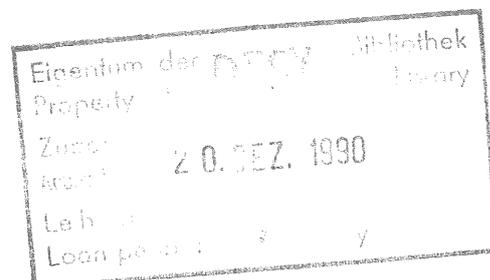


Untersuchungen zur
Optimierung der Lichtauslese aus
Blei-Szintillator-Kalorimetern unter-
schiedlicher
Wellenlängenschieberkonfigurationen

Diplomarbeit

vorgelegt von
Eiko Eisen

04.12.1990



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	H1-Detektor.....	7
1.2	BEMC.....	9
1.3	Aufgabenstellung und Inhaltsübersicht.....	11
2	Theoretischer Teil	12
2.1	Grundlagen elektromagnetischer Schauer.....	12
2.2	Aufbau der Kalorimetermodule.....	15
2.3	Funktionen der Kalorimeterkomponenten.....	17
2.3.1	Organische Szintillatoren und Wellenlängenschieber.....	17
2.3.2	Photodioden und Vorverstärker.....	22
2.3.3	Xenon-Blitzlampe und Lichtleiter.....	23
3	Laborversuche	25
3.1	Meßaufbau.....	25
3.1.1	Optischer und Mechanischer Aufbau.....	25
3.1.2	Elektronischer Aufbau.....	30
3.2	Meßprogramm und Ergebnisse.....	31
3.2.1	Koordinatensysteme, Normierungen und Symmetrisierungen.....	31
3.2.2	Testpulsermessungen.....	33
3.2.3	Mechanischer Aufbau der Module.....	35
3.2.4	Wahl des Reflektormaterials.....	38
3.2.5	Optimierung der transversalen Abhängigkeit.....	39
3.2.6	Optimierung der longitudinalen Abhängigkeit.....	47
3.2.7	Die hadronischen Wellenlängenschieber.....	52
3.2.7.1.	Transversale Ortsabhängigkeiten.....	52
3.2.7.2.	Longitudinale Ortsabhängigkeiten.....	54
4	Teststrahlungsmessungen	56
4.1	Meßaufbau und Meßprogramm.....	56
4.2	Ergebnisse.....	59
5	Diskussion der Ergebnisse	63
6	Zusammenfassung	64

7	Anhänge	65
7.1	Anhang A Aufbau eines Kalorimetermoduls	65
7.2	Anhang B Materialeigenschaften von SCSN 38	66
7.3	Anhang C Technische Daten der Photodioden	67
7.4	Anhang D Weitere Darstellungen zur transversalen Abhängigkeit der Diodensignale.....	68
7.5	Anhang E Serienmessungen der Wellenlängenschieber	73
8	Literaturverzeichnis	75

Abbildungsverzeichnis

Abb.1.1	Schematische Darstellung des Speicherrings HERA	6
Abb.1.2	Schematische Darstellung des H1-Detektors	8
Abb.1.3	Rechter oberer Quadrant des BEMC, vom Vertex aus gesehen, sowie Art und Menge der verwendeten Module	10
Abb.2.1	Schauerprofile von Elektronen in einem Blei-SCSN 38 Kalorimeter	15
Abb.2.2	Energieschema eines organischen Szintillators	19
Abb.2.3	Absorptions- und Emissionsspektrum von Polystyrol	20
Abb.2.4	Absorptions- und Emissionsspektren von SCSN 38 und Y7	21
Abb.2.5	Reflexion innerhalb eines Lichtleiters	24
Abb.3.1	Ankoppelung des Lichtleiters in den Szintillator.	26
Abb.3.2	Meßaufbau innerhalb der lichtdichten Kiste (Angaben in mm)	27
Abb.3.3	Lochmasken (Angaben in mm)	29
Abb.3.4	Schematisierter Meßaufbau (optisch, mechanisch und elektronisch)	30
Abb.3.5	Ergebnisse der Pedestalmessungen	34
Abb.3.6	Vergleich verschiedener Bauformen quadratischer Szintillatorplatten.	37
Abb.3.7	Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer rechteckigen Szintillatorplatte ohne Abschattungen.	40
Abb.3.8	Auswahl einiger untersuchter Abschattungen.	42
Abb.3.9	y - Scans bei $x = 4$. mit den Abschattungen A1 bis A5.	44
Abb.3.10	Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer rechteckigen Szintillatorplatte mit Abschattung A3.	46
Abb.3.11	Longitudinale Abhängigkeit bei weißem Wellenlängenschieber-Reflektorpapier (verschiedene Lichteinleitung bei gleicher Platte)	48
Abb.3.12	Longitudinale Abhängigkeit bei weißem Wellenlängenschieber-Reflektorpapier (gleiche Lichteinleitung bei verschiedenen Szintillatorplatten)	48
Abb.3.13	Longitudinale Abhängigkeit bei Wellenlängenschieber-Reflektorpapier mit der Abschattung W.A1	49
Abb.3.14	Longitudinale Abhängigkeit bei Wellenlängenschieber-Reflektorpapier mit der Abschattung W.A2	50
Abb.3.16	Longitudinale Abhängigkeit bei Wellenlängenschieber-Reflektorpapier mit der Abschattung W.A3	51
Abb.3.15	Abschattung A3 aus der Sicht der hadronischen Wellenlängenschieber	52
Abb.3.17	Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer quadratischen Szintillatorplatte mit Abschattung A3, bei einer Lichtauslese mit einem hadronischen Wellenlängenschieber, an der Stelle $z = 42$	53
Abb.3.18	Longitudinale Abhängigkeit bei hadronischen Wellenlängenschiebern.	55
Abb.3.19	Meßaufbau der zweiten Teststrahlmeßzeit.	56
Abb.3.20	Modulkonfiguration und Positionen des Ortsscans der zweiten Teststrahlmeßzeit	57
Abb.3.21	Modulkonfiguration und Positionen der Meßpunkt der ersten Teststrahlmeßzeit	58
Abb.3.22	Meßergebnisse des Ortsscans der zweiten Teststrahlmeßzeit (normiert auf den Plattenmittelpunkt)	60

Abb.3.23	Vergleich von Messungen von Kalorimetermodulen ohne und mit Abschattungen	61
Abb.3.24	Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale eines Kalorimetermodules mit Abschattungen	62
Abb.A1	Aufbau eines quadratischen Kalorimetermoduls im Längsschnitt und im Querschnitt (nicht maßstabgerecht).	65
Abb.D1	y - Scans bei $x = 6$ mit den Abschattungen A1 bis A5	69
Abb.D2	y - Scans bei $x = 11$ mit den Abschattungen A1 bis A5	70
Abb.D3	Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer rechteckigen Szintillatorplatte mit Abschattung A1	71
Abb.D4	Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer rechteckigen Szintillatorplatte mit Abschattung A2	72
Abb.E1	Histogramm der Pulshöhen aller elektromagnetischen Wellenlängenschieber-Photodioden-Einheiten für die quadratischen Kalorimetermodule aus der Serienproduktion des BEMC.	74
Abb.E1	Histogramm der Pulshöhen aller handronischen Wellenlängenschieber-Photodioden-Einheiten für die quadratischen Kalorimetermodule aus der Serienproduktion des BEMC.....	74

Tabellenverzeichnis

Tab.2.1	Materialkonstanten.....	13
Tab.2.2	Aufbau der Kalorimetermodule des BEMC in Strahlungslängen	17
Tab.2.3	Strukturformeln der Szintillatoren und Wellenlängenschieber	18
Tab.2.4	Absorptions- und Emissionsmaxima von SCSN 38 und Y7	19
Tab.2.5	Daten der Xenon-Blitzlampe	23
Tab.3.1	Parameter der Ausgleichsgeraden für die Testpulsermessungen	33
Tab.3.2	Materialstärken und Oberflächenbeschaffenheit verschiedener Reflektor- materialien	38
Tab.3.3	Lichtausbeute bei verschiedenen Reflektormaterialien.	39
Tab.B1	Materialeigenschaften des SCSN 38	66
Tab.B2	Materialeigenschaften des Polystyrols	66
Tab.C1	Daten der HAMAMATSU Photodioden S2575	67

1 Einleitung

Im Bemühen, die aller kleinsten Strukturen der Materie zu erkunden, werden die dazu notwendigen Meßapparaturen bedauerlicherweise immer gigantischer. So wird in den Jahren 1990/91 der neue Speicherring HERA¹ (Abb.1.1) in Hamburg seinen Betrieb aufnehmen.

Bei HERA werden in dem Ringtunnel von 6,4 km Umfang 30 GeV Elektronen und 820 GeV Protonen gegensinnig beschleunigt und in zwei von vier möglichen Wechselwirkungszone zur Kollision gebracht. Die an diesen beiden Stellen installierten Detektoren sind H1 (Halle Nord) und ZEUS (Halle Süd). Für die Experimente stehen bis zu 314 GeV im Schwerpunktsystem zur Verfügung.

Der Aufbau des H1-Detektors wird im folgenden Kapitel kurz erläutert. Im Rückwärtsbereich des H1-Detektors befindet sich das BEMC². Es ist ein elektromagnetisches Blei-Szintillator Sampling Kalorimeter zur Messung der Elektronenenergie in einem Winkelbereich von etwa 5° bis 30° relativ zur Einfallsrichtung des Elektronenstrahls. Planung und Bau dieses Subdetektors obliegen dem I. Institut für Experimentalphysik in Hamburg. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zur Optimierung der Lichtauslese aus den Kalorimetermodulen des BEMC durchgeführt.

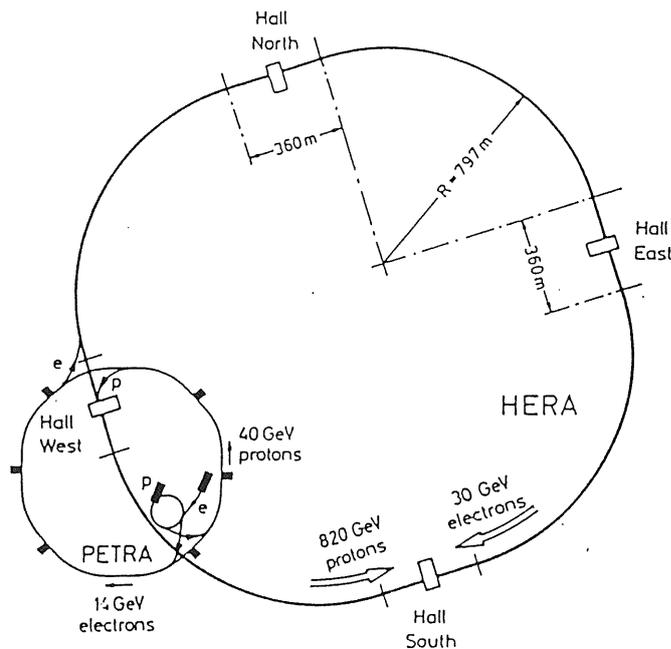


Abb.1.1 Schematische Darstellung des Speicherrings HERA; aus [Wol86]

¹ Hadronen- Elektronen-Ring-Anlage

² Backward ElektroMagnetic Calorimeter

1.1 H1-Detektor

Der Wechselwirkungspunkt (Vertex) wird von dem H1-Detektor asymmetrisch umschlossen, da die Protonen gegenüber den Elektronen wesentlich energiereicher sind und demzufolge ein Hauptteil der Reaktionsprodukte in Vorwärtsrichtung³ erwartet wird.

Vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen gliedert sich der H1-Detektor folgendermaßen: Im inneren Detektorbereich befinden sich zur Vertexbestimmung und Spurrekonstruktion die gasgefüllten Violdrahtkammern. Die Teilchenenergien werden mit den sich anschließenden Kalorimetern gemessen. Den größten Teil des Raumwinkels erfaßt das Flüssig-Argon-Sampling-Kalorimeter. Es besteht aus einem elektromagnetischen Teil mit Blei als passivem Material und einem hadronischen Teil mit Absorberplatten aus Stahl. Auslesemedium ist in beiden Fällen das flüssige Argon, in dem die erzeugten Ladungen gemessen werden können. Ergänzt wird das Flüssig-Argon-Kalorimeter in Vorwärtsrichtung durch das PLUG-Kalorimeter und in Rückwärtsrichtung durch das BEMC. Das PLUG-Kalorimeter dient zu einer besseren Erfassung der Hadronen in Vorwärtsrichtung und ist aus Siliziumzählern mit Absorberplatten aus Kupfer aufgebaut. Das BEMC ist, wie bereits erwähnt, ein elektromagnetisches Sampling-Kalorimeter mit Blei-Absorberplatten und einer Auslese über Szintillatorplatten, Wellenlängenschieber und Photodioden.

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter ist in einem Kryostaten aufgebaut, und wird auf einer Betriebstemperatur von ca. 80 K gehalten. Den Kryostaten umgibt die supraleitende Spule, welche in ihrem Inneren ein homogenes axiales Magnetfeld von 1,2 T erzeugt. Der äußere Bereich des Detektors besteht aus Myonenkammern und instrumentiertem Eisen.

Der prinzipielle Aufbau des H1-Detektors ist in Abb.1.2 dargestellt.

³ Nach HERA-Konvention ist die Protonenrichtung die Vorwärtsrichtung.

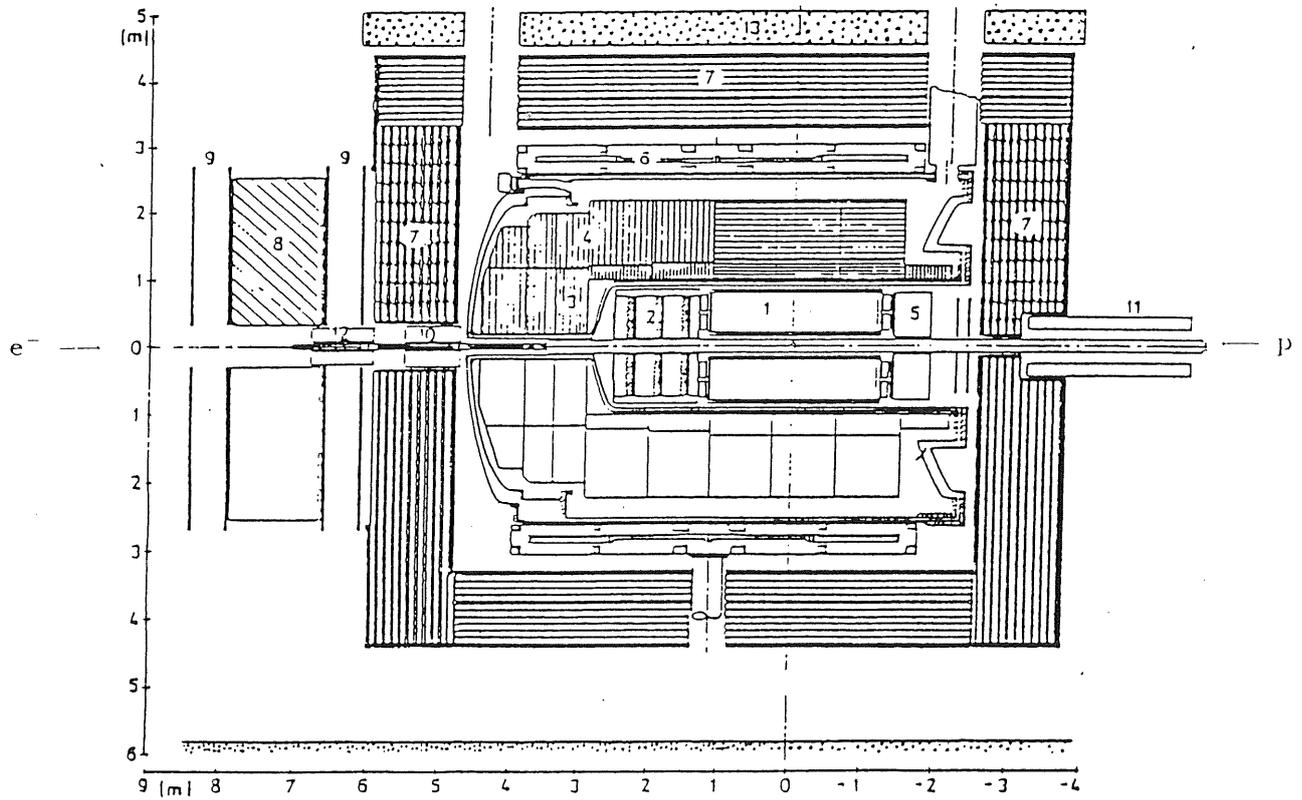


Abb.1.2 Schematische Darstellung des H1-Detektors

- 1) Innendetektor
- 2) Spurkammern
- 3) Elektromagnetisches Flüssig-Argon-Kalorimeter
- 4) Hadronisches Flüssig-Argon-Kalorimeter
- 5) Elektromagnetisches Rückwärtskalorimeter (BEMC)
- 6) Magnetspule
- 7) Eisenjoch mit Streamer-Röhren
- 8) Muon-Toroid-Magnet
- 9) Muonkammern
- 10) PLUG-Kalorimeter
- 11) Ausgleichsspule
- 12) HERA-Quadrupol
- 13) Beton

1.2 BEMC

Das BEMC ist im Rückwärtsbereich des H1-Detektors positioniert. Da es sich außerhalb des Kryostaten befindet, wird es auch als warmes elektromagnetisches Kalorimeter bezeichnet. Es ist ein aus insgesamt 88 Einzelmodulen aufgebautes Sampling-Kalorimeter (Abb.1.3). Die Module sind dicht gepackt in einer tonnenförmigen Tragekonstruktion aus Aluminium eingehängt. Diese Konstruktion hat einen Durchmesser von 162 cm, eine Tiefe von 49 cm und in ihrem Zentrum hat sie eine Aussparung für das HERA-Strahlrohr (Abb.1.3). An der Vorderseite beträgt der Abstand zum Vertex 144 cm, an der Rückseite 189 cm. Um die kreisringförmige Fläche des Kalorimeters zu abzudecken, kommen zwei Arten von dreieckigen, zwei Arten von trapezförmigen sowie quadratische Module zum Einsatz. Das BEMC schließt die Lücke zwischen dem Strahlrohr und dem Kryostaten, und damit einen Winkelbereich von $150,6^\circ$ bis $175,6^\circ$ ⁴. Allerdings ist zu erwarten, daß verwertbare Signale, mit dem BEMC, nur in einem Winkelbereich von 154° bis 175° gemessen werden können [Pep89]. Im äußeren Winkelbereich von 154° bis $150,6^\circ$ ergibt sich eine Überlappung mit dem rückwärtigen BBE des Flüssig-Argon-Kalorimeters.

Jedes Modul des BEMC besteht aus 50 Sampling Schichten wobei jede Schicht aus 2,5 mm Blei und 4 mm Szintillator aufgebaut ist. Die Lichtauslese erfolgt über longitudinal angeordnete Wellenlängenschieber mit Photodioden und Vorrverstärkern. Um die Intensitätsverluste bei der Lichtüberführung so gering wie möglich zu halten, sind die Szintillatorplatten und die Wellenlängenschieber in geeigneter Weise mit diffus reflektierendem weißen Papier belegt, und um ferner eine gute Homogenität der Lichtauslese zu erreichen, sind die Reflektorpapiere teilweise in unterschiedlichen Graustufen bedruckt. Untersuchungen bezüglich der Reflektorpapiere und ihrer Bedruckungen (Abschattungen) sind Gegenstand dieser Arbeit.

⁴ Die Protonenrichtung entspricht 0° .

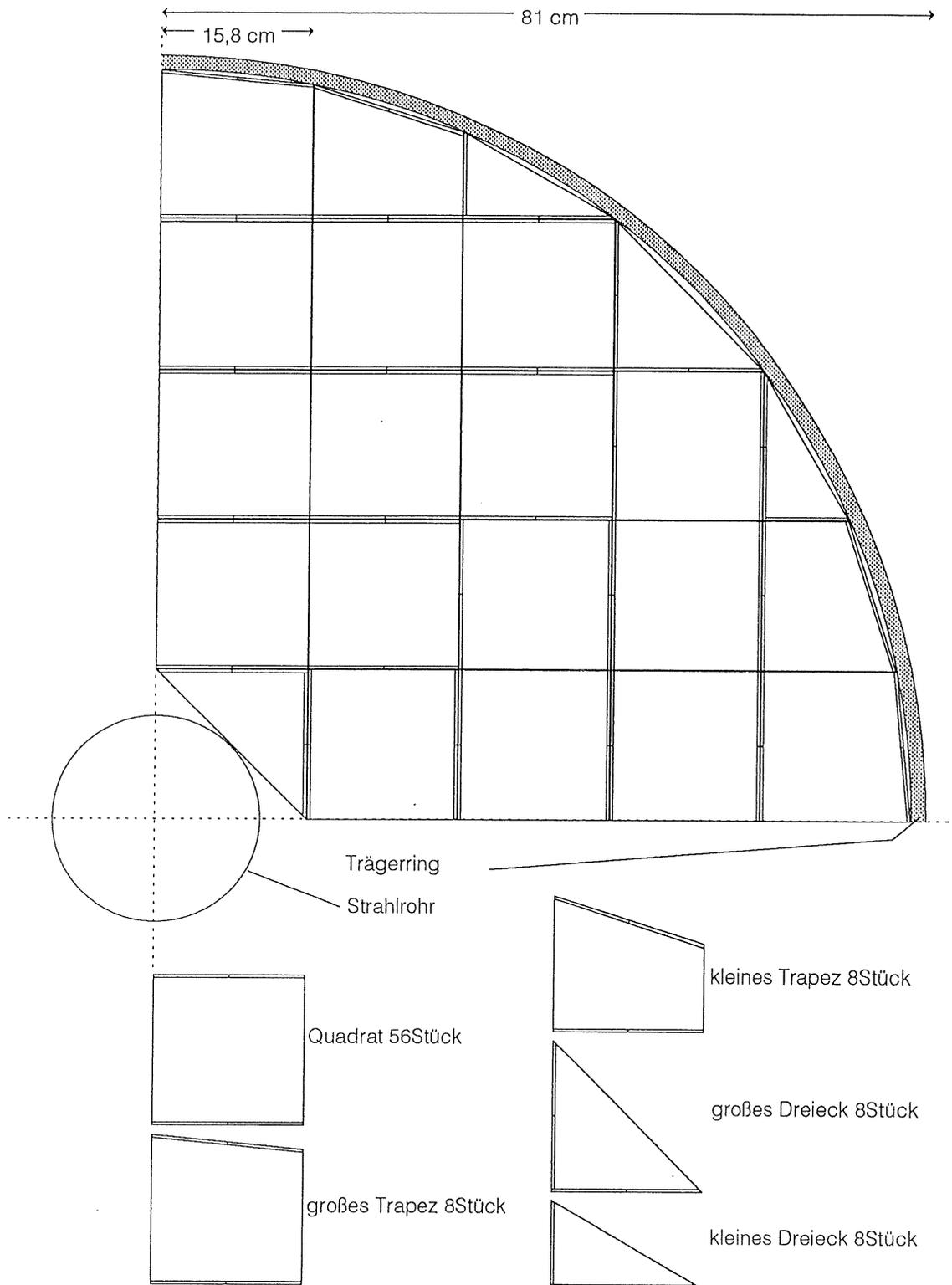


Abb.1.3 Rechter oberer Quadrant des BEMC, vom Vertex aus gesehen, sowie Art und Menge der verwendeten Module

1.3 Aufgabenstellung und Inhaltsübersicht

Eine gute Energieauflösung ($\frac{\sigma_{\text{samp}}}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}}$) und eine gute Homogenität der Energiesignale, nach der Kalibration der Module, über den gesamten Detektor (<1%) [Fel85] [Fel87], sind die an das BEMC gestellten Anforderungen.

Inhomogenitäten der Energiesignale werden u.a. verursacht durch:

- Leckverluste d.h. unvollständiger Schauereinschluß
- Unterschiedliche Transmission des Szintillatorlichtes zu den Photodioden innerhalb jedes Moduls in transversaler (x,y) und in longitudinaler Richtung (z)

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Reduzierung von Effekten wie sie in Punkt zwei genannt sind, also mit der Optimierung der Ortsabhängigkeiten der Signale der Einzelmodule. Erreicht wird dies durch Abschattungen der Reflektorpapiere der Wellenlängenschieber und Szintillatorplatten. Die Ermittlung der optimalen Abschattungen erfolgte im Laborversuch, bei dem die Szintillatorplatten mit UV-Licht angeregt wurden und alle wesentlichen geometrischen und elektronischen Parameter der Module komfortabel variiert werden konnten. Außerdem wurden mit Prototypen und mit den Modulen aus der Serienproduktion Messungen am DESY-Teststrahl durchgeführt. Auf diese Weise konnten die Ergebnisse der Laborversuche überprüft werden.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt:

- Kapitel 2 umfaßt die theoretischen Grundlagen von Sampling-Kalorimetern und es werden die Komponenten der Module des BEMC beschrieben
- Kapitel 3 beinhaltet den Aufbau und die Durchführung der Laborversuche. Die gewonnenen Ergebnisse werden vorgestellt
- Kapitel 4 enthält die Beschreibung des Aufbaus und der Ergebnisse der Experimente am DESY-Teststrahl
- In Kapitel 5 werden die Ergebnisse diskutiert
- In Kapitel 6 wird die vorliegende Arbeit dann kurz zusammengefasst

2 Theoretischer Teil

2.1 Grundlagen elektromagnetischer Schauer

Elektromagnetische Schauer bilden sich aus, wenn hochenergetische Elektronen, Positronen oder γ -Quanten mit Materie wechselwirken.

Im Schauer erfolgt eine Teilchenvervielfachung durch die Abstrahlung von Bremsstrahlungs- γ -Quanten der Elektronen bzw. Positronen und durch Paarbildungseffekt der γ -Quanten. Die am Schauer beteiligten Teilchen nehmen daher kaskadenhaft in ihrer Anzahl zu, bis die Energie der einzelnen Teilchen zu gering ist, um die schauerbildenden Prozesse aufrecht zu erhalten. Es überwiegen dann als Wechselwirkung die Ionisationsverluste im Material und die Schauerentwicklung kommt zum Stillstand.

Ein elektromagnetischer Schauer wird im wesentlichen durch drei materialabhängige Größen beschrieben. Diese sind als Maß für die Ausbildung des Schauers die Strahlungslänge X_0 , als Maß für das Absterben des Schauers die kritische Energie E_k und als laterales Ausdehnungsmaß des Schauers der Molière-Radius R_M , wobei in einem lateralen Bereich von einem R_M um die Schauerachse 90% des Schauers eingeschlossen sind. Für $2R_M$ beträgt der Schauereinschluß 95% und bei $3R_M$ sind es 98%.

Für Elektronen, deren Energie $E \gg E_k$ ist, folgt für die Energieabgabe im Absorber in der Tiefe x :

$$E(x) = E \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right)$$

Die Strahlungslänge X_0 ist somit die absorberspezifische Eindringtiefe bei der die Elektronenenergie auf den $\frac{1}{e}$ -ten Teil, d.h. auf 37% abgesunken ist.

Für X_0 gilt nach [Mus88]:

$$\frac{1}{X_0} = 4 N_v \alpha r_e^2 Z^2 \left(\ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{1}{18} \right)$$

N_v ist die Atomdichte, α die Feinstrukturkonstante, r_e der klassische Elektronenradius und Z die Ordnungszahl des Absorbers.

In Analogie zur Strahlungslänge beschreibt die Konversionslänge X_D die Energieabnahme von γ -Quanten durch Paarbildung im Absorbermaterial:

$$E_\gamma(x) = E_\gamma \exp\left(-\frac{x}{X_D}\right)$$

Für X_D folgt (nach [Mus88]):

$$\frac{1}{X_D} = 4 N_v \alpha r_e^2 Z^2 \frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \approx \frac{7}{9} X_0$$

Die kritische Energie E_k kennzeichnet die Elektronenenergie, bei der Bremsstrahlungs- und Ionisationsverluste gleich groß sind, d.h. es gilt:

$$\frac{(dE/dx)_{\text{rad}}}{(dE/dx)_{\text{ion}}} = \frac{E}{E_k} = 1$$

Als Näherungsformeln gelten nach [Ama81] die folgenden Beziehungen (A = Molmasse und ρ = Dichte des Absorbers):

$$X_0 \approx 180 \frac{A}{Z} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right) \quad \left(\frac{\Delta X_0}{X_0} \leq \pm 20\%, 13 \leq Z \leq 92 \right)$$

$$E_k \approx \frac{550}{Z} \text{ (MeV)} \quad \left(\frac{\Delta E_k}{E_k} \leq \pm 10\%, 13 \leq Z \leq 92 \right)$$

$$R_M \approx 7 \frac{A}{Z} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right) = 7 \frac{A}{Z \rho} \text{ (cm)} \quad \left(\frac{\Delta R_M}{R_M} \leq \pm 10\%, 13 \leq Z \leq 92 \right)$$

In Tabelle 2.1 sind die entsprechenden Materialwerte der im Kalorimeter verwendeten Substanzen aufgelistet.

Material	Z	A (g)	ρ (gcm ⁻³)	X_0 (cm)	X_0 (gcm ⁻²)	E_k (MeV)	R_M (cm)
Al	13	26,98	2,70	8,90	24,01	39,3	3,69
Pb	82	207,19	11,35	0,56	6,37	7,2	1,63
Polystyrol	6	12,00	1,03	42,40	43,80	87,0	10,20
38,5%Pb, 61,5%SCSN 38	28	67,66	5,00	1,43	7,15	8,9	3,38

Tab.2.1 *Materialkonstanten*

Die Kombination aus 38.5 Volumen-% Pb und 61.5 Volumen-% SCSN 38 entspricht der Zusammensetzung einer Samplingschicht der Kalorimetermodule des BEMC. SCSN 38 ist ein Plastikszintillator der zu 99% aus Polystyrol besteht [Mun88].

Mit einem Kalorimeter lässt sich die Energie des Primärteilchens messen, da die totale Spurlänge T der Elektronen im Schauer - diese entspricht der Summe aller Einzelspuren der im Schauer ausgebildeten Elektronen - der Energie E des Primärteilchens proportional ist. Die in einem Sampling-Kalorimeter über das aktive Medium (z.B. Szintillatorplatten) ausgelesene Energie (E_{vis} =visible energy) ist dann ebenfalls proportional der Primärteilchenenergie.

Das Schauerprofil, d.h. die Energiedeposition dE pro Absorber-Eindringtiefe dt (gemessen in X_0) eines elektromagnetischen Schauers wird nach [Lon75] durch die folgende Formel beschrieben:

$$\frac{dE}{dt} = E \frac{\beta^{\alpha+1}}{\Gamma(\alpha+1)} t^\alpha \exp(-\beta t)$$

In dieser Formel sind α und β materialabhängige Parameter, für die $\alpha = t_{\max} \beta$ und $\beta \simeq 0.5$ gilt.

Die Größe t_{\max} beschreibt dann die Lage bzw. die Tiefe des Schauermaximums im Absorbermaterial, angegeben in Strahlungslängen X_0 .

Für Elektronen der Energie E als Primärteilchen gilt:

$$t_{\max} \simeq \ln \frac{E}{E_k} - 1,1$$

und für γ -Quanten als schauerauslösende Teilchen gilt entsprechend:

$$t_{\max} \simeq \ln \frac{E}{E_k} - 0,3$$

Die ebenfalls in X_0 gemessene Strecke im Absorber in der $\frac{E}{2}$ deponiert worden ist, wird als t_{med} bezeichnet, wobei für Elektronen

$$t_{\text{med}} \simeq \ln \frac{E}{E_k} + 0,4$$

gilt, und für γ -Quanten entsprechend:

$$t_{\text{med}} \simeq \ln \frac{E}{E_k} + 1,2$$

Abb.2.1 zeigt die nach der Schauerprofilformel berechneten Verteilungen für verschiedene Elektronenenergien in einem Blei-SCSN 38-Kalorimeter mit 38.5% Volumen-% Blei und 61,5 Volumen-% SCSN 38 Anteil, wie es den Verhältnissen im BEMC entspricht.

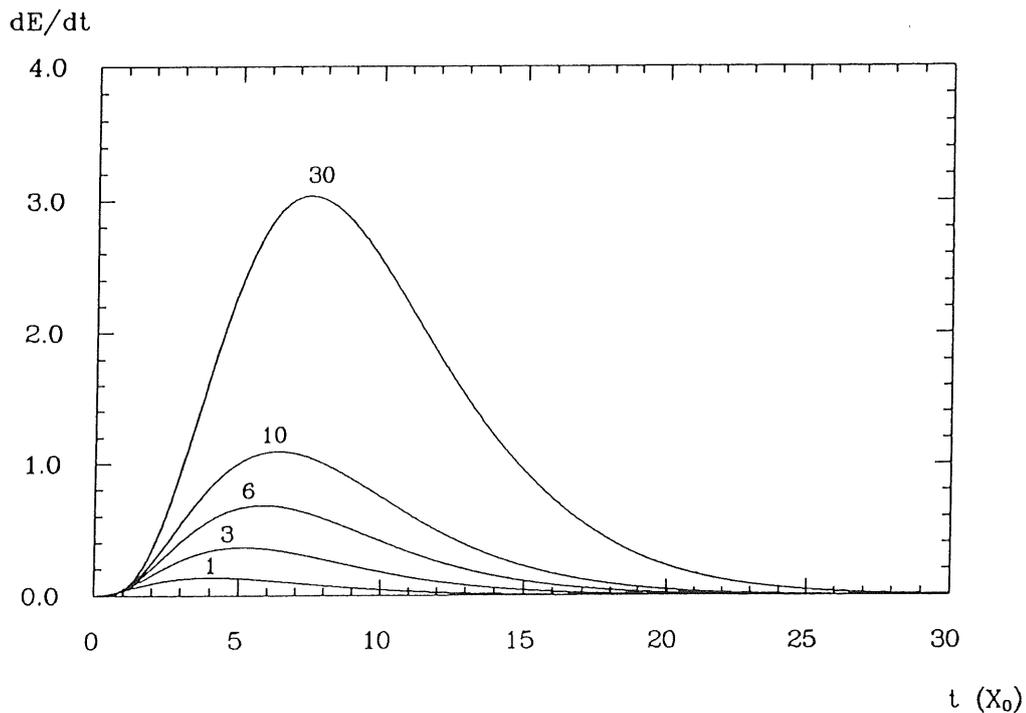


Abb.2.1 *Schauerprofile von Elektronen in einem Blei-SCSN 38 Kalorimeter*
 Dargestellt sind die nach der Schauerprofilformel berechnete Verteilungen für 1, 3, 6, 10, und 30 GeV Elektronen in einem Blei-SCSN 38-Kalorimeter mit 38,5% Volumen-% Blei und 61,5 Volumen-% SCSN 38 Anteil.

Für die Dimensionierung eines Kalorimeters ist es wichtig einen möglichst vollständigen longitudinalen Schauereinschluß zu erreichen und das "Leakage", d.h. die Leckverluste durch einen unvollständigen Schauereinschluß, gering zu halten. Ein charakteristischer Wert ist hier eine Auslegung der Kalorimetertiefe $\geq 2,6 t_{med}$ mit einem Schauereinschluß $\geq 98\%$.

Die im folgenden Kapitel beschriebenen Kalorimetermodule des BEMC haben eine Gesamttiefe von $22,55 X_0$ und erfüllen damit die oben genannte Forderung für Elektronen bis 32 GeV, für die $2,6 t_{med}$ gleich $22,3 X_0$ gilt.

2.2 Aufbau der Kalorimetermodule

In diesem Kapitel soll der Aufbau der quadratischen Kalorimetermodule näher beschrieben werden. Der grundlegende Aufbau der anderen Modulformen entspricht dem der quadratischen, allerdings ergeben sich hier Änderungen in der Wellenlängenschieberanzahl und -anordnung und natürlich auch in der geometrischen Form der Blei-Szintillator-Schichten (siehe Kapitel 1.2).

Alle Module des BEMC bestehen aus 49 hintereinandergesetzten Samplingschichten von 2,5 mm Blei als passivem Material in dem sich der Schauer ausbildet und aus 4 mm Plastiksintillator SCSN 38 als aktivem Material durch das ein Teil der im Kalorimeter deponierten Energie des Primärteilchens als UV-Licht ausgelesen wird. Vor diesen 49 Samplingschichten ist noch eine 50-zigste Szintillatorplatte eingebaut.

Die Lichtauskopplung- und weiterleitung erfolgt durch seitlich angeordnete Y7-Wellenlängenschieber und die Signalumformung und -weiterverarbeitung geschieht mit Photodioden und Vorverstärkern.

Die Vorder- und Rückseiten sowie zum Teil auch die Kanten der Szintillatorplatten sind mit weißem Reflektorpapier belegt, das mit speziellen Schwärzungen (Abschattungen) bedruckt ist und der Erhöhung der Lichtausbeute sowie der Homogenisierung der Ortsabhängigkeiten der Signale dient.

Zur Auslese des in den Szintillatorplatten erzeugten UV-Lichtes werden insgesamt sechs Wellenlängenschieber verwendet.

Es gibt vier Wellenlängenschieber (Breite 7,8 cm, Dicke 3 mm), die über die ganze Modullänge reichen, also alle 50 Szintillatorplatten auslesen. Jeweils zwei dieser Wellenlängenschieber liegen - optisch voneinander getrennt - in Aluminiumschattullen nebeneinander an einer Längsseite der Module. Ein zweites Wellenlängenschieberpaar befindet sich dann auf der gegenüberliegenden Modulseite. Diese zu Paaren zusammengefassten Wellenlängenschieber werden als elektromagnetische Wellenlängenschieber bezeichnet, da durch sie die eigentliche Signalmessung am BEMC erfolgt.

An den anderen Längsseiten liegen kurze Wellenlängenschieber der doppelten Breite, die nur die letzten 15 Szintillatorplatten auslesen. Mit Hilfe dieser Wellenlängenschieber, die auch als hadronische Wellenlängenschieber bezeichnet werden, soll eine Signalunterscheidung zwischen Elektronen und Pionen erreicht werden [Lip90].

Alle Module des BEMC bestehen aus 49 Blei- und 50 SCSN 38-Platten, wobei die vorderen 35 Sampling-Schichten aufgrund der Wellenlängenschieberanordnung eine rechteckige Form mit den Maßen $157,1 \times 150,5 \text{ mm}^2$ haben und die letzten 14 Blei- und 15 Szintillatorplatten von quadratischer Form sind ($150,5 \times 150,5 \text{ mm}^2$).

Die Wellenlängenschieber überragen am hinteren Ende der Module die Blei-Szintillator Schichten und sind hier zur Modulmitte hin gebogen⁵. So wird ein direkter Einschuss von Elektronen, die durch die Wellenlängenschieber fliegen, in die Photodioden vermieden - die Folge wären störende Halbleiterzähleffekte - .

Die vordere Stirnfläche und die Seitenkanten der Wellenlängenschieber sind mit weißem Reflektorpapier versehen und auch die Außenseite der Wellenlängenschieber ist mit einem speziellen Reflektorpapier belegt, auf das Abschattungsmuster gedruckt sind. Durch diese Papiere soll die Lichtausbeute erhöht und die longitudinale Abhängigkeit der Signale homogener gestaltet werden.

Ein optischer Kontakt zwischen Wellenlängenschieber und Szintillatorplatten, der die Totalreflexion verhindern würde, wird durch einen Nylonfaden von 300 μm Durchmesser, der auf der Innenseite der Wellenlängenschieber liegt verhindert.

Auf alle elektromagnetische Wellenlängenschieber ist in der Mitte der hinteren Stirnfläche eine Photodiode des Typs S2575 der Firma HAMAMATSU aufgeklebt, die eine sensitive Fläche von $3 \times 0,34 \text{ cm}^2$ besitzt. Bei den hadronischen Wellenlängenschiebern erfolgt die Umwandlung der Lichtsignale in elektronische Signale durch zwei Photodioden (pro Wellenlängenschieber) des gleichen Typs, die parallel durch einen Vorverstärker ausgelesen werden.⁶

Die Stabilität der Kalorimetermodule wird gewährleistet durch den Einbau der mittels eines schwarzen Schrumpfschlauches lichtdichten Blei-Szintillator-Struktur in einen Stahlkasten von 0,2 mm Wandstärke, der an der Vorderseite an einer 18 mm starken Aluminiumplatte und an der Rückseite ebenfalls an einer Aluminiumplatte befestigt ist. An der hinteren Platte ist auch das Elektronikgehäuse angebracht, in dem sich das Motherboard mit insgesamt sechs ladungsempfindlichen Vorverstärkern⁷ befindet - vier der Vorverstärker werden für die Weiterverarbeitung der elektromagnetischen und zwei für die hadronischen Signale verwendet. Das Motherboard enthält außerdem sechs Line-Driver, die die Signale über ein 30 m langes Twisted-Pair-Kabel zu den Hauptverstärkern bzw. Line-Receiver "treiben", sowie die Anschlüsse zur Spannungsversor-

⁵ An diesem Ende der Wellenlängenschieber sind die Photodioden aufgeklebt.

⁶ Alle Photodioden wurden mit dem Zweikomponentenkleber Stycast 1264 a u. b der Firma Grace aufgeklebt.

⁷ Gebaut von der Firma Vitrohm nach einem Vorschlag aus dem Max-Planck-Institut In München.

gung der Vorverstärker und Bias-Versorgung der Photodioden. Ferner befindet sich auf diesem Board für jeden Vorverstärker ein separater Testpulsereingang.

Die Gesamtstrahlungslänge der Kalorimetermodule beträgt $22,55 X_0$, so daß ein 98 %-iger longitudinaler Schauereinschluß gewährleistet wird (siehe Kapitel 2.1).

Der Aufbau der Kalorimetermodule des BEMC in Strahlungslängen X_0 ist in Tab.2.2 dargestellt.

Anzahl	Material	Gesamt- X_0
1	18 mm Al	0,20
49	2,5 mm Pb	21,88
50	4 mm SCSN 38	0,47
		$\Sigma = 22,55$

Tab.2.2 Aufbau der Kalorimetermodule des BEMC in Strahlungslängen

Dabei beträgt der Auslesebereich der hadronischen Wellenlängenschieber im hinteren Teil der Module nur ca. $6,8 X_0$.

Die Abschattungsmuster der Reflektorpapiere sind aus den Untersuchungen dieser Arbeit hervorgegangen.

2.3 Funktionen der Kalorimeterkomponenten

2.3.1 Organische Szintillatoren und Wellenlängenschieber

In den Kalorimetermodulen des BEMC wird der Organische Szintillator SCSN 38 verwendet, der kommerziell bei der Firma Kyowa-Gas erhältlich ist. SCSN 38 besteht zu 99% aus einer Polystyrolmatrix, die als fluoreszierende Beimischungen zu 1% den Farbstoff b-PDB (1.Fluor) und zu 0,02% den Farbstoff BDB (2.Fluor) enthält. Die Strukturformeln dieser Verbindungen sind in der Tabelle Tab.2.3 aufgeführt. Alle drei Verbindungen enthalten als wesentlichen Bestandteil Benzolringe, die ihre Szintillationseigenschaften begründen.

Das Energieschema eines organischen Szintillators zeigt Abb.2.2. Es besteht typischerweise aus den Grund- und Anregungsniveaus der Singulett- und Triplettzustände (S_0, S_1, S_2, \dots bzw. T_1, T_2, \dots) mit einem Abstand der Niveaus von einigen eV. Allen Niveaus sind äquidistante Schwingungsniveaus überlagert, wobei der Abstand der Schwingungsniveaus in der Größenordnung von 100 meV liegt.

Bei Raumtemperatur (ca. 25 meV) sind nahezu alle Moleküle im Grundzustand. Durch geladene Teilchen, die den Szintillator durchdringen, werden höhere Singulettzustände oder deren Schwingungsniveaus angeregt, die sich dann strahlungslos nach einigen Pikosekunden auf das S_{10} -Niveau abregen.

Die Abregung unter Strahlungsemission erfolgt dann über drei verschiedene Prozesse, wobei die prompte Fluoreszenz, d.h. der direkte Übergang auf das Grundniveau des Singulett-Zustandes bzw. auf eines seiner Schwingungsniveaus den wesentlichen Anteil des Abregungsprozesses darstellt.

Als weiterer Abregungskanal tritt die Phosphoreszenz auf, die nach einem strahlungslosen Übergang der Anregung auf den energetisch tieferliegenden Triplett-Zustand (T_{10}) erfolgt, der dann unter Strahlungsemission auf den Grundzustand übergeht. Diese Abregung erfolgt nach einigen Nanosekunden, da der Übergang vom Singulett- zum Triplett-Zustand mit einer Spinänderung verbunden ist und daher langsamer abläuft.

Substanz	Strukturformel
Polystyrol-Monomer	
b-PBD	
BDB	
PMMA-Monomer	

Tab.2.3 Strukturformeln der Szintillatoren und Wellenlängenschieber
*b-PBD: 2-(4-*t*-buthylphenyl)-5-phenyl-oxadiazol*
BDB: 4,4'-bi(2,5-dimethyl-styryl)-biphenyl
PMMA: Polymethacrylsäuremethylester
(nach [Röm 73])

Ferner kann die Abregung auch durch verzögerte Fluoreszenz auftreten, wenn die Moleküle vom 1. Triplett-Anregungszustand auf den 1. Singulett-Anregungszustand zurückkehren und anschließend ihre Energie durch Fluoreszenz abgeben.

Bei SCSN 38 werden nach dem Durchdringen eines geladenen Teilchens, z.B. eines Elektrons, zunächst die Moleküle der Polystyrolmatrix, die sich am Ort des Teilchendurchgangs befinden, angeregt und diese Moleküle verlieren ihre Anregungsenergie isotrop durch spontane Fluoreszenz im UV-Bereich. Durch die Beimischungen der beiden Fluor-Farbstoffe wird auf diese strahlungslos oder unter Absorption von Strahlung Anregungsenergie übertragen. Die Farbstoffe liegen in ihren Absorptions- und Emissionsspektren dabei so, daß das Maximum der Emission der Polystyrolmatrix im Bereich der maximalen Absorption des 1. Fluor liegt und der Emissionsbereich des 1. Fluor auf das Absorptionslicht des 2. Fluor abgestimmt ist. Durch diese Anpassung der Fluor-Farbstoffe an die Polystyrolmatrix wird erreicht, daß am Ende der Übertragungskette schließlich das Emissionslicht des 2. Fluor steht. Für dieses Licht, daß im sichtbaren Bereich liegt, ist die Polystyrolmatrix transparent, so daß es von den seitlich angeordneten Wellenlängenschiebern ausgelesen werden kann.

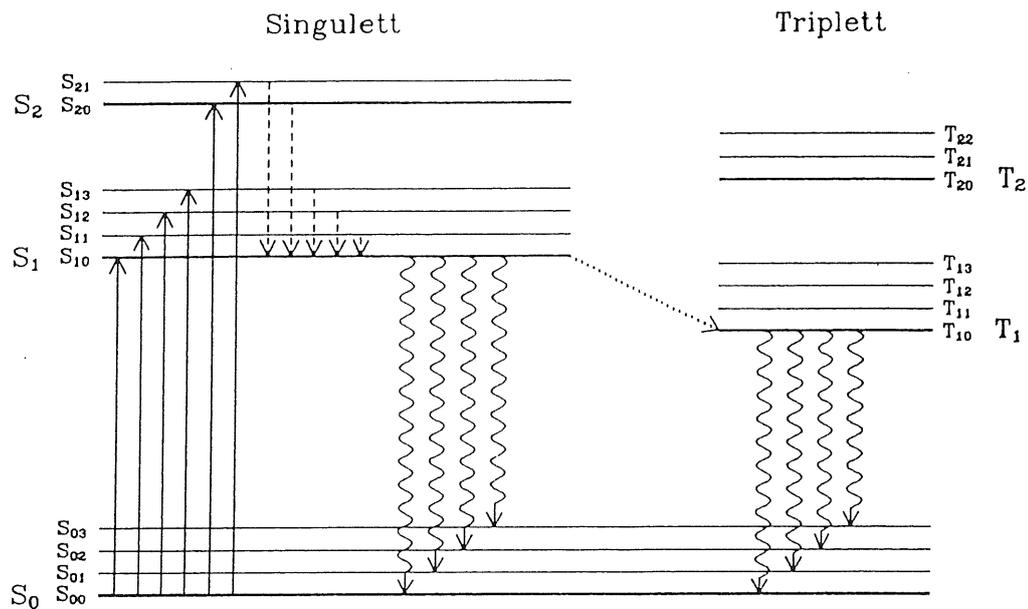


Abb.2.2 *Energieschema eines organischen Szintillators*
 Anregungsübergänge = durchgezogene Pfeile
 strahlungslose Übergänge = gestrichelte Pfeile
 Fluoreszenz- bzw. Phosphoreszenz-Übergänge = Wellenlinien
 (nach [Kno79])

Substanz	Absorptionsmaximum	Emissionsmaximum
Polystyrol	260 nm	320 nm
b-PDB	305 nm	366 nm
BDB	405 nm	425 nm
Y7	437 nm; 460 nm	490 nm

Tab.2.4 *Absorptions- und Emissionsmaxima von SCSN 38 und Y7*
 (nach [Kam83])

Bei [Kam83] wird für SCSN 38 eine Abschwächlänge λ_a - dies ist die Strecke entlang des Lichtweges, an dem die Lichtintensität auf den $\frac{1}{e}$ -ten Teil also auf 37% abgefallen ist - einen Wert von 97 cm an.

Die im Kalorimeter verwendeten Wellenlängenschieber des Typs Y7 sind auf den SCSN 38 Szintillator abgestimmt, so daß hiermit eine optimale Lichtauslese und Lichtüberführung zu den Photodioden erfolgen kann. Y7 ist die Bezeichnung eines Farbstoffes, der zu 30 ppm in einer Plexiglasmatrix (PMMA) gelöst ist. Die Strukturformel ist in Tab.2.3 aufgeführt.

Y7 ist so strukturiert, daß das Emissionslicht des 2. Fluors von SCSN 38 optimal absorbiert wird und grünes Licht emittiert, welches dann von den Photodioden absorbiert wird. Hergestellt und vertrieben wird Y7, wie auch SCSN 38, von der Firma Kyowa-Gas.

Für die Abschwächlänge von SCSN 38 in Verbindung mit Y7 wird bei [Kam83] ein Wert von 91 cm angegeben.

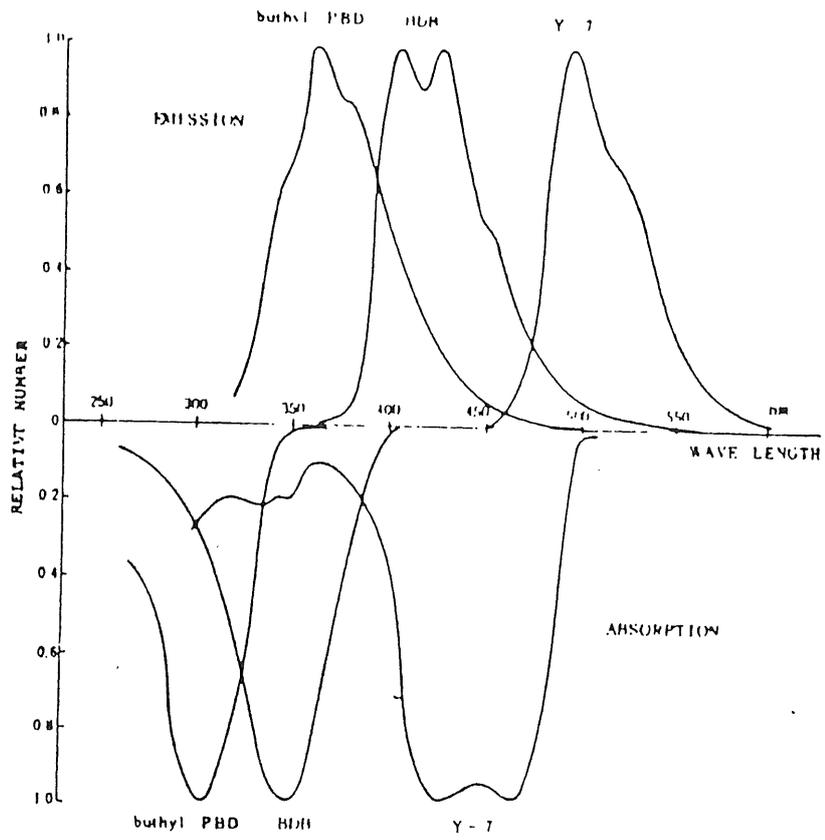


Abb.2.4 Absorptions- und Emissionsspektren von SCSN 38 und Y7
(nach [Kam83])

2.3.2 Photodioden und Vorverstärker

Die Umwandlung der Lichtsignale, welche über die Wellenlängenschieber aus den Szintillatorplatten ausgelesen werden, in elektrische Signale, erfolgt mit pin-Photodioden und Vorverstärkern.

Photodioden werden verwendet, da sie für einen Einsatz im BEMC Vorteile gegenüber Photomultipliern besitzen. Der wesentliche Vorteil besteht neben dem günstigeren Preis von Photodioden in ihrer Magnetfeldunabhängigkeit (im Bereich des BEMC herrscht ein longitudinales Magnetfeld von 1,2 T).

Da Photodioden keine innere Verstärkung besitzen, werden für die Signalverstärkung und Signalweiterverarbeitung rauscharme, ladungsempfindliche Vorverstärker benutzt.

Pin-Photodioden haben zwischen der p- und n-Schicht eine vergrößerte intrinsische Schicht aus eigenleitendem Material. Durch diese Schicht wird der aktive Bereich der Photodiode erweitert, so daß in einem größeren Volumen nach dem Einfall von elektromagnetischer Strahlung durch die besonders dünn ausgelegte p-Schicht Elektronen-Loch-Paare gebildet werden. Der dann erzeugte Photostrom der in Sperrrichtung betriebenen Photodioden - positive Bias-Spannung an der n-Schicht und Masse an der p-Schicht - ist dem Photostrom und damit dem Quantenstrom pro Fläche proportional. Die erweiterte intrinsische Schicht der Photodioden führt zu einer Verkleinerung der Diodenkapazität und damit zu einer Verringerung des Diodenrauschens, allerdings wird durch die angelegte Spannung der Dunkelstrom der Photodiode vergrößert.

Als Photodioden werden pin-Dioden des Typs S2575 der Firma HAMAMATSU verwendet, die auf die hintere Stirnkante der Wellenlängenschieber aufgeklebt sind (siehe Kapitel 2.2). Als Vorverstärker kommen in den Kalorimetermodulen ladungsempfindliche Vitrohm-Vorverstärker zum Einsatz. Für die in dieser Arbeit beschriebenen Laborversuche wurden Vorverstärker der Firma Silena benutzt, die ähnliche Eigenschaften aufweisen wie die Vitrohm-Vorverstärker.

Die verwendeten HAMAMATSU-Photodioden haben eine sensitive Fläche von 1 cm^2 ($3,4 \times 30 \text{ mm}^2$) und einen sensitiven Wellenlängenbereich von 320 nm bis 1060 nm. Besonders im Wellenlängenbereich des Emissionslichts des Y7-Wellenlängenschiebers zeichnen sich die Photodioden durch eine hohe Effektivität der Lichtumwandlung in elektrische Signale aus (siehe Anhang C).

Das Rauschverhalten der Kombination Photodiode-Vorverstärker ist wesentlich bestimmt durch die Bias-Spannung, den Dunkelstrom der Photodiode und die Shapekonstante des nachfolgenden Verstärkers⁸. Unter Zugrundelegung einer näherungsweise linearen Zunahme des Dunkelstromes mit der Bias-Spannung und der Abhängigkeit der Diodenkapazität C von der Bias-Spannung U_B

gemäß $C \sim \frac{1}{\sqrt{U_B}}$ folgt als Rauschgleichung nach [Kow70] und [Del80]:

$$\text{ENC} = \sqrt{a\tau + b\tau U_B + \frac{c}{\tau U_B}}$$

ENC ist die äquivalente Rauschladung, τ die Shapekonstante und a,b,c sind Konstanten. Für die in den Laborversuchen und den Teststrahlungsmessungen verwendeten Verstärker wurde eine Shapekonstante von $2 \mu\text{s}$ und eine Bias-Spannung von 24 V gewählt. Für diese Werte ist das Rauschen minimal [Kas90].

⁸ Durch den das Signal-Rausch-Verhältnis entsprechend der Art der Signalformung (Shaping) und der Shapekonstanten verändert wird.

2.3.3 Xenon-Blitzlampe und Lichtleiter

Die Anregung der Szintillatorplatte erfolgte in den Laborversuchen mit Hilfe von UV-Licht, welches mit einer Xenon-Blitzlampe⁹ erzeugt dann gefiltert¹⁰ (Maximum bei ca.360nm) und mit Quarz-Lichtleitern¹¹ transportiert wurde.

Bei der Blitzlampe handelt es sich im Prinzip um einen mit Xenongas gefüllten Glaskolben in welchem sich eine Anode und eine Kathode im Abstand von 12 mm befinden. Mit Hilfe von Zündelektroden zwischen der Anode und der Kathode kann beim Anlegen einer Hochspannung eine Bogenentladung erzeugt werden. Die Frequenz beträgt maximal 100 Hz, wobei die Streuung der Intensität mit der Frequenz abnimmt und bei 20 Hz ca. 0,5% beträgt. Das Spektrum der Lampe ist abhängig von der Ladespannung. Dabei nimmt der höherenergetische Anteil bei höherer Spannung zu. Die Xenon-Blitzlampe wurde mit einer Frequenz < 20 Hz und ihrer maximalen Betriebsspannung von 1000 V eingesetzt. Einige technische Daten der verwendeten Lampe sind in der Tabelle Tab.2.5 aufgeführt.

Fenstermaterial	UV-Glas (UG11)
spektrale Verteilung	200 - 2000 nm
Transmissionsmaximum mit UV-Fenster	ca. 330 nm
Bogenlänge	8 x 1.5 mm
Betriebsspannung	700 - 1000 V
Triggerspannung	5 - 7 kV
maximale Leistung	15 W
maximale Energie pro Puls	0,15 J
maximale Frequenz	100 Hz
Intensitätsstreuung	
- bei 100 Hz	maximal 2%
- bei 20 Hz	maximal 0,5%
Lebensdauer	10 ⁹ min

Tab.2.5 Daten der Xenon-Blitzlampe

Bei den verwendeten Lichtleitern handelt es sich um kunststoffummantelte Quarzglas-Stufenindex-Multimode-Fasern. Sie bestehen aus drei koaxialen Schichten: Im innersten befindet sich der Kern aus Quarzglas mit einem Durchmesser von 200 µm, diesen umschließt eine dünne Schicht, die Cladding genannt wird und aufgrund ihres, gegenüber dem Kern, geringeren Brechungsindex (Stufenindex) den Lichttransport durch Totalreflektion im Faserkern gewährleistet. Gegen mechanische oder chemische Einflüsse wird die Faser durch die äußere Schicht, einen Kunststoffmantel, geschützt.

⁹ HAMAMATSU Type No. L2188.

¹⁰ Gefiltert mit dem UV-Durchlass-Filter UG11 und dem Blau-Durchlass-Filter BG12 der Firma Spindler & Hoyer

¹¹ Quarzlichtleiter des Typs PCS 200-W der Firma Quarz & Silice

Wenn, wie in diesem Fall, der Kerndurchmesser gegenüber der Wellenlänge des transportierten Lichtes sehr groß ist, so spricht man von einer Multimode-Faser. Für solche Fasern sind die Gesetze der Strahlenoptik anwendbar. Für den Grenzwinkel der Totalreflexion Θ_c gilt:

$$\Theta_c = \arcsin \frac{n_1}{n_0}$$

Dabei ist n_0 der Brechungsindex des Kernmaterials und n_1 der Brechungsindex des Cladding. Die Reflexionsverhältnisse in einem Lichtleiter sind schematisch in Abb.2.5 gezeigt.

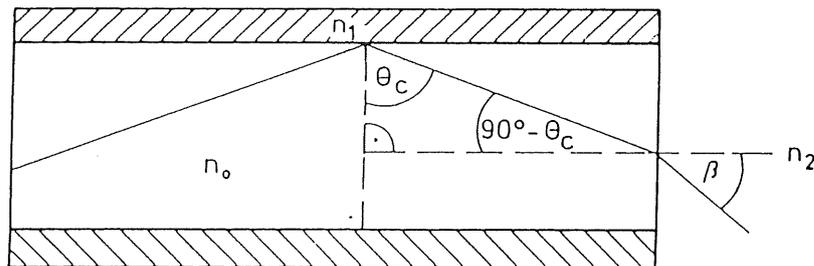


Abb.2.5 Reflexion innerhalb eines Lichtleiters

Für die Ein- oder Auskoppelung von Licht gilt, daß nur Anteile von solchen Strahlen in den Lichtleiter eintreten bzw. austreten können, die unter einem Winkel kleiner einem Grenzwinkel β auf die Stirnflächen des Lichtleiterkernes auftreffen. Dabei ist n_2 der Brechungsindex des den Lichtleiter umgebenden Mediums ($n_2 = 1$ für Luft in unserem Fall).

$$\beta = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_0} \sin (90^\circ - \Theta_c) \right)$$

Je größer β ist, um so größer ist die Effizienz der Koppelung. Sie wird bestimmt durch die Numerische Apertur (NA), für die bei $n_2 = 1$ gilt:

$$NA = \sin \beta$$

Weiterhin wichtig für die Koppelungseffizienz ist der Durchmesser des Lichtleiterkernes. Die ein-koppelbare Leistung wächst quadratisch mit der Numerischen Apertur und ebenfalls quadratisch mit dem Kerndurchmesser.

3 Laborversuche

3.1 Meßaufbau

Der Meßaufbau der Laborversuche war so auszulegen, daß mit ihm die Lichtauslese aus den Kalorimetermodulen des BEMC bestmöglichst simuliert werden konnte, ohne daß mühsame und zeitaufwendige Strahlungsmessungen mit hochenergetischen Elektronen durchgeführt werden mußten. Die Apparatur bestand im wesentlichen aus einer Szintillatorplatte deren Anregung mit UV-Licht und deren Auslese mit Y7-Wellenlängenschiebern erfolgte. Die Auslese der Wellenlängenschieber wiederum geschah mit Hilfe von Photodioden (Abb.3.2 und 3.4). Es wurden Untersuchungen zur Abhängigkeit der Diodensignale von dem Ort der Szintillatoranregung (transversale (x,y) - Ortsabhängigkeit) und von der Position des Szintillators relativ zum Wellenlängenschieber (longitudinale (z) - Abhängigkeit) durchgeführt (Koordinatensystem siehe auch Abb. 3.2), und verschiedene Wellenlängenschieberkonfigurationen und unterschiedliche Szintillatorplattenformen untersucht.

Folgende Anforderungen waren an die Apparatur zu stellen:

- Die Anregungssignale sollten konstant bzw. überprüfbar sein
- x,y , und z mußten komfortabel zu variieren sein
- Wellenlängenschieber, Szintillator und Dioden waren vor Streulicht zu schützen
- Die Auswertungen sollten simultan zu den Messungen möglich sein

3.1.1 Optischer und Mechanischer Aufbau

Die Szintillatoranregung erfolgte mit Hilfe einer Xenon-Blitzlampe mit einem UV-Glas Fenster. Die Wahl fiel auf diesen Lampentyp , da er sich bereits bei anderen Experimenten bewährt hatte [Fin89, Sch89]. Die Lampe erwies sich im permanenten Betrieb als außerordentlich stabil. Die Stärke der Lichtpulse wurde aber Kontrollmessungen ständig überwacht. Immerhin betrug die Dauer der Messungen ca. 15 Monate, und die Lampe diente über diese Zeit hinaus bei nachfolgenden Experimenten als Lichtquelle [Esch91]. Alle während der Messungen aufgetretenen Intensitätsverluste hatten ausschließlich mechanische Ursachen (z.B. verstellte Lichtleiterankoppelung). Das Licht der Xenon-Blitzlampe wurde in zwei Quarzlichtleiter eingespeist., und die Lichtleiter in eine lichtdichte Kiste geführt, in welcher sich gemäß den oben aufgeführten Anforderungen sämtliche lichtempfindlichen Teile der Apparatur befanden. Um eine Kontrolle der Blitzlampe, der Ankoppelung der Lichtleiter an die Lampe, der Lichtleitung innerhalb der Quarzfasern und der Ankoppelung von den Fasern in die Szintillatoren zu ermöglichen, wurde die nachfolgend beschriebene Anordnung gewählt (Abb 3.1, 3.2 und 3.4).

Eine der beiden Lichtleiterfasern diente zur Anregung eines kleinen Monitor-Szintillatorstücks, auf dem eine Photodiode des Typs HAMAMATSU S2575¹² aufgeklebt¹³ war (feste Referenz). Intensitätsverluste, die auf Störungen im Lichtweg zurückgehen, haben in aller Regel mechanische Ursachen, zu häufiges oder extremes Biegen der Lichtleiter oder Veränderungen der Ankopplungsgeometrien. Da der Lichtweg für die feste Referenz keinerlei mechanischen Beanspruchungen unterlag, ließ sich mit ihr die Stabilität der Xenon-Blitzlampe überprüfen. Die zweite Faser wurde zur Anregung der auszumessenden Szintillatorplatte eingesetzt, und konnte ebenfalls in einen feststehenden Referenzaufbau eingespeist werden. Mit dieser wählbaren Referenz ließ sich der Lichtweg der zweiten Faser auf zeitliche Konstanz überprüfen. Die szintillatorseitigen Enden der Lichtleiter waren jeweils mit einem zweiteiligen Hohlstopfen versehen, in dessen Bohrung die Faser geführt und mit Hilfe eines konischen Gewindes fest verklemt wurde (Abb.3.1). Damit war gewährleistet, daß der Abstand Faserende-Szintillator (ca. 1 mm) stets konstant blieb. Die Orte der Anregung der Szintillatorplatte ergaben sich durch eine Anordnung von Bohrungen ($\varnothing 6,2$ mm) in einer Lochmaske aus Aluminium, in welche der Lichtleiter mit Stopfen eingeführt werden konnte (Abb.3.1 und 3.2). Da ein Verdrehen des Stopfens zu Intensitätsänderungen führen konnte, wurde er an einer Seite abgeplattet um eine immer gleiche Orientierung gewährleisten zu können.

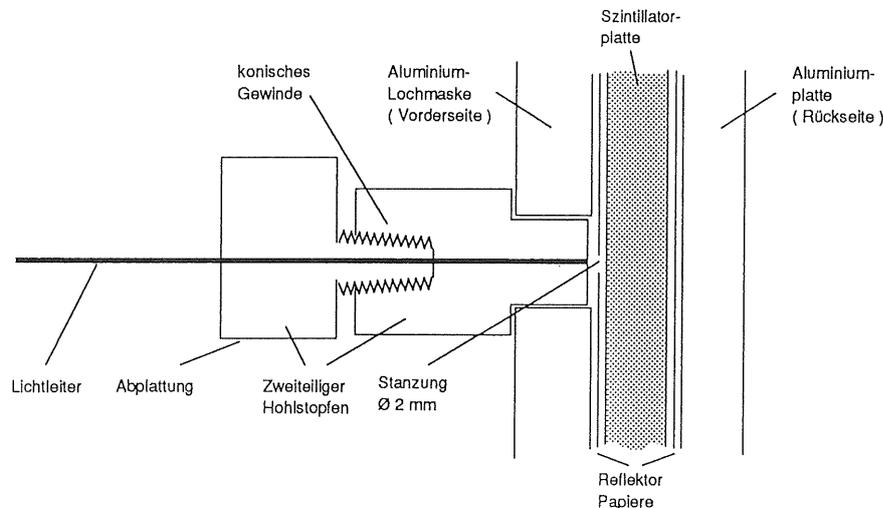


Abb.3.1 Ankopplung des Lichtleiters in den Szintillator.

Die auszumessende Szintillatorplatte war in einer Sandwichkonstruktion aus Aluminiumteilen eingebettet (Abb. 3.1), und Vorder- und Rückseite des Szintillators mit auswechselbaren Reflektorpapieren belegt. Die Lochmaske an der Seite, die der Lampe zugewandt war, und eine Rückenplatte aus Aluminium umschlossen Szintillator und Papier und bildeten einen stabilen Verbund. Aus dem Reflektorpapier zwischen dem Szintillator und der Lochmaske waren, entsprechend den Positionen der Bohrungen 2 mm große Löcher gestanzt. Durch diese Löcher ergab sich natürlich ein Unterschied zu den realen Reflexionsverhältnissen in den Kalorimetermodulen. Da die gesamte Fläche aller Löcher aber nur 0,02% bis 0,06% der Reflektorfläche ausmachte, wurde dieser Aspekt vernachlässigt. Als Kantenreflektoren kamen Papierstreifen oder Wellenlängenschieber-Dummys zum Einsatz. Die gesamte Verbundkonstruktion war zur unteren Kante hin

¹² Technische Daten siehe Anhang C

¹³ Anfangs kam bei allen Diodenklebungen der 2-Komponenten-Silikon-Kleber Silicone Rubber Compound RTV 615A und 615B zum Einsatz. In diesem Fall ließen sich die Dioden wieder ablösen und anderweitig verwenden. Später wurde der, ebenfalls 2-komponentige Kleber Stycast 1264 a u. b der Firma Grace benutzt. Stycast 1264 a u. b wurde auch bei der Serienproduktion der Kalorimetermodule eingesetzt. Klebungen mit diesem Kleber sind dauerhaft.

lichtoffen, so daß die Auslese des Szintillators mit Hilfe von Y7-Wellenlängenschiebern an dieser Kante erfolgen konnte. Die Wellenlängenschieber lagen flach in einer Schublade aus Aluminiumteilen, in welche vor dem Einlegen der Wellenlängenschieber noch Kanten- und Unterseitenreflektoren eingepaßt wurden. Reflektoren und Wellenlängenschieber ließen sich rasch auswechseln. Die Szintillatorplatte stand senkrecht zum Wellenlängenschieber in einer Führung von zwei U-Profilen, die an verschiedenen longitudinalen Positionen - entsprechend unterschiedlichen Tiefen in den Kalorimetermodulen - mit der Schublade verschraubt werden konnten. Die achtzehn möglichen z-Positionen hatten Anfangs einen Abstand von 20 mm. In einer verbesserten zweiten Apparatur gab es 25 mögliche Meß-Positionen und der Abstand zwischen zwei Positionen wurde auf 13,4 mm reduziert. Der Abstand zwischen zwei Meßpunkten entspricht der Entfernung von der Mitte einer Szintillatorplatte im Kalorimeter-Modul bis zur Mitte der übernächsten Platte, so daß für Untersuchungen der longitudinalen Abhängigkeiten die Position jeder zweiten Szintillatorplatte simuliert werden konnte. Um einen exakten Abstand zwischen Szintillator und Wellenlängenschieber zu gewährleisten¹⁴, wurden die Ränder der Schublade einige Zehntel Millimeter höher ausgeführt als die Dicke von Wellenlängenschieber und Reflektorpapier. Die Lichtauslese erfolgte mit Photodioden, die an die hintere Schmalkante der Wellenlängenschieber aufgeklebt waren.

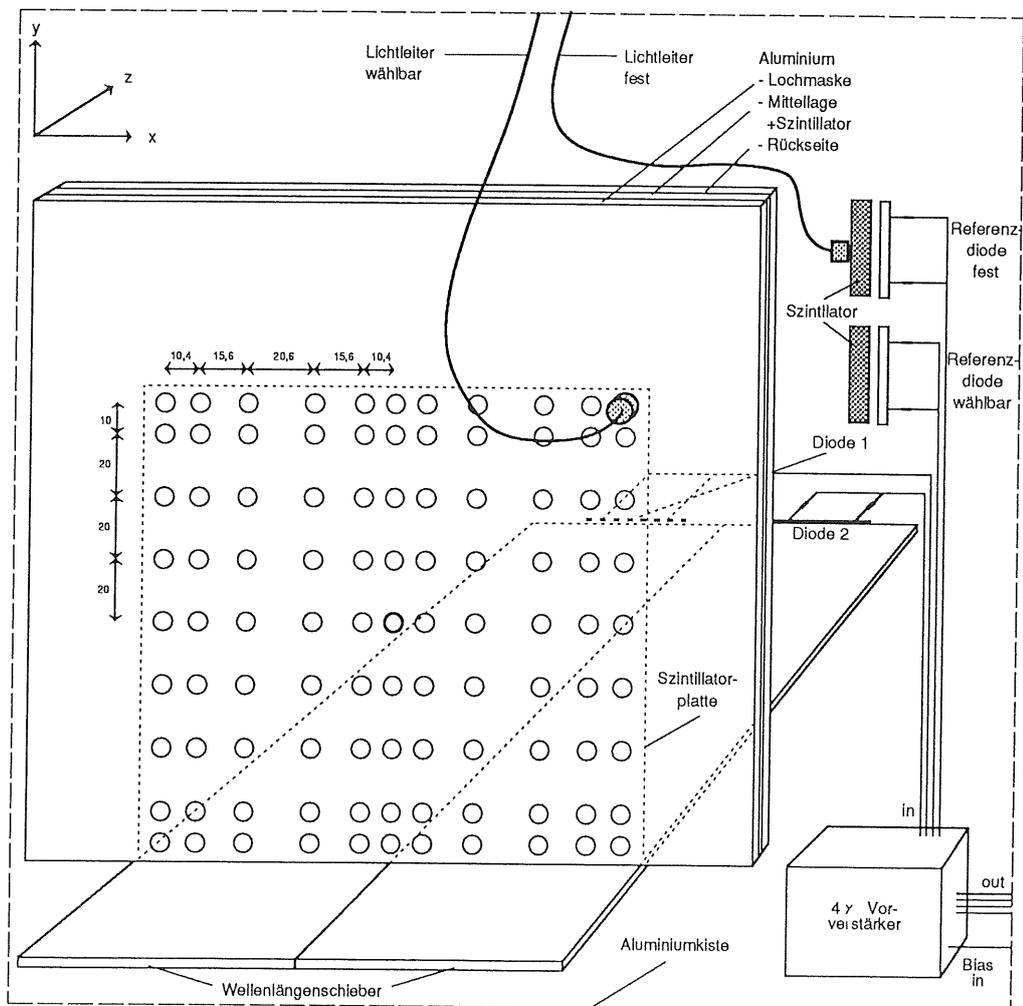


Abb.3.2 Meßaufbau innerhalb der lichtdichten Kiste (Angaben in mm)

¹⁴ In den Kalorimetermodulen werden als Abstandhalter 200 µm starke Angelsehnen verwendet.

Im Verlauf der Messungen wurde die Apparatur entsprechend der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt. Die zu Beginn verwandte Lochmaske besaß 6×6 Bohrungen im gleichmäßigen Abstand von 25 mm von Mittelpunkt zu Mittelpunkt und hatte geringfügig größere Abmessungen als die quadratische Szintillatorplatte. Die Kantenreflektoren oder Wellenlängenschieber-Dummys wurden mit Schaumstoffstreifen angedrückt und die gesamte Verbundkonstruktion mit Klebeband zusammengehalten. Daraus ergaben sich einige Nachteile:

- Trapezförmige Szintillatorplatten konnten aufgrund der zu geringen Abmessungen der Maske nicht untersucht werden
- Die für eine homogene Lichtauslese sehr wichtigen Kantenreflektoren ließen sich nicht präzise genug fixieren, da der Zusammenhalt mit Schaumstoff und Klebeband zu ungenau war
- Die Messungen waren nicht immer reproduzierbar. Auch in diesem Fall schien die Ursache der Zusammenbau mit Klebeband zu sein
- Aufgrund der 6×6 -Lochanordnung gab es keine Bohrung für die Lichteinleitung in die Zentralposition
- Das 6×6 -Raster war nicht fein genug, um Randeffekte und die starken Änderungen der Einzeldiodensignale bei geteilten Wellenlängenschiebern in der Nähe der Mittelachse untersuchen zu können

Deshalb wurde eine zweite Apparatur entwickelt und gebaut. Diese hatte eine 11×9 -Lochmaske mit unterschiedlichen Lochabständen (Abb 3.3). Sie war insgesamt größer und konnte später noch zur Untersuchung der trapez- und dreiecksförmigen Szintillatorplatten benutzt werden [Esch91]. Die Teile der Lochmaske waren verschraubt und nicht mehr mit Klebeband zusammengehalten. Außerdem wurden die Teile der zweiten Apparatur mit geringeren Fertigungstoleranzen hergestellt.

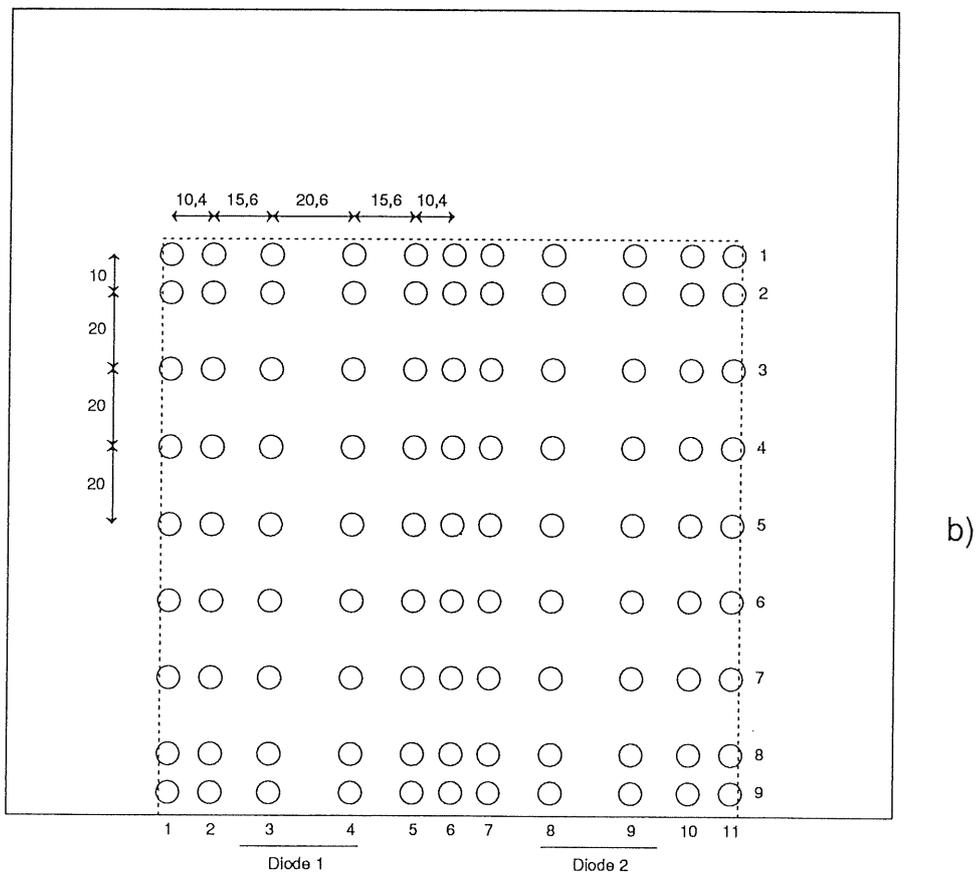
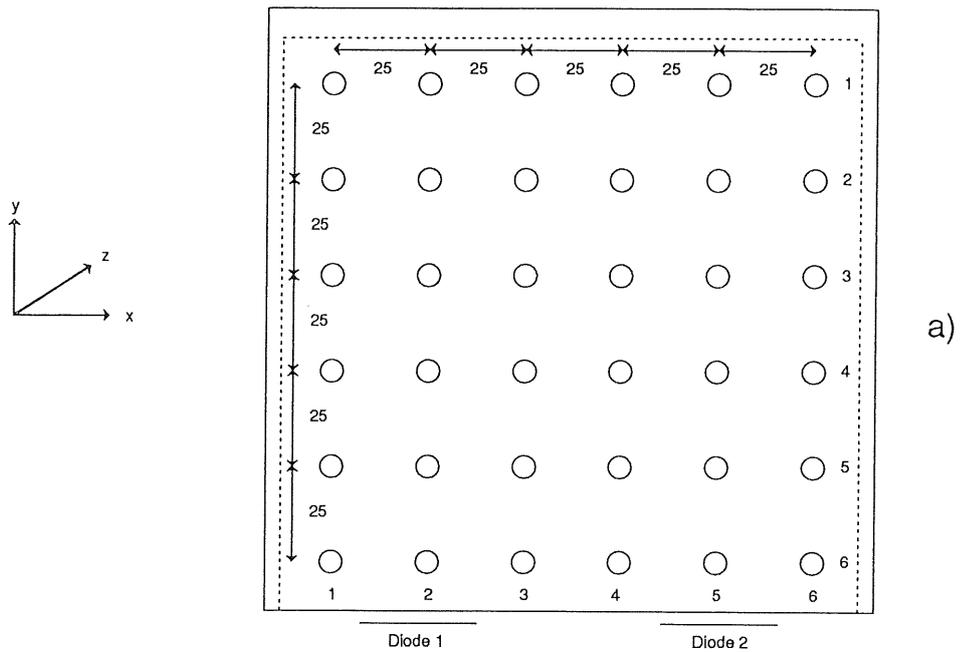


Abb.3.3. Lochmasken (Angaben in mm)
 Die Abmessungen einer quadratischen Szintillatorplatte (150x150 mm) sind gestrichelt eingezeichnet.

3.1.2 Elektronischer Aufbau

Die Auslese der Wellenlängenschieber erfolgte mit Hilfe von HAMAMATSU S2575 Photodioden. Die sehr kleinen Diodensignale wurden mit ladungsempfindlichen Silena Vorverstärkern und anschließend mit Emetron e.m. 1003 Hauptverstärkern¹⁵ verstärkt, so daß sie im Akzeptanzbereich der verwendeten NIM-Analog-zu-Digital-Konvertern (NIM-ADC's)¹⁶ lagen.

Die Photodioden und Vorverstärker befanden sich innerhalb der lichtdichten Kiste. Die Bias-Spannung und die Länge der Kabel zwischen den Vorverstärkern und den Dioden haben einen Einfluß auf das Rauschen und damit auf die Energieauflösung der gemessenen Signale. Daher wurden die Kabel zwischen den Vorverstärkern und den Dioden möglichst kurz und störungsunanfällig gewählt. Es wurden Lemo-Koaxialkabel von 20 cm Länge und einer Kapazität von 100 pF/m benutzt. Die Bias Spannung betrug 24 V.

Die Hauptverstärker-Pulse wurden mit NIM-ADC's digitalisiert und mit einem Vielkanal-Analysator der Firma Nuclear Data spektroskopiert. Die so erzeugten Pulshöhenspektren konnten simultan zu den Messungen (Online-Verfahren) auf einem angeschlossenen Monitor ausgewertet, d.h. die Lage und Breite der Verteilung bestimmt werden (Abb. 3.4).

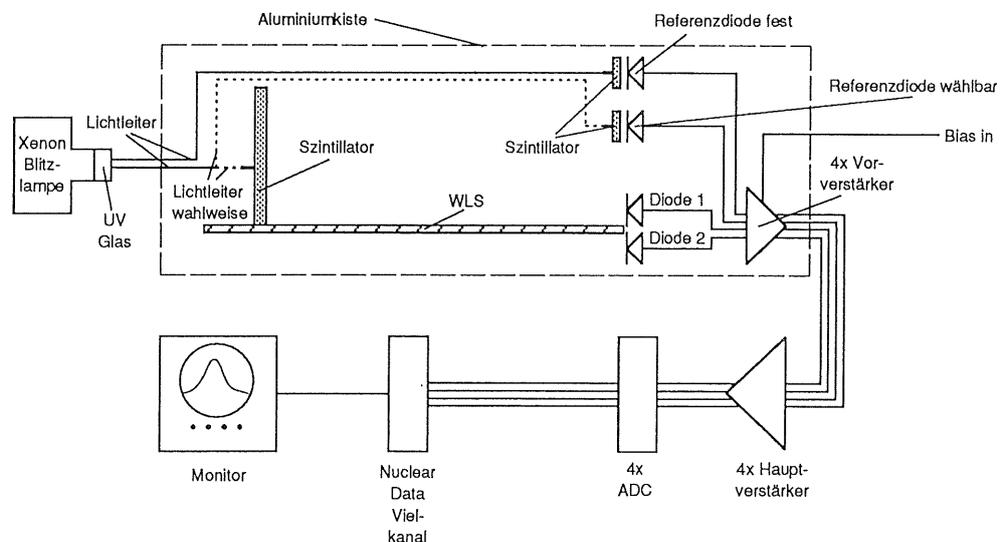


Abb.3.4 Schematisierter Meßaufbau (optisch, mechanisch und elektronisch)

Da eine schnelle Auswertung absolute Priorität hatte, wurden die Monitor-Spektren direkt abgelesen und die Werte für Mittelwert (mean value) und Halbwertsbreite (FWHM = Full-Width-Half-Maximum) registriert. Die zur weiteren Auswertung notwendige Eingabe der Meßwertdaten in die DESY-IBM bzw. in einen Apple Macintosh erfolgte manuell.

¹⁵ Mit einer 2 µs Shapekonstante

¹⁶ NIM-ADC's benötigen ein positives Signal von 0 - 8 V und einer Länge von 2 µs.

3.2 Meßprogramm und Ergebnisse

Die Laborversuche wurden durchgeführt um die Kalorimetermodule des BEMC bezüglich der Lichtauslese zu optimieren. Zahlreiche Einzelkomponenten der Module wurden untersucht. Es war notwendig eine Bewertung folgender Kriterien zu erzielen:

- Wie kann ein stabiler Zusammenhalt der Modulkomponenten gewährleistet werden, ohne daß eine solche Konstruktion die Lichtauslese ungünstig beeinflußt?
- Welches ist eine geeignete Konfiguration der Wellenlängenschieber, so daß eine homogene Lichtauslese bei gleichzeitig guter intrinsischer Ortsauflösung möglich wird?
- Wieviele Dioden sind zweckmäßig und wie hat der optische Kontakt zwischen den Wellenlängenschiebern und den Dioden auszusehen?
- Welches Material eignet sich zur Herstellung der Reflektoren für die Szintillatorplatten und die Wellenlängenschieber?
- Wie ist insbesondere der Einfluß der Reflektoren an den Schmalkanten der Szintillatorplatten und Wellenlängenschieber?
- auf welche Weise lassen sich bei einer ausgewählten Konfiguration die transversalen und longitudinalen Ortsabhängigkeiten der Diodensummensignale homogen gestalten?

In diesem Kapitel werden die zu den angeführten Punkten durchgeführten Meßprogramme vorgestellt, die bei der Durchführung aufgetretenen Probleme beschrieben sowie die Auswertung der Meßdaten und die damit verbundenen Entscheidungen erläutert.

3.2.1 Koordinatensysteme, Normierungen und Symmetrisierungen

Bei der Beschreibung der Meßdaten und Ergebnisse kommen je nach Zweckmäßigkeit zwei verschiedene Bezugssysteme zur Anwendung. Es sind beides kartesische Koordinatensysteme. Die Szintillatorplatten spannen die x,y-Ebene auf und die z-Richtung wird durch die Längsrichtung der Wellenlängenschieber definiert. Der Ursprung des einen Systems befindet sich im Mittelpunkt der ersten Szintillatorplatte. Für Messungen mit der 6x6-Apparatur ergeben sich also folgende Koordinaten Intervalle: $(-62,5 \text{ mm} \leq x \leq 62,5 \text{ mm})$, $(-62,5 \text{ mm} \leq y \leq 62,5 \text{ mm})$ und in z-Richtung $(0 \text{ mm} \leq z \leq 340 \text{ mm})$.

Bei der 11x9-Apparatur gilt: $(-72,6 \text{ mm} \leq x \leq 72,6 \text{ mm})$, $(-70,0 \text{ mm} \leq y \leq 70,0 \text{ mm})$ und in z-Richtung $(0 \text{ mm} \leq z \leq 321,6 \text{ mm})$ (Abb.3.3 und Kapitel 3.1.1).

Bei dem zweiten System ergeben sich die Koordinaten der Orte der Lichteinleitung aus einer Durchnummerierung. So bekommt die Bohrung oben links bei der 6x6-Maske, wie auch bei der 11x9-Maske die Bezeichnung (1,1), während die Bohrung rechts unten bei der 6x6-Maske (6,6) und bei der 11x9-Maske (11,9) heißt (Abb.3.3). Hieraus ergibt sich die Problematik, daß ein und dieselben (x,y)-Koordinaten bei den verschiedenen Apparaturen verschiedene Positionen bezeichnen. Wo immer die Nummerierungsmethode benutzt wird, wird explizit auf die verwendete Apparatur verwiesen.

Für die z-Positionen bei der 6x6-Apparatur ergeben sich Werte von 1 bis 18 - Es könnte an 18 verschiedenen äquidistanten (20 mm) z-Positionen gemessen werden. Bei der 11x9-Apparatur ließen sich Werte von 1 bis 25 angeben. Da in diesem Fall der Abstand zweier möglichen z-Positionen genau der Entfernung einer Szintillatorplatte im Kalorimetermodul zur übernächsten Szintillatorplatte entspricht, wird bei der 11x9-Apparatur die z-Position als Szintillatorplattennummer angegeben. Die erste Meßposition entspricht der ersten Szintillatorplatte im Modul und die 24-zigste Position der 49-zigsten Szintillatorplatte.

Weiterhin gelten für die Bezeichnung der Dioden und die Summation der Diodensignale folgende Standards: Vom Wechselwirkungspunkt aus betrachtet ist die Diodennummerierung der quadratischen Stacks entsprechend der Benennung wie sie in Abb.3.6b zu sehen ist. Die Diodennummern finden sich in dem Schaubild "Sz. ohne Stifte, Wls breit". Die Photodioden werden durch dicke schwarze Balken symbolisiert. Diode 1 bis Diode 4 bezeichnen die Photodioden der elektromagnetischen Wellenlängenschieber. Die Bezeichnungen Diode 5 und Diode 6 stehen für die Signale der hadronischen Wellenlängenschieber bei denen immer zwei Photodioden pro Wellenlängenschieber parallel zu einem Signal zusammengefasst werden. Die hadronischen Wellenlängenschieber und ihre Photodioden sind in der Abb.3.6b nicht eingezeichnet, auf sie wird an späterer Stelle eingegangen.

In den realen Kalorimetermodulen gibt es also vier elektromagnetische Wellenlängenschieber mit jeweils einer Photodiode. Bei dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Meßaufbau werden aber nur zwei Photodioden verwendet (D1 und D2). Die gewissermaßen fehlende Hälfte der Signale ergibt sich aus der einfachen Geometrie der quadratischen und rechteckigen Szintillatorplatten. Bei einer Lichteinleitung am Punkt (2,2) (Nummerierung bei 6x6-Maske) entspricht das Einzelsignal der Diode 1 genau dem Einzelsignal einer Diode 3 für den Fall der Lichteinleitung am Punkt (2,5) (Abb.3.3 und Abb.3.6). Für die Bestimmung eines Summensignals am Punkt (x,y) über alle vier elektromagnetischen Photodioden bei der 6x6-Apparatur ergibt sich folgende Vorschrift:

$$\text{Summensignal } (x,y) = D1 (x,y) + D2 (x,y) + D1 (x, (7 - y)) + D2 (x, (7 - y))$$

Für die 11x9-Apparatur gilt entsprechend:

$$\text{Summensignal } (x,y) = D1 (x,y) + D2 (x,y) + D1 (x, (12 - y)) + D2 (x, (10 - y))$$

Die nachfolgenden Darstellungen sind normiert. Dies ist für die Messungen der Szintillatorplatten stets als Normierung auf den Plattenmittelpunkt oder auf Punkte auf der Seitenhalbierenden bei $y = 0$ mm zu verstehen. Bei der 11x9-Maske gab es eine Mittelbohrung und bei der 6x6-Maske wurde der zur Normierung notwendige Wert für die Mittenanregung durch lineare Interpolation gewonnen.

Aufgrund der beschriebenen Verfahren zur Bildung der Summensignale ist es klar, daß die Meßwerte stets symmetrisch zur Horizontalen bei $y = 0$ mm verlaufen. Eigentlich sollten die Werte aufgrund der vorliegenden Symmetrien ebenfalls symmetrisch zur Vertikalen bei $x = 0$ mm sein. Dies war nicht immer vollkommen der Fall, da es z.B. bei ungleichmäßig anliegenden Kantenreflektoren zu Verzerrungen der Symmetrie kommen konnte. Wenn im Folgenden davon die Rede ist, daß die Werte symmetrisiert wurden so bedeutet dies für Messungen mit der 6x6-Apparatur:

$$\text{Summensignal } (x,y)_{\text{sym}} = \frac{\text{Summensignal } (x,y) + \text{Summensignal } ((7 - x),y)}{2}$$

und für die 11x9-Apparatur:

$$\text{Summensignal } (x,y)_{\text{sym}} = \frac{\text{Summensignal } (x,y) + \text{Summensignal } ((10-x), y)}{2}$$

3.2.2 Testpulsermessungen

Zur Überprüfung der bei den Laborversuchen verwendeten Elektronik wurden zwei Arten von Testpulsermessungen durchgeführt. Mit Hilfe des benutzten Pulsers¹⁷ ließen sich NIM-gerechte Signale erzeugen.

In der ersten Meßreihe wurden die Signale des Testpulsers direkt auf die ADC's gegeben und in der zweiten Meßreihe in die Vorverstärker eingespeist. Der zweite Fall diente der Überprüfung der gesamten elektronischen Kette nach den Photodioden.

Die Abb.3.5 zeigt die Ergebnisse dieser beiden Meßreihen. An die Meßwerte wurden Ausgleichsgeraden nach dem Verfahren der kleinsten Quadrate angepaßt. Die Parameter für die Ausgleichsgeraden können der Tabelle Tab.3.1 entnommen werden.

Die Messungen der ADC's sind ausnahmslos linear und die Fitfunktionen gehen alle durch den Nullpunkt. Die Ergebnisse mit der gesamten elektronischen Kette ergaben ebenfalls einen linearen Zusammenhang zwischen Testpulsersignal und ADC-Kanal. Allerdings ergaben sich Kanaloffsets von ca. -2 Kanälen.

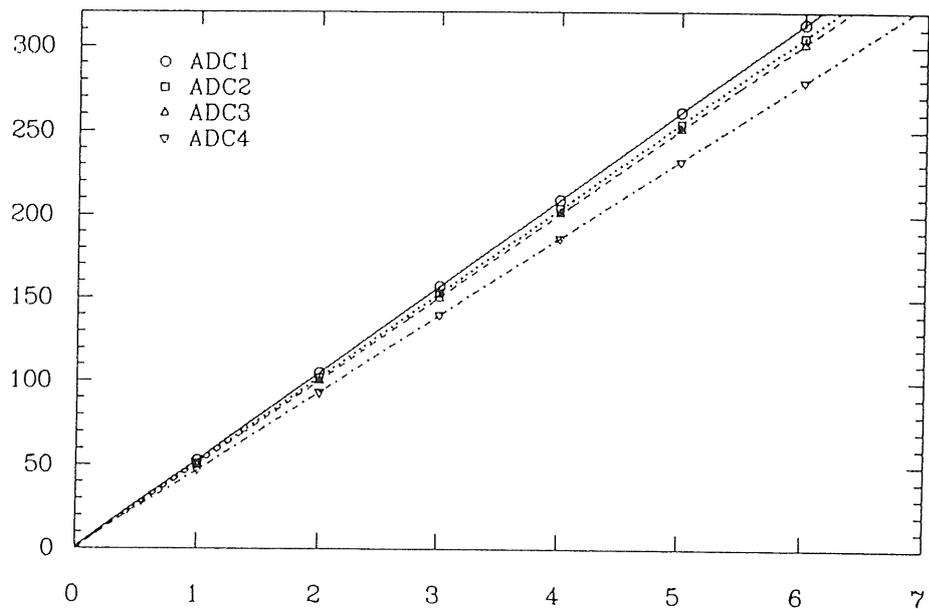
Fitfunktion: $F(X) = A(1) * X + A(2)$

	A(1)	Fehler von A(1)	A(2)	Fehler von A(2)
ADC 1	52,0	0,2	1,0	0,9
ADC 2	50,8	0,2	0,5	0,9
ADC 3	50,3	0,2	-0,4	0,9
ADC 4	46,4	0,2	0,5	0,9
VV 1	52,9	0,2	-2,2	0,9
VV 2	33,7	0,2	-2,0	0,9
VV 3	29,6	0,3	-2,8	0,9

Tab.3.1 Parameter der Ausgleichsgeraden für die Testpulsermessungen

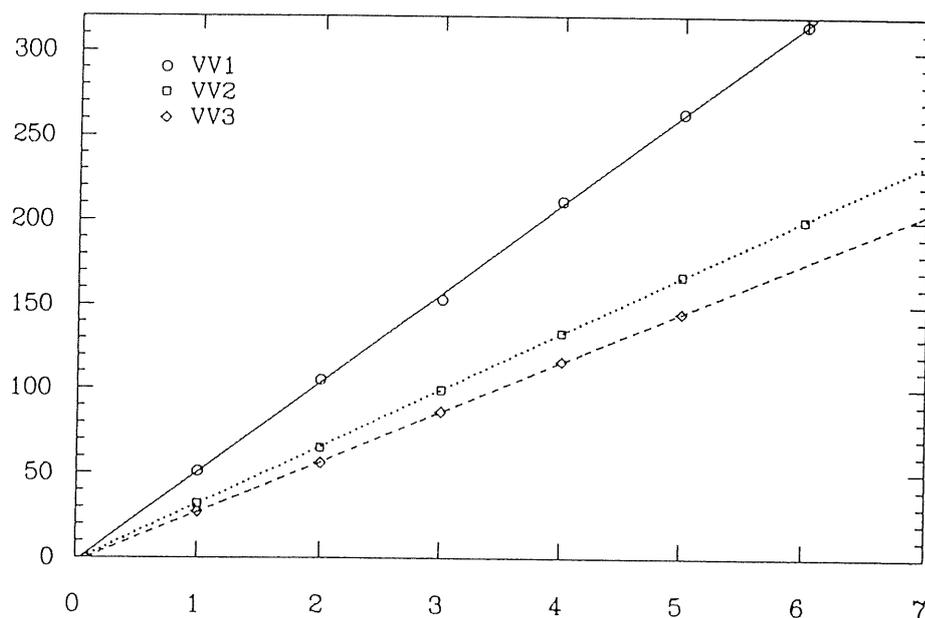
¹⁷ BNC pulse generator Pb-K

ADC-Kanäle



Testpuls-Amplitude

ADC-Kanäle



Testpuls-Amplitude

Abb.3.5 Ergebnisse der Pedestalmessungen
Das obere Diagramm zeigt die Ergebnisse der ADC-Messungen. Beim unteren Diagramm wurde die gesamte elektronische Kette nach den Photodioden getestet. An die Meßergebnisse sind Geraden gefittet.

3.2.3 Mechanischer Aufbau der Module

Die Kalorimetermodule des BEMC werden in einem tonnenförmigen Trägerahmen aus Aluminium einzeln eingehängt. Eine solche Konstruktion ermöglicht es, Module zu Reparatur- oder Wartungszwecken auszuwechseln ohne das der Detektor komplett zerlegt werden muß. Jedes quadratische Modul hat ein Gewicht von ca. 40 kg und wird an Front- und Rückenplatte gehalten. Um einen Durchhang des Moduls infolge seines Eigengewichtes zu verhindern, war es notwendig ein Gehäuse bzw. eine Halterung zu entwickeln, welche ausreichend stabil und damit dieser Aufgabe gewachsen war.

Erste, in den Arbeiten von [Wun88] und [Pep89] untersuchte Prototypen, erhielten ihre Stabilität durch Gewindestifte (\varnothing 4 mm). Diese Stifte wurden durch Bohrungen in den Ecken aller für ein Modul verwendeten Blei- und Szintillatorplatten geführt und mit der Front- und Rückenplatte verschraubt. Im Falle der quadratischen Prototypen erfolgte die Lichtauslese der Szintillatorplatten durch je vier Wellenlängenschieber welche 3 cm breit und 3 mm dick waren und über die ganze Länge reichten. Jede Seite eines Moduls war mit einem Wellenlängenschieber versehen, der (vom Vertex aus betrachtet) links von der Seitenmitte derart in die Szintillator- und Bleiplatten eingelassen war, daß er plan mit der Außenfläche abschloß (Abb.3.6b Schaubild "Sz. mit Stiften, Wlschmal"). Auf diese Weise war gewährleistet, daß bei jeder beliebigen Anordnung der Module im Gesamtkalorimeter sich niemals zwei Wellenlängenschieber gegenüberliegen konnten. Größere Flächen nichtaktiven Materials (Cracks) wurden so vermieden. Eine starke Ortsabhängigkeit der Einzeldiodensignale ließ Hoffnungen auf eine gute intrinsische Ortsauflösung zu. Die Homogenität der quadratischen Module, d.h. die Abhängigkeit der gemessenen Energie (Diodensummensignale) vom Einschußort betrug nach [Wun88] $\pm 20\%$. Dieser Wert ließ sich mit Softwarekorrekturen auf $\pm 3\%$ verbessern.

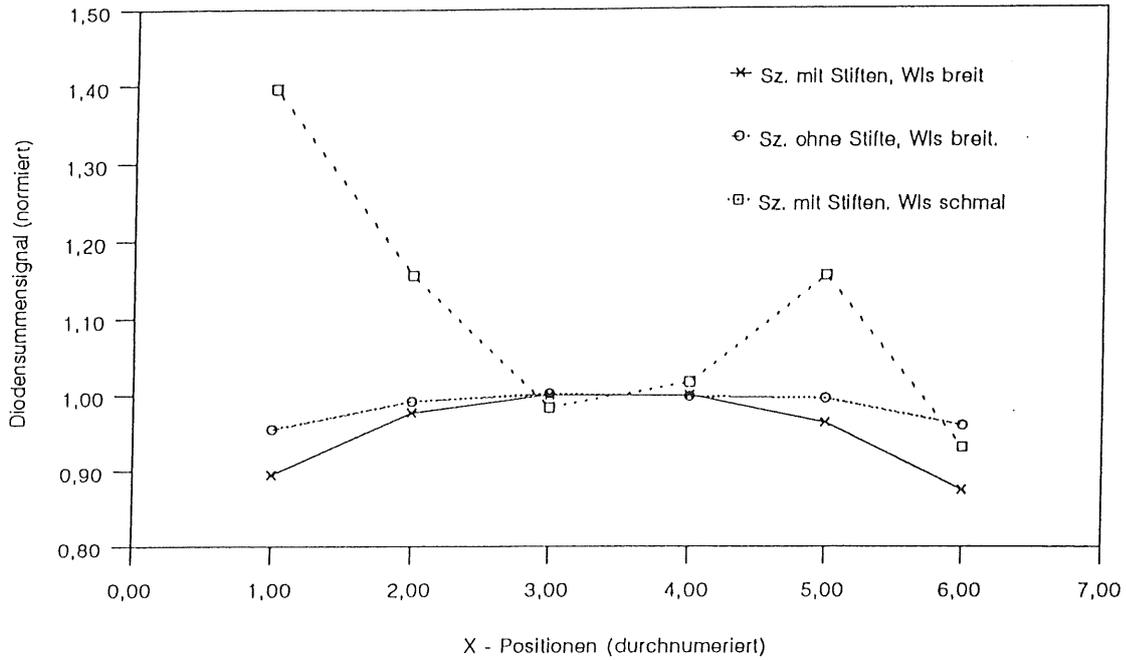
Damit sind die Ortsabhängigkeiten der Signale für diese Geometrie groß. Es mußte ein Moduldesign gefunden werden, welches bereits ohne Softwarekorrekturen wesentlich homogenere Werte liefert.

So war schon vor Beginn der vorliegenden Arbeit die Entscheidung gefallen, sich gegenüberliegende über die gesamte Breite und Länge der Module gehende elektromagnetische Wellenlängenschieber einzusetzen. Ungeklärt aber war die Frage inwieweit sich die Verwendung von durch die Szintillatorplatten geführten Gewindestifte auf die Homogenität der Diodensummensignale auswirkten. In Abb. 3.6a sind einige charakteristische mit dem 6x6 Lochmaske durchgeführte Messungen zu sehen. Die Schaubilder der dazugehörigen Szintillatorplattengeometrien befinden sich in Abb.3.6b.

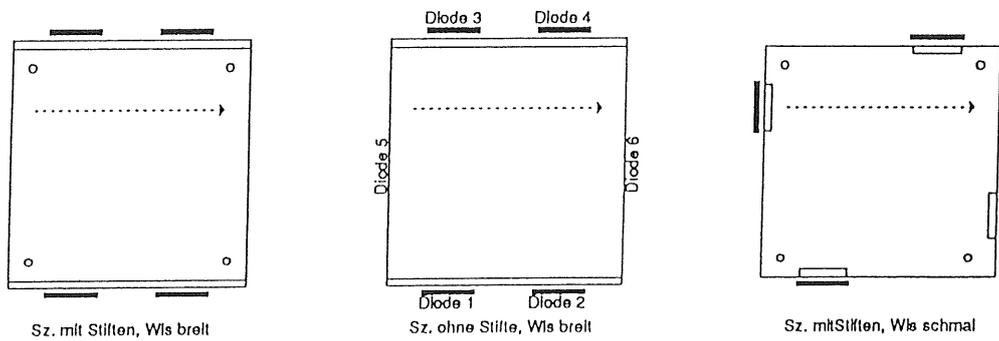
Es sind drei x-Scans bei $y = 2$ (Numerierungscoordinate) dargestellt. Beim Vergleich der Messungen der beiden Szintillatorplatten, die mit breiten Wellenlängenschiebern ausgelesen wurden, fällt bei der Platte mit den Bohrungen für die Gewindestifte der deutliche Abfall der Signale zum Rand hin auf. Der durch die Bohrungen erzeugte "Schatten" führt offensichtlich zu deutlichen Intensitätsverlusten. Obwohl die Bohrungen poliert waren und man davon ausgehen kann, daß das Licht zum größten Teil an diesen Stellen totalreflektiert wurde, scheint es zur Gesamtbilanz nicht mehr beizutragen.

Außer den beiden Bauformen mit breiten Wellenlängenschiebern, ist in Abb.3.6a noch eine Messung einer Szintillatorplatte entsprechend der von [Wun88] gemessenen Prototypen dargestellt. Besonders interessant hierbei ist der große Gewinn an Homogenität beim Übergang zu einer Bauart mit breiten Wellenlängenschiebern. In Abb.3.6c ist ferner die Darstellung einer Teststrahlungsmessung aus der Arbeit von [Wun88] übernommen, bei der der Verlauf des unkorrigierten y-Scans in Modul B eine erhebliche Übereinstimmung mit dem Verlauf des mit der 6x6-Maske, bei den Labormessungen durchgeführten, y-Scans zeigt. Die Übereinstimmung in den Messergebnissen der Teststrahl- und Labormessungen ist gut und kann als Indiz für die Übertragbarkeit der im Labor gewonnen Ergebnisse gelten.

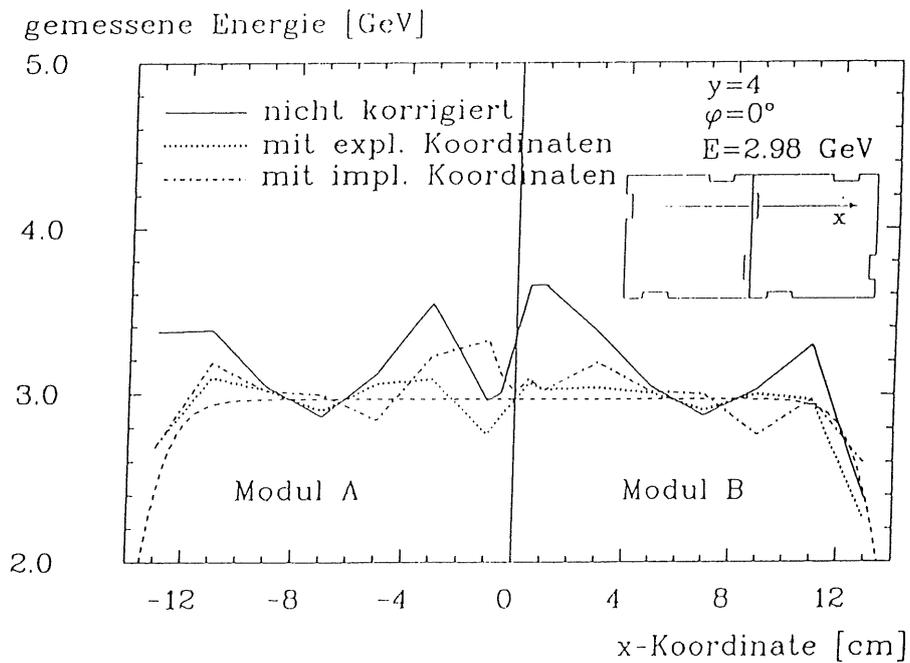
Aufgrund der beschriebenen Gegebenheiten wurde das Konzept einer modulinternen Halterung mit Hilfe von Gewindestiften verworfen. Im endgültigen Design der Kalorimetermodule wird die notwendige Stabilität der Kalorimetersegmente durch eine Stahlhülle, wie sie im Kapitel 2.2 beschrieben wurde, erzielt.



a



b



c

Abb.3.6 Vergleich verschiedener Bauformen quadratischer Szintillatorplatten.

3.2.4 Wahl des Reflektormaterials

Es wurden verschiedenen Materialien mit Hilfe der 6x6-Apparatur auf ihre Tauglichkeit als Reflektoren untersucht. Dabei waren folgende Ansprüche an das Material zu stellen:

- Das Reflektormaterial sollte dünn sein, um Cracks zu vermeiden
- Durch die Verwendung des Reflektormaterials sollte eine hohe Lichtausbeute erreicht werden
- Das Reflektormaterial sollte eine raue Oberfläche besitzen um eine gute diffuse Reflexion des ausgetretenen Lichtes zu gewährleisten und unter Druck die Totalreflexion innerhalb der lichtleitenden Materialien nicht zu beeinträchtigen (bei glatten Materialien ist die Gefahr des Festklebens hoch)

In der Tabelle Tab.3.2 sind die Angaben zur Materialbeschaffenheit aufgelistet. Tekla-Folie ist favorisiert durch eine sehr geringe Materialstärke. Allerdings kann es aufgrund der glatten Oberfläche zu den oben beschriebenen Problemen kommen. Während der Messungen fiel auf, daß sich die Folie teilweise stark verwellte und die Reflexionseigenschaften dadurch sehr inhomogen wurden. Der Zeichenkarton war sehr stabil und damit frei von Verwellungen, aber auch sehr dick. Das Tyvecpapier lag in seinen Eigenschaften zwischen denen der anderen Materialien.

Reflektormaterial	Dicke des Materials (mm)	Oberflächenbeschaffenheit
Tedlar-Folie ¹⁸	< 0,1	glatt
weißer Zeichenkarton	> 0,4	sehr rau
weißes Tyvecpapier ¹⁹	0,2	rau

Tab.3.2 Materialstärken und Oberflächenbeschaffenheit verschiedener Reflektormaterialien.

Bei den Versuchen zur Bestimmung der Lichtausbeute wurden nur die Wellenlängenschieberreflektoren gewechselt. Das Szintillatorreflektormaterial war in allen Fällen weißer Zeichenkarton. Die Lichtausbeute wurde an verschiedenen z-Positionen ermittelt. Dazu erfolgte eine Lichteinleitung an den Stellen (x_i, y_j) mit $i = 1, 2$ und $j = 1, \dots, 6$. Dann wurden alle Pulshöhen für eine z-Position und ein Material aufsummiert und der Wert für Tekla-Folie gleich eins gesetzt:

$$\text{Lichtausbeute}_{\text{Material}} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^6 \text{PH}(x_i, y_j)}{\text{Lichtausbeute}_{\text{Tekla-Folie}}}$$

¹⁸ Ein DUPONT Produkt welches bei der Firma KREMPEL in Vaihingen/Enz bezogen wurde.

¹⁹ Dieses Material wurde über die Firma KLINKE DRUCK in Hamburg-Norderstedt bezogen.

Die Ergebnisse der Messungen sind in der Tab.3.3 aufgeführt. Das Tyvecpapier zeigt für alle z-Positionen die höchsten Lichtausbeuten, außerdem ist es in den Punkten Oberflächenbeschaffenheit und Materialstärke ebenfalls gut geeignet. Daher wird diese Papiersorte in den Kalorimetermodule des BEMC für den Bau sämtlicher Reflektoren benutzt.

Reflektormaterial	Lichtausbeute z =1	Lichtausbeute z =14	Lichtausbeute z =18
Tekla-Folie	1,000	1,000	1,000
weißer Zeichenkarton	1,039	1,039	1,037
weißes Tyvecpapier	1,064	1,063	1,060

Tab.3.3 Lichtausbeute bei verschiedenen Reflektormaterialien.

3.2.5 Optimierung der transversalen Abhängigkeit

Aufgrund der Ergebnisse der Labormessungen ist für das Design der quadratischen Kalorimetermodule bisher festgelegt:

Die elektromagnetischen Wellenlängenschieber gehen über die ganze Länge der Module und es befinden sich je zwei, zusammen über die ganze Breite reichend, an sich gegenüberliegenden Seiten der Module. Jeder Wellenlängenschieber ist mit einer Photodiode an der hinteren Schmalkante bestückt. Die Szintillatorplatten sind an Vorder- und Rückseite mit weißem Tyvecpapier als Reflektor belegt. Die rechteckigen Szintillatorplatten erhalten zusätzlich an den nicht ausgelesenen Schmalkanten aus demselben Material Kantenreflektoren. Ferner ist die Außenseite der Wellenlängenschieber ebenfalls mit weißem Tyvecpapier versehen. Dieser Unterseiten-Reflektor ist an der, der Photodiode gegenüberliegenden Schmalseite, entsprechend der Dicke des Wellenlängenschiebermaterials gefalzt, und dient dort als Kantenreflektor. An den langen Seiten der Wellenlängenschieber übernimmt die Aluminiumschatulle, in welcher die Wellenlängenschieber liegen, die Aufgabe als Kantenreflektor. An diesen Stellen wird aus fertigungstechnischen Gründen auf Tyvecpapier verzichtet.

Nachdem diese Geometrie festgelegt war, war es notwendig die Homogenität der Signale sowohl in transversaler wie auch in longitudinale Richtung weiter zu verbessern. Dies wurde durch eine partiellen Beeinflussung des Reflexionsverhaltens (Schattierung) der Reflektorpapiere erreicht. Alle dazu durchgeführten Messungen wurden mit der 11x9-Apparatur durchgeführt.

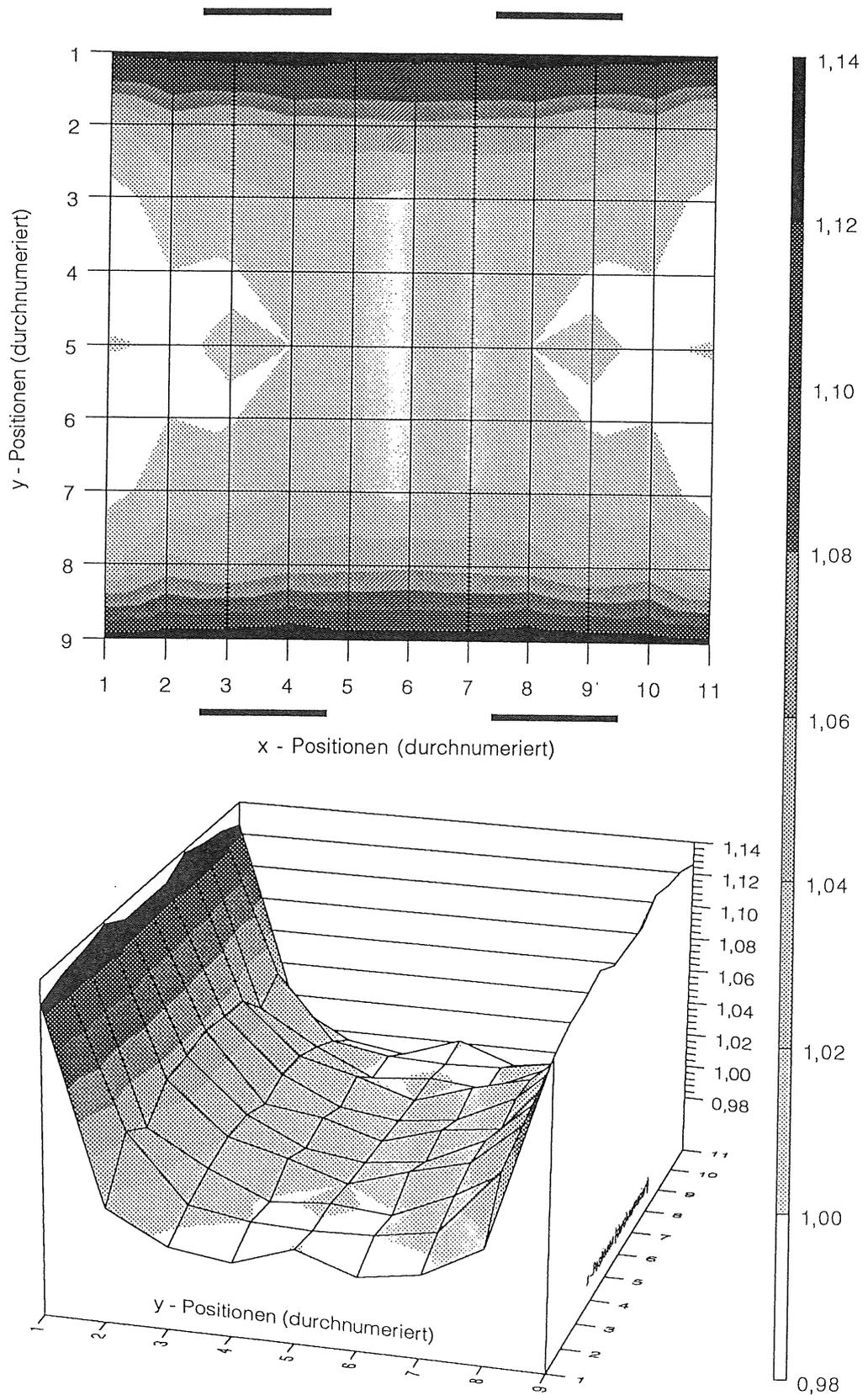


Abb.3.7 Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer rechteckigen Szintillatorplatte ohne Abschattungen.

Alle in diesem Kapitel und im Anhang D vorgestellten Messungen erfolgten bei $z = 21$, d.h. der Position der 21-zigsten Szintillatorplatte in den Kalorimetermodulen.

In Abb. 3.7 sind die Messungen einer rechteckigen Szintillatorplatte dargestellt. Als Reflektoren an Vorder- und Rückseite sowie an den kurzen Schmalkanten kamen ausschließlich weiße Tyvecpapiere zum Einsatz. Im oberen Teil der Abbildung sind die Meßwerte in ein Kontur- und im unteren Teil in ein Oberflächendiagramm umgesetzt. Die Darstellungen sind normiert und symmetrisiert (siehe Kapitel 3.2.1). Im Konturdiagramm ist zur besseren Orientierung die Lage der Dioden durch schwarze Balken angedeutet. Die Abstufung der Konturlinien erfolgt in 2% Schritten. Es ist zu beachten, daß die Abstände der x- und y-Positionen jeweils als äquidistant abgebildet wurden. Dies ist in der Realität aber nicht der Fall gewesen. Die Orte der Lichteinleitung entsprechen den in Abb. 3.3 bzw. in Abb. 3.8 dargestellten. Daraus ergibt sich eine leichte Verzerrung der Diagramme in der Abb. 3.7, welche für die Beurteilung der Darstellungen aber irrelevant ist.

Es fällt auf, daß man bei x - Scans - parallel zu den Wellenlängenschiebern mit den Dioden - meist in einem $\pm 2\%$ Bereich der Signale bleibt. Daher ist es die vordringlichste Aufgabe eine Homogenität der Signale in y - Richtung zu erzielen. Der erste Ansatz auf diesem Weg ist eine Abschattung der Reflektoren, welche sich als Anlehnung an den Verlauf der Konturlinien ergibt. Also an Orten großer Signalhöhen wird besonders stark abgeschattet und umgekehrt.

In Abb. 3.8 sind einige der Abschattungen welche untersucht wurden aufgeführt. Es läßt sich an ihnen gut die Entwicklung hin zum endgültigen Muster erklären. Die Bilder sind in der Reihenfolge ihrer Entwicklung von A1 bis A5 numeriert. A1 und A2 stellen insofern eine Ausnahme dar, als daß es sich hier um unterschiedliche Bedruckungen der Vorder- und Rückseitenreflektoren handelt. Bei A1 ist nur der Rückseitenreflektor bedruckt. Für die Abschattung A1 sind noch einmal exemplarisch die Koordinaten eingezeichnet, sowie die Positionen der Photodioden oberhalb und unterhalb der Szintillatorplatte durch Striche kenntlich gemacht. Die Orte der Lichteinleitung sind für alle Abschattungen durch kleine Kreise angedeutet. Am oberen rechten Rand einer jeden Abschattung sind die Breiten der Muster in mm angegeben. Den Angaben am unteren rechten Rand kann man die Stärke der verwendeten Graustufe entnehmen (0% = weiß, 100% = schwarz).

In Abb. 3.9 ist zu jeder Abschattung aus Abb. 3.8 ein y - Scan bei $x = 4$ (von Photodiode zu Photodiode) dargestellt. Als Bezug dient der ebenfalls eingezeichnete y - Scan mit vollständig weißen Reflektoren. Im oberen Bild sind die Scans für A1 bis A3 und im unteren Bild die Scans für A3 bis A5 zu sehen. A3 entspricht der endgültig gewählten Bedruckung und ist zum Vergleich daher in beiden Darstellungen enthalten. Die Grenzen der Szintillatorplatte sind gleich den Intervallgrenzen der y-Achse. Weitere Scans bei $x = 6$ (Plattenmitte) und $x = 11$ (rechter Rand) finden sich im Anhang D.

Die Abb. 3.10 schließlich stellt die Messungen einer rechteckigen Szintillatorplatte bei Verwendung der Abschattung A3 in gleicher Weise dar, wie es für weiße Reflektoren in der Abb. 3.7. gesehen ist.

Folgende Gründe führten zur Wahl von A3: Die Abschattung A1 stellt ein frühes Stadium der Entwicklung dar. Es ist ein Muster mit großer Nähe zum Konturverlauf bei weißen Reflektoren. Der keilförmige Teil der Bedruckung ist als Grauverlauf (ca. 80% - 70%) mit abnehmenden Grauwerten in Richtung der Keilspitze bzw. Plattenmitte ausgeführt. Im oberen Bild von Abb. 3.9 ist zu erkennen, daß die Signale über den gesamten Bereich stark abgefallen sind (15% - 18%), ohne daß der Signalverlauf dabei besonders homogen geworden ist. Bei $y = \pm 70$ mm hat die Dämpfung der Reflektivität der Papiere sogar den Signalanstieg in Richtung der Photodioden, welcher bei weißem Papier gemessen wurde, überkompensiert. Erstaunlich ist der starke Signalabfall in der Plattenmitte. An dieser Stelle sind die Reflektoren bei beiden Abschattungen weiß gewesen. Es scheint also eine Fernwirkung der abgeschatteten Stellen auf entferntere Plattenbereiche zu bestehen.

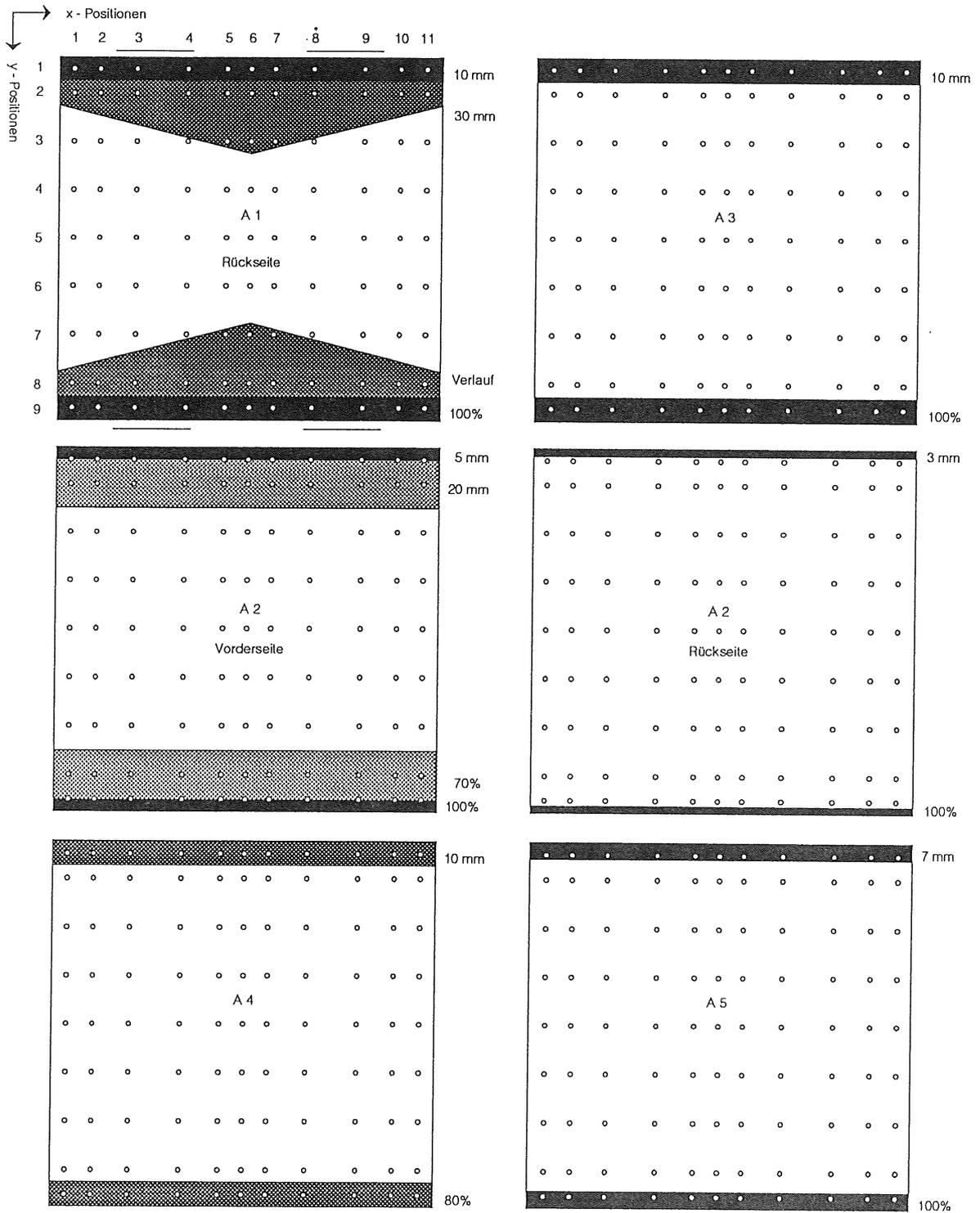


Abb.3.8 Auswahl einiger untersuchter Abschattungen.

Der große Verlust an Lichtausbeute und die Signalüberhöhung vor den Wellenlängenschiebern im Falle der Abschattung A1 mußte verringert werden.

Im Falle von A1 war nur ein Reflektor abgeschattet worden. Dies reichte nicht aus um die großen Signale in der Nähe der Photodioden zu kompensieren obwohl am oberen und unteren Reflektorrand bereits zur stärksten (100%) Graustufe gegriffen wurde. Deshalb ist bei A2 die Vorder- und Rückseite abgeschattet. Die schmalen schwarzen Balken auf dem Vorderseitenreflektor sollen helfen die Signale bei $y = \pm 70$ mm zu verringern. Auf dem Rückseitenreflektor wurde die Abschattungen gegenüber A1 in Grauwerten bzw. Abmessungen zurückgenommen um den Gesamtabfall der Signale nicht so groß ausfallen zu lassen. Das Design eines keilförmigen Grauverlaufes im Mittelbereich des Reflektors wurde zugunsten von Balken mit diskreter Graustufe (70%) aufgegeben. Die Verwendung eines Grauverlaufes hätte ohnehin fertigungstechnische Probleme aufgeworfen und außerdem standen keine Standardverläufe mit genügend großem Verlaufsgradienten zur Verfügung²⁰. Die keilförmige Ausführung der mittleren Segmente des Musters hatte die in sie gesetzten Erwartungen nicht erfüllt. Für den Scan bei $x = 6$ (Anhang D, Abb.D.1) konnten die Signale durch den weit in die Mitte reichenden Graubereich zwar gut gedämpft werden, aber an den anderen Stellen ($x = 4$ und $x = 11$ (Anhang D, Abb.D.2)) genügte die Dämpfung der Randsignale nicht, während sie etwas weiter zur Plattenmitte schon zu stark war. So wurde also gegenüber A1 bei A2 die Reflektivität der Papiere an den Rändern, die den Wellenlängenschiebern zugewandt waren, verringert und im Mittenbereich erhöht.

Die Meßergebnisse von A2 sind deutlich homogener als diejenigen von A1 (siehe auch Anhang D, Abb.D1 bis Abb.D4). Doch auch bei A2 reicht die Minderung der Reflektivität an den Rändern der Reflektorpapiere noch nicht aus, um die großen Signale vor den Photodioden zu nivellieren. Gegenüber A1 sind bei A2 die Signale auf der ganzen Breite wieder angestiegen, so daß im Gegensatz zu der Version mit durchgehend weißen Reflektoren nur noch ein Intensitätsverlust von etwas unter 10% zu verzeichnen ist. Im mittleren Bereich von $y = \pm 60$ mm ist der Signalverlauf sehr homogen.

Für den Schritt zur Abschattung A3 gab es folgende Gründe: Aus der Gruppe, der für Fertigung der Serienmodule verantwortlichen Mitarbeiter wurde der Wunsch einer gleichartigen Bedruckung Szintillatorplattenreflektoren geäußert, um die Möglichkeit einer Seitenvertauschung der Papiere beim Zusammenbau der Kalorimetermodule auszuschließen. Ferner hatte es sich gezeigt, daß die mit dem Institut zusammenarbeitende Druckerei bei dem Drucken von definierten Grauwerten $< 100\%$ Probleme hatte, einen diskreten Grauwert über alle Druckexemplare konstant zu halten. Die beobachteten Streuungen waren zum Teil beträchtlich und können mit 10% bis 20% abgeschätzt werden. Außerdem gab es bei der Abschattung A2 noch die zu große Signalüberhöhung vor den Wellenlängenschiebern.

So wurde der Bereich der 100% Abschattung auf Vorder- und Rückseiten auf eine Breite von jeweils 10 mm vergrößert und auf weitere Abschattungen ganz verzichtet. Dieses war offensichtlich der richtige Weg, denn die Ergebnisse von A3 liegen in einem Bereich von $\pm 3\%$ über die ganze Platte. Damit war eine "hardwareseitige" Homogenität erreicht, wie sie bei den vorangegangenen Prototypen in der Arbeit von [Wun88] erst nach umfangreichen Softwarekorrekturen zu erzielen gewesen wäre. Eine Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Verhältnisse bei der Messung hochenergetischer Elektronen ist für diese Aussage die Voraussetzung. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Labormessungen wurden Experimente am DESY-Teststrahl durchgeführt (siehe Kapitel 4).

Die Homogenität der Signale bei Verwendung der Abschattung A3 wird allerdings nur erreicht mit einem Lichtverlust von ca. 10%. Ein Intensitätsverlust in dieser Größenordnung ist gerade für ein mit Photodioden ausgelesenes Kalorimeter, welches insbesondere ein gutes Signal-Rausch-Verhältniss aufweisen sollte, nicht wünschenswert.

²⁰ Grauverläufe der Firma Letraset.

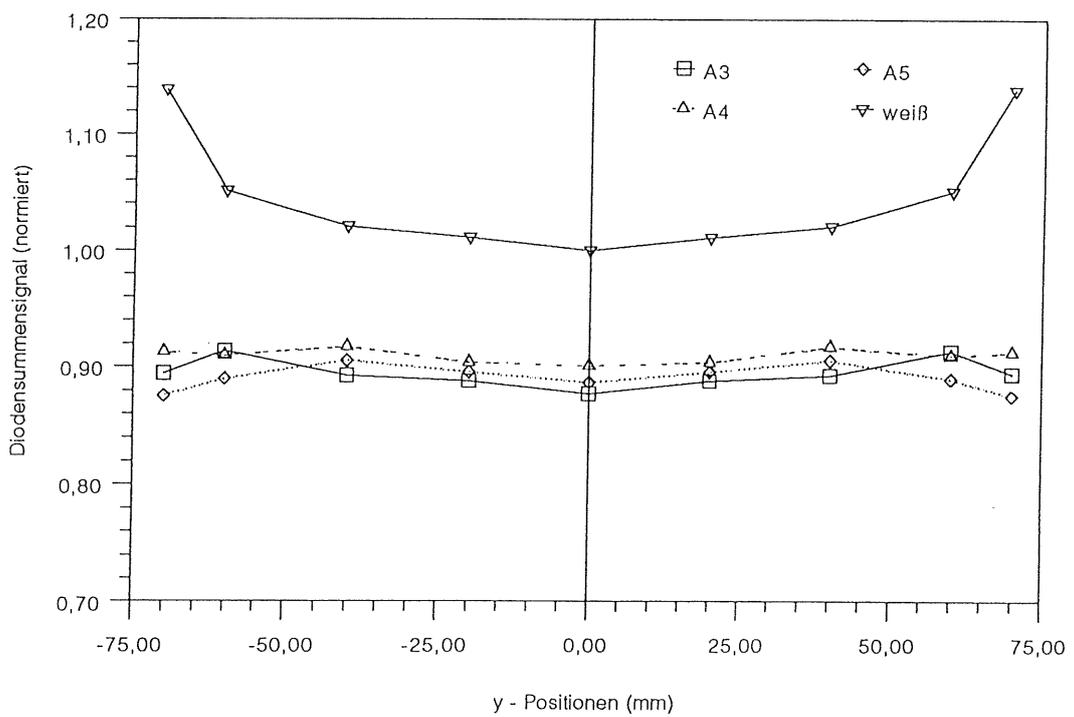
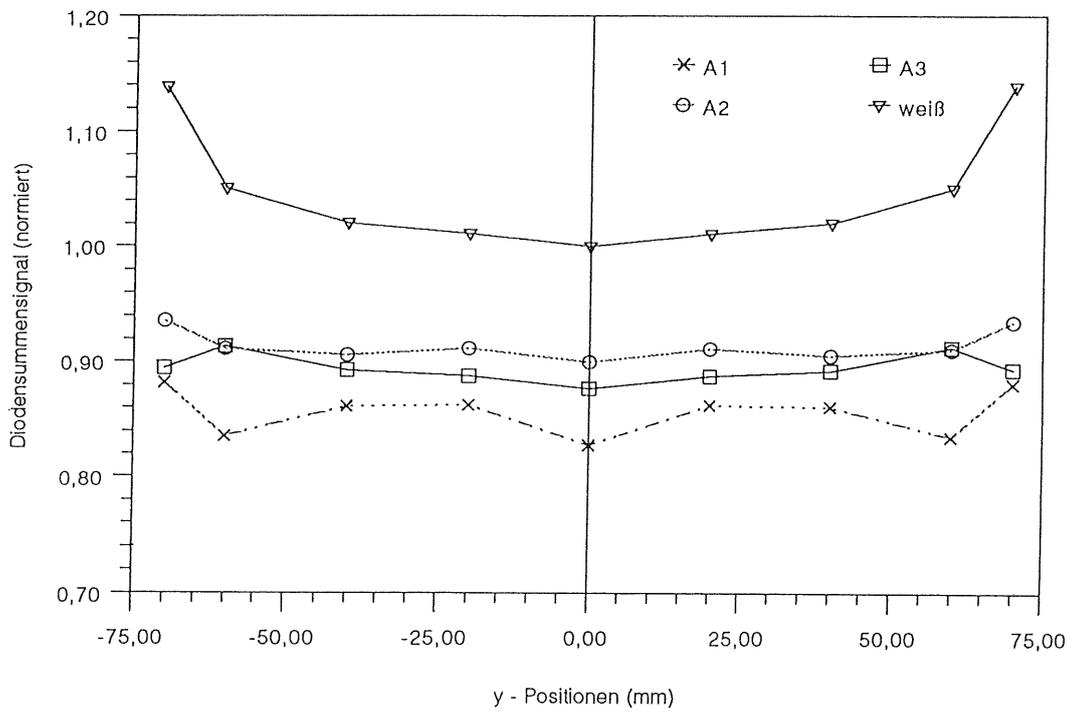


Abb.3.9 y - Scans bei $x = 4$. mit den Abschaltungen A1 bis A5.

Aus diesem Grund wurden Untersuchungen durchgeführt, ob man mit einer noch sparsameren Abschattung zu einer ähnlich guten Homogenität wie bei A3 allerdings mit geringerem Lichtverlust gelangen könnte. Die Abschattungen A4 und A5 setzen diese Idee auf zwei verschiedene Arten um. Bei A4 wurde gegenüber A3 die Schwärzung von 100% auf 80% zurückgenommen, und bei A5 wurde die Breite der Balken bei gleichbleibender Graustufe (100%) von 10 mm auf 7 mm verringert.

Die Meßergebnisse sind in dem unteren Diagramm der Abb.3.9 sowie im Anhang D in den Abbildungen Abb.D.1 und Abb.D.2 dargestellt. Die Scans der Abschattungen A4 und A5 sind im Gegensatz zu den bisher besprochenen nicht symmetrisiert, da die Messungen an den zu $x = 4$ und $x = 11$ korrespondierenden Stellen $x = 8$ und $x = 1$ nicht durchgeführt wurden. Aus demselben Grunde liegen auch keine Kontur- und Oberflächendiagramme zu diesen Abschattungen vor. Durch die Nichtsymmetrisierung der Scans von A4 und A5 sind diese Messungen mit einem größeren Fehler als die bislang vorgestellten behaftet. Für alle Messungen wurde dieselbe Szintillatorplatte benutzt. Da die Verbundkonstruktion aus Szintillatorplatte, Reflektorpapieren und Aluminiumplatten im Verlaufe der Messungen oft zerlegt werden mußte, war es manchmal auch erforderlich, die Szintillatorplatte von Staub zu reinigen. Ein Verschleiß der empfindlichen Szintillatorplattenoberflächen, in Form kleiner Kratzer blieb daher nicht aus. Die zum Schluß der Messungen mit dieser Platte gewonnenen Ergebnisse für A4 und A5 sind deshalb weniger aussagekräftig. Eine neue Szintillatorplatte wurde nicht verwendet da zu diesem Zeitpunkt eine Platte mit denselben Abmessungen nicht verfügbar war.

Dennoch lassen die Scans von A4 und A5 sicher folgende Schlüsse zu: Eine gravierende Verbesserung der Lichtausbeute kann von ihnen nicht erwartet werden. Die Homogenität der Signale verändert sich bei Verwendung von A4 oder A5 kaum.

Die Entscheidung fiel zugunsten der Abschattung A3, da diese, die an sie gestellten Anforderungen erfüllt, sie am genauesten untersucht war und da gravierende Vorteile der Abschattungen A4 und A5 nicht erkennbar waren.

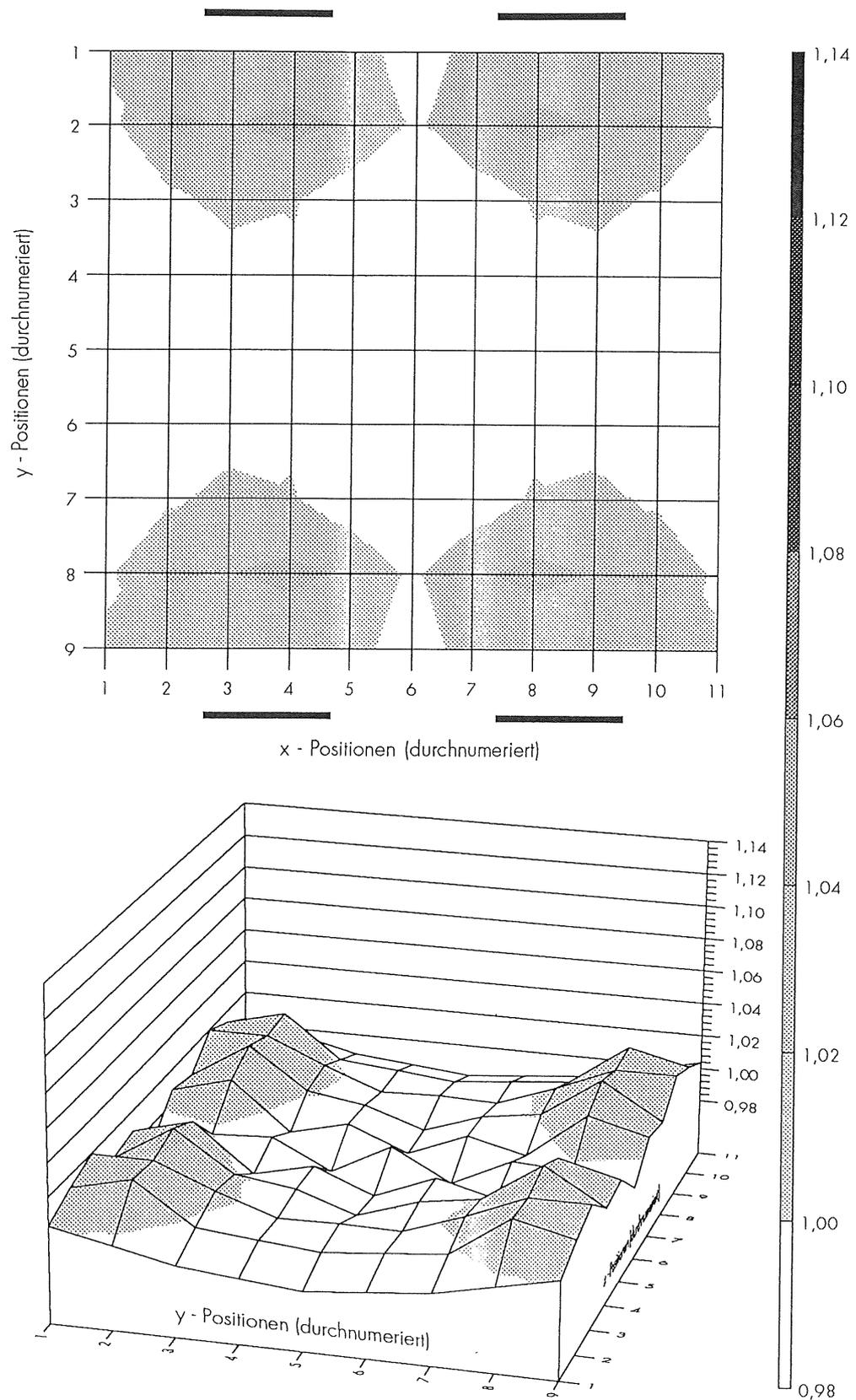


Abb.3.10 Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer rechteckigen Szintillatorplatte mit Abschattung A3.

3.2.6 Optimierung der longitudinalen Abhängigkeit

Zusätzlich zu der Notwendigkeit, die Ortsabhängigkeiten der Photodiodensignale in lateraler Richtung homogen zu gestalten, wurde auch untersucht, ob eine Homogenisierung auch in longitudinaler Richtung erforderlich ist. Es wurden für eine stets gleiche Auswahl von Anregungsorten der Szintillatorplatte verschiedene z -Positionen durchgemessen. Diese Versuche erfolgten sowohl mit der 6×6 - wie auch mit der 11×9 -Maske. In ihren Ergebnissen unterscheiden sich diese beiden Meßreihen prinzipiell nicht. Da aber für die Daten, welche mit der 11×9 -Apparatur gewonnen wurden, eine größere Genauigkeit anzusetzen ist und da mit ihr umfangreichere Messungen durchgeführt wurden, werden diesem Kapitel ausschließlich mit der 11×9 -Apparatur erzielte Ergebnisse vorgestellt.

Ein starker Anstieg der Signale der Photodioden in Richtung großer z -Werte, d.h. in Richtung der Photodioden, wurde vermutet und bestätigte sich. Es mußte untersucht werden, ob der Signalverlauf in z -Richtung von dem Ort der Lichteinleitung in die Szintillatorplatte abhing. Da ein komplettes absannen der Szintillatorplatte bei verschiedenen z -Positionen zu zeitaufwendig war, wurde eine Auswahl der Anregungspunkte getroffen. Das waren gemäß der Numerierungsmethode (Kapitel 3.2.1) die Punkte mit den Koordinaten $(6,1)$, $(6,5)$, $(6,9)$, $(4,5)$ und $(8,5)$. Diese fünf Punkte bilden ein Kreuz, in dessen Mitte der Ort für den Zentraleinschuß $(6,5)$ liegt (siehe auch Abb.3.3b oder Abb.3.8). Nach der Bildung und der Symmetrisierung der Diodensummensignale bleiben für jede z -Position drei potentiell unterschiedliche Werte übrig, da das Summensignal für die Punkte $(6,1)$ und $(6,5)$, sowie für $(4,5)$ und $(8,5)$ gleich ist.

In Abb.3.11 ist die longitudinale Abhängigkeit der gemessenen Werte dargestellt. Um die Kurven vergleichbar zu machen und die Frage beantworten zu können ob es eine Abhängigkeit zwischen z -Entwicklung und dem Ort der Szintillatoranregung gibt, ist jede Kurve auf ihren Wert bei $Z = 21$ normiert. Die Messungen wurden mit einer quadratischen Szintillatorplatte durchgeführt, da sich der Bereich der großen longitudinalen Signalabhängigkeiten im hinteren Teil der Kalorimetermodule befindet und hier aufgrund der gleichzeitigen Präsenz von elektromagnetischen und hadronischen Wellenlängenschiebern die quadratischen Szintillatorplatten Verwendung finden. Während der Messungen waren sämtliche Schmalkanten der Szintillatorplatte, außer der Auslesekannte, mit Dummys aus Wellenlängenschiebermaterial belegt. Die Reflektorpapiere der Szintillatorplatte waren mit der Abschattung A3 versehen. In x -Richtung ist in der Abb.3.11 die z -Position aufgetragen und zwar in Einheiten von Szintillatorplatten. Das heißt, eine Szintillatoranregung an der Stelle $z = 50$ entspricht einer Anregung der 50-zigsten Szintillatorplatte im Kalorimetermodul. Die Skala ist bis 55 ausgeführt, da der Wellenlängenschieber länger ist, als die Tiefe der Blei-Szintillator-Schichten.

Die drei in Abb.3.11 dargestellten Kurven sind nahezu deckungsgleich. Es wird davon ausgegangen, daß der longitudinale Signalverlauf nicht von dem Ort der Lichteinleitung in die Szintillatorplatte abhängt. Deshalb wird in den folgenden Diagrammen immer nur der Verlauf bei zentraler Szintillatoranregung betrachtet.

In Abb.3.12 sind die z -Abhängigkeiten einer quadratischen Szintillatorplatte, in der oben beschrieben Anordnung, sowie einer rechteckigen Platte mit weißen Reflektoren an den kurzen Schmalkanten dargestellt. Die Meßwerte der rechteckigen Szintillatorplatte sind auf den Wert der quadratischen bei $z = 21$ normiert. Die Kurve für die rechteckige Platte liegt über den gesamten Bereich um ca. 3% bis 5% oberhalb derjenigen der quadratischen Platte. Dies ist nicht weiter verwunderlich, weil bei der quadratischen Platte aufgrund der Verwendung von Wellenlängenschiebermaterial an allen schmalen Kanten eine diffuse Rückreflektion des, an solchen Kanten ausgetretenen Lichtes, im Gegensatz zur rechteckigen Platte stark vermindert ist.

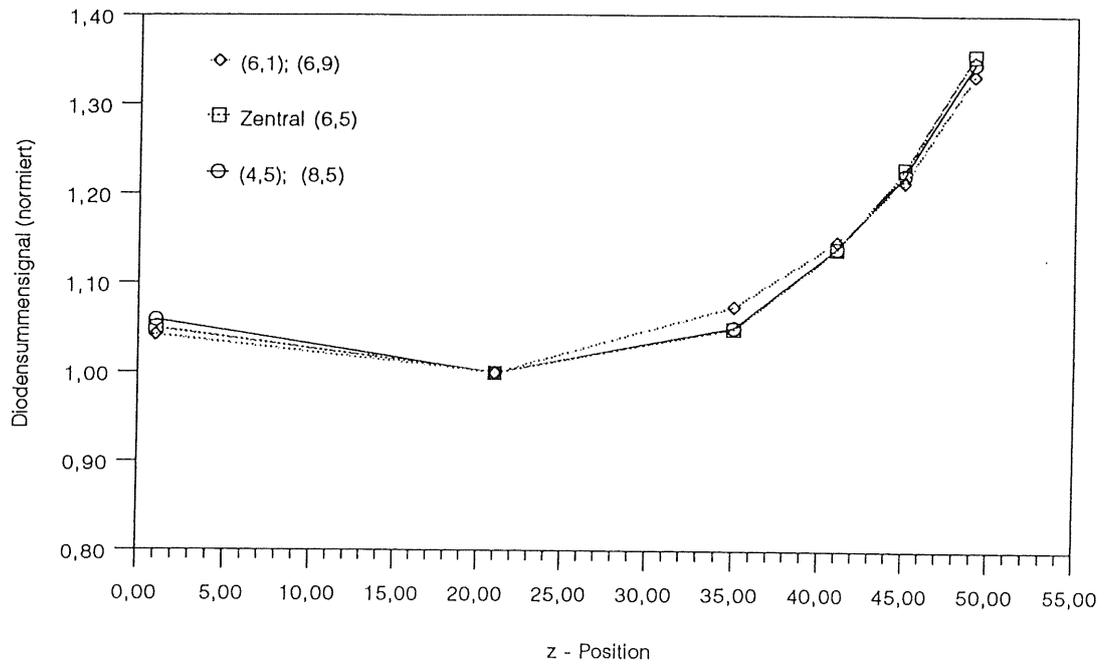


Abb.3.11 Longitudinale Abhängigkeit bei weißem Wellenlängenschieber-Reflektorpapier (verschiedene Lichteinleitung bei gleicher Platte)
Die Daten wurden unter Verwendung einer quadratischen Szintillatorplatte, welche mit den Abschaltungen A3 versehen war, gewonnen.

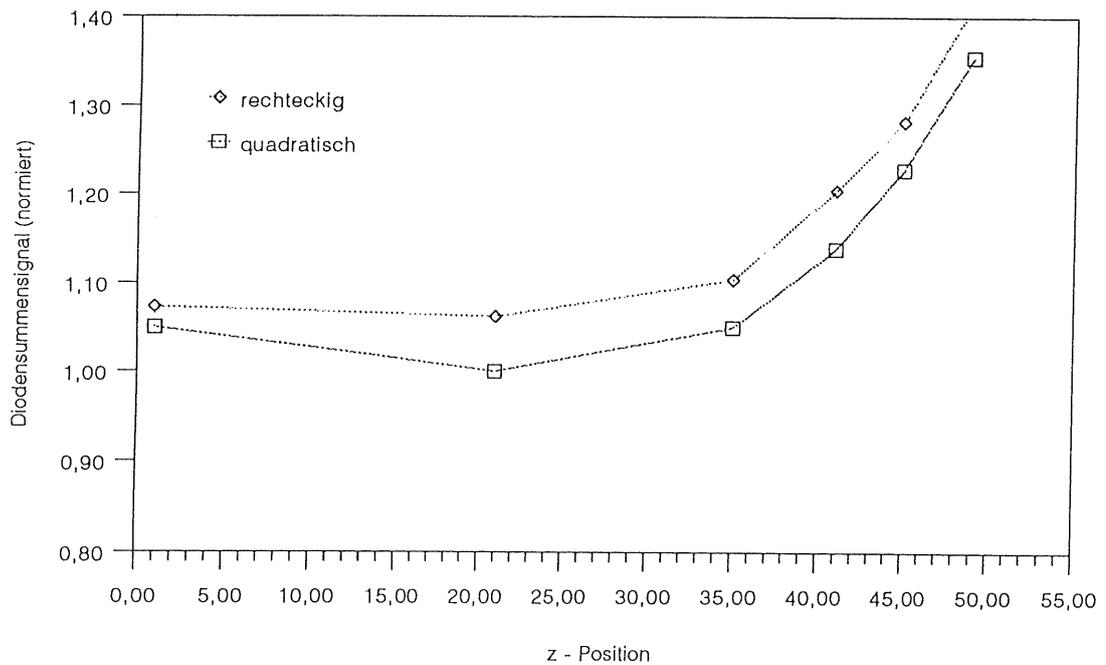


Abb.3.12 Longitudinale Abhängigkeit bei weißem Wellenlängenschieber-Reflektorpapier (gleiche Lichteinleitung bei verschiedenen Szintillatorplatten)
Die Daten wurden unter Verwendung einer quadratischen und einer rechteckigen Szintillatorplatte welche mit den Abschaltungen A3 versehen waren, gewonnen.

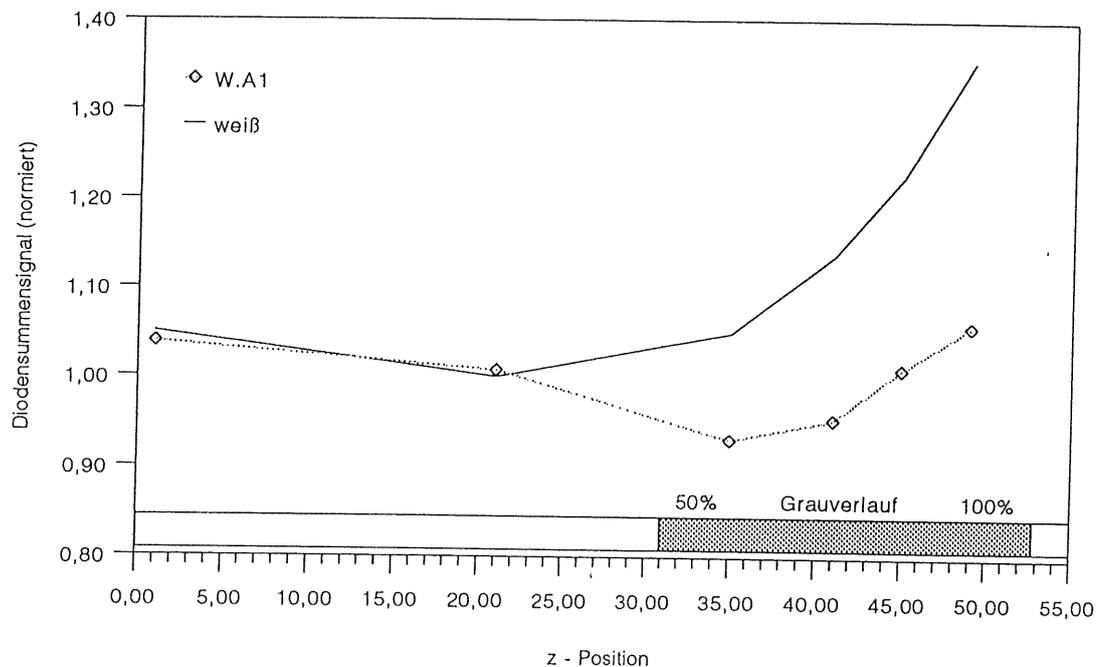


Abb.3.13 Longitudinale Abhängigkeit bei Wellenlängenschieber-Reflektorpapier mit der Abschattung W.A1
Die Daten wurden unter Verwendung einer quadratischen Szintillatorplatte, welche mit den Abschattungen A3 versehen war, gewonnen.

Im Folgenden wird die Entwicklung der letztendlich verwendeten Wellenlängenschieberabschattung beschrieben. In jeder zu diesem Thema vorgestellten Abbildung ist der longitudinale Signalverlauf bei vollständig weißen Wellenlängenschieberreflektoren zum Vergleich ebenfalls dargestellt. Die Meßwerte der Abschattungen sind auf den Wert für den Weißreflektor bei $z = 21$ normiert. Im unteren Diagrammbereich ist immer die jeweilige Wellenlängenschieberabschattung eingefügt.

Die Abb.3.13 zeigt die Messergebnisse bei einer Bedruckung des Wellenlängenschieberreflektors mit einem 13 cm langen Grauverlauf, der über die ganze Breite der Wellenlängenschieber reicht, und dessen photodiodenseitiges Ende einen Grauwert von 100% hat. Das andere Ende des Verlaufes weist einen geschätzten Grauwert von 50% bis 60% auf. Der Gradient des Grauverlaufes ist nicht steil genug um die großen Signaländerungen in diesem Bereich auszugleichen. Deshalb wurden für die nächsten Abschattungen Zonen diskreter Grauwerte verwendet.

Ein bemerkenswerter Gegensatz zu den Erfahrungen welche beim Homogenisieren der lateralen Ortsabhängigkeiten der Signale gewonnen wurden, ist das Fehlen einer Fernwirkung der longitudinalen Abschattungen. Die Signale bei $z = 1$ und $z = 21$ sind von der Reflektivitätsdämpfung des Reflektors bei hohen z -Werten vollkommen unbeeinflusst. Auf diesen Punkt wird später näher eingegangen.

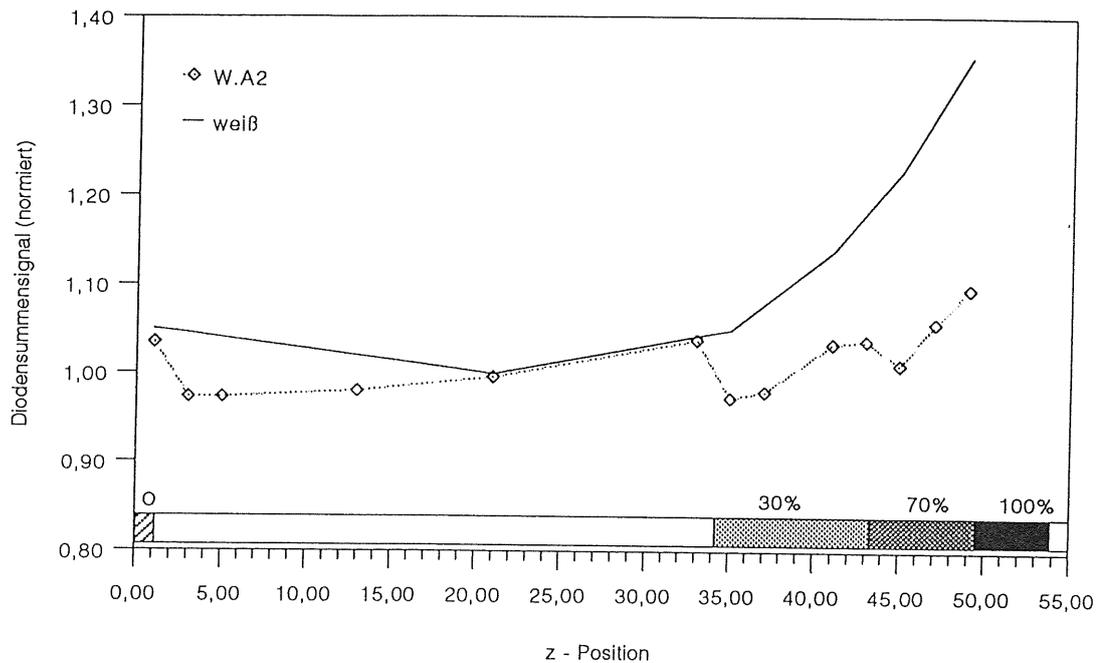


Abb.3.14 Longitudinale Abhängigkeit bei Wellenlängenschieber-Reflektorpapier mit der Abschattung W.A2
Die Daten wurden unter Verwendung einer quadratischen Szintillatorplatte, welche mit den Abschattungen A3 versehen war, gewonnen.

In der Abb.3.14 sind die mit der Abschattung W.A2 gemachten Messungen dargestellt. Die Zahl der Messpunkte ist erhöht worden, um die Signale bei kleinen z-Werte genauer zu untersuchen. Es zeigt sich, daß das Signal der ersten Szintillatorplatte angehoben ist. Schon der Wert bei $z = 3$ entspricht dem Kurvenverlauf an den übrigen Messpunkten. An der Stirnkante des Wellenlängenschiebers bei $z = 0$ befindet sich ein Endreflektor aus weißem Tyvecpapier. Die Absorptionslänge des Szintillationslichtes im Wellenlängenschiebermaterial Y7 beträgt 6 mm. Der Wellenlängenschieber ist 3 mm dick und die Vorderseite der ersten Szintillatorplatte schließt bündig mit der Vorderkante des Wellenlängenschiebers ab. Das bedeutet, daß ein großer Anteil des, von der ersten Szintillatorplatte in den Wellenlängenschieber eingestrahlt Lichtes auf den Endreflektor trifft, ohne zuvor im Wellenlängenschieber absorbiert worden zu sein.

Offenbar garantiert die Einstrahlung direkt vor dem Stirnkantenreflektor bei $z = 0$ eine stärkere Emission in Richtung der Photodioden als dies bei einer Einstrahlung in den Wellenlängenschieber bei höheren z - Werten der Fall ist.

Schattet man den Wellenlängenschieberreflektor lokal im Bereich der ersten Szintillatorplatte zu 100% ab, dies ist in dem die Abschattung symbolisierenden Balken schraffiert dargestellt, so sinkt das Signal an dieser Stelle beträchtlich (kleiner Kreis in Abb.3.14), ohne daß sich der sonstige Kurvenverlauf ändert. Auch in diesem Fall wird keine Fernwirkung festgestellt.

Zu dem übrigen Kurvenverlauf ist zu sagen, daß die Abmessungen und Plazierungen der Graustufen noch nicht optimal genug gewählt wurden. Der schwarze Bereich muß noch weiter nach innen gerückt und die beiden anderen Grauzonen etwas kleiner gehalten werden.

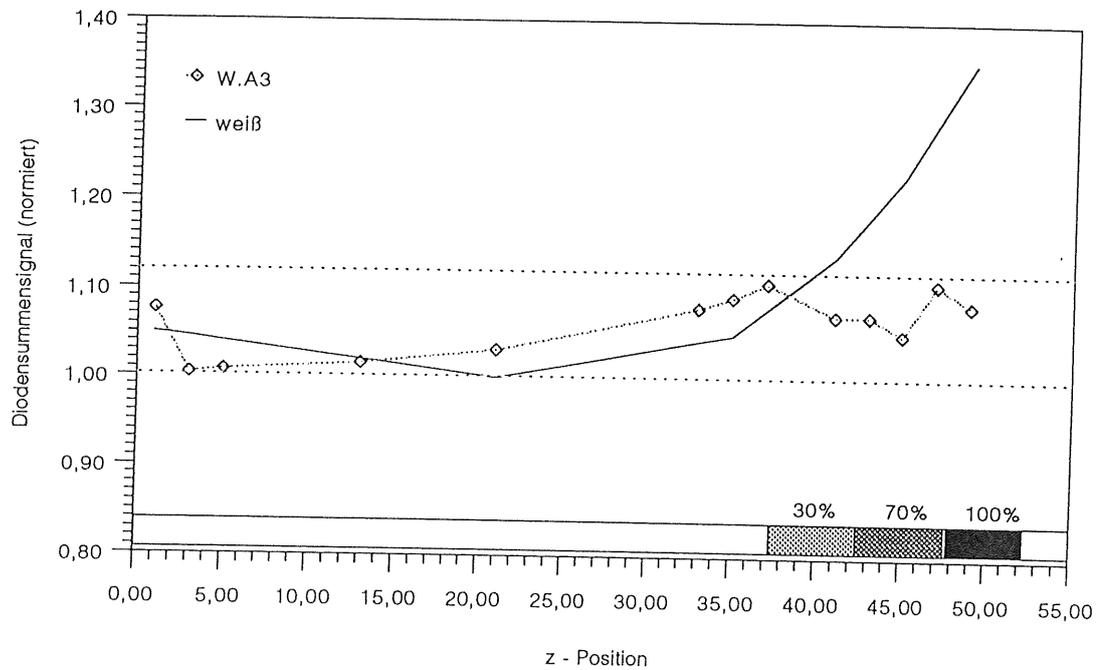


Abb.3.16 Longitudinale Abhängigkeit bei Wellenlängenschieber-Reflektorpapier mit der Abschattung W.A3
Die Daten wurden unter Verwendung einer quadratischen Szintillatorplatte, welche mit den Abschattungen A3 versehen war, gewonnen.

Die Ergebnisse, welche mit der Abschattung W.A3 gewonnen wurden, sind in der Abb.3.15 dargestellt. Jeder Graubereich ist nun drei Zentimeter lang. Die Grauwerte wurden aus der Abschattung W.A2 übernommen und das photodiodenseitige Ende von W.A3 wurde gegenüber W.A2 weiter nach vorne verschoben. Auf eine Abschattung bei $z = 1$ wurde verzichtet, da von der ersten Szintillatorplatte in den Kalorimetermodulen ohnehin nur sehr wenig Szintillationslicht erwartet wird.

In der Abb.3.12 war zu sehen, daß der Signalverlauf für eine rechteckige Szintillatorplatte im Schnitt um etwa 4% über demjenigen für eine quadratische Platte liegt. In den Kalorimetermodulen des BEMC sind die ersten 35 Szintillatorplatten rechteckiger Bauart. Deshalb wurden bei der Abb.3.15 die Werte der w.A3-Kurve für z_i mit $i = 1, 2, \dots, 35$, um 4% angehoben. Damit liegt die Varianz der z-Abhängigkeit in einem Intervall von $\pm 6\%$. Dieser Bereich ist in der Darstellung gestrichelt eingezeichnet.

Die Abschattung W.A3 findet in den Serienmodulen des BEMC-Kalorimeters für alle Wellenlängenschieber, mit Ausnahme der hadronischen, Verwendung.

3.2.7 Die hadronischen Wellenlängenschieber

Die hadronischen Wellenlängenschieber der quadratischen Kalorimetermodule des BEMC weisen eine gestreckte Länge von 121,8 mm auf. Mit ihnen werden die letzten 15 Szintillatorplatten an den nicht von elektromagnetischen Wellenlängenschiebern belegten Seiten ausgelesen. Ihre Breite beträgt, an der Vorderseite 150 mm. Das hintere Teil ist, wie bei den elektromagnetischen Wellenlängenschiebern, in Richtung des Elektronik-Boardes gebogen. An der Stirnseite des gebogenen Stückes sind zwei Photodioden aufgeklebt. Um ein Zusammenstoßen mit den ebenfalls nach innen gebogenen elektromagnetischen Wellenlängenschiebern zu vermeiden, ist an dem diodenseitigen Ende der hadronischen Wellenlängenschieber an jeder Längsseite, je ein Bereich von 22,5 mm x 12,5 mm aus dem Material ausgefräst. Es läßt sich zusammenfassen: Die hadronischen Wellenlängenschieber reichen über die gesamte Breite eine Modulseite und tragen zwei Photodioden pro Wellenlängenschieber, die gemeinsam von einem Vorverstärker ausgelesen werden.

Die transversalen und longitudinalen Ortsabhängigkeiten der hadronischen Wellenlängenschieber sind mit der 11x9-Apparatur untersucht worden.

3.2.7.1. Transversale Ortsabhängigkeiten

Die Verwendung der Abschattung A3 (siehe Kapitel 3.2.8) für die Reflektorpapiere der quadratischen Szintillatorplatten, hat eine erhebliche Beeinträchtigung der Homogenität der Diodensummensignale der hadronischen Wellenlängenschieber zur Folge. Denn aus der Sicht der hadronischen Wellenlängenschieber ist die Abschattung A3, gegenüber den Verhältnissen für die elektromagnetischen Wellenlängenschieber um 90° gedreht. Somit sind die Bereiche hoher Signale, d.h. vor den hadronischen Wellenlängenschiebern, nicht abgeschattet, während Bereiche niedriger Signale stark abgeschattet sind.

In der Abb.3.16 ist eine quadratische Szintillatorplatte, die Abschattung A3 sowie die Orte der Lichteinleitung und ihre Koordinaten aufgeführt. Die zwei waagerechten Balken jeweils ober- und unterhalb der Szintillatorplatte symbolisieren die Positionen der Photodioden der hadronischen Wellenlängenschieber. Im Gegensatz zur Abb.3.8 sind hier, bedingt durch die 90° Drehung, die x- und y-Koordinaten vertauscht.

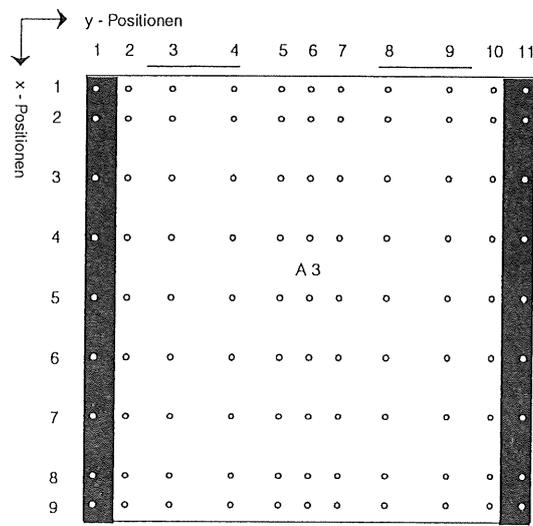


Abb.3.15 Abschattung A3 aus der Sicht der hadronischen Wellenlängenschieber

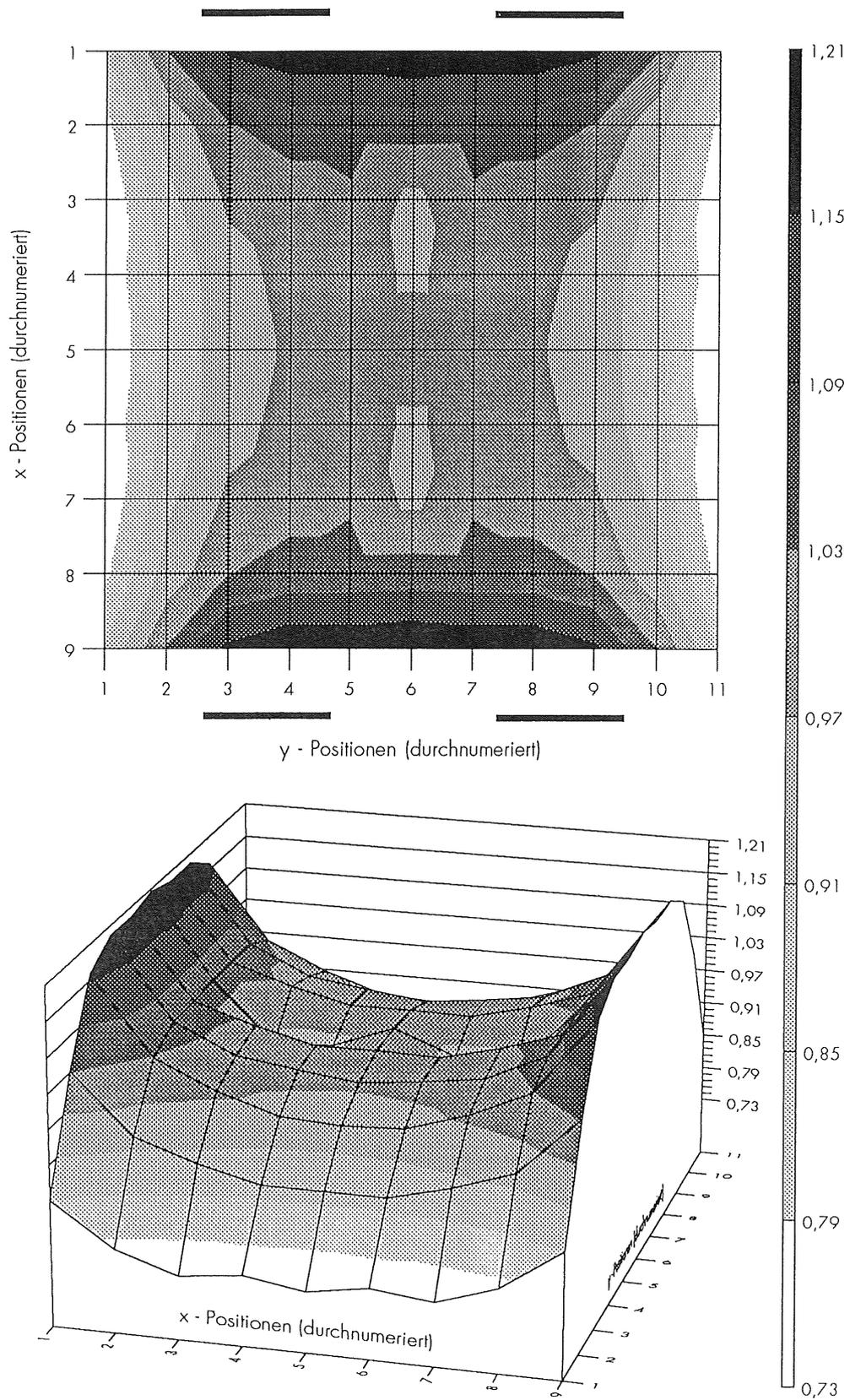


Abb.3.17 Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer quadratischen Szintillatorplatte mit Abschattung A3, bei einer Lichtauslese mit einem hadronischen Wellenlängenschieber, an der Stelle $z = 42$

Die Abb.3.17 zeigt die Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer quadratischen Szintillatorplatte mit der Abschattung A3, bei einer Lichtauslese mit einem hadronischen Wellenlängenschieber, an der Stelle $z = 42$. Der verwendete Wellenlängenschieber war mit einem Reflektor aus weißem Tyvecpapier ohne Abschattung ausgestattet. Der Darstellungsbereich der Legende mußte gegenüber entsprechenden Abbildungen für die elektromagnetischen Wellenlängenschiebern verdreifacht werden. Jede Graustufe umfasst in der Abb.3.17 ein Intervall von 6%. Die Meßwerte sind symmetrisiert und auf den Plattenmittelpunkt normiert. Eine Messung mit weißen Szintillatorplattenreflektoren ist für die hadronischen Wellenlängenschieber nicht erfolgt. Als Vergleich zur Abb.3.17 kann die Abb.3.7 benutzt werden, welche die Kontur- und Oberflächendiagramme einer rechteckigen Szintillatorplatte mit Weißreflektoren bei $z = 21$, ausgelesen mit elektromagnetischen Wellenlängenschiebern, zeigt.

Das Diodensummensignal wie in Abb.3.17 dargestellt differiert um +21%, -23%. Der starke Signalabfall an den Kanten, welche von den elektromagnetischen Wellenlängenschiebern ausgelesen werden, rührt sicher von den an diesen Stellen besonders wirksamen schwarzen Balken der Abschattung A3, her. Bemerkenswert bleibt der Signalanstieg in Richtung der Photodioden, welcher mit +21% um 7% über dem für die elektromagnetischen Photodioden liegt. Ein Grund mag die Nähe zu den Photodioden bei $z = 42$ sein. Ein weiterer ergibt sich durch die Annahme einer Fernwirkung der Abschattung: Benutzt man das A3 Muster, wie für die hadronischen Wellenlängenschieber geschehen, kontrahomogenisierend, so kann ein Absinken der Mittelsignale eine Vergrößerung der Spanne zu den Signalen direkt vor den Wellenlängenschiebern zur Folge haben.

3.2.7.2. Longitudinale Ortsabhängigkeiten

Die longitudinale Abhängigkeit der Diodensummensignale der hadronischen Wellenlängenschieber ist in Abb.3.18 für drei verschiedene Anregungsorte der Szintillatorplatte dargestellt. Das Reflektorpapier ist ohne Abschattung. Jede Kurve ist auf ihren Wert bei $z = 42$ normiert.

Das obere Diagramm unterscheidet sich von dem unteren durch den dargestellten z -Bereich. Das untere Bild ist direkt mit der Abb.3.11 vergleichbar.

Genau wie im Falle der elektromagnetischen Wellenlängenschieber bewirkt auch bei den hadronischen Wellenlängenschiebern der Endreflektor an der kleinste z -Position (z_{\min}) ein sehr großes Signal. Bereits an der Position $z_{\min+2}$ ist das Photodiodensignal um ca.10% gesunken. Für die elektromagnetischen Wellenlängenschieber lag der Wert der Pulshöhe an der Stelle $z_{\min+2}$ um ca.8% unter demjenigen bei z_{\min} . Dies kann mit der geringeren Länge der hadronischen Wellenlängenschieber und der deshalb größeren Effizienz des Endreflektors erklärt werden. Aus demselben Grund fällt der Gesamtanstieg für den hadronischen Wellenlängenschieber geringer aus. Im elektromagnetischen Fall steigen die Signale bei weißem Reflektor in dem Bereich von z_{42} bis z_{48} um ca. 20%, während es für die hadronischen Wellenlängenschieber ein nur etwa halb so großer Anstieg ist.

Für die Lichtauslese der letzten fünfzehn Szintillatorplatten der Kalorimetermodule des BEMC mit Hilfe kurzer ungeteilter Wellenlängenschieber, steht einer nicht mehr beeinflussbaren transversale Inhomogenität von über $\pm 20\%$, eine longitudinale Inhomogenität in einer Größe von ca. $\pm 5\%$ ²¹ gegenüber.

Es wurde entschieden, die verhältnismäßig geringen Ortsabhängigkeiten der Photodiodenpulse in longitudinaler Richtung der hadronischen Wellenlängenschieber zu belassen und für die Wellenlängenschieberreflektoren keine Abschattungen zu entwickeln.

²¹ Dieser Wert ist vergleichbar mit dem für die elektromagnetischen Wellenlängenschieber nach erfolgter Abschattung.

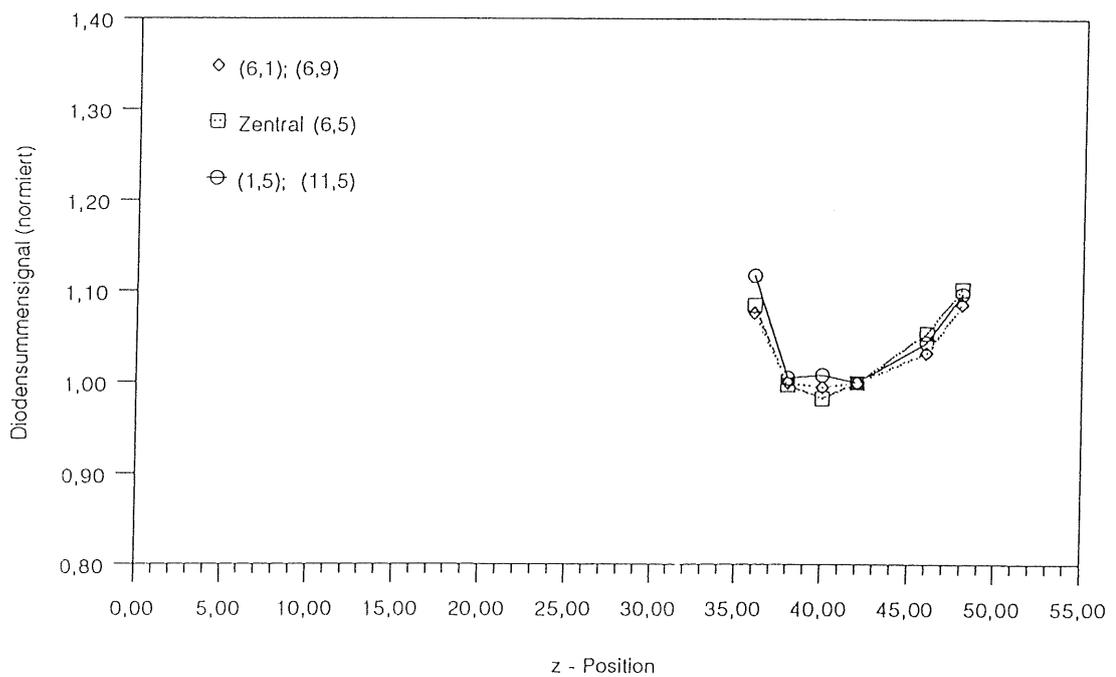
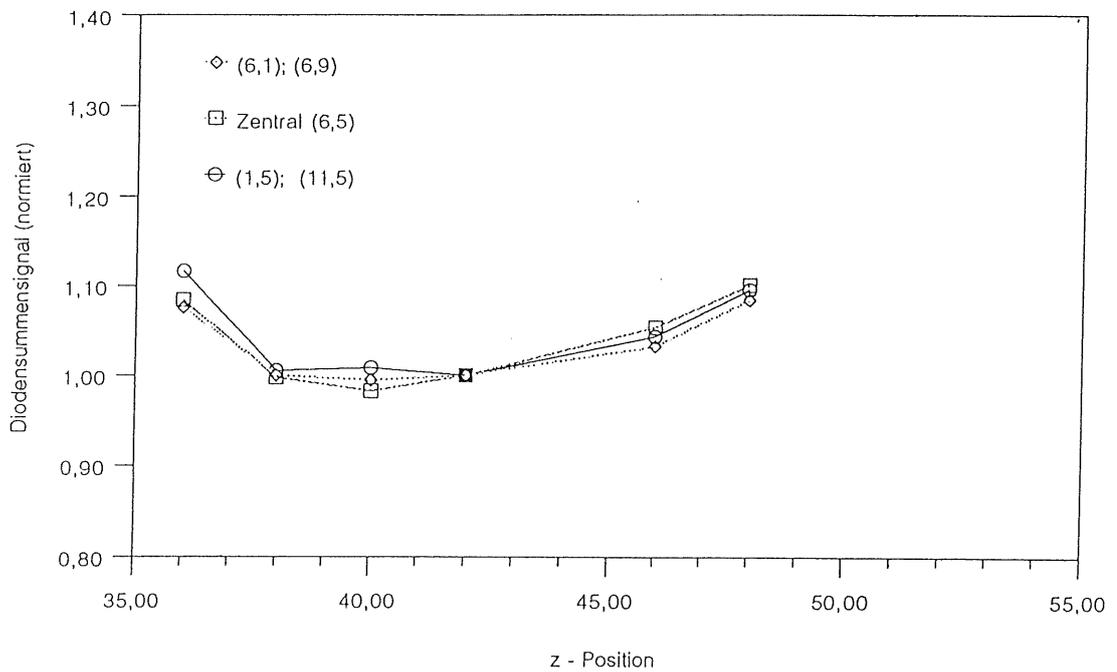


Abb.3.18 Longitudinale Abhängigkeit bei hadronischen Wellenlängenschiebern.
 WellenlängenschieberReflektor ist weißes Tyvecpapier
 Die Daten wurden unter Verwendung einer quadratischen Szintillatorplatte, welche mit den Abschaltungen A3 versehen war, gewonnen.

4 Teststrahlmessungen

Am DESY-Teststrahl wurden bei zwei Meßzeiten Untersuchungen zur Ortsabhängigkeit der Energiesignale von Kalorimetermodulen mit verschiedenen Reflektoren gemacht. Die während der ersten Meßzeit verwendeten Module waren sowohl für die Szintillator-, wie auch für die Wellenlängenschieberreflektoren mit weißem Tyvecpapier ausgestattet. Bei der zweiten Meßzeit wurde mit den Kalorimetermodulen aus der Serienfertigung gemessen, welche Is Sintillatorreflektoren Tyvecpapier mit der Abschattung A3 und als Wellenlängenschieberreflektoren Tyvecpapier mit der Abschattung W.A3 besaßen. Ansonsten war der Aufbau der Module bei beiden Meßzeiten identisch.

4.1 Meßaufbau und Meßprogramm

Zunächst wird der Meßaufbau der zweiten Teststrahlmeßzeit beschrieben. Die Unterschiede zum Aufbau der ersten Meßzeit finden sich am Ende des Kapitels.

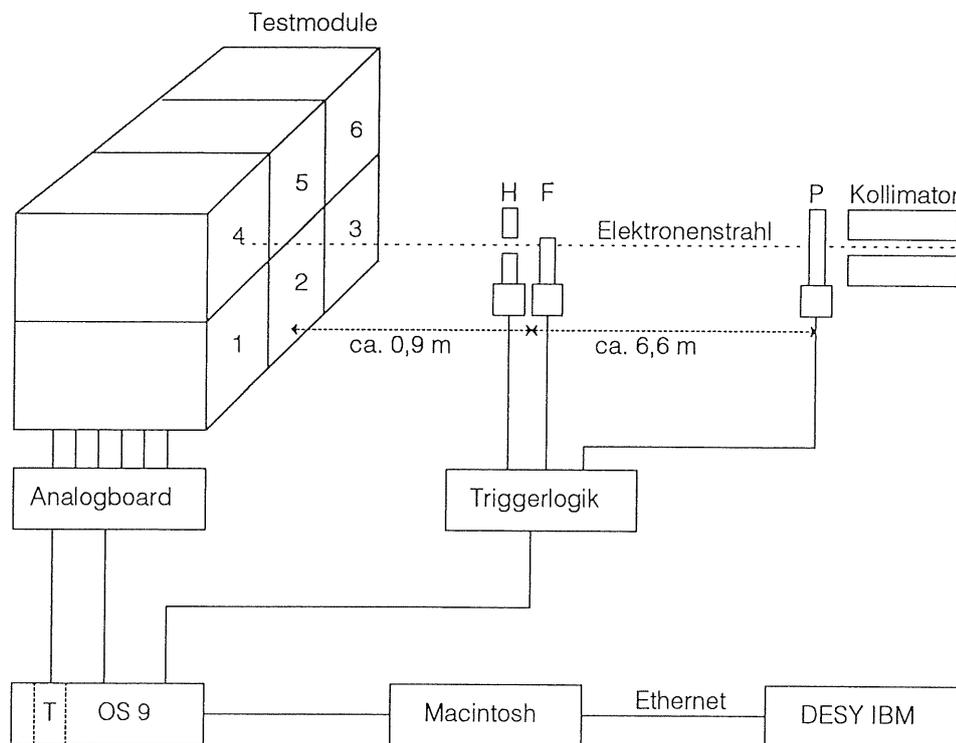


Abb.3.19 Meßaufbau der zweiten Teststrahlmeßzeit.
P - großflächiges Szintillator-Paddel
F - Szintillator-Finger ($10 \times 10 \text{ mm}^2$)
H - Szintillator-Halo (Lochdurchmesser 8 mm)
T - Testpuls-Generator

Alle Messungen wurden am Teststrahl 22 des DESY II-Synchrotrons durchgeführt. An einem Maschinen-Target²² werden die Elektronen²³ des Synchrotrons in Bremsstrahlungs- γ 's konvertiert. Nachdem die Gammas eine tangential zum Verlauf des DESY II-Ringes angeordnete Vakuumröhre passiert haben, treten sie durch ein 0.1 mm dickes Aluminium-Fenster aus und werden durch ein zweites, wählbares Target in Elektronen konvertiert. Die Elektronen durchlaufen dann einen Ablenkmagneten²⁴. Mit Hilfe dieses Magneten können Elektronen mit Energien von 1 GeV bis 6 GeV selektiert werden. Nach dem Durchqueren einer weiteren Vakuumröhre, in welcher sich ein Kollimator²⁵ befindet, gelangen sie in das Meßareal.

Der weitere Strahlengang, die Meßapparaturen und der Weg der Signale sind schematisch in der Abb.3.19 dargestellt. Im Meßareal passieren die Elektronen zuerst einen Kollimator mit einer Öffnung von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ und dann ein großflächiges Szintillatorpaddel (P) ($100 \times 100 \text{ mm}^2$), anschließend einen Szintillatortfinger (F) ($10 \times 10 \text{ mm}^2$) und ein Halo-Szintillator (H) (Lochdurchmesser 8 mm). Danach treten die Elektronen in die Kalorimetermodule ein und schauen auf.

Die Auslese der, den Elektronenstrahl definierenden, drei Triggerszintillatoren geschah mit Photomultipliern. Die Triggerlogik war in der Lage frühes und spätes Pile-up²⁶ zu erkennen. Pile-up-Ereignisse ließen sich nach Datennahme (off-line) abziehen. Eine genaue Beschreibung des Triggers findet sich bei [Gen91].

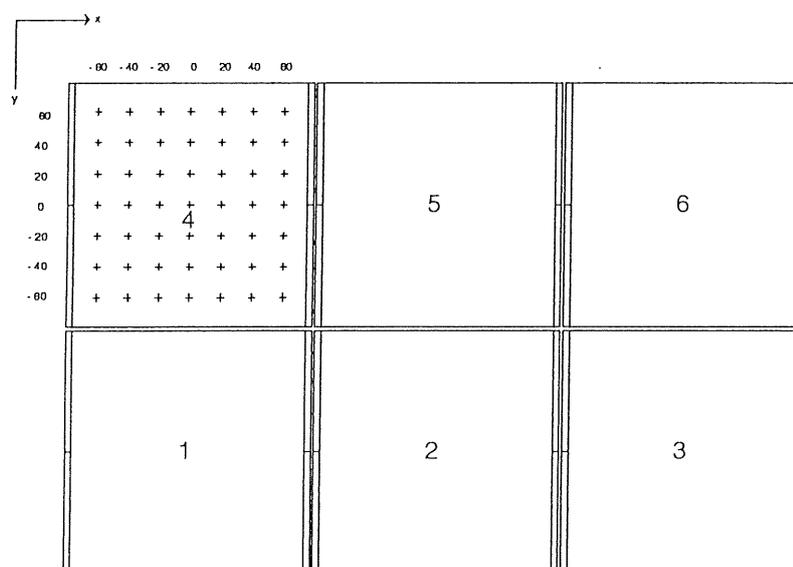


Abb.3.20 Modulkonfiguration und Positionen des Ortsscans der zweiten Teststrahlmeßzeit

Die benutzte Ausleseelektronik für die Kalorimetermodule ist dieselbe, die für den Betrieb des BEMC im Rahmen des H1-Experimentes Verwendung finden wird.

Die Kalorimetersignale wurden in dem Analogboard aufbereitet und in einem OS 9-Datenaquisitionssystem, in dem der Testpuls-Generator (T) integriert war, weiterverarbeitet. Anschließend erfolgte eine Übertragung der Daten²⁷ auf einen Apple Macintosh II zur Zwischenspeicherung. Danach wurden die Daten über eine Ethernet-Verbindung auf den DESY Zentralrechner zur weiteren Auswertung überspielt.

²² Ein Kohlefaserfaden mit einer Dicke von $600 \mu\text{m}$.

²³ Die Elektronen haben eine maximale Energie von 7 GeV.

²⁴ Typ: MR, Oerlikon, Nr.: 983630001.6 (Ablenkwinkel $1,5^\circ$)

²⁵ Für alle hier vorgestellten Messungen betrug die Kollimatoröffnung $5 \times 5 \text{ mm}^2$.

²⁶ Unter Pile-up versteht man die Addition mehrerer Signale, die bei hohen Zählraten nicht getrennt von den Vorverstärkern verarbeitet werden..

²⁷ Es handelte sich um List-Mode-Daten, d.h. um die ereignisweise Speicherung der ADC-Werte.

Die Messungen der zweiten Meßzeit wurden im Rahmen der Kalibrationsmessungen der Serienmodule des BEMC durchgeführt. Für die Kalibrationsmessungen wurde ein Überrahmen aus Aluminium gefertigt, der in der Lage war sechs Kalorimetermodule, in einer Konfiguration wie in Abb.3.20 dargestellt, aufzunehmen. Das mittlere Modul der oberen Reihe (Modul 5) ließ sich mit geringem Zeitaufwand auswechseln. An dieser Stelle wurden im Verlaufe der Meßzeit sämtliche Kalorimetermodule des BEMC nacheinander eingebaut und zu Kalibrationszwecken gemessen. Das Meßprogramm sowie die Orientierung der elektromagnetischen Wellenlängenschieber sind in Abb.3.20 zu sehen. Es handelt sich um einen x-y-Scan des Moduls 4 bei einer Elektronenenergie von 5 GeV bei senkrechtem Einschluß. Die Einschlußorte und ihre Koordinaten in mm, ausgehend von einem Nullpunkt in der Modulmitte, können ebenfalls der Abb.3.20 entnommen werden. Am Anfang und am Ende der Scanmessungen wurden Pedestalmessungen durchgeführt und regelmäßig, nach jeder siebten Strahlungsmessung wurde eine Testpulsermessung mit einem konstanten Pulserlevel vorgenommen. Bei jeder Messung wurden 5000 Ereignisse aufgezeichnet

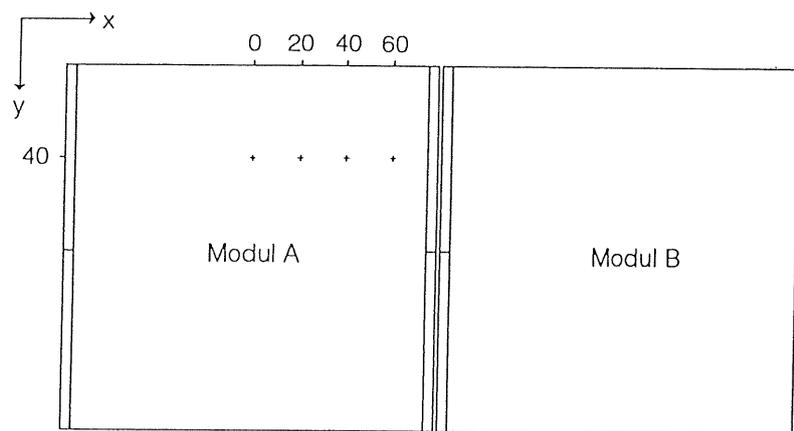


Abb.3.21 Modulkonfiguration und Positionen der Meßpunkte der ersten Teststrahlmeßzeit

Der Aufbau der ersten Meßzeit unterschied sich in folgenden Punkten von dem Aufbau der zweiten Meßzeit: Das Datenaquisitionssystem war ein im I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg entwickeltes System auf der Basis der CAMAC-Norm. Die Triggerlogik war weniger komplex und ließ keine Pile-up-Erkennung zu. Es wurde lediglich mit zwei Kalorimetermodulen gemessen. Die Meßpunkte und die Lage der Module mit den Positionen der elektromagnetischen Wellenlängenschieber können der Abb.3.21 entnommen werden. Es handelt sich um einen x-Scan des Moduls A bei $y = 40$ mm und einer Elektronenenergie von 3 GeV bei senkrechtem Einschluß. Alle Einschlußorte dieses Scans sind auch in dem Ortsscan der zweiten Meßzeit enthalten (Abb.3.20). Die Konfiguration von Modul A und Modul B der ersten Meßzeit entspricht derjenigen von Modul 4 und Modul 5 der zweiten Meßzeit.

4.2 Ergebnisse

Die Bestimmung der gemessenen Energie aus den Daten der zweiten Meßzeit geschah nach folgendem Verfahren [Pep90]: Da die Lichtausbeute der Kombinationen aus Wellenlängenschieber, Kleber und Photodiode verschieden ist, mußten mit Hilfe der Daten bei zentralem Einschuß in ein Modul Gewichtungsfaktoren α_i für jedes Photodiodensignal ermittelt werden. Für die gemessene Energie E bei einem Einschuß an der Stelle (x,y) gilt:

$$E(x,y) = \text{Gaußfit (Histogramm } E_i(x,y))$$

Das heißt $E(x,y)$ ist das Ergebnis eines Gaußfits an ein Histogramm dessen Einträge $E_j(x,y)$ folgendermaßen berechnet wurden:

$$E_i(x,y) = \sum_{i=1}^{24} \alpha_i \frac{(ADC_{ij}(x,y) - Ped_i)}{(ADC_i(TP) - Ped_i)}$$

E_j ist die Summe der Energiesignale über alle 24 elektromagnetischen Wellenlängenschieber der 6 Module für ein einzelnes Ereignis j , wobei $j = 1, \dots, 5000$. Es wurde über alle 6 Module addiert um die Leckverluste in Nachbarmodule zu berücksichtigen. $ADC_{ij}(x,y)$ ist der ADC-Wert für den Wellenlängenschieber i bei einem Einschuß an der Position (x,y) für das Ereignis j . Von diesem Wert wird der jeweilige Pedestalwert Ped_i abgezogen. Der Nenner stellt die elektronische Kalibration mit dem Testpuls TP dar, wobei eine Linearität der ADC's vorausgesetzt wird. Mit Hilfe der Faktoren α_i wird die Energiekalibration für jeden Wellenlängenschieber erreicht. Dabei gilt:

$$\frac{5 \text{ GeV}}{4} = \alpha_i \frac{(ADC_{ij}(\text{Zentral}) - Ped_i)}{(ADC_i(TP) - Ped_i)}$$

Damit sind für jedes Modul die vier elektromagnetischen Wellenlängenschieber so kalibriert das jeder Wellenlängenschieber bei Zentraleinschuß genau $\frac{1}{4}$ der Gesamtenergie (in diesem Fall 5 GeV) registriert.

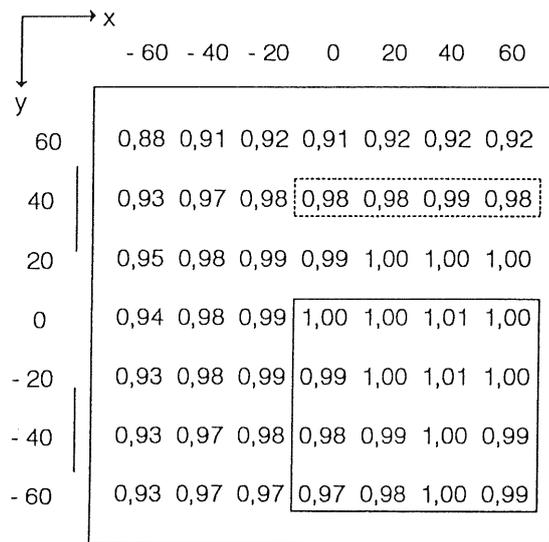


Abb.3.22 Meßergebnisse des Ortsscans der zweiten Teststrahlmeßzeit (normiert auf den Plattenmittelpunkt)

Alle Ergebnisse des Ortsscans von Modul 4 sind in Abb.3.22 entsprechend den Positionen der Meßpunkte eingetragen. Die Werte sind auf den Plattenmittelpunkt normiert. Der gestrichelt eingezeichnete Bereich beinhaltet die Ergebnisse für diejenigen Meßpunkte, welche auch während der ersten Meßzeit gemessen wurde. In der Abb.3.23 sind die Meßergebnisse an diesen Einschußorten für beide Meßzeiten aufgetragen. Die Werte der ersten Meßzeit sind ebenfalls auf den Plattenmittelpunkt normiert.

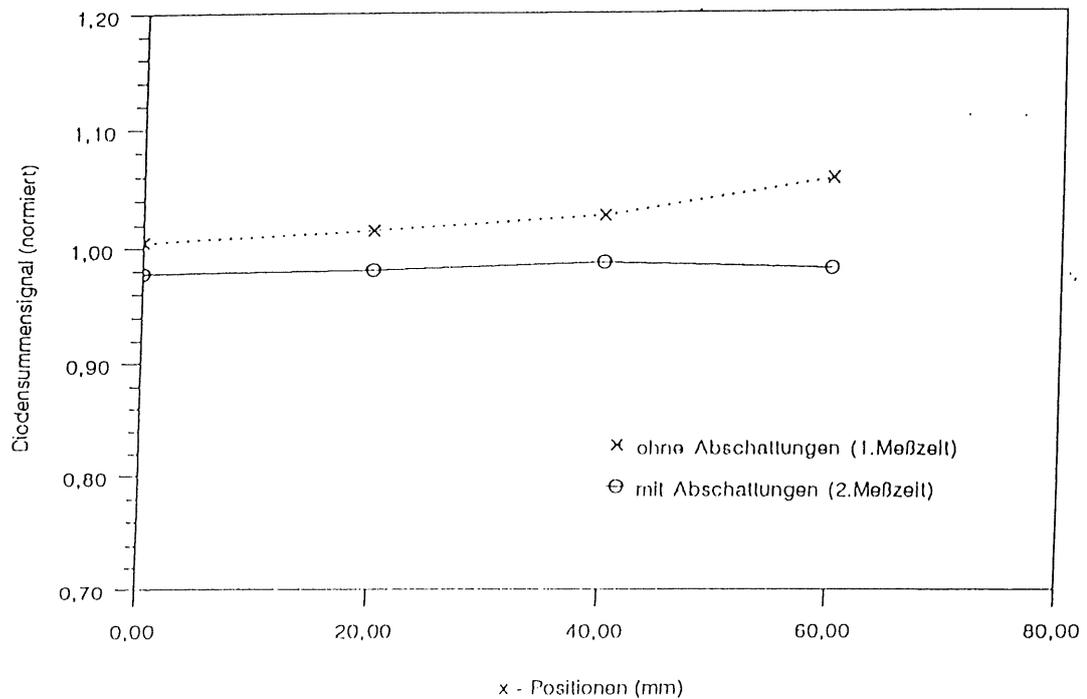


Abb.3.23 Vergleich von Messungen von Kalorimetermodulen ohne und mit Abschattungen

Die beiden Kurven sind Scans in Richtung einer Photodiode und während das Energiesummsignal bei dem Modul aus der ersten Meßzeit, also dem Modul ohne Abschattungen der Reflektorpapiere, zum Rand hin um 6% steigt, bleibt das Summsignal bei dem Modul mit den abgeschatteten Papieren konstant und fällt am äußersten Meßpunkt um 1% ab. Die Ortsabhängigkeit der Energiesummsignale der Kalorimetermodule ist demnach durch die Verwendung von Abschattungen auf den Reflektorpapieren verringert worden.

Für die Beurteilung der Homogenität der Energiesignale über ein ganzes Modul mit Abschattungen dienen die Ergebnisse des Ortsscans der zweiten Meßzeit. Das Modul 4 befand sich in der linken oberen Ecke des Verbandes aus sechs Modulen. Daher traten bei Elektroneneinleitung nach oben und nach links von der Modulmitte große Leckverluste des elektromagnetischen Schauers auf (Abb.3.22). Nur bei einem Einschuß in den in Abb.3.23 eingerahmten Quadranten gab es solche Verluste nicht, da sich der Schauer in den benachbarten Kalorimetern weiter ausbreiten konnte und so seine Energie für die Messung erhalten blieb. Für die Abb.3.24 sind lediglich die eingerahmten Meßwerte benutzt worden und es resultiert aus ihnen eine Verteilung für die Abhängigkeit der Signale von dem Ort des Einschusses der Elektronen, die in einem Bereich von $\pm 3\%$ liegt. Diesen Wert lieferten auch die Labormessungen an der Szintillatorplatte mit der Abschattung A3 (siehe Kapitel 3.2.5). Vergleicht man die Teststrahl- mit den Labormessungen (Abb.3.24 mit Abb.3.10), so fällt auf, daß der Signalverlauf bei den Teststrahlmessungen gegenüber dem Verlauf der Labormessungen geglättet ist. So sind z.B. die im Labor gemessenen ausgeprägten Überhöhungen der Signale vor jeder Photodiode bei den Messungen mit hochenergetischen Elektronen zu einem Signalhügel an jeder Ausleseseite verschmolzen. Der punktuellen Anregung einer Szintillatorplatte, wie es bei den Laborversuchen geschah, steht die ausgedehnte Anregung der Kalorimetermodule mit einem elektromagnetischen Schauer entgegen. Der nivellierende Effekt eines Schauers ist so verständlich.

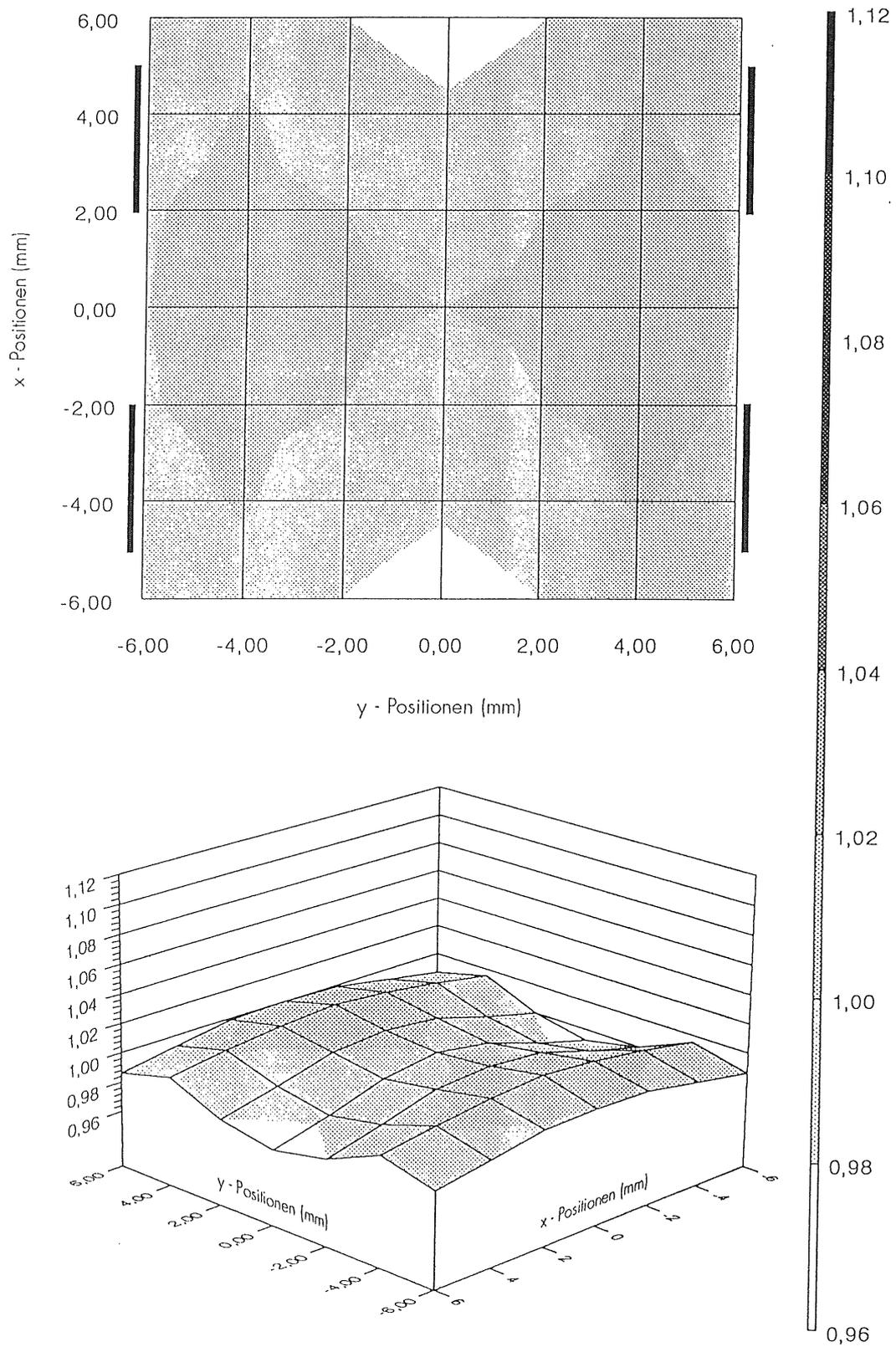


Abb.3.24 Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale eines Kalorimetermoduls mit Abschaltungen
Gemessen während der zweiten Teststrahlmeßzeit

5 Diskussion der Ergebnisse

Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen war es unter anderem mit Hilfe der Labormessungen ortsabhängige Gewichtungsfaktoren für die Lichtausbeute in transversaler und longitudinaler Richtung zu bestimmen. Diese Faktoren sollen in die Monte-Carlo-Computersimulationen für das H1-Experiment einfließen. Mit Hilfe dieser Faktoren sollen die Simulationen des Ansprechverhaltens der Module des BEMC bei einem Teilchendurchgang verbessert werden.

Die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren ist erfolgt. Aber vor kurzem entdeckte und bislang noch nicht vollständig untersuchte Effekte machen eine Überarbeitung der transversale Faktoren gegebenenfalls erforderlich. So wird eine Druckabhängigkeit des Reflexionsverhaltens der Reflektorpapiere angenommen. In den Serienmodulen des BEMC stehen alle Szintillatorreflektorpapiere unter hohem Druck. Eine definierte Reproduktion der Druckverhältnisse, die innerhalb der Kalorimetermodule herrschen, ist im Rahmen der Laborversuche nicht trivial. Untersuchungen zu diesem Thema werden z.Zt durchgeführt [Cla91].

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Abschattungsmuster wurden folgendermaßen entwickelt: Für jedes Muster wurden aus Tyvec-Papier-Bögen, die in definierten Grauwerten bedruckt waren, Segmente in Form der zu untersuchenden Abschattungen ausgeschnitten und auf weißes Tyvecpapier in der Größe einer Szintillatorplatte aufgeklebt. Diese nicht vollkommen planen Einheiten aus verschieden stark abgeschatteten Papiersegmenten dienten dann in den Laborversuchen als Szintillatorplattenreflektoren. Aufgrund des mechanischen Aufbaues der Laborversuche - die Szintillatorplatte und die Reflektorpapiere wurden zwischen zwei verschraubten Aluminiumplatten fest eingeklemmt - lastete auf der Papieroberfläche ein hoher Druck. Diese Druckverhältnisse sind jedoch nicht genau bekannt und sind unter anderem durch die oben erwähnte nicht plane Oberfläche der Papiere sicher verschieden von den Druckverhältnissen in den Serienmodulen in denen die Abschattungen auf die Reflektorpapiere aufgedruckt sind. Daher war es notwendig die Messungen zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren mit Papieren aus der Serienfertigung zu wiederholen. Diese Messungen sind im Rahmen der Diplomarbeit von [Esch91] durchgeführt worden. Die auf diese Weise reproduzierbar ermittelten Faktoren weichen geringfügig von den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ab, und werden in tabellarischer Form bei [Esch91] aufgeführt sein. Jene mit den Serienpapieren bestimmten Faktoren sind derzeit Bestandteil der Computersimulationen.

Es wäre wünschenswert die experimentell ermittelten Faktoren durch eine Computersimulation, die eben diese Faktoren zum Ergebnis haben sollte, zu bestätigen. Mit Hilfe einer solchen Methode ließe sich das Verständniss der Lichttransportvorgänge innerhalb der Szintillatoren und Wellenlängenschieber vertiefen und einige lediglich qualitativ beschriebene Effekte könnten mit einer solchen Simulation womöglich quantifiziert werden. Hierzu seien insbesondere folgende erklärungsbedürftige Punkte genannt: Bei einer Anregung der Szintillatorplatte mit UV-Licht besteht eine Fernwirkung der Abschattungen der Szintillatorreflektorpapiere. Bei einer Anregung der Wellenlängenschieber mit dem Licht welches aus der Szintillatorplatte austritt besteht keine Fernwirkung der Abschattungen der Wellenlängenschieberreflektorpapiere. Bei einem Einschuß von Elektronen in die Kalorimetermodule zeigt die ortsabhängige Funktion der Energiesignale einen glatteren Verlauf als bei einer punktuellen Anregung in den Laborversuchen.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zur Optimierung der Lichtauslese aus den quadratischen Blei-Szintillator Kalorimetermodulen des rückwärtigen elektromagnetischen Sampling Kalorimeters (BEMC) des H1-Detektors im Rahmen des HERA-Projektes durchgeführt. Mit Hilfe eines, gegenüber ersten Prototypen [Wun88, Pep89], veränderten Designs der Module und speziell für jeden Modultyp entwickelten Abschattungen der verwendeten Reflektorpapiere der Szintillatorplatten und Wellenlängenschieber, sollte eine Homogenität der Energiesignale von $<1\%$ [Fel85] [Fel87] nach der Kalibration der Module über den gesamten Detektor gewährleistet werden können.

In der endgültigen Geometrie besteht jedes Modul aus 49 Blei- (Dicke 2,5 mm) und 50 SCSN 38-Platten (Dicke 4 mm). Wobei die Schichtung vertexseitig mit einer Szintillatorplatte beginnt. Ausgelesen werden die quadratischen Module mit je vier elektromagnetischen Wellenlängenschiebern (Breite 7,8 cm, Dicke 3 mm), die paarweise angeordnet an zwei gegenüberliegenden Seiten über die gesamte Länge und Breite der Module reichen und auf die je eine Photodiode pro Wellenlängenschieber aufgeklebt ist. An den beiden anderen Seiten sind doppelt so breite hadronische Wellenlängenschieber mit je zwei Photodioden angeordnet. Diese lesen die letzten 15 Szintillatorplatten aus. Alle Szintillatorplatten und Wellenlängenschieber sind mit Reflektorpapieren versehen.

Die Entwicklung der Abschattungen der Reflektorpapieren für die quadratischen²⁸ Kalorimetermodule geschah in Laborversuchen mit Hilfe einer zu diesem Zwecke gebauten Meßapparatur, in welcher die ortsabhängige Transmission des Szintillationslichtes zu den Photodioden in transversaler (x,y) und longitudinaler (z) Richtung simuliert werden konnte. Eine Szintillatorplatte konnte an verschiedenen (x,y)-Positionen, entsprechend einem Lochraster in einer Aluminium-Platte, mit dem UV-Licht (Maximum bei ca. 330 nm) einer Xenon-Blitzlampe angeregt werden. Die z-Position der Szintillatorplatte ließ sich ebenfalls variieren.

Während die Diodensummensignale bei weißen Szintillatorreflektorpapieren Ortsabhängigkeiten von +14% und -2% gegenüber der Anregung in Zentralposition aufwiesen, ließen sich diese Werte mit abgeschatteten Reflektorpapieren auf +3% und -2% bei einem Intensitätsverlust von ca. 10% verbessern. Die longitudinale Abhängigkeit für die elektromagnetischen Wellenlängenschieber konnte von ca. $\pm 17\%$ für weiße Reflektoren auf ca. $\pm 6\%$ bei abgeschatteten Papieren reduziert werden. Bei den Reflektoren der hadronischen Wellenlängenschieber wurde auf eine Abschattung verzichtet.

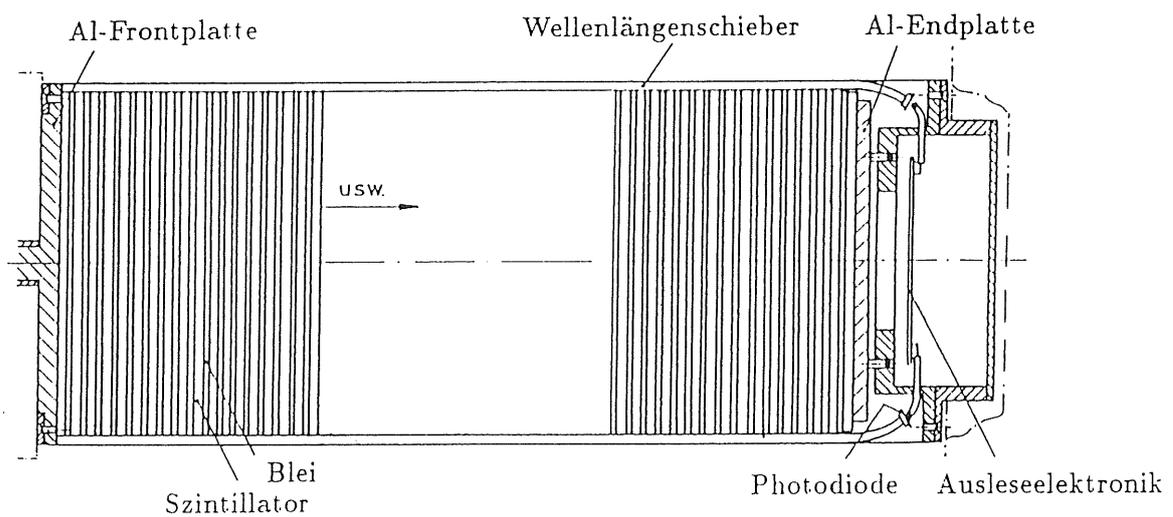
Erste Ergebnisse der Kalibrationsmessungen der Kalorimetermodule aus der Serienfertigung welche am Elektronenstrahl des DESY durchgeführt wurden liefern eine qualitative Bestätigung der Labormessungen.

Die Uniformität der Lichtausbeute der Serienmodule ist gegenüber den Messungen mit den oben erwähnten ersten Prototypen und Prototypen mit dem endgültigen Design aber durchgehend weißen Reflektorpapieren soweit verbessert, so daß die geforderte Genauigkeit von 1% in der Energiekalibration wohl zu erreichen ist.

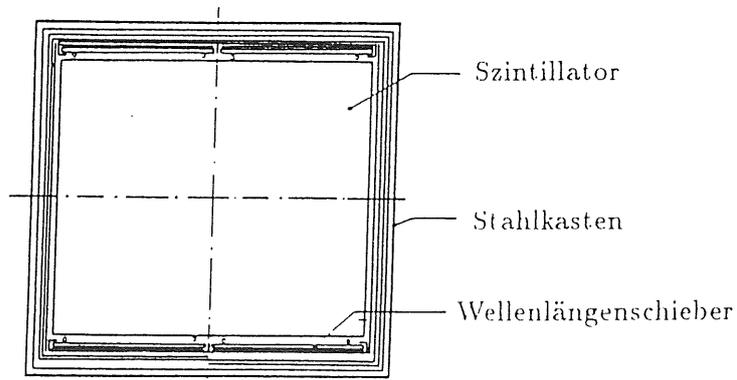
²⁸ Die Ergebnisse der Untersuchungen der dreieckigen und der trapezförmigen Modulformen können der Arbeit von [Esch91] entnommen werden.

7 Anhänge

7.1 Anhang A Aufbau eines Kalorimetermoduls



a) Längsschnitt



b) Querschnitt
(nicht maßstabsgerecht)

Abb.A1 Aufbau eines quadratischen Kalorimetermoduls im Längsschnitt und im Querschnitt (nicht maßstabsgerecht).

7.2 Anhang B Materialeigenschaften von SCSN 38

Für die Kalorimetermodule des BEMC wird das Szintillatormaterial SCSN 38 (auf Polystyrol-Basis) verwendet. Nachstehend sind einige Materialeigenschaften tabellarisch aufgeführt.

SCSN 38

Dichte	1,032 g/cm ³
Brechungsindex	1,59
Wellenlängenbereich des Szintillationslichtes	~ 400 - 500 nm
Wellenlänge der maximalen Intensität	430 nm
Abklingzeit des Szintillationspulses	2,5 ns
Trägersubstanz	Polystyrol
Szintillator	1% b-PBD
Wellenlängenschieber	0.02% BDB
Hersteller	Kyowa Gas

Tab.B1 Materialeigenschaften des SCSN 38

Polystyrol

Dichte	1,060 g/cm ³
Z/A	0,5377
mittleres Ionisierungspotential	68,7 eV
mittlere Elektronendichte	3,342 x 10 ²¹ cm ³

Tab.B2 Materialeigenschaften des Polystyrols

7.3 Anhang C Technische Daten der Photodioden

HAMAMATSU PHOTODIODE S2575

Sensitive Fläche	3,4 x 30 mm ²
Sensitiver Wellenlängenbereich	320 - 1060 nm
Maximale Empfindlichkeit	900 ± 50 nm
Quantenausbeute ≥ 75%	600 - 940 nm
Spektrale Empfindlichkeit	
- im Maximum	0,6 A/W
- bei 480 nm	0.25 A/W
Dunkelstrom bei $U_{\text{Bias}} = 30 \text{ V}$	
- Typischer Wert	1,5 nA
- Maximaler Wert	ca. 5 nA
Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms	x 1,15 / °C
Übergangskapazität bei $U_{\text{Bias}} = 30 \text{ V}$	80 pF
Anstiegszeit (10% - 90%) bei $U_{\text{Bias}} = 30 \text{ V}$ nach Laserdioden-Anregung (800nm)	15 ns
Abschneidefrequenz bei $U_{\text{Bias}} = 30 \text{ V}$	30 MHz
Maximale Bias-Spannung	ca. 50 V
Fenstermaterial	Resin

Tab.C1 Daten der HAMAMATSU Photodioden S2575
(nach [Ham86])

7.4 Anhang D Weitere Darstellungen zur transversalen Abhängigkeit der Diodensignale

Ergänzend zum Kapitel 3.2.8 sind in diesem Anhang weitere y - Scans einer rechteckigen Szintillatorplatte abgebildet. Die Darstellungsweise entspricht derjenigen aus Abb. 3.9. Die Messungen wurden bei $z = 21$ (entspricht der Position der 21-igsten Szintillatorplatte in den Kalorimetermodulen) und $x = 6$ (Plattenmitte) (Abb.D.1) sowie $x = 11$ (rechter Rand) (Abb.D.2) mit den Abschattungen A1 bis A5 durchgeführt. Die Abschattungsmuster sowie die Orte der Anregung der Szintillatorplatte können der Abb. 3.8 entnommen werden. Jeder einzelne Scan ist symmetrisiert (siehe Kapitel 3.2.1) und auf den Wert des Diodensummensignals bei weißen Reflektoren an der Stelle $y = 0$ mm normiert.

Für die Abschattungen A1 und A2 sind an dieser Stelle auch die Kontur- und Oberflächendiagramme der Signalverläufe der Diodensummensignale aufgeführt. Diese Darstellungen entsprechen denen aus den Abbildungen Abb. 3.7 und Abb 3.10 für den Fall der weißen Reflektoren und der Abschattung A3.

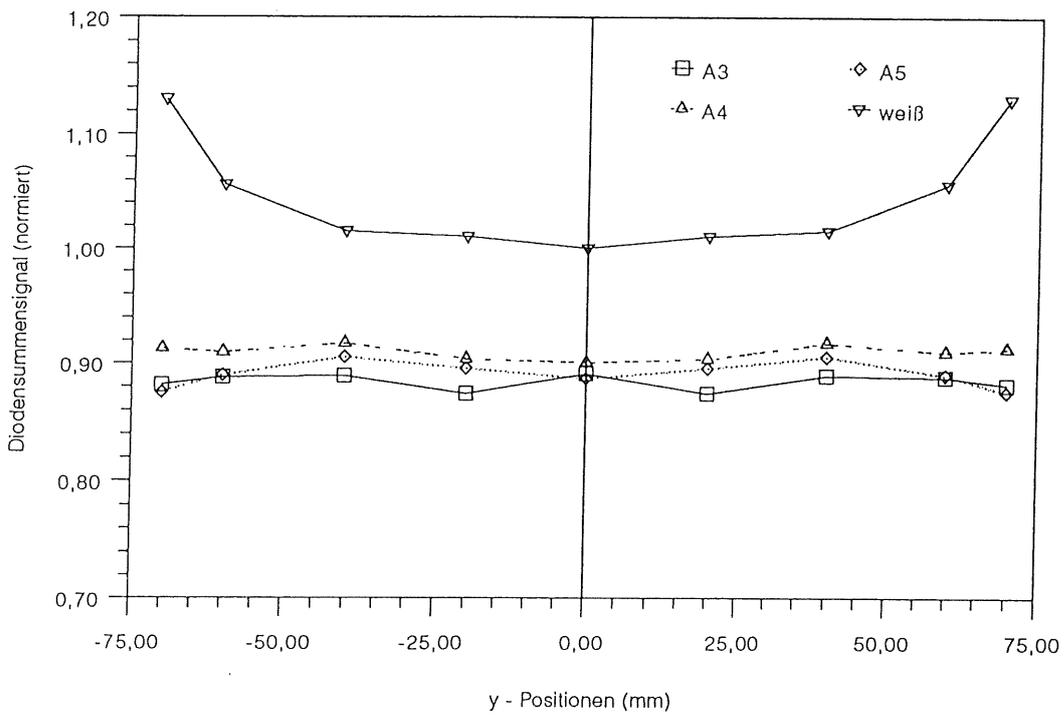
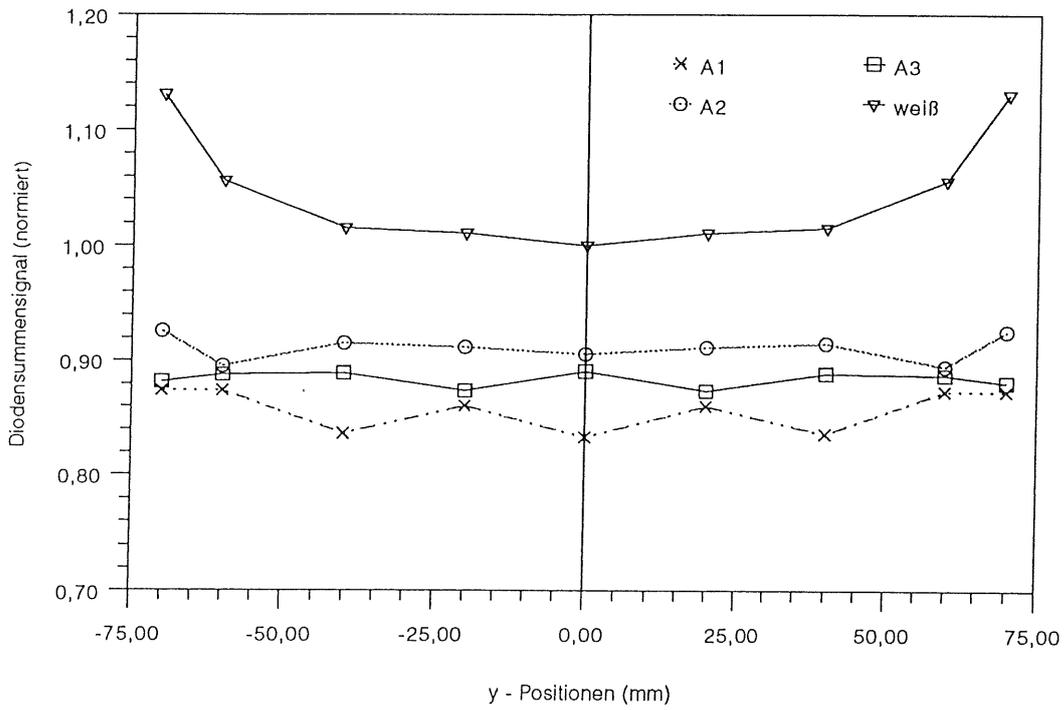


Abb.D1 y - Scans bei $x = 6$ mit den Abschaltungen A1 bis A5

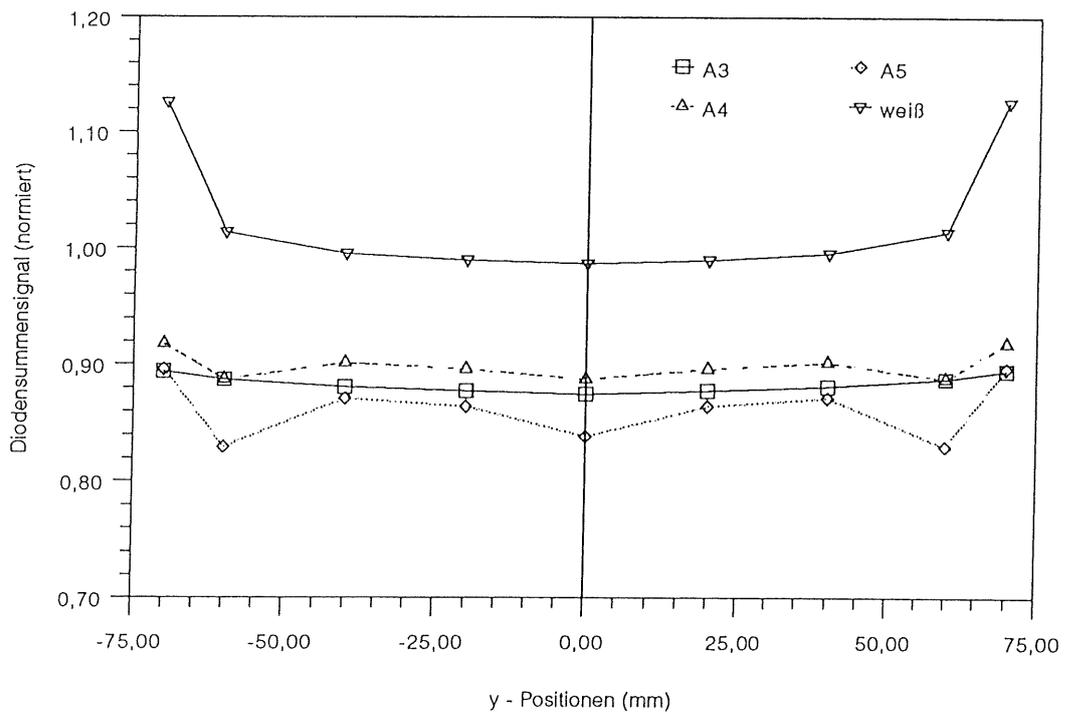
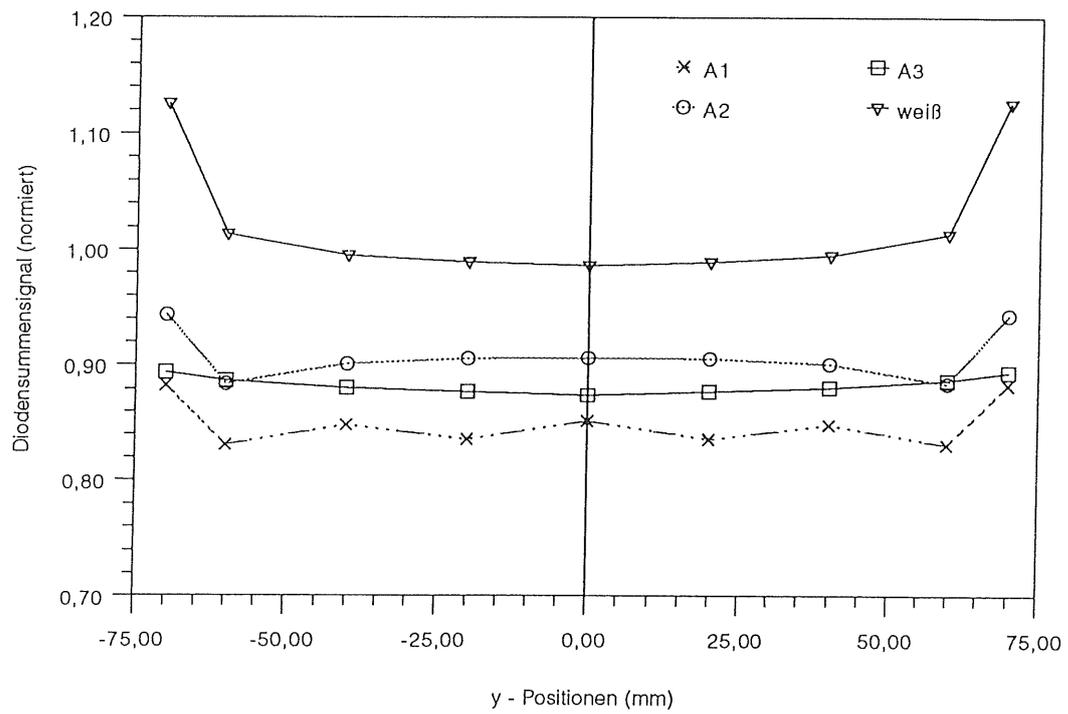


Abb.D2 y - Scans bei x = 11 mit den Abschaltungen A1 bis A5

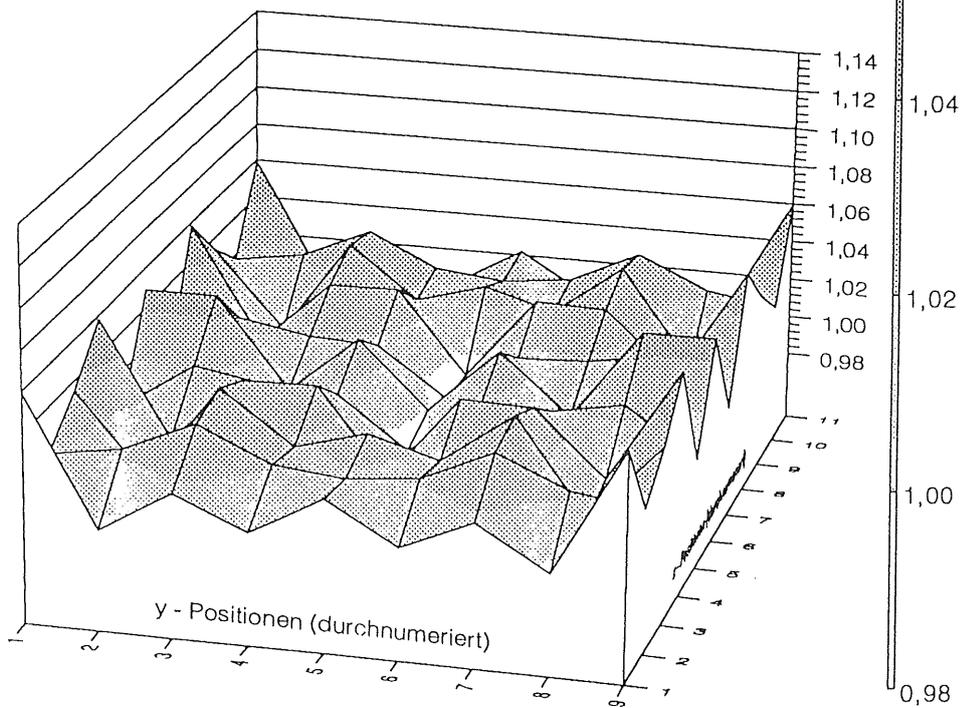
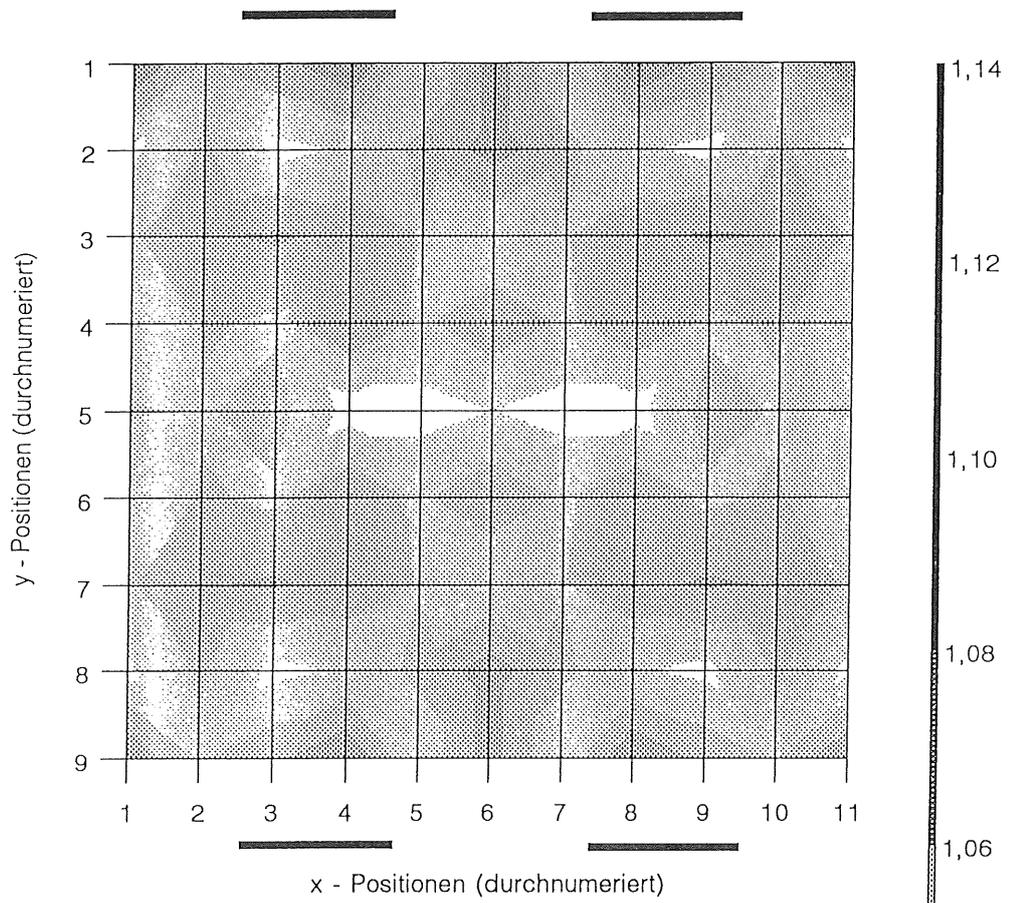


Abb.D3 Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummsignale einer rechteckigen Szintillatorplatte mit Abschaltung A1

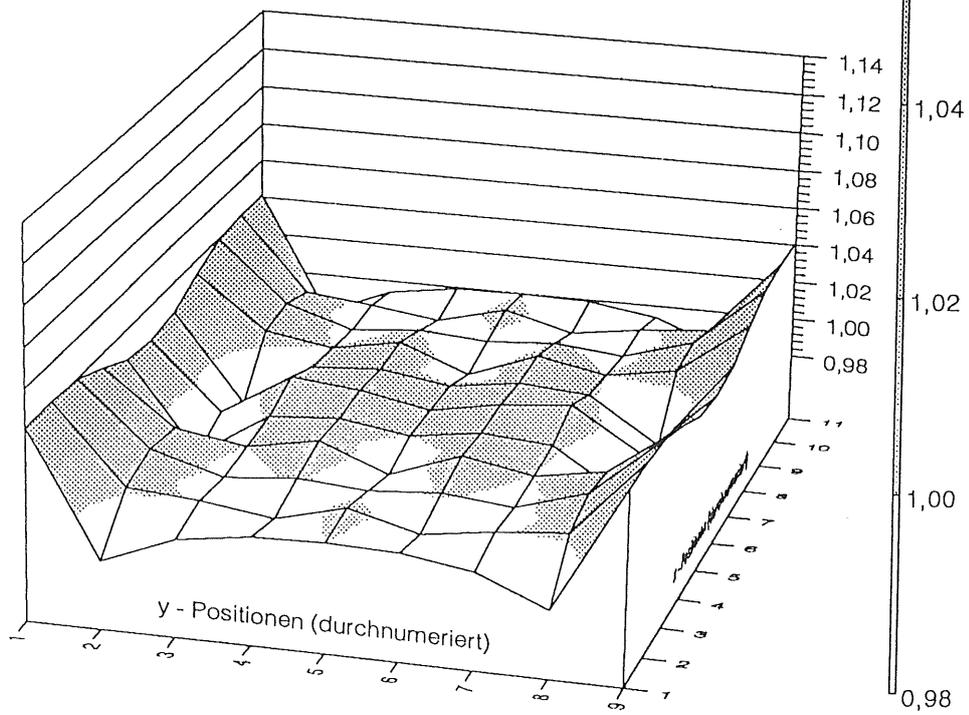
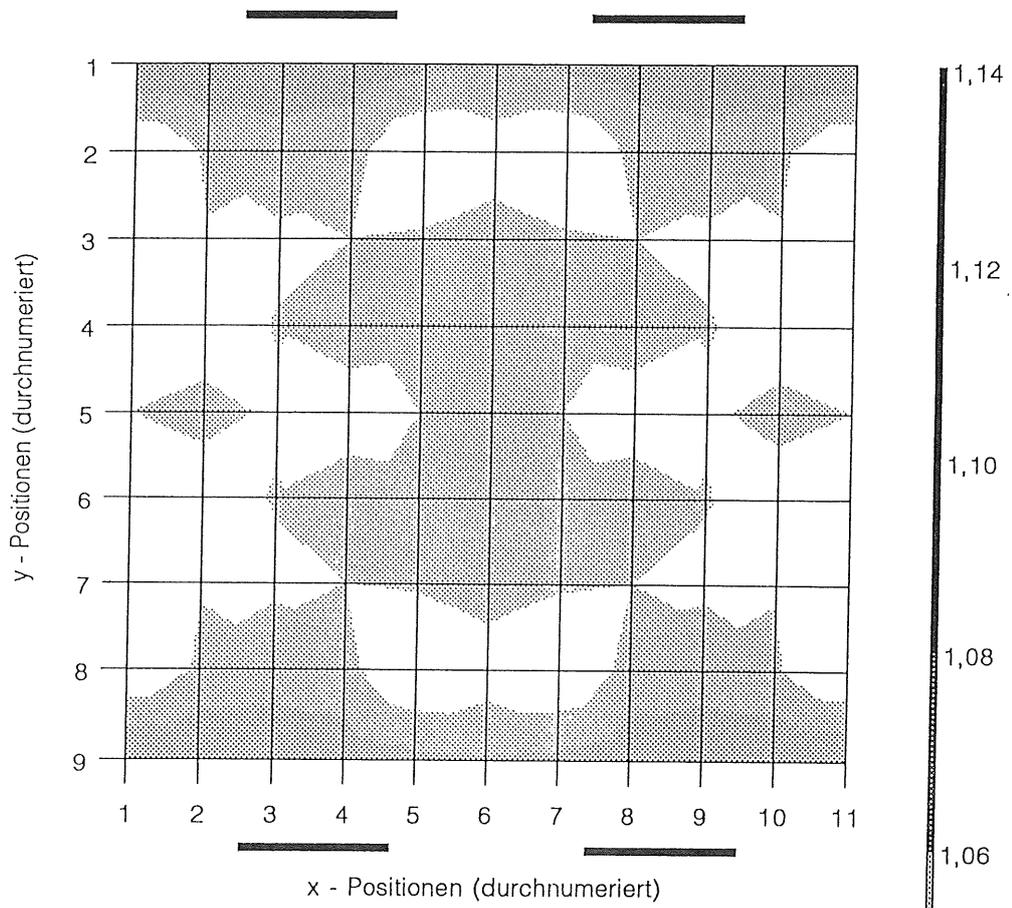


Abb.D4 Kontur- und Oberflächendiagramme der Diodensummensignale einer rechteckigen Szintillatorplatte mit Abschaltung $\Lambda 2$

7.5 Anhang E Serienmessungen der Wellenlängenschieber

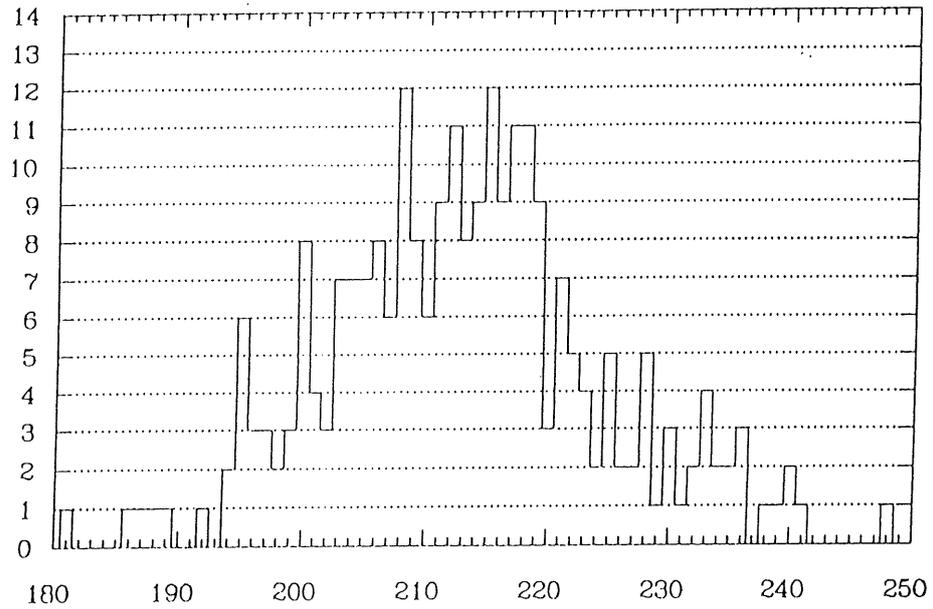
Im Verlaufe der Serienproduktion der Kalorimetermodule des BEMC sind sämtliche für das BEMC produzierten Einheiten aus Wellenlängenschieber und aufgeklebter Photodiode mit der in Kapitel 3 beschriebenen 11x9 Meßapparatur auf ihre jeweiligen Transmissionseigenschaften für Szintillationslicht und die Effektivität der Lichtumwandlung in elektrische Signale hin untersucht worden.

Zu diesem Zweck wurde eine Referenzlochmaske angefertigt mit Bohrungen an den Stellen (3,5), (6,5) und (9,5). Alle elektromagnetischen Wellenlängenschieber-Photodioden-Einheiten (EWPE) und ebenfalls alle hadronischen Wellenlängenschieber-Photodioden-Einheiten (HWPE) sind unter Verwendung dieser Dreilochmaske gemessen worden. Dabei wurden je zwei EWPE in eine Aluminiumschatulle, wie sie auch in den Kalorimetermodulen Verwendung findet, eingelegt, und bei Lichteinleitung an allen drei Punkten gemessen. Danach wurden die Positionen der EWPE vertauscht und die Messungen wiederholt. Für die Messungen der HWPE gilt entsprechendes, allerdings ohne Seitenvertauschung da im hadronischen Fall je eine Einheit in einer Aluminiumschatulle eingebaut wird. Die während der Messungen verwendeten Reflektorpapiere entstammten der Serienproduktion

Die Messergebnisse bei einer Lichteinleitung an den Punkten (3,5) und (9,5) dienen zur Kontrolle der Symmetrie des Meßaufbaus. Anhand des arithmetischen Mittels der Meßergebnisse am Punkt (6,5) (Diodensumme PH_6) wurden die Wellenlängenschieber-Photodioden-Einheiten klassifiziert. Für jedes Kalorimetermodul wurde daraufhin eine Gruppe von EWPE und HWPE zusammengestellt, die in ihren Meßergebnissen möglichst dicht zusammenlagen.

In den Abbildungen Abb.E1 und Abb.E2 sind die Diodensummen PH_6 für die EWPE und die HWPE der quadratischen Module dargestellt.

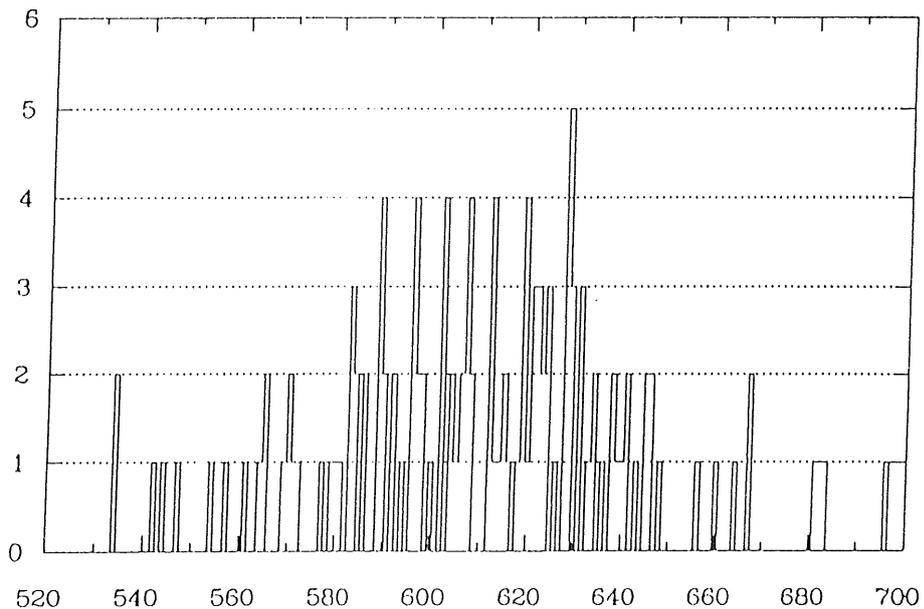
Einträge



Mittelwert PH₆

Abb.E1 Histogramm der Pulshöhen aller elektromagnetischen Wellenlängenschieber-Photodioden-Einheiten für die quadratischen Kalorimetermodule aus der Serienproduktion des BEMC. (Lichteinleitung am Punkt (6,5))

Einträge



Diodensumme PH₆

Abb.E1 Histogramm der Pulshöhen aller handronischen Wellenlängenschieber-Photodioden-Einheiten für die quadratischen Kalorimetermodule aus der Serienproduktion des BEMC. (Lichteinleitung am Punkt (6,5))

8 Literaturverzeichnis

- [Ama81] U. Amaldi; Fluctuations in Calorimetry Measurements, Phys. Scripta 23 (1981) 409
- [Bia85] Z. Bian, J. Dobbins, N. Mistry; The Use of Silicon Photodiodes in a CsI(Tl) Calorimeter, Nucl. Instr. and Meth. A239 (1985) 518
- [Cla91] F. Clasen, Diplomarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg (1991)
- [Del80] C.D.G. Delaney; Electronics for the Physicist with Applications, Ellis Horwood Ltd., Chichester (1980)
- [Eng85] J. Engler; Perspectives in Calorimetry, Nucl. Instr. and Meth. A235 (1985) 301
- [Esch91] M. Eschweiler; Diplomarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg (1990)
- [Fel85] J. Feltesse; Systematic Shifts in Structure Functions and absolute Calibrations, H1-04/8504 Internal-Report (1985)
- [Fel87] J. Feltesse; Measurement of inclusive Differential Cross Sections, Proceedings of the HERA Workshop Vol.1 (1987)
- [Fin89] G. Finsel; Untersuchungen zum Verhalten von Trioden, Tetroden und 8-stufigen Photomultipliern in Magnetfeldern bis zu 1,5 T, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Gen87] M. Gennis; Entwurf und Test eines elektromagnetischen Kalorimeters, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1987)
- [Gen91] M. Gennis; Dissertation in Vorbereitung, Universität Hamburg (1991)
- [Gro84] D.E. Groom; Silicon Photodiode Detection of Bismuth Germanate Scintillation Light, Nucl. Instr. and Meth. 219 (1984) 141
- [Hal86] G. Hall, D. Robinson, I. Siotis; Evaluation of the Performance of Silicon Photodiodes in Combination with Plastic Scintillators, Nucl. Instr. and Meth. A245 (1986) 344
- [Ham86] HAMAMATSU; Technical Data Sheet No. S-504-01 (1986)
- [Jah90] Th. Marckmann, U. Holm; Im Jahresbericht 1988/1989 I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg; Universität Hamburg (1990)

- [Kam83] T. Kamon et al.; A new Scintillator and Wavelength Shifter, Nucl. Instr. and Meth. 213 (1983) 261
- [Kle87] K. Kleinknecht; Detektoren für Teilchenstrahlung, Teubner Studienbücher (1987)
- [Kno79] G.F. Knoll; Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, New York (1979)
- [Kow70] E. Kowalski; Nuclear Electronics, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York (1970)
- [Lip90] M. Lipka; Diplomarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg (1990)
- [Lon75] E. Longo, I. Sestili; Monte-Carlo-Calculations of Photon Initiated Showers in Leadglas, Nucl. Instr. and Meth. 128 (1975) 283
- [Mun88] R. Mundt, G. Grindhammer, L. Görlich; FLASH-Manual Version 3.1 (1988)
- [Mus88] G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger; Kern- und Elementarteilchenphysik VCH Weinheim (1988)
- [Pau85] R. Paul; Optoelektronische Halbleiterbauelemente, Teubner Studienbücher (1985)
- [Pep89] E. Peppel; Untersuchungen an einem Prototyp-Segment aus vier Modulen des elektromagnetischen Rückwärtskalorimeters für den H1-Detektor bei HERA, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Pep90] E. Peppel; Persönliche Mitteilungen; Universität Hamburg (1990)
- [Per87] D.H. Perkins; Introduction to High Energy Physics, Addison-Wesley Pub.Inc. (1987)
- [Röm73] Römpps Chemie-Lexikon, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart (1973)
- [Sch89] Ch. Schrader; Ein Monitorsystem für das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter bei H1-HERA, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Tpr89] Technical Progress Report; H1Collaboration; Hamburg (1989)
- [Wol86] G. Wolf; HERA: Physics, Machine and Experiments; DESY 86-089 (1986)
- [Wun88] R. Wunderlich; Untersuchung an einem Prototyp-Doppelmodul des elektromagnetischen Rückwärtskalorimeters für den H1-Detektor bei HERA, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1988)

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen, die mir bei der Durchführung und der Anfertigung dieser Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen, herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt:

- meinen Eltern, die stets zu mir gehalten und mich nicht eingeengt haben;
- Herrn Prof. Dr. H.H. Duhm für die Aufgabenstellung und die ausgesprochen freundliche Betreuung;
- Herrn Prof. Dr. R. Langkau und Herrn Prof. Dr. W. Scobel für die Hilfe und Unterstützung bei allen anfallenden Problemen;
- allen Mitgliedern der H1-Gruppe des Instituts, insbesondere Dr. W. Bauhoff, Markus Eschweiler, Gisela Finsel, Mathias Funk, Martin Gennis, Thomas Hartmann, Silke Mordhorst und Christian Pichler für das sehr angenehme Arbeitsklima und die umfassende Hilfsbereitschaft;
- Hans-Peter Kasselmann für die kompetente fachliche Beratung, aber insbesondere für die tiefe Freundschaft und die vergnüglichen Zeiten innerhalb und außerhalb der Cafeteria;
- Erich Peppel ebenfalls für die kompetente fachliche Beratung und für seine große Hilfsbereitschaft;
- Kalle Rathje für die stresskompensierenden Squash-Partien und die Lachatacken;
- Götz Korf für die zahlreichen und interessanten Erzählungen zu allen erdenklichen Themen;
- Herrn N. Schirm, Herrn M. Matysek und Herrn Gärtner für die gute Zusammenarbeit;
- Herrn H. Krause für seine freundliche Unterstützung bei Hardware-Problemen;
- Herrn B. Leicht und seinen Mitarbeitern in der Werkstatt des I. Instituts für ihre Hilfsbereitschaft, Schnelligkeit und Sorgfalt bei der Anfertigung notwendiger Teile für die Experimente;
- **Janine**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Hamburg, im Dezember 1990