturgradient der Lichtausbeute	$\approx -1.2\%/^{\circ}\text{C}$	$\approx -0.3\%/^{\circ}\text{C}$
allgemeine Eigenschaften		
Dichte ρ	7.13 g/cm ³	4.41 g/cm ³
Härte	5 MOHS	2 MOHS
mechanische Stabilität	wie Glas	sehr gut
chemische Stabilität	gut	H ₂ O-löslich
Strahlenresistenz	vergl. Kap 5.0	vergl. A1.3

Tab. 15 Vergleich von BGO und CsJ

Die hohe Lichtausbeute (45 % von NaJ bei Photomultiplerauslese) und die den Photodioden gut angepaßte Emissionslinie macht CsJ(Tl) für eine Photodiodenauslese interessant. Wegen der guten Anpassung der Emissionslinie an die Empfindlichkeit der Photodiode ist zu erwarten, daß sich die Lichtausbeute von CsJ(Tl) gegenüber BGO bei Photodiodenauslese noch verbessern wird.

Nachteilig wirkt sich die größere Strahlungslänge von CsJ(Tl) aus. Sie hat zur Folge, daß ein CsJ(Tl)-Kalorimeter mit entsprechenden Strahlungslängen deutlich größer ausfallen wird.

A1.2 Photodiodenauslese von CsJ(Tl)

Die höhere Lichtausbeute und bessere Anpassung der Emissionslinie an Photodioden führt dazu, daß auch Energien < 1 MeV mit langen CsJ(Tl)-Kristallen und Photodiodenauslese nachgewiesen werden können.

Dazu wurde ein Test gemacht:

Verwendet wurde ein $1.5 \times 1.5 \times 10$ cm³ CsJ-Kristall der Firma Korth. Er war allseitig poliert und in weißer Scotch-Farbfolie verpackt. Seine ¹³⁷Cs (662 keV) Auflösung betrug mit Photomultiplier FWHM=9.6 %. Auf die Auslesefläche des Kristalls wurde eine Photodiode S 1790 von Hamamatsu mit optischem Fett gekoppelt. Ausgelesen wurden 662-keV-Photonen eines ¹³⁷Cs Präparates (10 μ Ci). Der Einschub erfolgte von vorne, 5 cm vom Kristallende entfernt. Der Elektronikaufbau war identisch mit dem im Kap.: "Eichung mit einem γ -Präparat" auf Seite 64 beschriebenen (vergl. Abbildung 32 auf Seite 65).

Die Ergebnisse: Das Signal der Photodiode bei 662-keV-Photonen betrug $5400 \pm 300 e_0$, das Rauschen betrug $\sigma = 700 \pm 30 e_0$, das entspricht einem Rauschäquivalent von $\sigma = 86$ keV. Es wurde eine Energieauflösung von $\sigma = 14.5 \pm 1$ % gemessen. Abbildung 40 zeigt ein Photo der Energieverteilung.

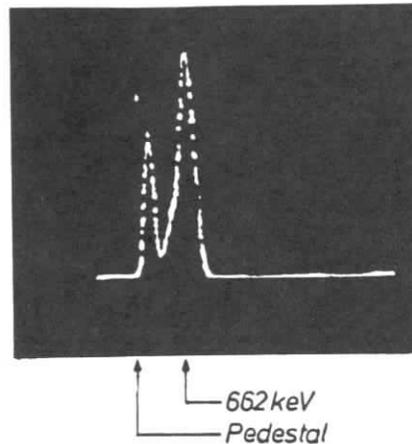


Abbildung 40. 662-keV-Eichlinie bei einem CsJ(Tl)-Kristall

Der auf dem Photo erkennbare Peak neben den Pedestal ist das vom Diskriminator reduzierte Grundrauschen. Mit diesem Ergebniss erfüllt sich die Behauptung, daß auch an langen CsJ(Tl)-Kristallen Energien < 1 MeV aufgelöst werden können.

A1.3 Strahlenresistenz von CsJ(Tl)

Wenn CsJ(Tl) BGO als Schauermaterial ersetzen soll, so muß auch seine Strahlenresistenz überprüft werden. Um dies zu tun, lief in dem in Kap.: "Kurzzeitbestrahlung verschiedener BGO-Kristalle" auf Seite 41 beschriebenen Test ein $1.5 \times 1.5 \times 10$ cm³ CsJ-Kristall der Firma Korth mit.

Der Kristall war allseitig poliert und bis auf seine Auslesefläche in 50 μ dicke Tedlar-Folie (200 BS 30WH) verpackt. Er hatte eine ¹³⁷Cs Auflösung von FWHM=9.8 % (Photomultiplerauslese) und war von guter optischer Qualität.

Zwei Bestrahlungen mit einer starken ¹³⁷Cs-Quelle wurden vorgenommen:

1. Die erste mit 41.7 rad in 24 Stunden
2. Die zweite mit 85.1 rad in 24 Stunden

Die Dosis bezieht sich auf TLDs, die an der Vorderseite des Kristalls angebracht waren.

Die Lichtausbeute wurde mit der 662-keV-Linie eines ¹³⁷Cs-Präparat (10 μ Ci) beobachtet. Abbildung 41 auf Seite 86 zeigt, wie sich die Lichtausbeute des Kristalls im Laufe der Zeit und nach den Bestrahlungen ändert. Dabei ist das Signal auf Schwankungen des Photomultipliers und auf Temperaturschwankungen korrigiert. Es wurde ein Temperaturgradient von $-0.3\%/^{\circ}\text{C}$ angenommen²¹.

Die erste Bestrahlung wurde 59 Tage nach Beginn der Messungen gestartet, die zweite nach 21 weiteren Tagen. Die Lichtausbeute konnte wegen eines sehr intensiven Nachleuchtens erst 16 Stunden nach Ende der Bestrahlung aufgenommen werden. Weitere Ergebnisse, die in der Abbildung zu erkennen sind:

1. Vor den Bestrahlungen ist ein kontinuierlicher Anstieg der Lichtausbeute von ≈ 4 %/Monat zu verzeichnen. Aus diesem Grund wurde der Kristall nicht sofort bestrahlt, sondern erst dieses Verhalten untersucht. Auszuschließen sind demzufolge: Einflüsse
 - a) der Elektronik und des Photomultipliers,
 - b) der Kopplung mit optischem Fett zwischen Multiplier und Kristall,
 - c) des Verpackungsmaterials,
 - d) der Temperatur und

²¹ Temperaturgradient aus [FAR 78]. [GRA 84] gibt einen Gradienten von $+0.6\%/^{\circ}\text{C}$ an. Da die Temperatur über den Meßzeitraum im wesentlichen konstant blieb, ändert sich durch einen ungenauen Gradienten nichts in den Ergebnissen.

e) durch Rotlichtbestrahlung.

Eine Erklärung für dieses Verhalten wäre, daß der Kristall im Herstellerwerk durch Raumlicht geschädigt worden ist, und der Anstieg eine sehr lange Erholungskomponente ist.

2. Nach der ersten Bestrahlung mit 42 rad zeigt der Kristall eine Schädigung von 13 %, nach der zweiten Bestrahlung mit der höheren Dosis von 85 rad zeigt der Kristall eine Sättigungserscheinung in der Schädigung. Die Lichtausbeute geht nur um weitere 7 % herunter.
3. Außer dem im Punkt 1) erwähnten Anstieg der Lichtausbeute ist keine weitere Erholung des Kristalls erkennbar. Dabei ist eine erste schnelle Erholung innerhalb der ersten 16 Stunden jedoch nicht auszuschließen.

Der permanente Strahlenschaden von dem CsJ(Tl)-Kristall hat die gleiche Größe, wie der Restschaden der in dieser Arbeit untersuchten langen BGO-Kristalle. Da der hier untersuchte CsJ-Kristall nur 10 cm lang war und außerdem CsJ eine größere Strahlungslänge als BGO hat, kann geschlossen werden, daß ein CsJ-Kalorimeter mit entsprechend vielen Strahlungslängen einen höheren Schaden als ein BGO-Kalorimeter aufweisen wird.

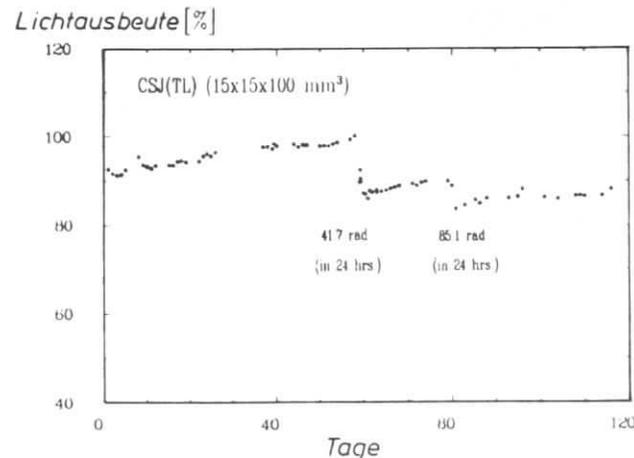


Abbildung 41. Verlauf der Lichtausbeute von einem CsJ-Kristall

ANHANG 2

Es werden die in dieser Arbeit verwendeten Verstärkersysteme zur Photodiodenauslese vorgestellt und ihre Eichung durch einen Testpuls beschreiben.

A2.1 Aufbau der Verstärker

A2.2 Eichung durch Testpuls

A2.1 Aufbau der Verstärker

Für diese Arbeit wurden zwei unterschiedliche Verstärker verwendet:

1. Ein kommerzielles System von Canberra, bestehend aus einem ladungsintegrierenden Vorverstärker Modell 2003 BT und einem pulsformenden Hauptverstärker Modell 2033.
2. Ein von W.Zimmermann entworfener Verstärker zur Auslese von Liquid-Argon-Zählern (L.A.Verstärker). Dieser Verstärker besitzt einen ladungsintegrierenden und einen pulsformenden Teil.

Wie in Kap.: "Rauschen von Photodiode und Vorverstärker" auf Seite 17 erwähnt, ist der wesentliche Teil des Verstärkersystems der ladungsintegrierende Vorverstärker. Beide verwendeten Geräte sind gegengekoppelte Verstärker mit FET-Eingang.

Da die Zeitkonstante τ des pulsformenden Verstärkerteils durch die bunch-crossing-Rate begrenzt ist, sind beide Verstärker mit einer Zeitkonstante von 1 μsec betrieben worden. Der L.A.Verstärker ist darauf schon ausgelegt, am Canberra Verstärker läßt sich die Zeitkonstante einstellen. Abbildung 42 auf Seite 88 und Abbildung 43 auf Seite 89 zeigen die Schaltpläne beider Verstärker.

Auf eine wichtige Tatsache wird noch hingewiesen: Der Canberra Vorverstärker hat einen vorgesehenen Eingang für die Vorspannung der Photodiode. Dies mußte beim L.A.Verstärker über eine externe Versorgung geschehen. Da damit am Eingang des Verstärkers diese Vorspannung anlag, mußten die dortigen Schutzdioden entfernt werden.

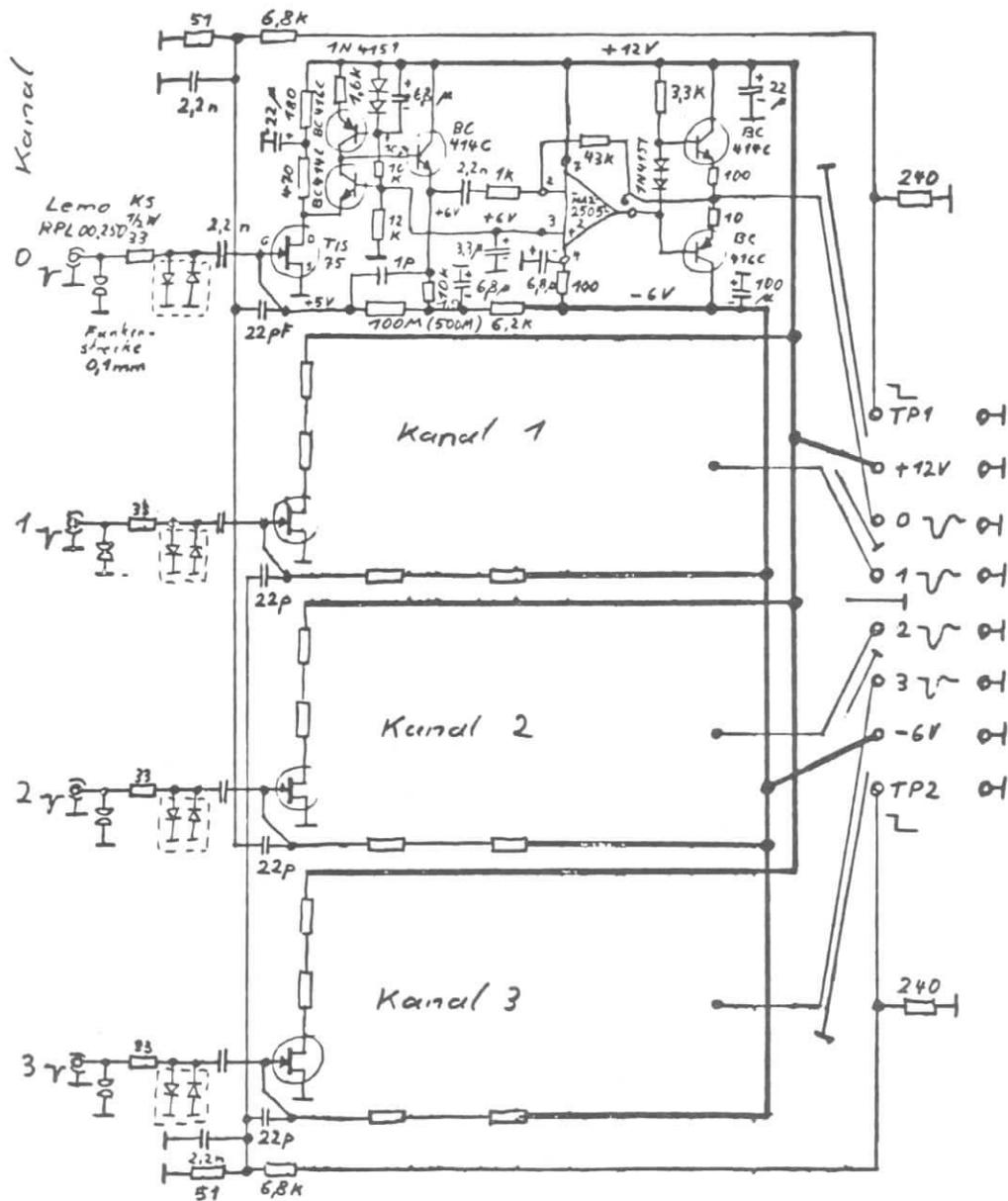


Abbildung 42. Schaltplan des L.A.Verstärkers

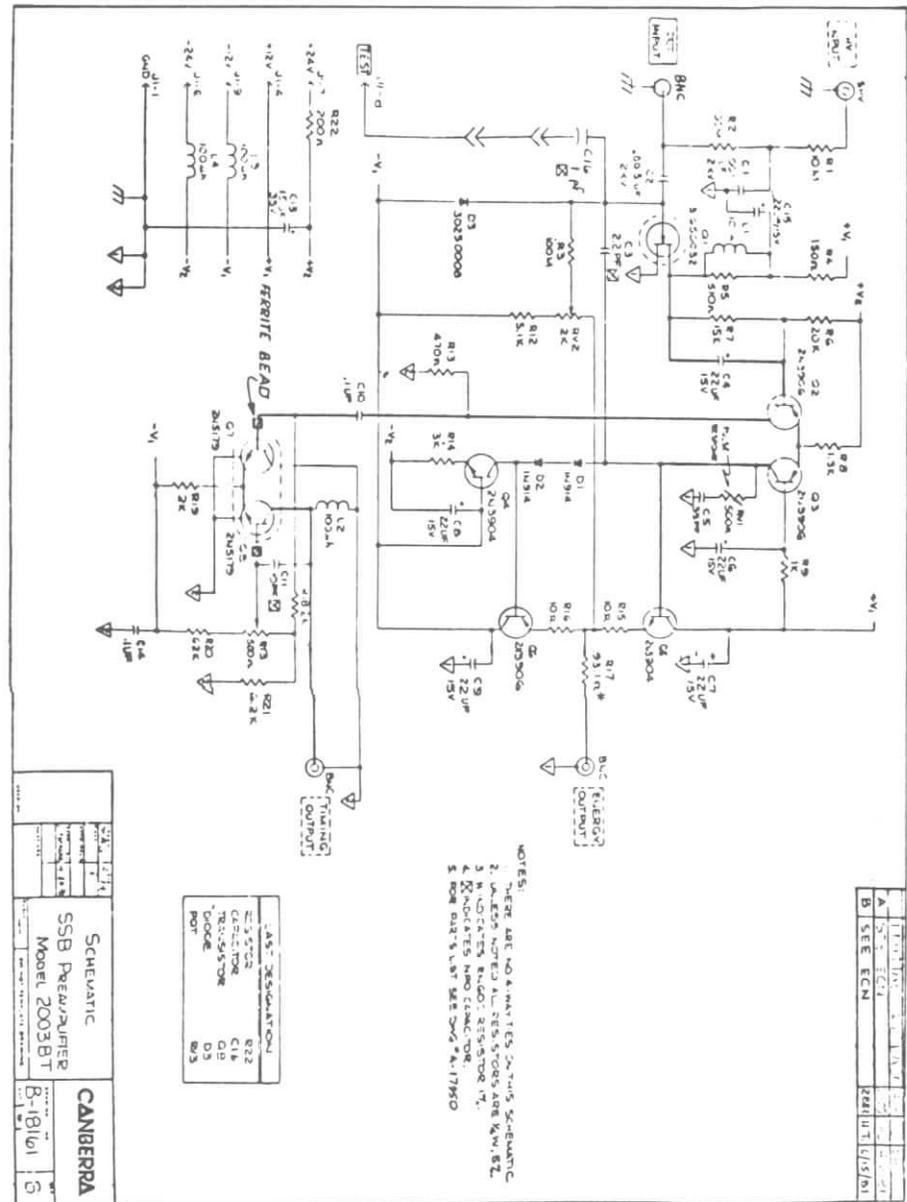


Abbildung 43. Schaltplan des CANBERRA-Vorverstärkers

A2.2 Eichung durch Testpuls

Photodioden geben ein Signal in Form von Ladungen ab. Diese Ladungen werden vom Vorverstärker aufintegriert und nachfolgend linear verstärkt. Um die Anzahl der empfangenen Ladungen angeben zu können, besteht bei beiden Verstärkern die Möglichkeit, sie über einen Testpuls zu eichen.

Dies soll im folgenden beschrieben werden:

Auf den Testpulsingang wird ein schnell ansteigendes rechteckförmiges Signal gegeben. Dies Signal erreicht den Testkondensator, der dem eigentlichen Eingangskondensator parallel geschaltet ist. Aus dem Spannungspuls U des Testpulses (beim L.A.Verstärker Spannungsteiler beachten!) und der Kapazität C des Testkondensators lassen sich die über den Kondensator weitergegebenen Ladungen Q berechnen:

$$Q = C \cdot U$$

Die Ladung wird meist in femto-Coulomb (fC) angegeben, wobei $1 \text{ fC} = 6242,2 e_0$ ist.

Die von dem Verstärker weiterverarbeiteten Ladungen entsprechen der Pulshöhe, bzw. dem Maximum der Pulshöhenverteilung. Ein im Pulshöhenanalyse-Mode betriebener Vielkanalanalysator kann die Pulshöhenverteilung aufnehmen und auf einen Bildschirm auftragen. Dann entspricht das Maximum (Max) der aufgetragenen Verteilung, angegeben in Kanälen, der Testladung an Testpulsingang. Mit

$$Q/\text{Max} = \text{Ladung/Kanal}$$

läßt sich die Ladung für jeden Kanal berechnen. Mit dieser Eichung können die von der Photodiode kommenden Ladungen in Einheiten von e_0 angegeben werden.

Die Berechnung des Rauschens durch Testpulse erfolgt folgendermaßen: Bei einem gegebenen Testpuls wird bei jedem Puls eine genau definierte Menge an Ladungen auf den Verstärker gegeben. Das Ausgangssignal wird dann allein durch das Rauschen von Photodiode und Verstärker verbreitert. Die Toleranzen des definierten Testpulses sind so klein, daß sie vernachlässigt werden können. Um das Rauschen bestimmen zu können, wird die Breite des Testpuls-Ausgangssignals in Kanälen gemessen, wobei gilt:

$$\sigma = \text{FWHM}/2,36$$

FWHM = Volle Breite in halber Höhe. Es wird in Einheiten von Kanälen gemessen.

Mit der oben genannten Eichung läßt sich dann das Rauschen in Einheiten von e_0 angeben.

Noch einige Bemerkungen zum Fehler:

- Durch bauartbedingte Toleranzen der Eingangskondensatoren, der Widerstände und durch Leitungsverluste können systematische Fehler in der Eichung auftreten. Da keine Angaben über die Toleranzen zu erhalten waren, wird der Fehler auf $\approx 1\%$ abgeschätzt.
- Ablesefehler in der Bestimmung der Testpulsgröße von $0,05 \text{ mV}$ führen beim Canberra Verstärker zu einem Fehler von $\pm 300 e_0$ und beim L.A.Verstärker zu $\pm 50 e_0$.

Bei vergleichenden Messungen im Hauptteil dieser Arbeit wurde ständig bei gleichem Verstärker mit einem unveränderten Testpuls gemessen. Damit gehen diese beiden Fehlerquellen bei allen vergleichenden Angaben gleichermaßen ein und erzeugen somit keinen Fehler der Meßwerte untereinander.

- Fehler in der Bestimmung der Kanalzahl am Vielkanalanalysator führen zu Fehlern der Meßwerte untereinander. Die Größe des Fehlers hängt dabei von dem Verstärkungsfaktor der Endverstärkung ab. Dieser Fehler ist in den Messungen im Hauptteil der Arbeit angegeben.

FIRMEN, LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

Crismatec, F 38610 Gieres, Frankreich

Harshaw Chemie BV, NL 3454 PK De Meern, Holland

NKK: Nihon Kessho Koogaku Co, 318-19 Kondo, Tatebayashi City, Japan

Shanghai Institute of Ceramics, Ning Nang Road 862, Shanghai, China

Scholz: IBS, D-8082 Grafrath (produziert in England)

Dr. Korth oHG, Am Jägersberg 9, D-2300 Kiel (produziert von BDH, England)

Canberra Elektronik GmbH, Halmstr. 70, D-6000 Frankfurt/Main 7

Hamamatsu Photonics, 1126-1, Ichino-Cho, Hamamatsu-City, Japan

J.D.Möller Optische Werke GmbH, D-2000 Wedel bei Hamburg

BOB 83: G.J.Bobbink et al.; Carnegie Mellon University Report CMU-HEP 83-13, 1983

BIE 84: C.Bieler; Diplomarbeit, Hamburg, 1984

CAV 82: M.Cavalli-Sforza; Konferenzbericht vom International Workshop on Bismut Germanate, C.Newman-Holmes, editor; Physics Department Report, Princeton University, 1982

CEL 83: Proposal to upgrade the CELLO Detector, Internal Report DESY-CELLO-83-01, PRC 83/01, 1983

DIE 83: H.Dielt et al; Internal Report BGO-MPI-13, EL/1983

DRI 83: M.A.van Driel, J.C.Sens; Slac-Pub.-3237, 1983

FAB 82: C.W.Fabjan, T.Ludlam; Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1982

FAR 78: M.R.Farukhi; Konferenzbericht vom Workshop on Transmission and Emission Computer Tomography, Seoul (Harshaw Technical Paper), 1978

GRA 84: H.Grasmann; Diplomarbeit, Erlangen, 1984

KOB 83: M.Kobayashi et al.; Nucl. Instr. and Meth. 206 (1983) 107

LAV 84: C.Laviron, P.Lecoq; Cern/EF 84-5, 1984

LEP L3: L3 collaboration; Technical proposal for the L3 detector at LEP, May 1983

LOR 82: E.Lorenz et al.; Vortrag auf der Frühjahrstagung DPG 1982

LOR 83: E.Lorenz; L3 Meeting, Genf, 1983

LUC 77: A.C.Lucas, M.R.Mayhugh; Harshaw Report, 1977

MAR 83: J.Marks; Vortrag am DESY Hamburg, 1983

PLU 82: Der Verstärker wurde von W.Zimmermann entworfen.

RIE 84: M.Riebesell; Diplomarbeit, Hamburg, 1984

STR 84: L.Strüder; Diplomarbeit, Aachen, 1984

STR 84/2: L. Strüder et al; Vortrag auf der DPG-Tagung, Bielefeld 1984

SCHÜ 84: D.Schütz; Diplomarbeit, Hamburg, noch nicht veröffentlicht.

UPS 83: F.Porter et al.; A proposal for a high-precision north area detector, submitted to Cornell University, 1983

WEB 73: M.Weber, R.R.Monchamp; J. Appl. Phys., Vol 44, No 12, 1973

WES 84: H.Westermann; Hamburg, private Mitteilung, 1984

WIN 84: G.G.Winter; Hamburg, private Mitteilung, 1984

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 1.	Feynmangraph eines Zwei-Photon-Prozesses	1
Abbildung 2.	Ansicht der BGO-Kristalle im LAT	4
Abbildung 3.	Ansicht des CELLO-Vorwärts-Bereichs	5
Abbildung 4.	Anregungs- und Emissionsspektrum von BGO	11
Abbildung 5.	Aufbau einer Photodiode	12
Abbildung 6.	Funktion einer völlig verarmten Photodiode	13
Abbildung 7.	Elektronik zur Auslese von Photodioden	16
Abbildung 8.	Kapazität, Dunkelstrom und Rauschen einer Photodiode	18
Abbildung 9.	Spektrale Empfindlichkeit einer Si-Photodiode	20
Abbildung 10.	Elektronik Reflexionstest	25
Abbildung 11.	Versuchsaufbau Reflexionstest	25
Abbildung 12.	Lichtausbeute bei verschiedenen Folien	28
Abbildung 13.	NaJ(Tl+Am) Lichtpulser	30
Abbildung 14.	Versuchsaufbau Übersprechttest	30
Abbildung 15.	Elektronik Überdeckungstest	34
Abbildung 16.	Versuchsaufbau Überdeckungstest	35
Abbildung 17.	Ergebnisse Überdeckungstest	36
Abbildung 18.	Optimale Überdeckung bei verschiedenen großen Ausleseflächen	39
Abbildung 19.	Versuchsaufbau Strahlungstest	43
Abbildung 20.	Lichtausbeute der bestrahlten BGO-Kristalle	49
Abbildung 21.	Lichtausbeute der bestrahlten BGO-Kristalle, Temperaturverlauf	50
Abbildung 22.	Elektronik Langzeitbestrahlung	52
Abbildung 23.	BGO Testbox	53
Abbildung 24.	Testposition im CELLO Detektor	54
Abbildung 25.	Absorberblenden im Strahlrohr	54
Abbildung 26.	Untergrundstrahlung bei PETRA, gemessen mit dem BGO-Kristall	56
Abbildung 27.	Position der TDLs in verschiedenen dicken Lagen Blei	57
Abbildung 28.	Strahlenschaden eines kontinuierlich bestrahlten BGO-Kristalls	58
Abbildung 29.	Temperaturverlauf während der Meßperiode	59
Abbildung 30.	Erholung eines lichtgeschädigten BGO-Kristalls	62
Abbildung 31.	Uniformität bei geschädigten BGO-Kristallen	62
Abbildung 32.	Elektronikaufbau: Eichung mit Präparat	65
Abbildung 33.	Energiespektren a) mit Yt 88 b) mit Cs 137	67
Abbildung 34.	Elektronik: Eichung durch Cosmics	69
Abbildung 35.	Versuchsaufbau: Eichung durch Cosmics	70
Abbildung 36.	Energiespektrum der Cosmics	72
Abbildung 37.	Eichfehler durch schlechte Uniformität	73
Abbildung 38.	(a) Zeitlicher Verlauf der Eichlinie b) Temperatur	79
Abbildung 39.	Häufigkeitsverteilung der gemessenen Maxima	79
Abbildung 40.	662 keV Eichlinie bei einem CsJ(Tl)-Kristall	84

Abbildung 41.	Verlauf der Lichtausbeute von einem CsJ-Kristall	86
Abbildung 42.	Schaltplan des L.A.Verstärkers	88
Abbildung 43.	Schaltplan des CANBERRA-Vorverstärkers	89

VERZEICHNIS DER TABELLEN

1. Vergleich von BGO und NaJ	9
2. Vergleich zwischen Photomultiplier und Photodiode	14
3. Verpackungsfolien	23
4. Daten der getesteten Folien bei Einschub vorne in den Kristall.	27
5. Übersprechen von Licht durch verschiedene Folien	31
6. Ergebnis: Überdeckungstest an einem langen dünnen BGO-Kristall	38
7. Daten der getesteten Kristalle	42
8. Strahlungsdosen und Bestrahlungszeiten	45
9. Energieauflösung und Uniformität nach erster Bestrahlung	47
10. Lichtausbeute (PH) nach zwei Bestrahlungen	48
11. Messwerte der TLDs in verschiedenen Bleilagern	56
12. Ergebnisse: Eichung mit Präparat	66
13. Kristalle im Eichtest	68
14. Ergebnisse: Eichung durch Cosmics	71
15. Vergleich von BGO und CsJ	83

NACHWORT

Das Anfertigen dieser Arbeit in der DESY-Gruppe F 14 hat mir sehr viel Freude bereitet und war sehr lehrreich. Sehr dazu beigetragen hat das hervorragende Arbeitsklima und die jederzeit gute Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft. Dafür möchte ich mich bei allen Mitgliedern dieser Gruppe bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich

bei dem Leiter der Gruppe, Herrn Prof. H. Spitzer, für die Aufgabenstellung und die gute Betreuung. Seine Ideen belebten diese Arbeit;

und bei Herrn Dr. G.G. Winter, der mir die experimentellen Techniken beibrachte und mit guten Ratschlägen hilfreich zur Seite stand.

H. Kapitza und B. Lewendel waren ständige Ansprechpartner zu Softwareproblemen und gaben mir viele Tips zur Benutzung der DESY-Rechenanlage.

Sehr profitiert habe ich von zahlreichen Diskussionen mit D. Burkart und M. Feindt, denen ich einen tieferen Einblick in die Hochenergiephysik verdanke.

Bei C. Bieler, M. Riebesell und J. Marks bedanke ich mich für die tolle Zusammenarbeit und die aufgelockerte Arbeitsatmosphäre.

Herrn K. Amsink und dem DESY-Strahlenschutz danke ich für die freundliche Unterstützung bei den Bestrahlungstests.

Ich versichere, diese Arbeit unter Angabe aller wesentlichen Quellen und Hilfsmittel selbständig angefertigt zu haben.

