

Kalibration des Laser-Monitorsystems
für das elektromagnetische
Rückwärts-Kalorimeter des HERA
H1-Detektors

Experimentelle Physik-Diplomarbeit
am I. Institut für Experimentalphysik
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Regine Griebel ✓

13. März 1991

MX

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Der H1-Detektor	4
1.2	Das BEMC	4
1.3	Aufgabenstellung	6
2	Grundlagen	8
2.1	Kalibration des BEMC	8
2.2	Allgemeines über Monitorsysteme	9
2.3	Wechselwirkungsprozesse von γ -Quanten mit Materie	10
2.4	Szintillatoren	13
2.4.1	Anorganische Szintillatoren	13
2.4.2	Organische Szintillatoren	14
2.5	Photomultiplier und Photodioden	16
2.5.1	Aufbau und Funktion von Photomultipliern	16
2.5.2	Aufbau und Funktion von pin-Photodioden	20
2.6	Lichtleiter	21
3	Das Monitorsystem	23
3.1	Das Monitorsystem für das BEMC	23
3.1.1	Aufgaben des Monitorsystems	23
3.1.2	Aufbau des Monitorsystems	24
3.2	Das Referenzsystem	29
3.2.1	Das Hauptreferenzsystem mit dem Photomultiplier	30
3.2.2	Der CsI(Tl)-Kristall	32
3.2.3	Das Hauptreferenzsystem mit der Photodiode	34
3.2.4	Das Nebenreferenzsystem	36
3.2.5	Die verwendeten Kalibrationsquellen	37
4	Experimentelle Methoden und Ergebnisse	41
4.1	Voruntersuchungen zur Stabilität des Hauptreferenzsystems mit dem Photomultiplier	41
4.1.1	Meßaufbau und Durchführung zur Untersuchung des Zählrateneffekts mit γ -Quellen	42
4.1.2	Meßaufbau und Durchführung zur Untersuchung des Zählrateneffekts mit einer LED	45
4.1.3	Diskussion der Ergebnisse	49
4.2	Die Stabilisierungseinheit	49
4.2.1	Beschreibung der Regelkreise	49
4.2.2	Aufbau und Justierung der Stabilisierungseinheit	50
4.2.3	Verbesserung des Photomultiplerverhaltens durch Stabilisation	56

4.3	Simulationsmessung von Monitorläufen	56
4.3.1	Der Meßaufbau	57
4.3.2	Durchführung der Messungen	58
4.3.3	Diskussion der Ergebnisse	58
5	Zusammenfassung	63
A	Aufbau eines Kalorimetermoduls	64
B	Daten der Photodioden, Photomultiplier und Lichtfasern	66
C	Spannungsteiler-Schaltungen	68
	Abbildungsverzeichnis	72
	Tabellenverzeichnis	74
	Literaturverzeichnis	75

Kapitel 1

Einleitung

Im Jahr 1991 wird die Speicherringanlage **HERA** (**H**adronen-**E**lektronen-**R**ing-**A**nlage) mit den beiden Großdetektoren **H1** (Halle Nord) und **ZEUS** (Halle Süd) ihren Betrieb aufnehmen.

In Abb. 1.1 ist die HERA-Ringanlage mit den Vorbeschleunigern schematisch dargestellt.

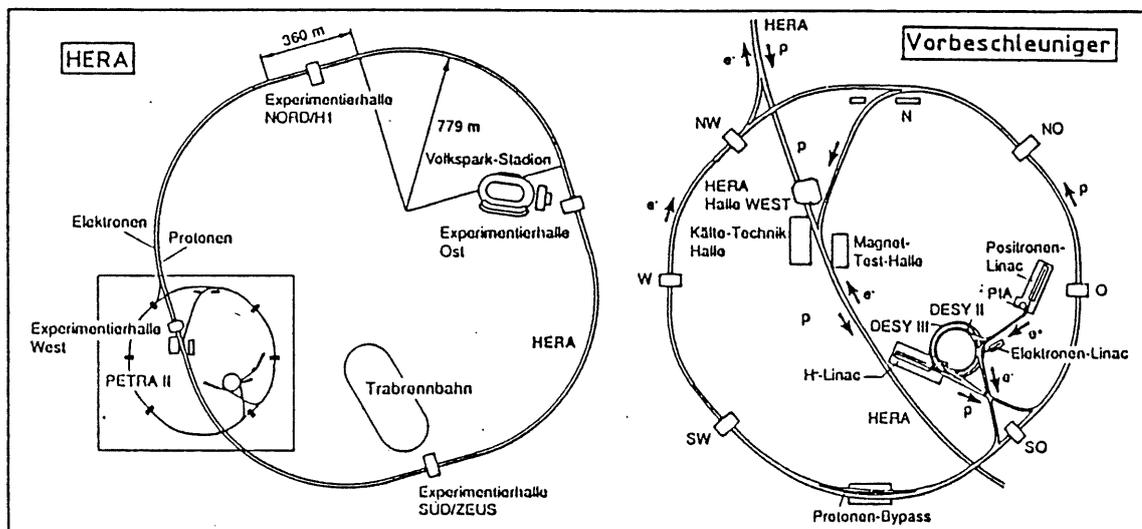


Abb. 1.1: **Der Speicherring HERA und seine Vorbeschleuniger**

Links – Die HERA-Speicherringe mit den Experimenten **H1** (Halle Nord) und **ZEUS** (Halle Süd)

Rechts – Die Vorbeschleuniger von HERA:

(Endenergie der Vorbeschleunigung in Klammern)

Elektronen: Linac (200 MeV), Synchrotron DESY II (7 GeV) und Synchrotron PETRA II (14 GeV)

Protonen: Hochfrequenz-Quadrupol (750 keV), H⁻-Linac (50 MeV), Synchrotron DESY III (7.5 GeV) (beim Einschuss werden die beiden Elektronen der H⁻-Ionen abgestreift) und Synchrotron PETRA II (40 GeV) [Scu 90].

In dem Speicherring werden Elektronen mit einer Maximalenergie von 30 GeV und Protonen mit einer Maximalenergie von 820 GeV gegeneinander beschleunigt und in den Wech-

selwirkungspunkten der beiden Detektoren mit einer Frequenz von 10.4 MHz zur Kollision gebracht.

Im Schwerpunktsystem stehen für die Experimente Energien bis zu 314 GeV zur Verfügung. Damit können Substrukturen von Quarks und Leptonen gesucht und möglicherweise neue Teilchen beobachtet werden.

1.1 Der H1-Detektor

Das I. Institut für Experimentalphysik ist am H1-Projekt mit dem Bau des **Backward Elektromagnetic Calorimeter (BEMC)** beteiligt. Im Rahmen dieser Beteiligung entstanden die Untersuchungen dieser Arbeit.

In Abb. 1.2 ist ein Schnittbild des H1-Detektors dargestellt. Weil sich der Schwerpunkt im Laborsystem in Richtung des auslaufenden Protonenstrahls bewegt, ist der H1-Detektor ebenso wie der ZEUS-Detektor asymmetrisch um den Wechselwirkungspunkt (Vertex) aufgebaut.

Ziel der Detektoren ist es, möglichst alle Teilchen, die bei der Wechselwirkung erzeugt werden, zu identifizieren, sowie ihre Flugbahn und Energie zu bestimmen.

Zur Vertexbestimmung und Teilchenidentifikation befinden sich direkt um den Vertex der Innendetektor und die Spurkammern. Die weiter außen liegenden Kalorimeter dienen der Bestimmung der Teilchenenergien. Der größte Teil des Raumwinkels wird vom Flüssig-Argon-Kalorimeter abgedeckt, dessen elektromagnetischer Teil mit Blei und dessen hadronischer Teil mit Stahl als Absorbermaterial ausgerüstet ist. Das Flüssig-Argon-Kalorimeter befindet sich in einem Kryostaten und wird bei ca. 80 K betrieben.

In Protonen-Austrittsrichtung (0° -Vorwärtsrichtung nach HERA-Konvention) ergänzt das hadronische Plug-Kalorimeter, das mit Kupfer als Absorber und Silizium als aktivem Material arbeitet, das Flüssig-Argon-Kalorimeter.

Im Winkelbereich von 150.6° bis 175.6° befindet sich das BEMC.

Außerhalb des Flüssig-Argon-Kalorimeters befindet sich eine supraleitende Magnetspule, die im Innenbereich des H1-Detektors – einschließlich des BEMC – ein axiales, homogenes Magnetfeld von 1.2 T erzeugt.

Im Außenbereich des H1-Detektors befinden sich Myonenkammern und das Eisenjoch, das dem Magnetfeldrückfluß dient und zusätzlich mit Streamer-Röhren durchsetzt ist.

Der gesamte H1-Detektor wird schließlich mit Beton abgeschirmt.

1.2 Das BEMC

Das BEMC ist ein aus 88 Modulen aufgebautes Samplingkalorimeter, das aus 56 quadratischen und 32 trapez- bzw. dreieckförmigen Modulen besteht.

Die Module sind abwechselnd je 50 Bleischichten als Absorbermaterial und SCSN 38-Szintillatorschichten als aktivem Material aufgebaut, was einer Gesamtstrahlungslänge von ca. $22.6 X_0$ entspricht.

Das Szintillationslicht wird über seitlich angeordnete Y 7-Wellenlängenschieber mit Photodioden ausgelesen. Es gibt zwei verschiedene Arten von Wellenlängenschiebern: Die einen gehen über die gesamte Länge des Moduls, während die anderen nur die hinteren 15 Samplingschichten abdecken. Mit dem Verhältnis der ausgelesenen Signale von langen und kurzen Wellenlängenschiebern soll eine Elektron-Pion-Separation ermöglicht werden [Lip 91].

Bei den quadratischen Modulen gibt es insgesamt 4 lange und 2 kurze Wellenlängenschieber.

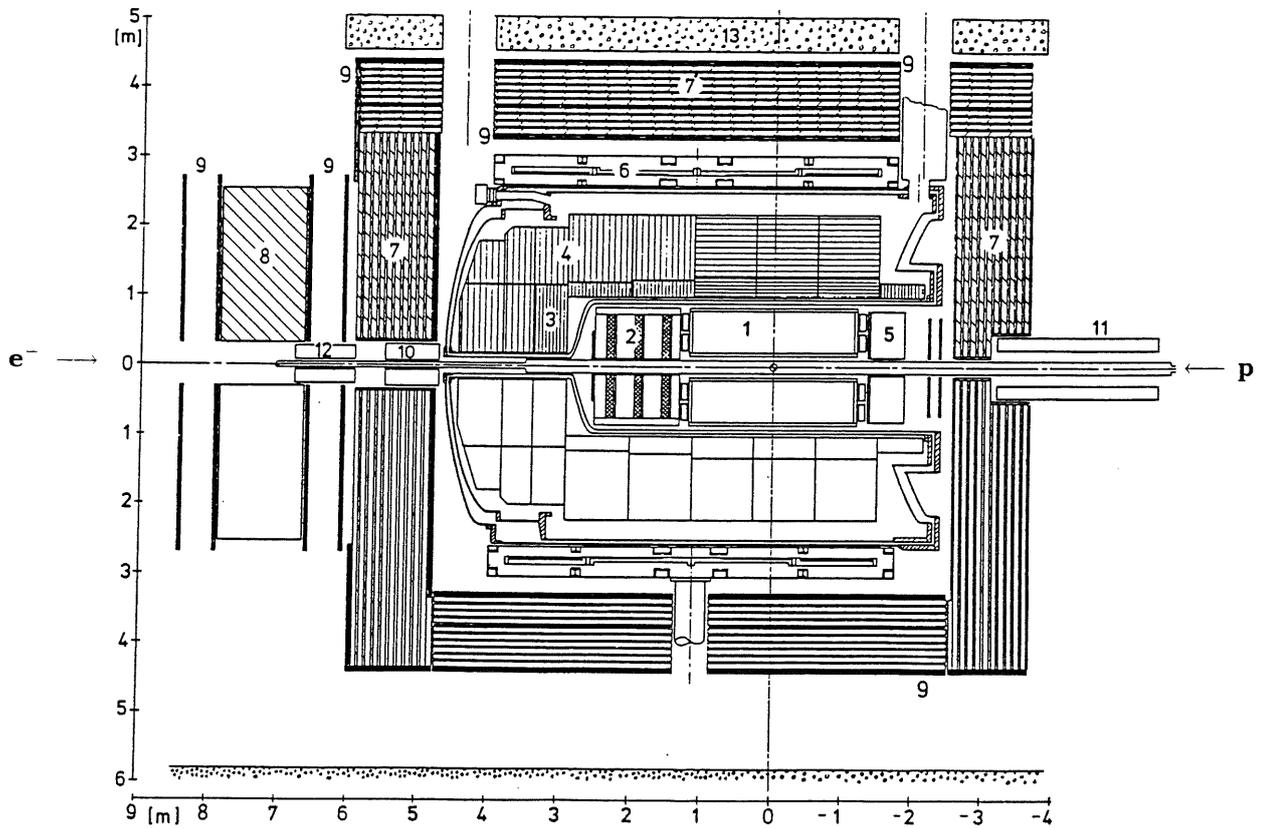


Abb. 1.2: Schnittbild des H1-Detektors

- 1) Innendetektor
- 2) Spurkammern
- 3) Elektromagnetisches Flüssig-Argon-Kalorimeter
- 4) Hadronisches Flüssig-Argon-Kalorimeter
- 5) **Elektromagnetisches Rückwärts-Kalorimeter (BEMC)**
- 6) Magnetspule
- 7) Eisenjoch mit Streamer-Röhren
- 8) Myon-Toroid-Magnet
- 9) Myonkammern
- 10) Plug-Kalorimeter
- 11) Ausgleichsspule
- 12) HERA-Quadrupol
- 13) Beton

Jeweils 2 lange Wellenlängenschieber liegen nebeneinander – die Paare liegen dann auf gegenüberliegenden Modulseiten (siehe Abb. A.1 in Anhang A).

Auf das hintere Ende der Wellenlängenschieber sind pin-Photodioden aufgeklebt – bei den langen Wellenlängenschiebern jeweils eine und bei den kurzen Wellenlängenschiebern, die die doppelte Breite haben, jeweils zwei Photodioden, deren Signale dann durch einen Vorverstärker weiterverarbeitet werden.

Am vom Vertex aus gesehen hinteren Ende der Module befindet sich ein Elektronikkasten, der das Motherboard mit den Vorverstärkern und Line-Drivern enthält, sowie die Anschlüsse für Testpulsler und Versorgungsspannungen (Bias etc.).

Die Samplingstruktur der Module ist in einen Stahlkasten mit 0.2 mm Wandstärke eingebaut, der an der Vorder- und Rückseite an eine Aluminium-Platte angeschraubt ist.

Die Einzelmodule sind dann entsprechend Abb. 1.3 in eine zylindrische Tonne eingehängt. Der Aufbau der Module ist am Beispiel eines quadratischen Moduls in Abb. A.1 in Anhang A skizziert. Tab. A.1 – ebenfalls in Anhang A – zeigt die verschiedenen Modulformen mit Maßangaben.

Die wesentlichen Aufgaben des BEMC sind:

- Bestimmung der Energie E von Elektronen, die in den Detektor gestreut werden, mit einer guten Energieauflösung von $\leq \frac{15\%}{\sqrt{E}}$
- Homogenität von $\leq 1\%$ der gemessenen Energien über den gesamten Detektor nach Kalibration [Fel 85, Fel 87]
- Ortsbestimmung der registrierten Elektronen
- Separation zwischen Elektronen und Pionen

Der Einsatz eines Laser-Monitorsystems soll dazu beitragen, daß die Anforderungen, die an die Kalibration des BEMC gestellt werden, erfüllt werden können. Als zentrale Lichtquelle dient ein gepulster N_2 -Laser, dessen UV-Licht mit Hilfe von Quarzglasfasern zu den einzelnen Modulen des BEMC geleitet wird. Die Fasern sind an die vom Vertex gesehen letzte Szintillatorplatte jedes Moduls fest, aber abkoppelbar angebracht.

1.3 Aufgabenstellung

Der Konstruktion des Monitorsystems liegen Ergebnisse von Voruntersuchungen zugrunde [Sca 89], bei [Fle 90] wurde der Aufbau des Systems im Labor realisiert und getestet. Die Installation des Monitorsystems ist Thema einer weiteren Diplomarbeit [Sch 91].

Ziel dieser Arbeit ist die Ermöglichung der Kalibration des Monitorsystems mit Hilfe eines Referenzsystems, das mit γ -Präparaten arbeitet.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

- In **Kapitel 2** werden die zum Verständnis der Arbeit wichtigen Grundlagen über Kalibration, Monitorsysteme und über die verwendeten Detektoren dargestellt.
- In **Kapitel 3** wird auf das am BEMC geplante Laserkalibrationssystem und seine einzelnen Elemente eingegangen.
- **Kapitel 4** beschreibt die Untersuchungen zum Aufbau des Referenzsystems und es werden die Messungen zur Überprüfung der Stabilität eines solchen Systems beschrieben und die Ergebnisse dargestellt.
- **Kapitel 5** enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit.

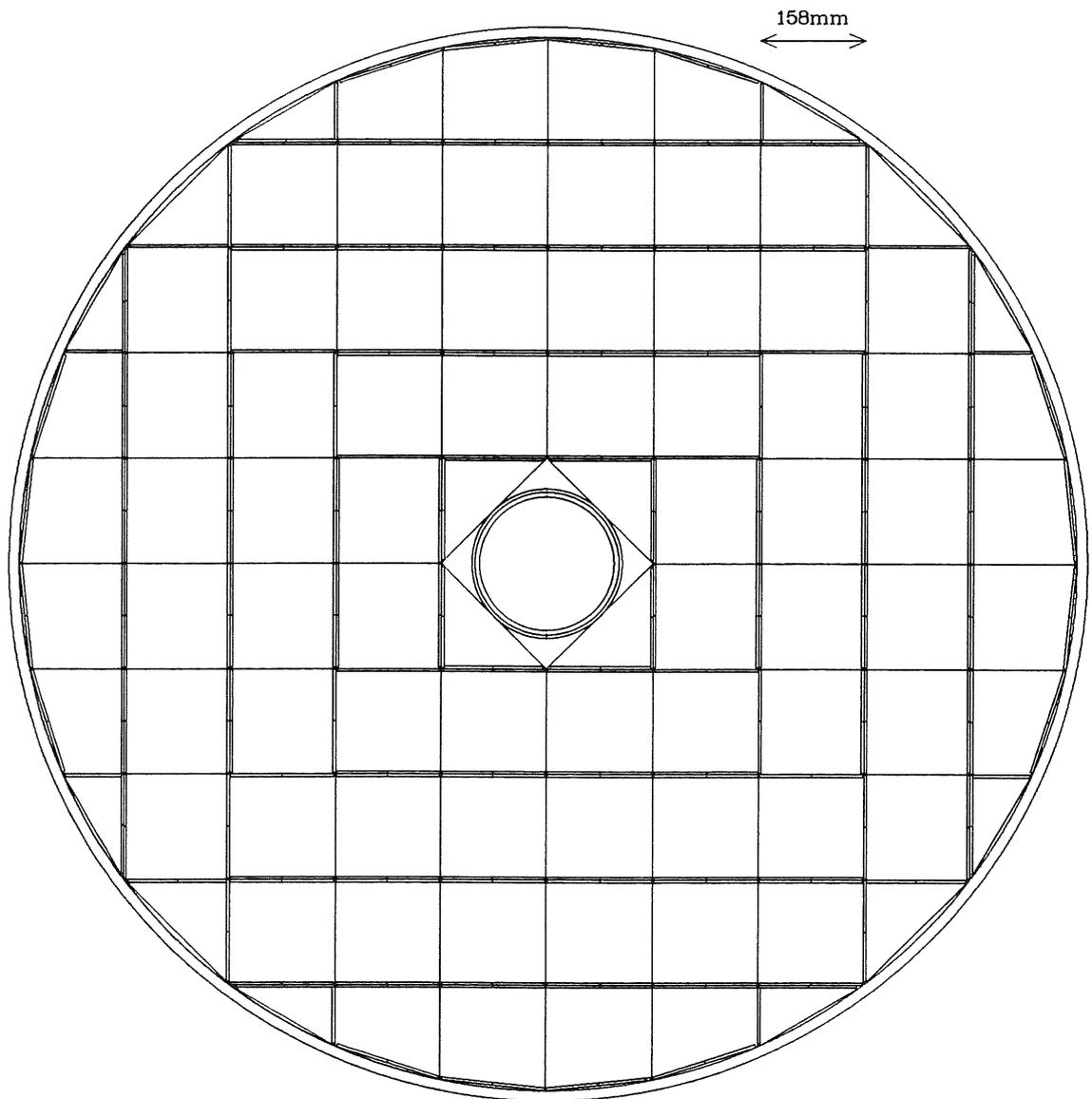


Abb. 1.3: Aufbau des BEMC aus der Elektronen-Richtung gesehen

Die inneren und äußeren Trägerringe und das Strahlrohr sind angedeutet. Der Außendurchmesser der zylindrischen Tonne beträgt 162 cm und die Aussparung für das Strahlrohr im Innern hat einen Durchmesser von 21 cm. Die Tiefe des BEMC beträgt ca. 45 cm.

Es gibt insgesamt 88 Module, die sich in 56 Module von quadratischer und je 16 Module von trapezförmiger (4 große und 4 kleine Trapeze) bzw. dreieckiger Form (ebenfalls 4 große und 4 kleine Dreiecke) aufteilen (für die Maße der Module siehe auch Tab. A.1 in Anhang A).

Die Position der langen Wellenlängenschieber in den Modulen ist eingezeichnet.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Kalibration des BEMC

Um die Zuordnung der in einem Kalorimeter registrierten Signale zur tatsächlich vom Primärteilchen deponierten Energie zu gewährleisten, muß jeder Signalweg mit Strahlung bekannter Energien kalibriert werden.

Am DESY-Teststrahl stehen dafür Elektronen im Energiebereich bis 6 GeV zur Verfügung. Hier wurden alle Module des BEMC mit Elektronen von 5 GeV kalibriert, wobei zusätzlich bei einigen Modulen Energiescans von 1 GeV bis 6 GeV durchgeführt wurden [Pep 90]. Mit den aus diesen Messungen erhaltenen Kalibrationskonstanten CAL_{ij} für die j -te Photodiode des i -ten Moduls kann man dann aus der Kalorimeterantwort p_{ij} auf ein Physikereignis die tatsächlich in diesem Modul deponierte Energie gemäß

$$E_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot CAL_{ij}$$

berechnen.

Durch das Auftreten verschiedener Faktoren muß mit dem Verlust dieser Kalibrationsinformation gerechnet werden:

- Nach [Esc 91] kann durch **unterschiedliche Druckverhältnisse** in den Modulen die Lichtausbeute der Szintillatoren beeinflusst werden.
- Untersuchungen zum Verhalten der BEMC-Module im **Magnetfeld** haben ergeben, daß das axiale Magnetfeld von 1.2 T, das den Detektor im Meßbetrieb umgeben wird, die Lichtausbeute beeinflussen kann [Har 90].
- Weil bei HERA in der Nähe des Strahlrohres durch Wechselwirkungen des Protonenstrahls mit Restgasatomen und der Strahlrohrwand sowie durch die Synchrotronstrahlung des Elektronenstrahls eine jährliche **Strahlenbelastung** von 300 Gy zu erwarten ist, muß mit Strahlenschäden der Szintillatoren und Wellenlängenschieber gerechnet werden [Zeu 87]. Besonders für die durch den Protonenstrahl erzeugten Untergrundteilchen (Protonen-Halo) ist im Innenbereich des BEMC mit Energien bis zu einigen GeV und Zählraten bis 100 kHz zu rechnen [Mei 90]. Untersuchungen bei [Hom 89] haben gezeigt, wie sich die Abschwächlänge λ^1 der in den Modulen verwendeten Materialien SCSN 38 und dem Wellenlängenschiebermaterial Y7, nach Bestrahlung mit einer Strahlendosis von 10^4 Gy unter Stickstoffatmosphäre verändert.

¹Die Abschwächlänge ist gemäß $I(x) = I_0 \exp(-x/\lambda)$ definiert und ein Maß für die Abschwächung der Lichtintensität I_0 entlang des Lichtweges x .

Weil auch im H1-Detektor eine Stickstoffatmosphäre vorhanden sein wird, können diese Messungen zur Abschätzung des erwarteten Strahlenschadens herangezogen werden. Eine Ausheilung des entstandenen Strahlenschadens ist nur bei dem Szintillatormaterial gemessen worden. Der Wellenlängenschieber zeigte einen permanenten Schaden.

- Schließlich muß auch mit **Signaländerungen der Ausselektronik** gerechnet werden, was durch den Einsatz von elektronischen Pulsern überwacht werden kann.

Durch den möglichen Verlust der Kalibrationsinformation wird die Nacheichung der einzelnen Module notwendig. Weil insbesondere die Lichtausbeute überwacht werden muß, kommen dafür nur Methoden in Frage, bei denen die Szintillation des aktiven Materials und die Weiterleitung des Szintillationslichts überwacht werden können.

Die für die Nachkalibration des BEMC möglichen Methoden sollen im folgenden kurz erläutert werden.

Durch die winkelabhängige Maximalenergie von quasielastisch gestreuten Elektronen, die im BEMC registriert werden, erhält man am hochenergetischen Ende des Elektronenspektrums einen Peak, der zu größeren Streuwinkeln, also zum Außenrand des Kalorimeters, mit immer kleinerer Zählrate auftritt. Diese Elektronenspektren liefern eine Kalibrationsinformation. Nach [Bau 89] wird es aber bei einer maximalen Luminosität des HERA-Ringes² mehrere Wochen dauern, bis die äußeren Module mit dieser Methode kalibriert werden können (siehe dazu auch [Sca 89]).

Minimalionisierende Teilchen deponieren in einem Kalorimeter Energie, die proportional zur Wegstrecke durch den Detektor ist. Die Energiesignale von Myonen, die parallel zur Strahlachse das BEMC durchqueren und kosmischer Myonen, die die Kalorimetermodule parallel zu den Sampling-Schichten passieren, können ebenfalls zur Nachkalibration herangezogen werden. Weil die Myonensignale der Einzeldioden im Bereich von 40 MeV liegen und damit nur ca. 1-2 Rausch- σ über dem Rauschen, ist für die genaue Bestimmung dieser Kalibrationssignale eine große Anzahl von Ereignissen erforderlich. Die Summensignale über ein Modul liegen ca. 4-5 Rausch- σ über dem Rauschen [Kas 90, Rat 91], allerdings gehen für die Bestimmung der Summensignale schon die Kalibrationskonstanten der Module ein [Pep 90].

Darüber hinaus erfolgt diese Kalibration am unteren Ende der Energieskala, so daß geringe Fehler für die Berechnung der Energie eines hochenergetischen Signals einen großen Fehler bewirken können.

2.2 Allgemeines über Monitorsysteme

Zur Überbrückung der großen zeitlichen Abstände, die zwischen den mit den oben aufgeführten Kalibrationsmethoden erhaltenen Nacheichungen entstehen, dient der Einsatz eines Monitorsystems. Eine Beschreibung des Monitorsystems für das BEMC ist in Kapitel 3 zu finden.

In diesem Abschnitt sollen einige grundlegende Eigenschaften eines Monitorsystems diskutiert werden:

- Das Durchführen eines Monitorlaufs sollte verglichen mit den anderen Kalibrationsmethoden in relativ kurzer Zeit (ca. 10-60 Minuten) möglich sein. Dafür muß das Monitorsignal mit einer hinreichend hohen Frequenz arbeiten.

²Der HERA-Ring ist für eine Design-Luminosität von $L = 2 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ausgelegt.

- Im Hinblick auf die Überwachung möglichst aller Detektorkomponenten sollte ein Monitorsignal die Hauptfunktionen des Detektors ansprechen. Für das BEMC-Monitorsystem bedeutet das den Einsatz eines Monitorsignals, das die Szintillation im aktiven Material der Detektormodule anspricht und damit die Überwachung von Szintillatoren, Wellenlängenschiebern und Photodioden gewährleistet.
- Die Monitorsignale sollten den Physiksignalen in Pulsform und Pulshöhe ähnlich sein, damit die Elektronik für die weitere Datenverarbeitung der Monitorsignale nicht modifiziert werden muß.
- Zeitliche Veränderungen des Monitorsystems sollten deutlich langsamer erfolgen als die zeitlichen Veränderungen des Detektors, damit diese detektiert werden können.

Diese Kriterien führten bei der Wahl der Signalquelle für das BEMC-Monitorsystem zu der Entscheidung, einen gepulsten N_2 -Laser einzusetzen, dessen UV-Licht die Szintillation des aktiven Materials anregt. Die Lichtintensität des N_2 -Lasers ist höher als die von einer Blitzlampe und zudem ist die Pulsdauer der vom Laser erzeugten Pulse kürzer als die Abklingzeit des Szintillators. Weil es sich bei dem N_2 -Laser um eine zentrale Lichtquelle handelt, ist der Einsatz eines Verteilungssystems notwendig, mit dem das Laserlicht zu den einzelnen Modulen des BEMC geführt wird. Die gesamten optischen Komponenten (Lichtfasern, Linsen, Filter etc.) des Verteilungssystems müssen aus Quarzglas sein, damit das UV-Licht des N_2 -Lasers transportiert werden kann.

Um Schwankungen der Laserintensität selbst detektieren zu können, ist darüber hinaus die Kalibration des Monitorsystems mit Hilfe eines Referenzsystems notwendig.

2.3 Wechselwirkungsprozesse von γ -Quanten mit Materie

Weil das Referenzsystem für das BEMC mit γ -Präparaten kalibriert werden soll, werden im folgenden die Wechselwirkungsprozesse von γ -Strahlung mit Materie erläutert.

Eine Beschreibung von Detektierungsmethoden dieser γ -Strahlung soll in den Kapiteln 2.4 und 2.5 folgen.

Die Energieabsorption von γ -Strahlung der Energie E_γ in Materie kann man mit Hilfe der folgenden Gleichung beschreiben (siehe z.B. [Mus 88, Kle 87]):

$$E_\gamma(x) = E_\gamma \exp(-\mu x)$$

x ist hier die Eindringtiefe der γ -Strahlung im Material und μ der materialspezifische Absorptionskoeffizient. Dieser Absorptionskoeffizient setzt sich aus den Absorptionskoeffizienten der drei Wechselwirkungsprozesse zusammen, mit denen γ -Strahlung ihre Energie in Materie abgibt:

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p = N_V(\sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_p)$$

μ_{ph} , μ_c und μ_p sind die Absorptionskoeffizienten für den Photoeffekt, den Comptoneffekt bzw. die Paarbildung und σ_{ph} , σ_c sowie σ_p die entsprechenden Wirkungsquerschnitte dieser Wechselwirkungen. N_V ist die Atomdichte des Absorbermaterials³.

Beim **Photoeffekt** wird ein Elektron aus dem Absorberatom unter Absorption eines γ -Quants der Energie E_γ emittiert, wobei die Energie des emittierten Elektrons

$$E = E_\gamma - E_B^{(i)}$$

³ $N_V = \frac{N_A \rho}{A}$ mit der Avogadrozahl N_A , der Absorberdichte ρ und der Molmasse A des Absorbers.

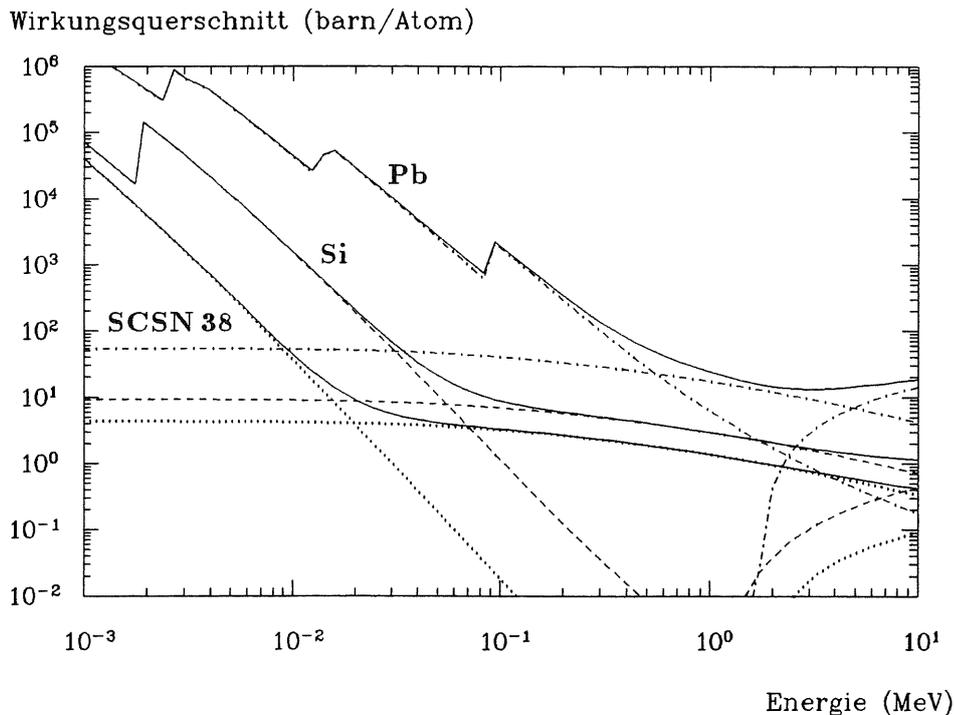


Abb. 2.1: Wirkungsquerschnitte für γ -Wechselwirkungen mit Blei, Silizium und SCSN 38-Plastikszintillator

Dargestellt sind die Einzelwirkungsquerschnitte für Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung (SCSN 38 gepunktete, Si gestrichelte und Pb strichpunktete Linien) sowie der Gesamtwirkungsquerschnitt (durchgezogene Linien).

(nach [Bau 89])

beträgt. $E_B^{(i)}$ ist die Bindungsenergie des Absorberelektrons der i -ten Schale. Bei $E_\gamma = E_B^{(i)}$ zeigt der Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt ausgeprägte Kanten. Dies ist auch in den Wirkungsquerschnittskurven für den Photoeffekt in Blei bzw. Silizium in Abb. 2.1 dargestellt.

Für den Wirkungsquerschnitt σ_{ph} in den Energiebereichen von $E_\gamma \ll m_e c^2$ bzw. $E_\gamma \gg m_e c^2$ gilt⁴:

$$\sigma_{ph} \approx \frac{Z^5}{E_\gamma^{7/2}} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{ph} \approx \frac{Z^5}{E_\gamma}$$

Der Photoeffekt ist wegen der oben aufgeführten Abhängigkeiten des Wirkungsquerschnitts nur für kleine γ -Energien und für Absorber mit hoher Ordnungszahl Z der dominierende Prozeß (siehe Abb. 2.1 und 2.2).

Die Streuung eines γ -Quants an einem quasifreien Absorberelektron mit Energie- und Impulsübertrag wird als **Comptoneffekt** bezeichnet.

Für die Energie $E_{\gamma'}$ des gestreuten γ -Quants gilt

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta_{\gamma'})}$$

⁴ $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$ ist die Ruhemasse des Elektrons.

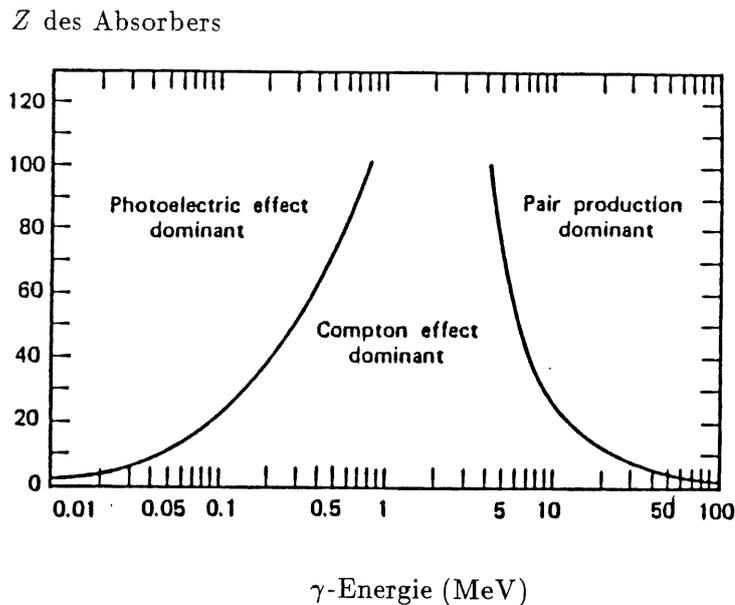


Abb. 2.2: Dominierende Prozesse der Wechselwirkungen von γ -Strahlung mit Absorbern verschiedener Ordnungszahl Z
 Für die eingezeichneten Linien gilt $\sigma_{ph} = \sigma_c$ bzw. $\sigma_c = \sigma_p$.
 (aus [Kno 79])

und für die Energie E des Elektrons

$$E = E_\gamma - E_{\gamma'} = E_\gamma \frac{\frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta_{\gamma'})}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta_{\gamma'})},$$

wobei $\vartheta_{\gamma'}$ der Winkel ist, um den das γ -Quant bei der Wechselwirkung mit dem Elektron von seiner Einlaufbahn abgelenkt wird (siehe z.B. [Mus 88, Kle 87]).

Bei Rückwärtsstreuung des γ -Quants, d.h. für $\vartheta_{\gamma'} = 180^\circ$, wird der Energieübertrag auf das Elektron maximal. Die Energie des gestreuten Elektrons bei $\vartheta_{\gamma'} = 180^\circ$ kennzeichnet die Comptonkante.

Für $E_{\gamma'}$ und E gilt bei $\vartheta_{\gamma'} = 180^\circ$

$$E_{\gamma'}^{180^\circ} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{2E_\gamma}{m_e c^2}} \quad \text{und} \quad E^{180^\circ} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma}}.$$

Wird die Energie $E_{\gamma'}^{180^\circ}$ auf ein Elektron übertragen – dies würde einem Photoeffekt mit $E_{\gamma'}^{180^\circ}$ entsprechen – so kennzeichnet diese Elektronenenergie den Rückstreupeak⁵.

Der atomare Wirkungsquerschnitt für Comptonstreuung ist proportional zu Z des Absorbermaterials; der Wirkungsquerschnitt pro Elektron wird durch die Klein-Nishina-Formel approximiert.

Durch Absorption des γ -Quants im Coulombfeld eines Absorberatomkerns kann bei En-

⁵In Tab. 3.2 sind für die in den Untersuchungen dieser Arbeit benutzten γ -Präparate die Photopeaks, Comptonkanten und Rückstreupeaks aufgelistet. Abb. 4.3 zeigt ein charakteristisches CsI(Tl)-Photomultiplierspektrum von einem ^{22}Na -Präparat.

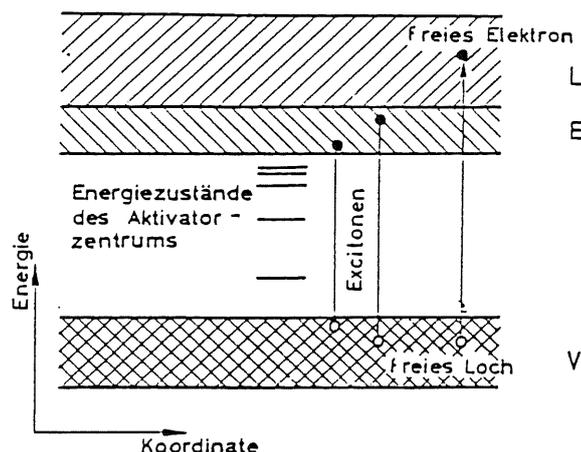


Abb. 2.3: Bändermodell für anorganische Halbleiter
(aus [Lan 66])

ergien $E_\gamma > 2m_e c^2$ ein Elektron-Positron-Paar gebildet werden. Diesen Prozeß bezeichnet man als **Paarbildung**. Für hochenergetische γ -Quanten im MeV-Bereich ist dieser Wechselwirkungsprozess dominant. Der Wirkungsquerschnitt für den Paarbildungseffekt ist proportional zu Z^2 des Absorbermaterials.

In Abb. 2.1 ist die Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte für drei Absorber mit verschiedenem Z (SCSN 38 $Z=6$, Si $Z=14$ und Pb $Z=82$) gegenübergestellt. An der Abbildung wird deutlich, bei welchen Energien in Abhängigkeit vom Absorber welche der genannten Prozesse dominieren.

2.4 Szintillatoren

In diesem Kapitel sollen die wesentlichen Mechanismen, die in Szintillatoren zur Entstehung von Lichtsignalen führen, beschrieben werden.

Die Vielzahl von Szintillatoren kann man in zwei Gruppen unterteilen: Bei den **anorganischen Szintillatoren** ist im wesentlichen das Gitter am Szintillationsmechanismus beteiligt. Dagegen führen bei den **organischen Szintillatoren** (Flüssigkeiten, Plastik) Energieübertragungs-Vorgänge in den einzelnen Molekülen zur Emission von Szintillationslicht.

Sowohl bei anorganischen als auch bei organischen Szintillatoren ist das erzeugte Szintillationslicht proportional zur Energie der einfallenden Strahlung.

2.4.1 Anorganische Szintillatoren

Zum Nachweis energiereicher Teilchen- und γ -Strahlung sind Alkalijodid-Kristalle wegen ihrer hohen Ordnungszahl und dem daraus resultierenden hohen Absorptionsvermögen gut geeignet (siehe Kapitel 2.3).

Das Verhalten solcher Kristalle läßt sich näherungsweise durch das in Abb 2.3 skizzierte

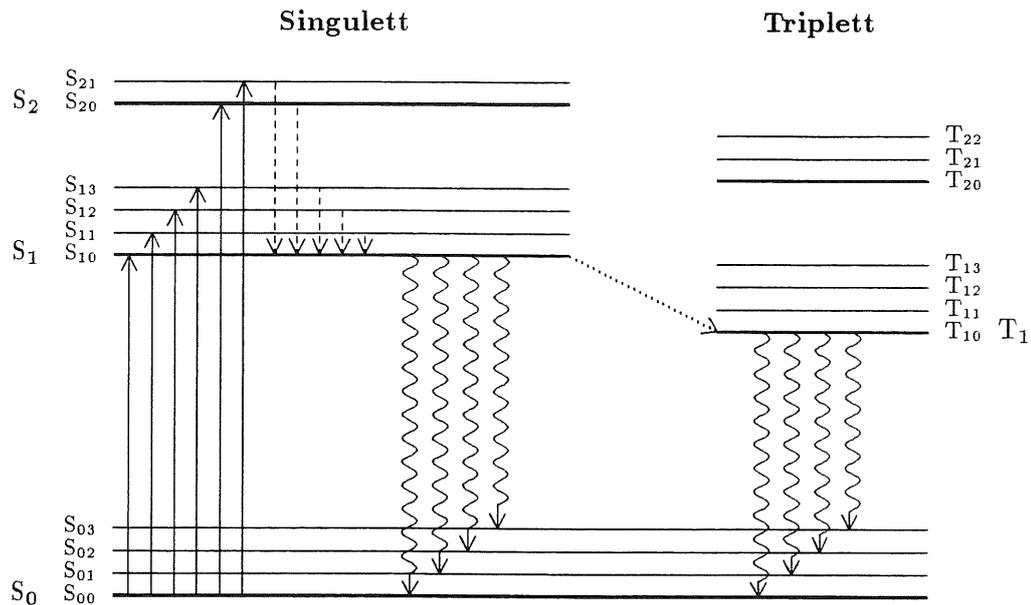


Abb. 2.4: Energieschema eines organischen Szintillators

Anregungsübergänge = durchgezogene Pfeile

Strahlungslose Übergänge = gestrichelte Pfeile

Fluoreszenz- bzw. Phosphoreszenz-Übergänge = Wellenlinien

(nach [Kno 79])

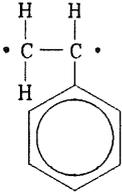
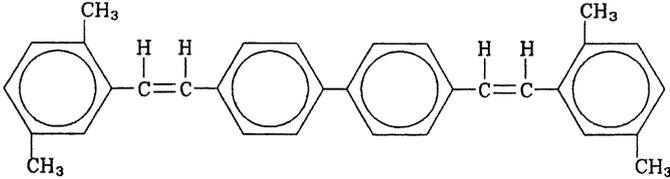
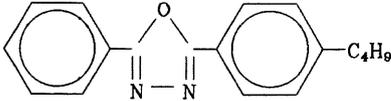
Bändermodell beschreiben. Bei den Alkalijodid-Kristallen (CsI, NaI) beträgt der Abstand zwischen dem besetzten Valenzband und dem Leitungsband etwa 7 eV. Dem Kristall durch ionisierende Strahlung zugeführte Energie erzeugt längs der Bahn des ionisierenden Teilchens Elektronen-Loch-Paare, indem Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden, sowie Excitonen, bei denen das angeregte Elektron an das Loch gekoppelt bleibt. Wegen der geltenden Auswahlregeln bei den Impulszuständen der Elektronen ist eine Rekombination der freien Elektronen und Löcher unter Emission von Strahlung nicht möglich.

Durch Gitterfehlstellen oder zugesetzte Aktivatoratome (bei Alkalijodiden meist Thallium) werden innerhalb der verbotenen Zone Elektronenniveaus erzeugt, so daß die durch den Kristall diffundierenden freien Elektronen, Löcher und Excitonen ihre Energie an das Aktivatorzentrum abgeben können. Das angeregte Aktivatorzentrum kann nun unter Emission von Licht oder durch Abgabe seiner Anregungsenergie an das Gitter in den Grundzustand übergehen [Lan 66].

2.4.2 Organische Szintillatoren

Bei den organischen Szintillatoren handelt es sich um aromatische Kohlenwasserstoffe, die Benzolringe enthalten. Wegen der geringen Ordnungszahl der im organischen Szintillator befindlichen Elemente sind sie zum Nachweis von γ -Strahlung wenig geeignet. Sie finden aber Anwendung in der Spektrometrie von β -Strahlung und Neutronen.

Abb. 2.4 stellt das Energieschema eines organischen Szintillators dar. Die Energieabgabe eines den Szintillator durchquerenden Teilchens führt zur Anregung der Moleküle in höhere Singulettzustände oder deren äquidistant überlagerten Schwingungsniveaus. Die Übergänge auf das S₁₀-Niveau sind strahlungslos. Von diesem Niveau kann die Energieab-

Strukturformel
 <p>Polystyrol-Monomer</p>
 <p>b-PBD</p>
 <p>BDB</p>

Tab. 2.1: **Strukturformeln der Szintillatorstoffe**

SCSN 38 besteht aus 99% Polystyrol, 1% b-PBD und 0.02% BDB.

b-PBD : 2-(4-t-butylphenyl)-5-phenyl-oxadiazol

BDB : 4,4'-bi(2,5-dimethyl-styryl)-biphenyl

(nach [Röm 73])

gabe der Moleküle durch direkten Übergang in ein Schwingungsniveau des Grundzustandes erfolgen – dies ist der Vorgang der prompten Fluoreszenz – oder indirekt durch vorherigen strahlungslosen Übergang auf das energetisch tieferliegende Triplettniveau T_{10} . Dieses Phosphoreszenzlicht hat eine größere Wellenlänge als das Fluoreszenzlicht.

Der in den Kalorimetermodulen des BEMC als aktives Material verwendete Plastiksintillator SCSN 38 besteht aus einer Polystyrolmatrix mit einer geringen Beimischung von b-PBD und BDB. Die Strukturformeln sind in Tab. 2.1 gezeigt.

Die Energieabgabe geladener Teilchen (z.B. Schauerelektronen), die den Szintillator durchqueren, führt zur Anregung der Polystyrolmoleküle, die ihre Energie durch Fluoreszenz wieder abgeben. Ein Teil der Anregungsenergie wird auf die Beimischungsmoleküle übertragen, wobei hier eine Übertragung der Energie vom b-PBD auf das BDB erfolgt. Für das isotrop emittierte Fluoreszenzlicht des BDB's ist die Polystyrolmatrix transparent, so daß dieses Licht den Szintillator ungehindert durchqueren kann [Kam 83]. Die beige-

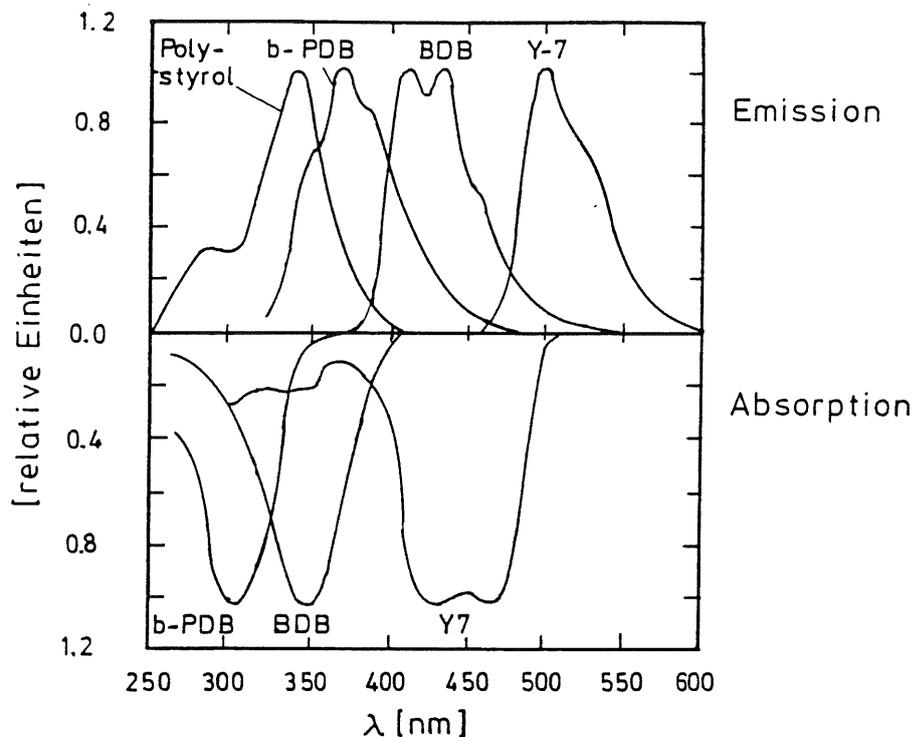


Abb. 2.5: **Absorptions- und Emissionsspektren von SCSN 38 und Y 7**

Es sind die Absorptions- und Emissionsspektren von Polystyrol und den Farbstoffen b-PDB, BDB sowie Y 7 dargestellt.

(nach [Kam 83, Mar 90])

mischten Farbstoffe und auch der Farbstoff des Wellenlängenschiebers (Y 7) sind dabei so gewählt, daß ihre Absorptions- und Emissionsbereiche aufeinander abgestimmt sind, um eine möglichst optimale Lichtübertragung zu ermöglichen (siehe Abb. 2.5).

Auf den Szintillator treffendes UV-Licht regt ebenfalls die b-PBD- Moleküle zur Fluoreszenz an.

2.5 Photomultiplier und Photodioden

Für die Umwandlung von optischen Szintillationssignalen in elektrische Signale werden im wesentlichen Photomultiplier und Photodioden verwendet.

Beide Methoden fanden bei den Untersuchungen dieser Arbeit Anwendung und sollen deshalb im folgenden kurz beschrieben werden.

2.5.1 Aufbau und Funktion von Photomultipliern

Ein entscheidender Vorteil, der die Anwendung von Photomultipliern gegenüber der von Photodioden bietet, liegt in der großen Eigenverstärkung (typischerweise 10^6) der Photomultiplier. Mit einem Photomultiplier werden aus kleinsten Lichtmengen elektrische Pulse generiert, die in ihrer Größe etwa mit Pulsen von Halbleiterphotodioden vergleichbar sind, die durch Vorverstärker weiterverstärkt wurden.

Die wichtigsten Elemente von Photomultipliern sind die semitransparente Photokathode,

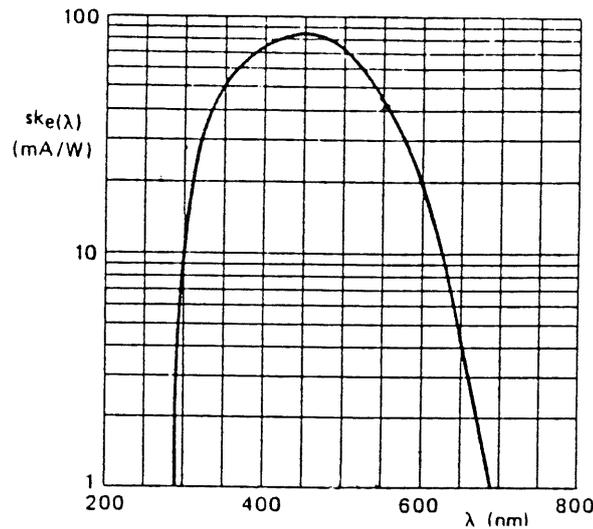


Abb. 2.6: Spektrale Empfindlichkeit der Photokathode des Valvo-Photomultipliers XP 2011 B
(nach [Val 85])

an der ein Szintillationslichtpuls in einen elektrischen Puls umgewandelt wird, und das nachfolgende Dynodensystem, das den elektrischen Puls um einige Größenordnungen verstärkt.

In der Photokathode überführt das einfallende Photon durch Abgabe seiner Energie ein gebundenes Elektron in einen freien Zustand. Durch Stöße innerhalb des Kathodenmaterials verliert das freie Elektron einen Teil seiner Primärenergie (Photonenenergie-Bindungsenergie) und tritt aus der Oberfläche aus, wenn seine Energie hier noch hinreichend groß ist, um die Potentialbarriere des Kathodenmaterials zu überwinden.

Für die Wahl des Kathodenmaterials kommen deshalb nur Verbindungen mit einer niedrigen Austrittsarbeit in Frage, wie z. B. Alkalimetalle und deren Verbindungen (SbRbCs, SbNaKCs), wo Austrittsarbeiten von 1.5 eV bis 2 eV zu erreichen sind.

Als Maß für die Güte der Photokathode dient die Quanteneffektivität QE:

$$QE = \frac{\text{Zahl der emittierten Elektronen}}{\text{Zahl der einfallenden Photonen}}$$

Die Quanteneffektivität hängt mit der spektralen Empfindlichkeit $S(\lambda)$ für ein gegebenes λ gemäß

$$S(\lambda) = QE(\%) \frac{\lambda(\text{nm})}{124}$$

zusammen, wenn $S(\lambda)$ in mA/W gemessen wird.

In Abb. 2.6 ist die spektrale Empfindlichkeit des Valvo-Photomultipliers vom Typ XP 2011 B, der in den Untersuchungen dieser Arbeit am häufigsten verwendet wurde, dargestellt⁶.

⁶Die bei den Messungen dieser Arbeit verwendeten Photomultiplier waren ein 10-stufiger Valvo-Photomultiplier vom Typ XP 2011 B und ein 16-stufiger Hamamatsu-Photomultiplier vom Typ R2490. Wenn im folgenden von Valvo- oder Hamamatsu-Photomultiplier die Rede ist, so sind stets diese Typen gemeint.

Mit Hilfe eines elektronenoptischen Fokussierungssystems werden die von der Photokathode emittierten Elektronen dem eigentlichen Sekundärelektronenvervielfacher – dem Dynodensystem – zugeführt. Das Fokussierungssystem soll gewährleisten, daß die emittierten Photoelektronen die erste Dynode erreichen und zudem die Laufzeitunterschiede der aus der Kathode austretenden Elektronen minimiert werden.

Ein durch die elektrostatischen Felder des Fokussierungssystems beschleunigtes Elektron trifft auf die erste Dynode und gibt hier seine Energie durch Stöße an die Elektronen des Dynodenmaterials ab, die dann als Sekundärelektronen emittiert werden können. Weil auch die Sekundärelektronen für die Emission die Potentialbarriere überwinden müssen, gilt für die bei den Dynoden verwendeten Materialien insbesondere in Bezug auf die Austrittsarbeit das gleiche Kriterium wie für das Kathodenmaterial. Am häufigsten kommen für die Herstellung der Dynoden SbCs, AgMg und Be-Legierungen, wie z.B. CuBe, zur Anwendung.

Die Elektronenemissionsrate δ ist definiert als:

$$\delta = \frac{\text{Anzahl der emittierten Sekundärelektronen}}{\text{Anzahl der einfallenden Elektronen}} = A \cdot U^\alpha$$

U ist die zur Beschleunigung der auf die Dynode einfallenden Sekundärelektronen angelegte Spannung, α ist ein material- und geometrieabhängiger Koeffizient, dessen Wert typischerweise bei 0.7-0.8 liegt und A ist eine Konstante [Kno 79].

Für die Gesamtverstärkung G eines n -stufigen Photomultipliers mit konstanter Spannungsdifferenz U zwischen benachbarten Dynoden gilt dann

$$G = \delta^n = A^n \cdot U^{\alpha n} = A^n \frac{1}{(n+1)^{\alpha n}} U_{ges}^{\alpha n} \quad ,$$

mit der zwischen Anode und Kathode angelegte Spannung $U_{ges} = (n+1)U$.

Hinsichtlich der Form und Anordnung der einzelnen Dynoden muß das Vervielfacher-system so ausgebildet sein, daß die Sekundärelektronen möglichst vollständig von einer zur nächsten Dynode gelangen. Dafür gibt es etliche Methoden, von denen hier nur zwei vorgestellt werden sollen, die auch in den in dieser Arbeit verwendeten Photomultipliern angewandt wurden [Kno 79]:

1. Linear fokussierendes Dynodensystem, z. B. Valvo XP 2011 B:

Weil die Elektronen hier gekrümmte Bahnen durchlaufen, ist eine Anwendung dieses Photomultipliertyps im Magnetfeld nur mit einer geeigneten Abschirmung möglich. Die räumliche Homogenität, d. h. die Unabhängigkeit der Pulshöhe vom Einstrahlort auf der Photokathode, ist gut.

2. Netzdynoden, z. B. Hamamatsu R 2490:

Dieser Photomultipliertyp zeichnet sich durch eine gute räumliche und zeitliche Homogenität aus und ist dadurch, daß die Elektronen hier gerade Bahnen durchlaufen, relativ unabhängig von Magnetfeldern. Untersuchungen hierzu sind bei [Mor 89, Fin 90] nachzulesen.

In Abb. 2.7 sind diese beiden Photomultipliertypen schematisch dargestellt.

Um von Dynode zu Dynode eine Beschleunigungsspannung anzulegen, teilt man die zwischen Kathode und Anode angelegte Spannung mit Hilfe eines Spannungsteilers auf. Damit die wenigen Photoelektronen gut auf die erste Dynode fokussiert werden, ist die Spannung zwischen Kathode und erster Dynode meist höher als zwischen den folgenden Dynoden.

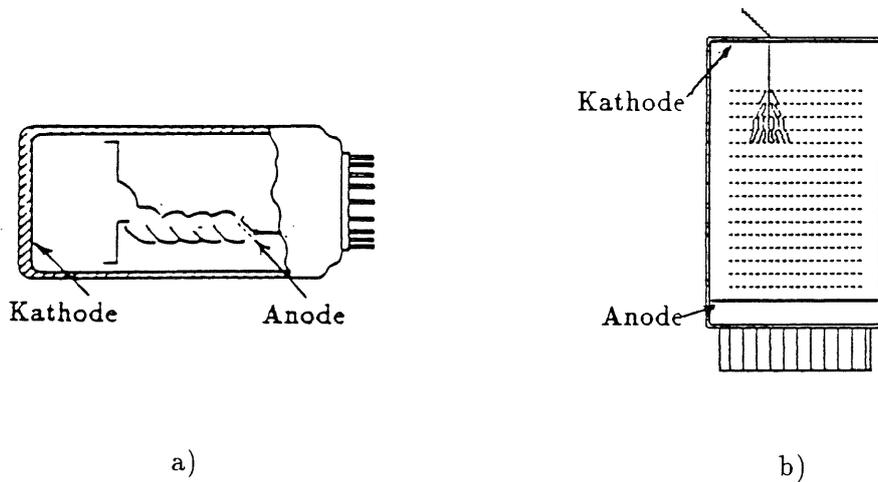


Abb. 2.7: Schematischer Aufbau von Photomultipliern
 a) linear fokussierende Dynoden, b) Netzdynoden
 (nach [Kno 79])

Der Gesamtwiderstand R_{ges} des Spannungsteilers und die angelegte Gesamtspannung U_{ges} bestimmen den Querstrom I_q durch den Spannungsteiler gemäß:

$$I_q = \frac{U_{ges}}{R_{ges}}$$

Der Querstrom sollte groß gegen den internen Strom sein, der durch die Elektronen erzeugt wird, die von Dynode zu Dynode beschleunigt werden, damit sich die Dynodenspannung und damit die Verstärkung des Photomultipliers nicht ändert. Eine Verstärkungsschwankung $\frac{\Delta G}{G}$ kann man nach [Val85] in Abhängigkeit des Kathodenstroms folgendermaßen beschreiben:

$$\frac{\Delta G}{G} \approx \frac{I_k}{I_q} \left(\delta^n - \frac{\delta^{n+1}}{(n+1)(\delta-1)} \right) = \frac{I_A}{I_q} \left(1 - \frac{\delta}{(n+1)(\delta-1)} \right)$$

- I_k = Kathodenstrom
- I_A = Anodenstrom
- I_q = Querstrom
- δ = Elektronenemissionsrate
- n = Anzahl der Dynoden

Aus der obigen Gleichung folgt, daß für eine Verstärkungsstabilität von $\leq 1\%$ der Anodenstrom etwa 100 mal kleiner sein sollte als der Querstrom durch den Spannungsteiler. Das Problem des Abfalls der Spannung zwischen den Dynoden bei zu großem internen Strom ist vor allem bei den letzten Dynoden von Bedeutung. Daher ist der Einsatz von Kondensatoren, die als Ladungsspeicher zwischen die letzten Widerstände der Spannungsteilerkette geschaltet werden, nützlich. Die Ladung dieser Kondensatoren gleicht den Ladungsverlust an den Dynoden während der Pulsdauer aus. Zwischen den Pulsen

werden die Kondensatoren über den Spannungsteiler wieder aufgeladen. Einen Standardspannungsteiler für den Valvo-Photomultiplier zeigt Abb. C.1 in Anhang C.

Die auf die Anode des Photomultipliers auftreffende Ladung Q_0 weist, bedingt durch die statistischen Prozesse im Zähler, auch bei Anregung des Szintillators durch monochromatische Strahlung (γ -Präparat) eine Streuung auf, die die Energieauflösung des Szintillationszählers begrenzt.

Die Streuung σ^2 ist aufgrund der Poissonstatistik proportional zur auf die Photokathode auftreffende Photonenzahl N^7 und damit auch proportional zur Energie E der im Szintillator umgewandelten Strahlung. Aus der Poissonstatistik folgt:

$$\sigma \approx \sqrt{N} \approx \sqrt{E}$$

Damit gilt für die relative Energieauflösung eines Photomultipliers:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{A}{\sqrt{E}}$$

2.5.2 Aufbau und Funktion von pin-Photodioden

In den Kalorimetermodulen des BEMC erfolgt die Umwandlung der von den Wellenlängenschiebern ausgelesenen Lichtsignale mit Hilfe von Photodioden, die gegenüber Photomultipliern den Vorteil haben, daß sie unempfindlich gegen Magnetfelder sind⁸. Zudem sind sie kleiner und einfacher an die Module zu montieren.

Bei den im BEMC verwendeten Photodioden handelt es sich um Silizium-pin-Dioden des Typs S 2575 von Hamamatsu.

Ein pin-Halbleiter ist im wesentlichen ein pn-Halbleiter mit einer vergrößerten intrinsischen Schicht aus eigenleitendem Material zwischen p- und n-Bereich. Das Silizium in der p-Schicht enthält dreiwertige Fremdatome, die als Akzeptoren Elektronen aus dem Valenzband aufnehmen, so daß positiv geladene Löcher entstehen. Diese Löcher bestimmen die Leitfähigkeit des p-leitenden Materials.

Die n-Schicht ist mit fünfwertigen Fremdatomen dotiert, die als Donatoren ein Elektron abgeben können. Die Elektronen bestimmen die Leitfähigkeit des n-leitenden Materials. Durch den Ausgleich der Ladungen durch die beweglichen Elektronen kommt es in der p-Schicht zu einer negativen und in der n-Schicht zu einer positiven Raumladungszone. Zwischen beiden Schichten sind keine Ladungen vorhanden.

Durch das Einbringen einer intrinsischen Schicht wird der aktive Bereich der Photodiode erweitert, so daß bei einem Einfall elektromagnetischer Strahlung in einem größeren Volumen Elektron-Loch-Paare gebildet werden können.

Die in Sperrichtung angelegte Biasspannung erhöht die Potentialdifferenz am pn-Übergang, vergrößert die intrinsische Schicht und verringert damit die Rekombinationswahrscheinlichkeit der Elektron-Loch-Paare. Die vergrößerte intrinsische Schicht der Photodiode führt zu einer Verkleinerung der Diodenkapazität und damit zur Verringerung des Diodenrauschens. Der Dunkelstrom der Photodiode wird aber durch die angelegte Biasspannung vergrößert, d.h. es gibt eine optimale Biasspannung. Für die Photodioden des verwendeten Typs S 2575 von Hamamatsu ist eine angelegte Biasspannung von 24 V optimal (siehe z.B. [Kas 90]).

Der durch die Elektron-Loch-Paare in der Photodiode erzeugte Strom ist dem Photostrom und damit dem Lichteinfall auf die Photodiode proportional.

⁷Dies gilt, wenn die Photonenstatistik über die Photoelektronenstatistik dominiert.

⁸Das BEMC befindet sich in einem Magnetfeld von 1.2 T.

Die Energieauflösung einer Photodiode wird verschlechtert durch einen vom Vorverstärker bedingten Rauschterm. Die durch das Rauschen verursachte relative Streuung der Signale σ^2 ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Energie der einfallenden Strahlung. Der durch die Statistik bedingte Term $\frac{A_1}{\sqrt{E}}$ und der Rauschterm $\frac{A_2}{E}$ addieren sich quadratisch, so daß für die relative Energieauflösung $\frac{\sigma}{E}$ gilt:

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{A_1}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{E}\right)^2}$$

Für die Signalverstärkung des Photodiodensignals werden rauscharme, ladungsempfindliche Vorverstärker verwendet.

2.6 Lichtleiter

Um Licht einer zentralen Lichtquelle zu den Detektoren zu führen, werden Lichtleiter verwendet. Je nach Art des zu transportierenden Lichts kommen dabei verschiedene Arten von Lichtleitern zum Einsatz.

Weil es sich bei dem Monitorsignal für das BEMC um UV-Licht handelt, kommt hier nur der Einsatz von Quarzglasfasern in Frage.

Bei allen für das Monitorsystem und die Laborversuche verwendeten Lichtleitern handelt es sich um Stufenindex-Multimode-Fasern⁹ aus Quarzglas, die aus drei koaxialen Schichten bestehen.

Den Quarzglaskern mit Durchmessern von 200 μm bis 1000 μm umgibt eine Cladding-Schicht, die aufgrund ihres gegenüber dem des Kernmaterials geringeren Brechungsindex dem Lichttransport durch Totalreflektion gewährleistet. Als Schutz gegen mechanische und chemische Einflüsse umgibt die Faser ein Kunststoffmantel.

Weil es sich um Multimode-Fasern handelt, sind die Gesetze der Strahlenoptik anwendbar, so daß für den Grenzwinkel der Totalreflektion θ_c

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

gilt, wobei n_1 der Brechungsindex des Claddings und n_0 der Brechungsindex des Quarzglaskerns ist.

In Abb. 2.8 ist der Strahlengang von Licht durch eine Glasfaser schematisch dargestellt. Der Grenzwinkel θ_c der Totalreflektion bestimmt den Grenzwinkel β für die Einkopplung von Licht in die Faser gemäß

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

wobei n_2 der Brechungsindex des den Lichtleiter umgebenden Mediums ist.

Die Kopplungseffizienz ist durch den Kernradius der Faser und die Numerische Apertur (NA) bestimmt. Für NA gilt bei $n_2 = 1$ (Luft):

$$\text{NA} = \sin \beta$$

⁹Als Multimode-Fasern bezeichnet man Fasern, dessen Kerndurchmesser groß gegen die Wellenlänge des transportierten Lichts ist.

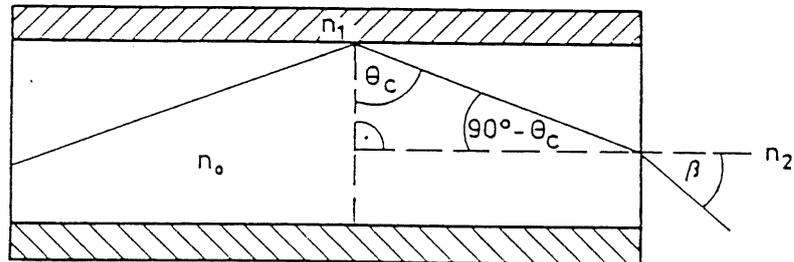


Abb. 2.8: **Reflektion in einem Lichtleiter**
(aus [Fin 89])

Die in einer Faser einkoppelbare Leistung wächst quadratisch mit NA und quadratisch mit dem Kernradius der Faser.

Die Faser-Abschwächlänge λ_F berechnet sich nach

$$I(x) = I_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda_F}\right)$$

wobei I_0 die in die Faser eingekoppelte Intensität ist und x die Länge der Faser [Hen 83].

Kapitel 3

Das Monitorsystem

3.1 Das Monitorsystem für das BEMC

In diesem Kapitel soll das für das BEMC geplante Lasermonitorsystem vorgestellt werden. Weil die Installation des Kalorimeters zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit unmittelbar bevorsteht, werden an dem hier aufgezeigten Konzept auch keine gravierenden Änderungen mehr vorgenommen werden.

3.1.1 Aufgaben des Monitorsystems

Das Monitorsystem soll zeitlich zwischen den Nacheichungen (siehe Kapitel 2.2) vermitteln. Der Quotient aus der Antwort der j -ten Diode des i -ten Kalorimetermoduls auf das Monitorsignal zur Zeit $T=0$ und zur späteren Zeit $T=\tau$ dient als Korrekturfaktor für die Kalibrationskonstante CAL_{ij} zum Zeitpunkt $T=0$. Dann folgt für die in Kapitel 2.1 eingeführte Kalibrationsgleichung

$$E_i = \sum_{j=1}^4 p_{ij}(\tau) \cdot CAL_{ij} \frac{MON_{ij}(0)}{MON_{ij}(\tau)} ,$$

wobei $p_{ij}(\tau)$ die gemessene Lichtausbeute der j -ten Photodiode des i -ten Kalorimetermoduls bei einem Physikereignis und E_i die tatsächlich in diesem Modul deponierte Energie des Teilchens ist.

Weil auch das Monitorsignal, das von einem Stickstofflaser geliefert wird (siehe Kapitel 3.1.2), Schwankungen unterliegt, ist es notwendig, ein Referenzsystem zur Überwachung der Laserintensität einzusetzen. Das Referenzsystem wird dazu mit einem Signal konstanter Energie kalibriert. Dieses Signal können z.B. kosmische Myonen liefern, die in einem Bleiglaszähler Lichtsignale erzeugen, die proportional zu ihrer Energie sind. Ein solches System ist beim ARGUS-Detektor zum Einsatz gekommen [DRE 86]. Der Nachteil dieser Methode ist die geringe Zählrate. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von radioaktiven Quellen. Diese Methode kommt beim Monitorsystem für das BEMC zum Einsatz. Das Referenzsystem für das BEMC soll mit von radioaktiven Quellen emittierten γ -Quanten, die im Detektor ein konstantes Signal erzeugen, kalibriert werden. Mit diesem System können Schwankungen des Monitorsignals erkannt werden. Der Ausdruck $MON_{ij}(\tau)$ wird dann beschrieben durch:

$$MON_{ij}(\tau) = \frac{L_{ij}(\tau)}{L_{ref}(\tau)} \cdot \langle p_{ref\gamma}(\tau) \rangle$$

Die vom Laser erzeugten Pulshöhen in der j -ten Photodiode des i -ten Moduls $L_{ij}(\tau)$ und im Referenzsystem $L_{ref}(\tau)$ zur Zeit τ werden dabei mit der Antwort des Referenzsystems

auf die Kalibrationsquellen $p_{ref\gamma}(\tau)$ korrigiert, so daß langfristige Instabilitäten¹ des Referenzsystems den obigen Ausdruck nicht beeinflussen.

Um eine möglichst gute Statistik zu erhalten, wird das γ -Spektrum so lange aufgenommen, bis die Lage der Maxima der Photolinien im Referenzsystem auf 0.05 %² genau bestimmt werden kann. Die eckige Klammer in der obigen Gleichung deutet daher eine geeignete Mittelwertbildung über die dafür notwendigen Ereignissen an. Das Lasersignal selbst soll ereignisweise aufgenommen und ausgewertet werden. Weil die relativen statistischen Schwankungen in Photodioden und in Szintillationszählern mit wachsenden Pulshöhen kleiner werden (siehe Kapitel 2.5 sowie Abb. 3.7), werden die Filter für das Referenzsystem (siehe Kapitel 3.2) so dimensioniert, daß das Lasersignal im oberen dynamischen Bereich der aufgenommenen γ -Spektren aufläuft. Auf diese Weise kann die Energie der einzelnen Laserpulse möglichst genau bestimmt werden. Der Einsatz einer γ -Quelle bekannter Energie im Referenzsystem liefert eine Kalibration der Laserintensität in absoluter Elektronenenergie und die Möglichkeit der Nachkalibration des Kalorimeters unabhängig vom HERA-Betrieb.

Neben der Überwachung der Kalibrationskonstanten der einzelnen Module soll das System die Möglichkeit des Diodenabgleichs innerhalb eines Moduls (Intrakalibration) und zwischen den Modulen (Interkalibration) liefern. Darüber hinaus soll eine Überwachung des gesamten Signalwegs über den dynamischen Bereich des Detektors möglich sein.

Um diesen Anforderungen gerecht werden zu können, muß die Verteilung des Lichts aus der zentralen Lichtquelle auf die einzelnen Module des Detektors stabil sein. Eine Instabilität im Verteilungssystem des Lichts würde die Erkennung von Schwankungen in den Modulen unmöglich machen. Auf diese Problematik wurde besonders bei [Fle 90] eingegangen.

Im folgenden sollen noch einmal die Anforderungen, die an das Monitorsystem gestellt werden, zusammengefaßt werden:

- Die Überwachung der Kalibrationskonstanten bei gleichzeitiger Kontrolle des Signalweges ist wegen möglicher Strahlenschäden und anderer Defekte in den Modulen (defekte Wellenlängenschieber, schadhafte Photodioden etc.) notwendig.
- Ein Abgleich der Diodensignale innerhalb eines Moduls und der Signale der Module untereinander soll möglich sein.
- Die Lasersignale sollen ereignisweise aufgenommen werden.
- Neben Linearitätstests mit einem elektronischen Pulser soll auch das Monitorsystem die Linearität der Module über den gesamten dynamischen Bereich überwachen können. Damit ist auch die Funktionskontrolle der Photodioden möglich.

Dabei ist die für die BEMC-Kalibration geforderte Genauigkeit von 1% zu beachten, die von dem Monitorsystem deutlich unterschritten werden sollte.

3.1.2 Aufbau des Monitorsystems

Als zentrale Lichtquelle des Monitorsystems dient ein gepulster Stickstofflaser³, der mit ca. 10 Hz betrieben wird [Fle 90]. Um eine möglichst gute Statistik zu erhalten, sollte ein Monitorlauf etwa 10 min dauern. Je nach der Anzahl von Monitorläufen mit verschiedenen Filtereinstellungen (Linearitätstests) erhöht sich die Gesamtdauer eines Monitorlaufes entsprechend. Das UV-Licht des N₂-Lasers wird mit Hilfe von Quarzglasfasern zu den einzel-

¹Dabei sind Instabilitäten gemeint, die sich in einem Zeitraum einstellen, der groß ist im Vergleich zur Dauer eines Monitorlaufs.

²Bei Angaben der Genauigkeit ist mit z.B. 0.05% stets $\pm 0.05\%$ gemeint.

³LN 120 C von der Firma PRA Laser Inc., Kanada.

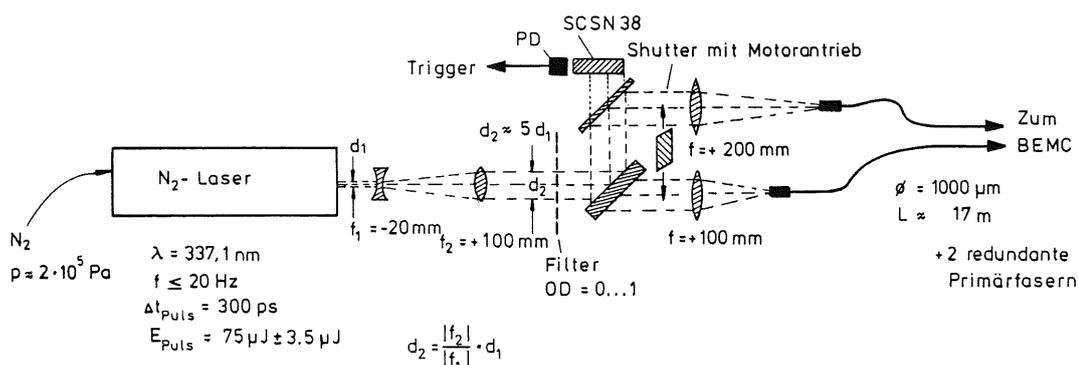


Abb. 3.1: Laserseitiger Aufbau des Monitorsystems

nen Modulen des Kalorimeters und zum Referenzsystem geleitet und erzeugt hier Szintillationslicht.

Der Vorteil einer UV-Lichtquelle liegt darin, daß mit ihr nicht nur die Photodioden und die nachfolgende Elektronik, sondern auch die Lichtwege zu den Photodioden, also die Szintillatoren und die Wellenlängenschieber, überwacht werden können. Angestrebt wurde aus diesem Grund die Einkopplung des Laserlichts in jede Szintillatorplatte, so daß die Detektierung eventueller Schäden aller Szintillatorplatten und der Wellenlängenschieber möglich ist. Aus technischen Gründen konnte dieses Konzept nicht verwirklicht werden. Deshalb werden nun zwei Fasern an die vom Vertex gesehen letzte Szintillatorplatte jedes Moduls gekoppelt. Da hier auch die größten Stahlschäden zu erwarten sind⁴, können entstehende Schäden des Szintillatormaterials mit dem Monitorsystem früh erkannt werden.

Die Ankopplungspunkte der Fasern aus den beiden Lichttransportwegen sind so gewählt, daß durch das Verhältnis der Einzeldiodensignale jeder Faser und den Vergleich der Signale beider Fasern signifikante Aussagen über Szintillator- bzw. Photodiodenschäden gemacht werden können. Die Ankopplungspunkte der Fasern sind in Anhang A in Abb. A.1 dargestellt.

Eine Bestimmung des mittleren Schadens über das ganze Modul ist mit der Kontrolle der letzten Szintillatorplatte nicht möglich und muß mit Hilfe von anderen Kalibrationsmethoden (siehe Kapitel 2.1) geschehen.

Aus Platzgründen wird der N_2 -Laser nicht direkt am BEMC, sondern in einer etwa 17 m entfernten Meßhütte, aufgebaut. In Abb. 3.1 ist der laserseitige Aufbau des Systems gezeigt. Das Laserlicht wird durch eine Linse (Brennweite 20 mm) defokussiert, mit einer zweiten Linse (Brennweite 100 mm) kollimiert und anschließend durch ein optisches Filter geschickt. Mit diesem Linsensystem wird die Querschnittsfläche des Laserstrahls um das 25-fache vergrößert, so daß das beschichtete Filter nicht beschädigt und vom Strahl voll ausgeleuchtet wird. Es stehen Filter verschiedener optischer Dichten⁵ ($OD=0.04-3.35$) zur Verfügung, um das Laserlicht, das in seiner Intensität Schwankungen unterworfen ist, ent-

⁴Durch Wechselwirkungen des Protonenstrahls mit dem Restgas und der Strahlrohrwand ist im Rückwärtsbereich mit besonders hoher Untergrundstrahlung zu rechnen [Mei 90].

⁵Die optische Dichte wird definiert als $OD = -\log T$, wobei T die Transmission des Filtermaterials ist.

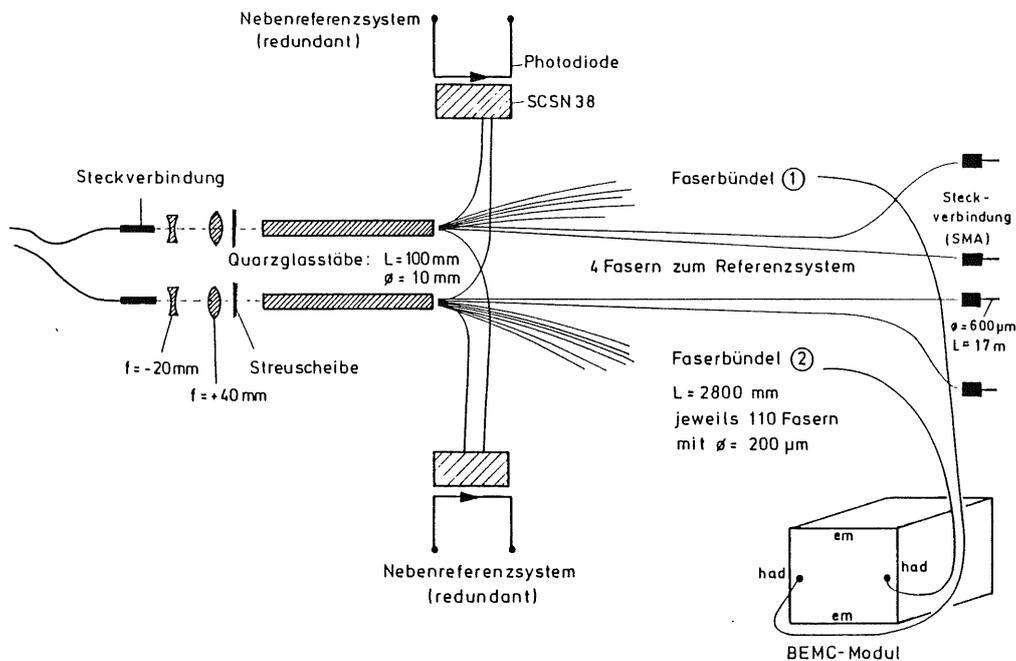


Abb. 3.2: BEMC-seitiger Aufbau des Monitorsystems

sprechend optimieren und Linearitätstests ermöglichen zu können. Es muß eine Vorrichtung für die ferngesteuerte Filterwechslung vorgesehen werden. Außerdem muß bei der Datenaufnahme eines Monitorlaufes gewährleistet sein, daß die Nummer des gewählten Filters abgespeichert wird (slow control).

Weil das Monitorsystem möglichst redundant ausgelegt werden soll, wird jedem Modul das Licht von zwei Fasern aus verschiedenen Lichttransportwegen zugeführt⁶. Dazu ist hinter dem optischen Filter ein Strahlteiler eingebaut, der das Laserlicht in zwei Strahlen gleicher Intensität aufteilt. Mit einer Linse (Brennweite 200 mm) werden die beiden Strahlen auf zwei Quarzglasfasern mit einem Kerndurchmesser von $1000 \mu\text{m}$ und einer Länge von 17 m fokussiert. Diese Fasern werden im weiteren als Primärfasern bezeichnet. Für den Fall der Beschädigung einer der Fasern werden vorsorglich noch zwei weitere Primärfasern verlegt. Diese Primärfasern transportieren das Laserlicht zum Kalorimeter, wo es durch eine spezielle Optik auf 220 Fasern verteilt wird. Hinter dem Strahlteiler wird ein motorgesteuerter Shutter eingebaut, damit während eines Monitorlaufs die Signale nur aus einem der beiden Transportwege zum BEMC gelangen.

Der BEMC-seitige Aufbau des Monitorsystems ist in Abb. 3.2 gezeigt. Am äußeren Trägerring des BEMC wird die Optik zur Verteilung des Lichts aus den Primärfasern auf zwei Faserbündel angebracht. Das mit Hilfe von Linsen aufgeweitete Licht aus beiden Lichttransportwegen wird an einer Oberflächenstreuscheibe gestreut. Ein Lichtmischer sorgt für eine homogene Verteilung der Intensität. Auf diese Weise wird in die hinter den Mischern angebrachten Faserbündel Licht mit optimaler homogener Ortsverteilung ein-

⁶ Ausnahme bilden hier nur die "kleinen Dreieck"-Module, deren Geometrie nur die Ankopplung von einer Faser zuläßt (siehe Abb. A.1 in Anhang A).

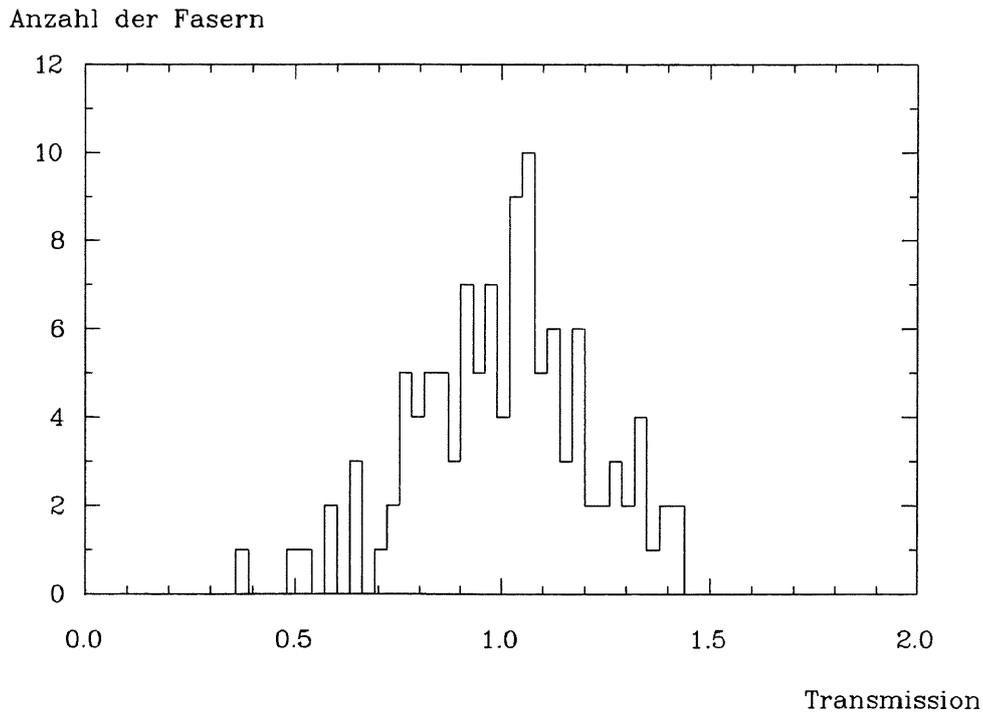


Abb. 3.3: **Integrales UV-Transmissionsverhalten der 110 Fasern des "blauen" Faserbündels^a** [Sch 91]

Die Transmission ist in relativen Einheiten angegeben und auf den Schwerpunkt der Verteilung normiert.

^aZur besseren Übersicht bei Installation und Wartung des Monitorsystems sind die Fasern beider Faserbündel mit Schrumpfschläuchen unterschiedlicher Farben umgeben.

gekoppelt. Die beiden Faserbündel transportieren das UV-Licht zu den 88 Modulen des BEMC.

Jedes Faserbündel besteht aus 110 Fasern, die an der Ankopplungsstelle zum Mischer auf möglichst engem Raum gebündelt sind. Alle Fasern wurden zuvor auf ihr integrales Transmissionsverhalten von UV-Licht hin untersucht. Dazu wurden die Faserbündel an eine fest installierte Optik gekoppelt, die der oben beschriebenen Lichtmischeroptik entspricht und das Laserlicht gleichmäßig auf alle Fasern verteilt. Das von den Fasern transportierte Laserlicht erzeugte in einem SCSN 38-Szintillatorstück Szintillationslicht, das mit einer Photodiode⁷ ausgelesen wurde. Es ergab sich eine Streuung der Lichtintensität der einzelnen Fasern von ca. 80 %. Die Fasern, deren Lichtintensität in einem Bereich von ca. 30 % um den Mittelwert liegen (siehe Abb. 3.3), werden den Modulen (insgesamt 168 Fasern⁸) und den Referenzsystemen (insgesamt 8 Fasern – je 4 Fasern für das Haupt- und Nebenreferenzsystem) zugeführt. Die übrigen 44 Fasern dienen der Redundanz und können im Bedarfsfall defekte Fasern ersetzen.

Im wesentlichen ist es, bedingt durch die unterschiedlichen Transmissionseigenschaften der Fasern, nur in Grenzen möglich, jedem Modul die gleiche Intensität des Laserlichts zuzuführen [Sch 91].

Die Ankopplungspunkte der Fasern auf der vom Vertex aus gesehen letzten Szintillator-

⁷Hamamatsu S 2575

⁸Von den 88 Modulen werden die 8 kleinen Dreieck-Module nur mit einer Faser bestückt.

platte der verschiedenen BEMC-Modulformen sind in Anhang A in Tab. A.1 aufgelistet. Jede Faser wird in eine Ferrüle gekrimpt und in eine spezielle Hülse eingeklebt, die mit einer Federvorrichtung an die Module befestigt wird. Diese stabile Verbindung gewährleistet einen guten optischen Kontakt zwischen Faser und Szintillatorplatte, läßt sich aber auch zum Auswechseln der Faser leicht lösen.

Zwei Fasern aus dem Zentrum jedes Faserbündels sind mit SMA-Steckern⁹ versehen und werden an Fasern mit einem Kerndurchmesser von $600\ \mu\text{m}$ gekoppelt. Diese Fasern, sie sollen im folgenden als Referenzfasern bezeichnet werden, transportieren das Laserlicht zum Hauptreferenzsystem, das neben dem Laser in der Meßhütte aufgebaut wird. Dieses Referenzsystem besteht aus zwei Detektoren, die jeweils das Licht aus beiden Lichttransportwegen überwachen. Bei einem Ausfall eines der Systeme kann so trotzdem ein Monitorlauf durchgeführt werden.

Zwei weitere starr verlegte Fasern aus jedem Faserbündel werden einem am BEMC aufgebauten System aus zwei Photodioden mit Szintillatoren (SCSN 38) zugeführt, das im folgenden als Nebenreferenzsystem bezeichnet werden soll (siehe auch Abb. 3.2). Die Aufgabe dieses Nebenreferenzsystems besteht in der Erhaltung der Kalibrationsinformation der einzelnen Module auch bei einer Zerlegung des gesamten BEMC. Für diesen Fall müssen alle Fasern von den Modulen entfernt werden. Durch die Erhaltung der Faserkopplung zum Nebenreferenzsystem ist nach neuer Installation der Fasern eine Zurückrechnung auf die ursprüngliche Kalibrationskonstante möglich.

Im folgenden sollen die wichtigsten Komponenten des Monitorsystems noch einmal kurz erläutert werden:

- Die Betriebsdaten des **Stickstofflasers** sind in Tab. 3.1 aufgeführt. Hinweise zum Betrieb des Lasers sind bei [Fle 90] nachzulesen.

Energie pro Puls	75 μJ
Wellenlänge	337.1 nm
Energie der Photonen	3.678 eV
Anzahl der Photonen pro Puls	$1.27 \cdot 10^{14}$
Pulsdauer	300 ps
Leistung pro Puls	250 kW
Strahlquerschnittsfläche	6 mm ²
Leistungsdichte	4.2 MW/cm ²
Gemessene Werte [Fle90]	
Strahlquerschnittsfläche	15.71 mm ²
Leistungsdichte	1.6 MW/cm ²

Tab. 3.1: **Daten des verwendeten N₂-Lasers**
(nach [PRA 88])

- Zum Transport des UV-Lichtes werden **optische Fasern** mit einem Quarzkern benötigt. Weil die Abschwächung des Lichts in den Fasern mit wachsendem Kernradius sinkt, werden für die langen Lichttransportwege vom Laser zum BEMC und

⁹SMA-Stecker sind Steckverbindungen zur Ankopplung von Lichtfasern, die sich durch die Stabilität der Verbindung und durch gute optische Eigenschaften auszeichnen (siehe Abb. 3.5 bzw. [Fle 90]).

vom BEMC zum Referenzsystem Fasern mit einem Kerndurchmesser von $1000\ \mu\text{m}$ und $600\ \mu\text{m}$ verwendet. Direkt am BEMC wird das Licht durch Fasern mit einem Kerndurchmesser von $200\ \mu\text{m}$ auf die Module des Kalorimeters verteilt. Genauere Angaben zu den verwendeten Fasern sind im Anhang B zu finden.

- Das **Verteilungssystem** besteht für jeden Lichttransportweg aus einer Oberflächenstreu-scheibe und dem Lichtmischer. Da die Verteilung des Laserlichts auf die 88 Module unter Beibehaltung der Wellenlänge geschehen soll, ist es notwendig, daß auch das Verteilungssystem aus Quarzglas ist. Eine Möglichkeit Licht zu "mischen", liefert der Einsatz eines Glasstabes, dessen Durchmesser etwa ein Zehntel seiner Länge beträgt. Durch die Vielfachreflektion an den Wänden des Stabes wird eine homogene Verteilung des Lichts erreicht. Beim Crystal-Barrel-Detektor ist ein solches System zum Einsatz gekommen [Käm 89]. Die Testmessungen mit dem für das Monitorsystem des BEMC verwendeten Quarzstab haben gezeigt, daß die Intensität hinter dem Mischer in einem Bereich mit dem Durchmesser von $3.7\ \text{mm}$ eine Homogenität von 95% aufweist [Fle 90]. Da der Durchmesser der aktiven Fläche des hier angekoppelten Faserbündels $2.7\ \text{mm}$ beträgt, ist mit diesem Verteilungssystem eine optimale Ausleuchtung des Faserbündels gegeben.
- Bei den **optischen Filtern**¹⁰ handelt es sich um beschichtete Quarzglasscheiben. Weil die Beschichtung empfindlich auf hohe Leistungsdichten des auftreffenden Lichtes reagiert, muß der Laserstrahl vor dem Filter mit einem Linsensystem aufgeweitet werden. Die Dimensionierung der optischen Dichten, d.h. die Auswahl der Filter, kann erst erfolgen, wenn alle Fasern am Kalorimeter installiert sind, weil die Transmissionseigenschaften der Fasern von der Art der Verlegung abhängen. Ausführliche Messungen dazu sind bei [Fle 90] nachzulesen.
- Da auch das Monitorsystem Schwankungen unterworfen ist, ist der Einsatz eines **Hauptreferenzsystems** zur absoluten Kalibration notwendig.
- Ein **Nebenreferenzsystem** soll die Information der Kalibrationskonstanten auch bei Zerlegung des BEMC-Detektors und bei Abkopplung der Referenzfasern vom Hauptreferenzsystem erhalten. Es ist aus zwei Photodioden desselben Typs aufgebaut, die auch in den Modulen des BEMC verwendet werden. Als Szintillator dient SCSN 38, das auch als aktives Material in die Module eingebaut ist.

3.2 Das Referenzsystem

Ein Referenzsystem muß sowohl kurzfristige als auch längerfristige Schwankungen der Intensität des Monitorsignals erkennen. Dazu sind zwei Punkte zu beachten. Erstens muß eine reproduzierbare Verteilung des Laserlichts insbesondere für die Referenzfasern erfüllt sein. Eine **Instabilität in der Laserlicht-Verteilung** würde eine Schwankung des Monitorsignals vortäuschen und ist deshalb untragbar. Deshalb müssen sowohl die Ankopplungen der Faserbündel an die beiden Lichtmischer als auch die Kopplungen der Referenzfasern so angefertigt werden, daß mechanische Veränderungen nicht möglich sind. Bei den Kopplungen der Referenzfasern sorgen SMA-Stecker-Systeme für eine feste Verbindung der Referenzfasern sowohl an die Fasern der Faserbündel als auch an die Referenzsysteme.

Bei [Fle 90] wurden Messungen zur Stabilität der Transmissionseigenschaften der Fasern durchgeführt. Das UV-Licht aus zwei hinter dem Lichtmischer angebrachten Fasern wurde

¹⁰Neutralfilter von der Firma Melles Griot

mit zwei Photodioden, auf die ein Stück SCSN 38-Szintillator angebracht war, ausgelesen. Aus den aufgenommenen List-Mode-Daten wurden ereignisweise Quotienten gebildet, d.h. es wurden on-line die koinzidenten Signale der beiden Photodioden dividiert, so daß die absolute Höhe des Lasersignals das Ergebnis der Messungen nicht beeinflusst.

Es zeigte sich, daß die Art der Verlegung der Fasern einen großen Einfluß auf die Stabilität des Quotienten ausübt. Bei spannungsfreier Verlegung aller Fasern wurde eine Stabilität des Quotienten von 0.2% erreicht. Eine unter mechanischer Spannung verlegte Faser zeigt dagegen Instabilitäten in ihrem Transmissionsverhalten von einigen Prozent [Fle90]. Die Stabilität des Faser-Transmissionsverhaltens von 0.2% ist die wesentliche Komponente für die Stabilität des Monitorsystems. Daher ist eine bessere Stabilität für das Referenzsystem erforderlich.

Als zweiter wichtiger Punkt für das Referenzsystem müssen **Verstärkungsschwankungen des Hauptreferenzsystems**, die durch Temperatur- und Zählratenänderungen hervorgerufen werden verhindert werden, da diese das Detektieren von Schwankungen der Monitorsignale unmöglich machen. Verstärkungsschwankungen, die sich in einem Zeitraum einstellen, der groß ist im Vergleich zum Überwachungszeitraum eines Monitorlaufs, können mit dem Einsatz eines γ -Präparats detektiert werden. Ein Präparat, das γ -Quanten mit zwei verschiedenen Energien emittiert, gewährleistet gleichzeitig die Überwachung der Pedestalwerte der Folgeelektronik.

Eine Schwankung, die sich während eines Monitorlaufs einstellt, ist dagegen untragbar. Deshalb müssen Schwankungen von $>0.1\%$ in einem Zeitraum von ca. einer Stunde ausgeschlossen werden können.

Das Hauptreferenzsystem besteht für beide Lichtwege aus zwei unabhängigen Auslesesystemen. Das Hauptreferenzsystem 1 besteht aus einem CsI(Tl)-Kristall, dessen Szintillationslicht mit einem stabilisierten Photomultiplier ausgelesen wird. Beim Hauptreferenzsystem 2 wird das Licht eines SCSN 38-Szintillators mit einer Photodiode ausgelesen.

In dem CsI(Tl)-Kristall wird von den γ -Quanten der Kalibrationsquelle Szintillationslicht erzeugt, dessen Intensität proportional zur Energie der einfallenden Strahlung ist (siehe Kapitel 2.4). Gleichzeitig wird das Laserlicht durch diesen Kristall geschickt, damit es diffus auf die Photokathode des Valvo-Photomultipliers auftrifft und ausgelesen werden kann. Als Kalibrationsquelle dient ein ^{22}Na -Präparat. Parallel hierzu wird eine auch in den Kalorimetermodulen des BEMC verwendete Photodiode von Hamamatsu (Typ S 2575) mit einer ^{241}Am - und einer ^{109}Cd - γ -Quelle kalibriert und als zweites Hauptreferenzsystem genutzt. Die Auslese erfolgt über einen ladungsempfindlichen Vorverstärker. Hier wird das Laserlicht durch ein SCSN 38-Szintillatorplättchen geschickt.

In der Tab. 3.2 in Kapitel 3.2.5 sind die Daten zu den verwendeten γ -Quellen aufgeführt. Technische Daten der verwendeten Photomultiplier und Photodioden sind in Kapitel 2.5 bzw. in Anhang B zu finden.

3.2.1 Das Hauptreferenzsystem mit dem Photomultiplier

Zu Beginn dieser Arbeit sollte das Hauptreferenzsystem aus zwei Photomultipliern bestehen, an die jeweils eine Faser aus einem der beiden Lichtwege gekoppelt werden sollte. Die beiden anderen Referenzfasern sollten ersatzweise verlegt werden. Damit auch diese Referenzfasern zur Überwachung des Monitorsignals genutzt werden können, wurde das zweite Hauptreferenzsystem mit der Photodiode geplant.

Der Einsatz zweier Photomultiplier wurde zugunsten eines Aufbaus des Hauptreferenzsystem 1 mit einem Photomultiplier und einen Kristall verworfen.¹¹ Beide Hauptreferenz-

¹¹Allerdings besteht die Möglichkeit, zwei Photomultiplier und zwei Kristalle in einer späteren Ausbaustufe des Referenzsystems einzusetzen.

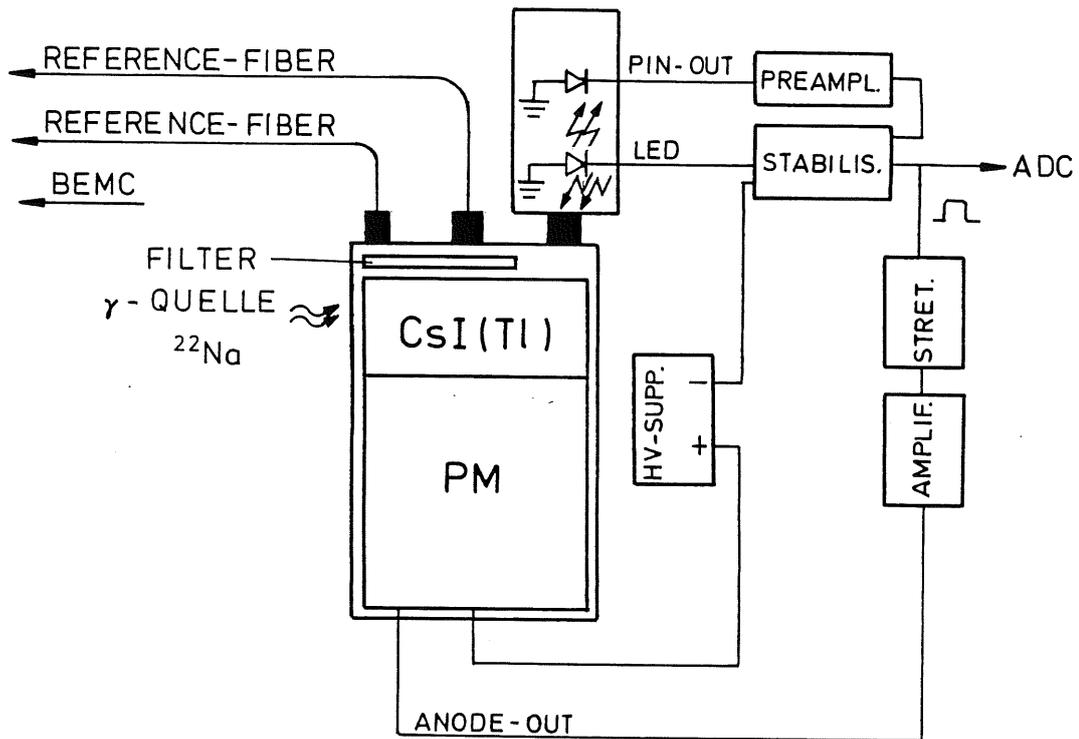


Abb. 3.4: Aufbau des Hauptreferenzsystems 1 mit dem Photomultiplier

systeme sollen das Monitorsignal aus beiden Lichttransportwegen erhalten. Dazu ist es notwendig, daß an den CsI(Tl)-Kristall zwei Referenzfasern gekoppelt werden können. Die in dieser Arbeit beschriebenen Messungen wurden mit einem CsI(Tl)-Kristall durchgeführt, bei dem nur die Ankopplung einer Referenzfaser möglich ist¹². Der Szintillator mit den Ankopplungsmöglichkeiten beider Fasern stand bei der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht zur Verfügung.

In Abb. 3.4 ist der Aufbau des Hauptreferenzsystems 1 mit dem Photomultiplier dargestellt, wie er für das Monitorsystem des BEMC-Detektors geplant ist. Der CsI(Tl)-Kristall (siehe Abb. 3.5) hat drei Fenster für die Ankopplung beider Referenzfasern, sowie einer pin-Photodiode und einer LED, die zu der in Kapitel 4.2 beschriebenen Stabilisierungseinheit gehören. Die Fasern und das Diodengehäuse werden mit SMA-Steckern an eine Metallplatte gekoppelt, die fest mit dem Photomultipliergehäuse verbunden ist. Instabilitäten der Kopplung, sowohl der Referenzfasern als auch der Photodioden, würden eine Schwankung des Monitorsignal vortäuschen und sind deshalb untragbar.

Zwischen den Kopplungsstellen und dem Kristall wird ein optisches Filter eingebaut, das so dimensioniert werden muß, daß das Lasersignal im oberen Dynamik-Bereich des Photomultiplierspektrums aufläuft. Wie auch die Dimensionierung der Filter hinter dem Laser kann die optische Dichte dieses Filters erst nach der Installation aller Fasern bestimmt

¹²Der hier verwendete Kristall verfügt zwar über zwei Kopplungsstellen, die eine wird aber für den Einsatz der Stabilisatoreinheit verwendet (siehe Kapitel 4.2).

werden. Außerdem muß auch hier eine Möglichkeit des Filterwechsels vorgesehen werden, weil bei einem Linearitätstest mit dem Monitorsystem auch die Filter vor dem Hauptreferenzsystem entsprechend der Intensität des Lasers variiert werden müssen. Das gilt ebenfalls für das Hauptreferenzsystem mit der Photodiode, das weiter unten beschrieben wird.

Der Kristall wird direkt auf die Photomultierröhre gesetzt, wobei der Kontakt durch optisches Fett verbessert wird. Das Photomultipliergehäuse ist so konstruiert, daß Verschiebungen zwischen dem Kristall und der Photomultierröhre unmöglich sind.

Der verwendete Valvo-Photomultiplier ist in Kapitel 2.5.1 näher beschrieben. Technische Daten zu diesem Photomultiplier finden sich auch in Anhang B.

Das Anodensignal des Photomultipliers wird verstärkt, durch einen Stretcher geschickt und dieses Signal wird dann sowohl in die Stabilisierungseinheit als auch in das Datenaufnahmesystem eingespeist.¹³ Die ²²Na-Quelle wird neben dem Photomultipliergehäuse befestigt. Mit einer hinreichend dicken Bleiabschirmung muß dafür gesorgt werden, daß die Umgebung möglichst strahlungsunbelastet ist.

Eine Beschreibung der verwendeten Kalibrationsquellen ist in Kapitel 3.2.5 zu finden.

3.2.2 Der CsI(Tl)-Kristall

Um bei Bestrahlung mit γ -Quanten in kurzer Zeit ein signifikant strukturiertes Pulshöhenspektrum zu erhalten, die eine Bestimmung der Kalibrationskonstanten des Referenzsystems 1 auf ca. 0.05% genau möglich macht, ist ein anorganischer Szintillator erforderlich (siehe Kapitel 2.4). Sowohl NaI(Tl) als auch CsI(Tl) würde für das Hauptreferenzsystem in Frage kommen. Der Nachteil von NaI ist seine hygroskopische Eigenschaft. Untersuchungen mit einem NaI(Tl+Am)-Pulser sind in der Diplomarbeit [Sch 89] erläutert. Hier wurde von der Anwendung von NaI(Tl) abgesehen, weil eine hinreichende Verkapselung des hygroskopischen Materials mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist. Deshalb fiel die Wahl auf einen CsI(Tl)-Kristall.

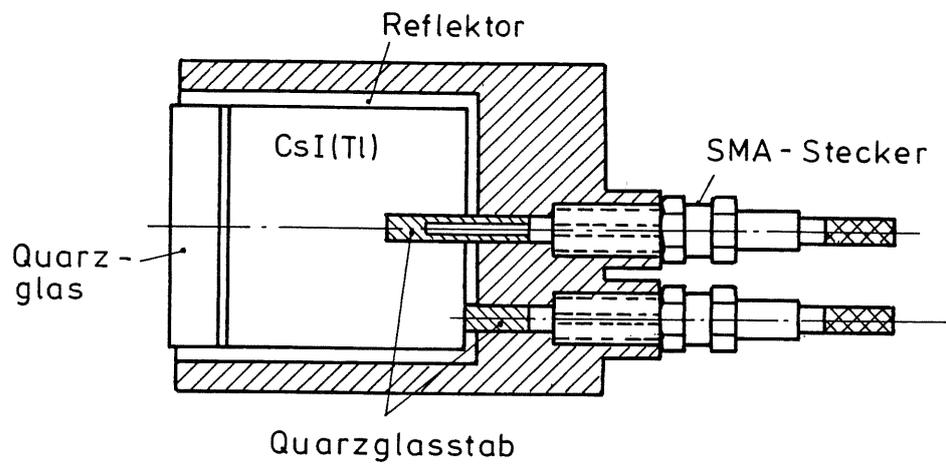
Bei der Dimensionierung des Kristalls ist darauf zu achten, daß die Photokathode der Photomultierröhre nicht voll ausgeleuchtet wird, weil Randeffekte auf der Photokathode Veränderungen in der Verstärkung des Photomultipliers hervorrufen [Kel 74]. Die runde Photokathode legt eine Zylindersymmetrie für den Szintillator nahe. Wegen des Durchmessers der Photokathode des Valvo-Photomultipliers von 32 mm [Val 85] und aus Symmetriegründen wurden Durchmesser und Höhe des Kristalls zu 30 mm festgelegt. Der in dieser Arbeit für die Messungen verwendete Kristall unterscheidet sich von dem für das Monitorsystem geplanten durch die Anzahl, die Anordnung und die Beschaffenheit der Ankopplungsstellen für die Quarzfasern und die pin-Photodiode sowie die LED.

Hier soll zunächst der in den Messungen verwendete Kristall¹⁴ beschrieben werden. Eine Skizze des Szintillatorkonstruktion ist in Abb. 3.5 dargestellt. Der Szintillator ist mit Reflektormaterial¹⁵ umgeben, um eine optimale Lichtausbeute zu erreichen. Die Seite des Kristalls, die der Photokathode des Photomultipliers zugewandt ist, ist mit einem Quarzglasfenster versehen, um den Kristall vor Feuchtigkeit zu schützen. Den gesamten Kristall umgibt ein Metallgehäuse. Es sind zwei in ihrer Beschaffenheit verschiedene Kopplungsstellen

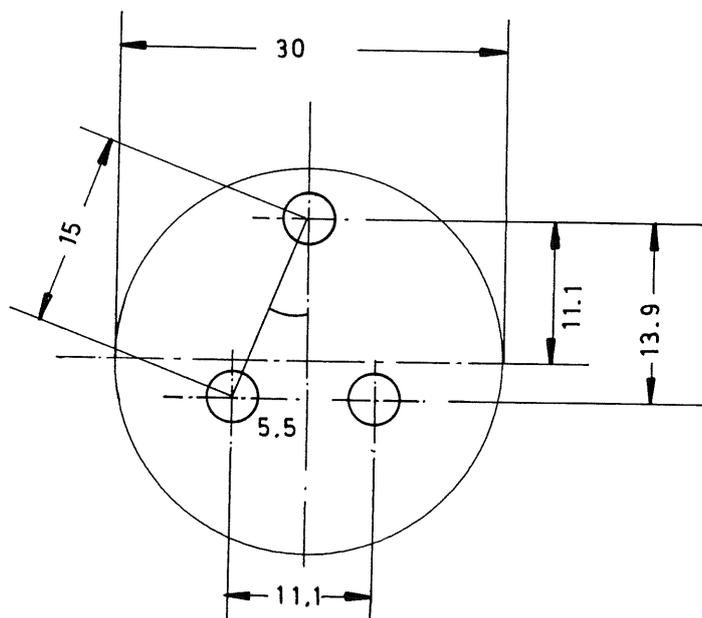
¹³Für die Messungen dieser Arbeit wurde ein Ortec 572 Verstärker und ein Ortec 442 Stretcher benutzt. Der elektronische Aufbau wird in Kapitel 4.2 näher beschrieben. Welche Elektronik für die Signalverarbeitung der Referenzsignale im HERA-Betrieb des BEMC eingesetzt wird, richtet sich nach dem Monitor-Datenaufnahmesystem und steht derzeit noch nicht fest.

¹⁴Beide CsI(Tl)-Kristalle wurden von der Firma Bicron Corporation Newbury, Ohio (USA), gefertigt.

¹⁵Teflon mit einem Reflektionsgrad von 86% des Standardreflektormaterials Al₂O₃ (Reflektionsgrad 96%) [Hec 90].



a)



b)

Abb. 3.5: Konstruktionszeichnung des für die Testmessungen verwendeten und des für das BEMC geplanten CsI(Tl)-Kristalls

Die beiden Kristalle unterscheiden sich nur in der Geometrie und Art der Faserankopplungspunkte.

a) Seitenansicht

b) Lage der Ankopplungspunkte für den für das BEMC geplanten Kristall

für die Quarzfasern vorgesehen. Die eine Ankopplungsstelle befindet sich in der Mitte des CsI-Kristalls und ist so konstruiert, daß eine Quarzfaser mit einem Kerndurchmesser von $1000\ \mu\text{m}$ eingesetzt werden kann. Dazu ist hier ein 5 mm dicker Quarzglaszylinder 10 mm tief in den Kristall eingesenkt. In dem Quarzzyylinder befindet sich die Bohrung für die einzuführende Faser. Bei der anderen Ankopplungsstelle bedeckt ein Quarzfenster die Kristalloberfläche, damit keine Luftfeuchtigkeit in den Kristall eindringen und das den Kristall umgebende Reflektormaterial nicht zwischen Kristalloberfläche und Kopplungsstelle gelangen kann. Diese zwei Kopplungsmöglichkeit wurden vorgesehen, um in späteren Messungen die optimale Methode zur Faserkopplung zu finden. Dies konnte jedoch nicht durchgeführt werden, da von dem Einsenken einer Quarzfaser mit einem Kerndurchmesser von $1000\ \mu\text{m}$ in die mittlere Ankopplungsstelle aus technischen Gründen abgesehen werden mußte. Das Polieren einer Faser, die nicht mit einem Stecker versehen ist, ist mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Weil der Einsatz eines Filters vor dem Hauptreferenzsystem auf jeden Fall notwendig ist, wäre bei einer in den Kristall eingesenkten Faser auch keine direkte Ankopplung an die Referenzfaser möglich. Das optische Filter müßte zwischen die fest im Kristall installierte Faser und die Referenzfaser eingebaut werden. An die mittlere Kopplungsstelle konnte aber entsprechend der anderen Kopplungsstelle eine $600\ \mu\text{m}$ -Faser befestigt werden.

Die Referenzfasern werden an das Photomultipliergehäuse gekoppelt und das Filter zwischen Referenzfaser und Kristall installiert. Diese Kopplungsmethode wird sowohl bei der anderen Kopplungsstelle als auch bei dem für den Einsatz im Referenzsystem vorgesehenen CsI-Kristall angewendet.

Untersuchungen der verschiedenen Kopplungsstellen haben ergeben, daß der eingesenkte Quarzglasstab bei nicht eingesenkter sondern nur aufgesetzter $600\ \mu\text{m}$ -Quarzfasern eine Abschwächung gegenüber der anderen Kopplungsstelle von 35 % bewirkt. Die Reproduzierbarkeit bei An- und Abkopplung zeigt Abb. 3.6. Sie ist bei beiden Methoden gleich. Es ist nicht möglich, eine Wiederankopplung einer Referenzfaser so vorzunehmen, daß das Monitorsignal mit der erforderlichen Genauigkeit reproduziert werden kann. Da aber zwei Referenzsysteme zur Verfügung stehen, kann bei Ausbau eines Systems das andere als Referenz genutzt werden.

Bei dem für den Einsatz am BEMC geplanten Kristall sind alle drei Kopplungsstellen gleich. Die Geometrie der Kopplungsstellen ergibt sich aus der Größe der SMA-Stecker. Sie ist in Abb. 3.5 skizziert.

In Abb. 3.7 sind Ergebnisse von Energieauflösungsmessungen mit dem CsI-Kristall unter Verwendung verschiedener γ -Quellen dargestellt. An die Meßdaten wurde ein A/\sqrt{E} -Fit gemäß der theoretisch zu erwartenden Energieauflösung (siehe Kapitel 2.5) angepaßt¹⁶. Die Übereinstimmung der Meßwerte mit der theoretischen Anpassung ist gut. Es ergibt sich z.B. für die 1275 keV-Linie von ^{22}Na eine Energieauflösung von 3.3%, was für 661 keV (^{137}Cs) einer Energieauflösung von 4.6% entspricht¹⁷.

3.2.3 Das Hauptreferenzsystem mit der Photodiode

Da für die beiden Lichttransportkanäle jeweils zwei Fasern verlegt werden sollen, stehen die beiden Ersatzsekundärfasern für die Ankopplung des mit einer Photodiode und SCSN 38-Szintillatormaterial ausgelegten Hauptreferenzsystems 2 zur Verfügung. Der Vorteil, das Hauptreferenzsystem aus zwei verschiedenen Auslesesystemen aufzubauen, liegt sowohl

¹⁶Bei allen in dieser Arbeit beschriebenen Anpassungen handelt es sich um Least-Square-Fits mit der Fitroutine aus dem Programmpaket GEP [Bas 85].

¹⁷Der Meßaufbau zu dieser Untersuchung ist in Abb. 4.1 dargestellt.

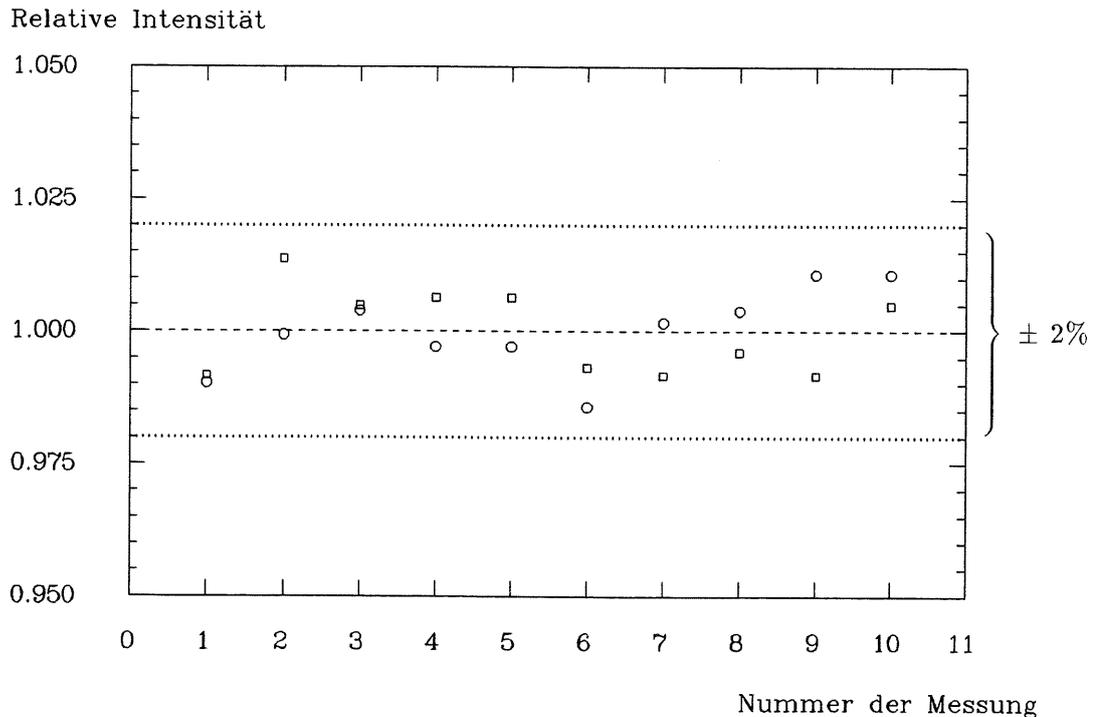


Abb. 3.6: **Reproduzierbarkeit der Faserkopplung an den verwendeten CsI(Tl)-Kristall**

Die runden Symbole zeigen die Messung an der mittleren und die quadratischen Symbole die an der seitlichen Kopplungsstelle. Die gestrichelte Linie deutet einen Bereich von $\pm 2\%$ um den normierten Mittelwert an. Die Meßgenauigkeit lag bei ca. 0.2% . Der Nullpunkt der y-Achse wurde unterdrückt.

darin, daß mit dem Photodiodensystem Störungen an dem empfindlichen Photomultiplier-System detektiert werden können, als auch darin, daß eine Überwachung des in den Kalorimetermodulen des BEMC verwendeten Photodiodentyps in Hinblick auf Alterungserscheinungen möglich ist.

In Abb. 3.8 ist der Aufbau des Hauptreferenzsystems 2 mit der Photodiode gezeigt. Die Referenzfasern aus den beiden Lichttransportwegen werden auch hier mit zwei SMA-Steckern an das Diodengehäuse gekoppelt. Zwischen den Quarzfasern und den Szintillatoren wird ein Filter installiert, dessen optische Dichte von der Intensität des Lasers abhängt (siehe dazu auch Kapitel 3.1.2). Auch hier muß eine Vorrichtung für die ferngesteuerte Filterwechslung vorgesehen werden.

Die Ausleseelektronik für die Testmessungen des Hauptreferenzsystems 2 ist einfacher aufgebaut, als die für das Hauptreferenzsystem mit dem Photomultiplier. Sie besteht aus einem Vorverstärker einem Hauptverstärker und einem Stretcher. Die Kalibrationsquellen sind direkt auf die Photodiode geklebt.¹⁸

Das Ergebnis einer Messung zur Energiekalibration dieses Meßaufbaus zeigt Abb. 3.10.

¹⁸Die Elektronik des Hauptreferenzsystems 2, die für die Überwachung des BEMC im HERA-Betrieb verwendet wird, richtet sich nach dem eingesetzten Datenaufnahmesystem und ist derzeit noch nicht festgelegt. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde ein Canberra 2003 BT Vorverstärker, ein Emetron e.m. 1003 Hauptverstärker, der ein unipolares Signal liefert, sowie ein Stretcher der Marke Canberra 1454 verwendet.

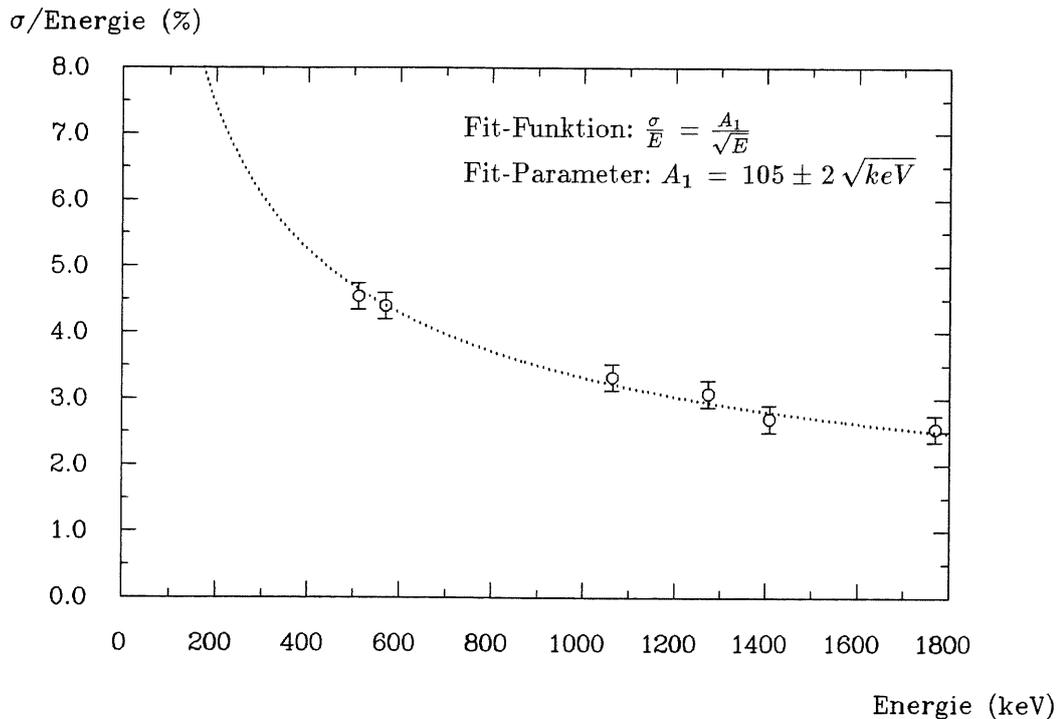


Abb. 3.7: **Energieauflösung des CsI(Tl)-Kristalls gemessen mit dem Valvo-Photomultiplier**

Als Kalibrationsquellen dienten hier: ^{22}Na (511 keV und 1275 keV), ^{207}Bi (569 keV, 1063 keV und 1769 keV) und ^{152}Eu (1408 keV).

Als Kalibrationsquellen wurden ^{109}Cd (88 keV), ^{241}Am (60 keV), ^{133}Ba (81 keV) und ^{57}Co (122 keV) verwendet.

Abb. 3.11 zeigt das Ergebnis der Messung zur Energieauflösung des Hauptreferenzsystems 2 mit den oben aufgeführten γ -Präparaten. An die Meßwerte wurde gemäß Kapitel 2.5 die Funktion

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{A_1}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{E}\right)^2}$$

angepaßt. Es ergibt sich für die 60 keV-Photolinie von ^{241}Am eine Energieauflösung von 4.8% und für die 88 keV-Photolinie von ^{109}Cd eine Energieauflösung von 3.2%. Für die Messung der Stabilität des Hauptreferenzsystems 2 wurden γ -Spektren von ^{241}Am und ^{109}Cd simultan 300 s lang aufgenommen und die Messung nach 15 min wiederholt. Bei der Meßdauer von 300 s und einer Breite von 4.8% ergibt sich bei der Bestimmung des Maximums der 60 keV-Photolinie eine Meßgenauigkeit von 0.08%. Innerhalb dieser Meßgenauigkeit wurden über 10 Stunden keine Schwankungen beobachtet.

3.2.4 Das Nebenreferenzsystem

Damit die Eichinformation des Monitorsignals auch bei Abkopplung der Fasern von den Kalorimetermodulen und vom Hauptreferenzsystem erhalten bleibt, wurde direkt am Träggerring des Detektors das Nebenreferenzsystem aus zwei Hamamatsu-Photodioden (S 2575) mit aufgeklebten SCSN 38-Szintillatorplatten aufgebaut, die jeweils mit einer Quarzfaser aus den beiden Lichttransportwegen versorgt werden.

Die nachfolgende Ausleselektronik und Datenaufnahme ist dieselbe, die auch für die

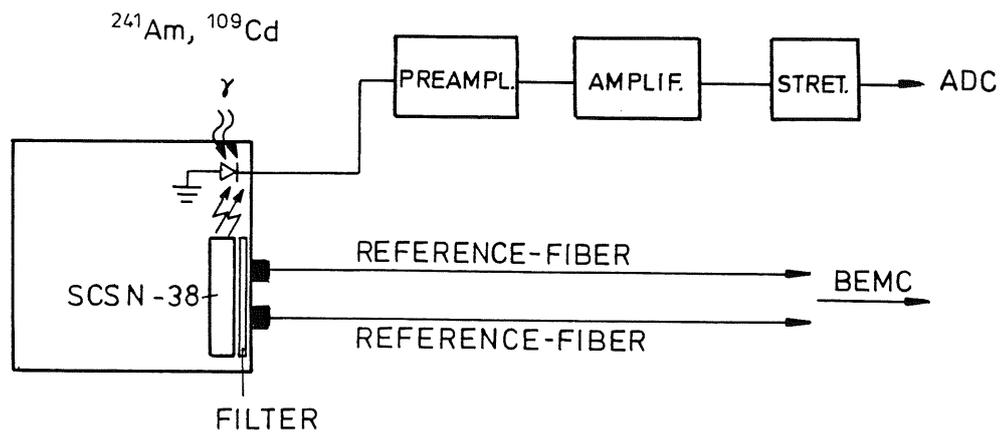


Abb. 3.8: Aufbau des Hauptreferenzsystems 2 mit der Photodiode

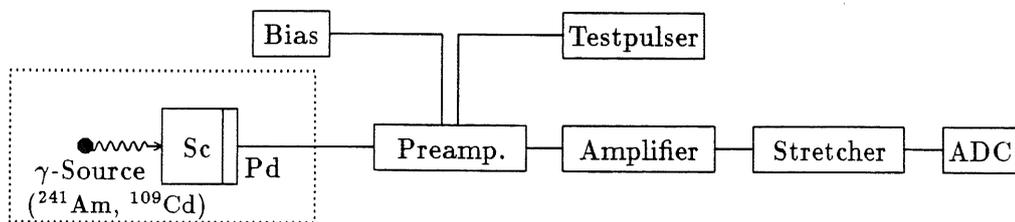


Abb. 3.9: Meßaufbau mit der Photodiode

Photodioden der Kalorimeter-Module verwendet wird – also Vitrohm-Vorverstärker, Line-Driver usw. .

Diese beiden Nebenreferenzsysteme sollen fest mit dem Verteilungssystem verbunden bleiben. Wie das Hauptreferenzsystem ist auch das Nebenreferenzsystem redundant ausgelegt.

3.2.5 Die verwendeten Kalibrationsquellen

Bei der Wahl der Kalibrationsquelle wurden mehrere Kriterien beachtet:

Eine **Mindestaktivität** ist gegeben durch die Statistik. Weil die Lage des Photopeaks auf 0.05% genau bestimmt werden soll, ist eine Mindestanzahl von Einträgen im Hauptreferenzsystem während eines Monitorlaufs gegeben. Mit einem zu schwachen γ -Präparat wäre eine unpraktikabel lange Meßzeit erforderlich. Insbesondere muß der Überwachungszeitraum τ im Vergleich zu dem Zeitraum T , in dem Änderungen in dem Referenzsystem zu erwarten sind, klein sein.

Im Hinblick auf Strahlenschäden ist ebenfalls auf eine **Höchstaktivität** zu achten. Weil

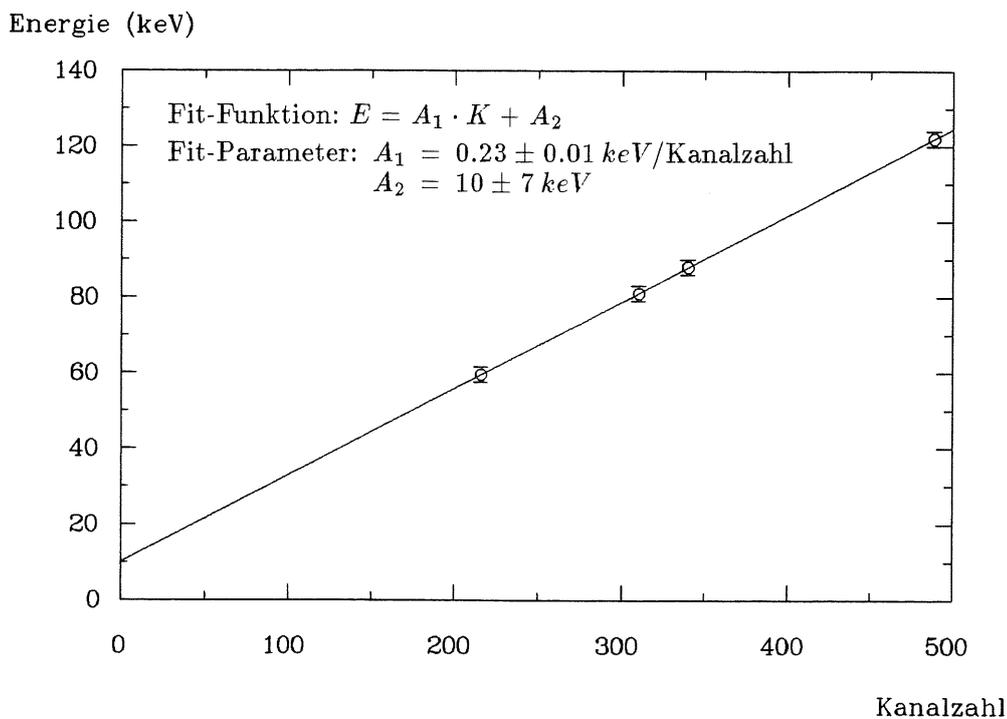


Abb. 3.10: **Energiekalibration des Hauptreferenzsystems 2 mit der Photodiode**

Als Kalibrationspräparate wurden ^{109}Cd (88 keV), ^{241}Am (60 keV), ^{133}Ba (81 keV) und ^{57}Co (122 keV) verwendet.

der Betrieb des BEMC auf mehrere Jahre angesetzt ist, sollte der Kristall auch eine mehrjährige Bestrahlung der gewählten Präparate ohne messbare Strahlenschäden überstehen können. Zur Strahlenbelastung für Detektoren allgemein tragen natürlich nicht nur die Einträge in der Kalibrationsphotolinie bei. Deshalb ist z.B. ein Präparat, das besonders viel niederenergetische γ -Quanten emittiert, ungeeignet.

Auch die γ -Energie, die als **Kalibrationsenergie** dienen soll, muß unter dem Gesichtspunkt der Strahlenschäden gewählt werden. Weil aufgrund der Poissonstatistik die Energieauflösung des Szintillationszählers umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Energie des einfallenden Teilchens ist (siehe Abb. 3.7 und Kapitel 2.5), wäre der Einsatz einer radioaktiven Quelle, die γ -Quanten von möglichst hoher Energie emittiert, sinnvoll. Gleichzeitig würde der Einsatz einer solchen Quelle eine höhere Gesamtaktivität voraussetzen, da der Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt mit steigender Energie kleiner wird (siehe Kapitel 2.3). Darüber hinaus ist der Einsatz einer Quelle mit zwei γ -Energien im passenden Energiebereich sinnvoll, weil damit nicht nur die Kalibrationskonstante, sondern auch die Pedestalwerte überwacht werden können.

Deshalb wurde hier als Kalibrationsquelle für das Hauptreferenzsystem mit dem Photomultiplier ^{22}Na gewählt, das signifikante Photopeaks bei 511 keV und 1275 keV zeigt. Das Zerfallsschema von ^{22}Na ist in Abb. 3.12 dargestellt.

Das Präparat sollte so positioniert werden, daß die Zählrate der 1275 keV-Linie etwa 20 Hz beträgt. Die Gesamtzählrate inklusive der niederenergetischen γ -Quanten beträgt dann etwa 500 Hz.¹⁹

¹⁹Eine Verringerung des Abstandes zwischen dem γ -Präparat und dem CsI-Kristall würde eine erhebliche Vergrößerung der Zählrate zur Folge haben!

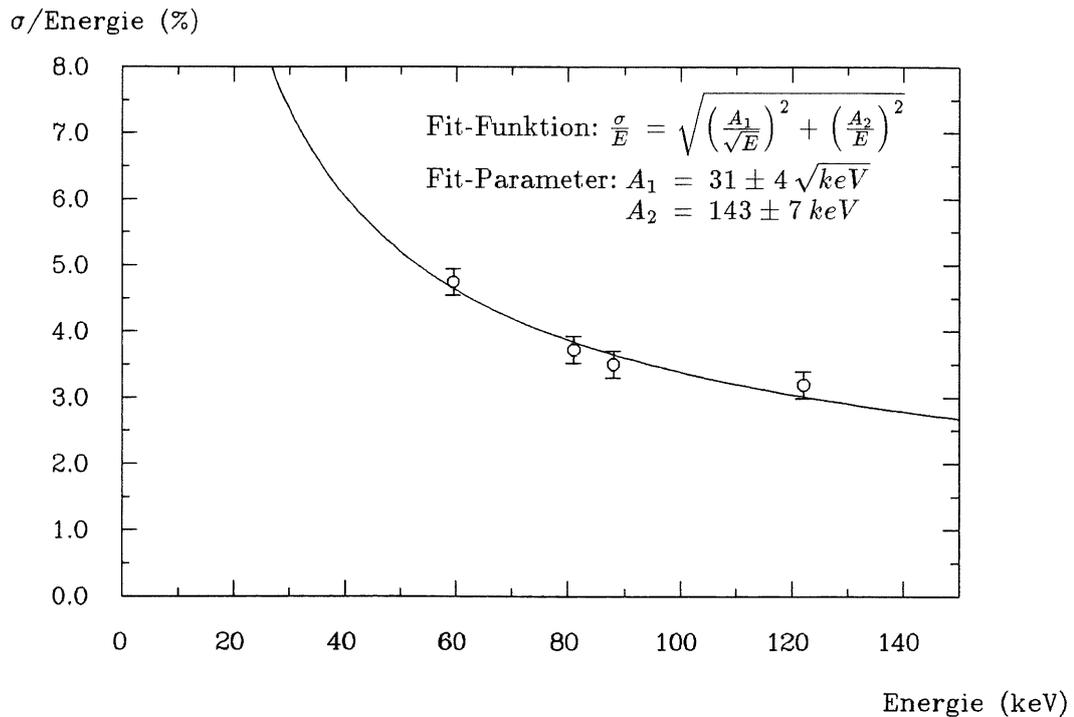


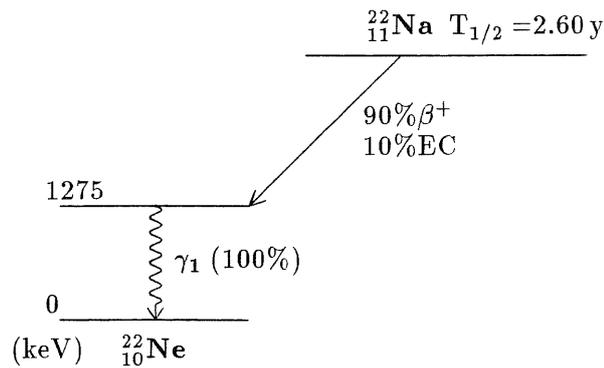
Abb. 3.11: **Energieauflösung des Hauptreferenzsystems 2 mit der Photodiode**

Als Kalibrationspräparate wurden ^{109}Cd (88 keV), ^{241}Am (60 keV), ^{133}Ba (81 keV) und ^{57}Co (122 keV) verwendet.

Um ein gut aufzulösendes Eichsignal für das Photodiodensystem zu erhalten, ist es notwendig, daß die Wechselwirkung der vom Eichpräparat emittierten γ -Quanten mit dem Photodiodenmaterial geschieht und nicht mit dem organischen SCSN 38-Szintillatormaterial. Der Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts ist in organischem Material wegen der niedrigen Kernladungen der Hauptbestandteile zu gering (siehe Kapitel 2.3). Das Hauptelement der hier verwendeten Photodioden ist Silizium mit einer Kernladungszahl von $Z=14$. Aus Abb. 2.1 und 2.2 in Kapitel 2.3 kann man ersehen, daß der Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt von γ -Quanten in der Photodiode für γ -Energien bis zu ca. 100 keV dominant ist. Für höhere Energien wird dann der Compton-Effekt dominant.

Deshalb wurden als Kalibrationsquellen ^{241}Am mit einer γ -Linie von 60 keV und ^{109}Cd mit einer γ -Linie von 88 keV gewählt. Für diese γ -Energien hat der Photoeffekt in Silizium einen ca. 50–70 mal größeren Wirkungsquerschnitt als in SCSN 38 (siehe Abb. 2.1). Die Aktivität der Präparate sollte auch hier so niedrig wie möglich sein, um vorzeitige Strahlenschäden weitgehend ausschließen zu können. Eine Aktivität, die eine Zählrate von ca. 10 Hz in den jeweiligen Photolinien erzeugt, ist für unsere Zwecke hinreichend. Die Aktivität der verwendeten ^{241}Am und ^{109}Cd Präparate²⁰ fiel etwas geringer aus. Es wurden maximale Zählraten der Photolinien von etwa 7 Hz gemessen. Auch eine solche Zählrate sollte ausreichen, um die während eines Monitorlaufs von 10 min im Detektor registrierten Photoeffekt ereignisse mit einer hinreichenden Genauigkeit auslesen zu können. Die Gesamtzählrate beider Quellen beträgt etwa 2000 Hz.

²⁰Diese γ -Präparate wurden von der Firma Amersham Buchler, Braunschweig bezogen. Die Aktivitäten betragen 1.1 μCi für ^{241}Am und 12 μCi für ^{109}Cd [Ame 90].


 Abb. 3.12: Zerfallsschema von ${}^{22}\text{Na}$

Die vom ${}^{22}\text{Na}$ emittierten Positronen annihilieren in der Plastikumhüllung der Quelle, so daß zwei koinzidente γ -Quanten mit Energien von 511 keV emittiert werden. Zusätzlich zur Annihilationsstrahlung tritt noch die 1275 keV-Strahlung des beim Zerfall entstehenden angeregten Ne-Kerns auf. (nach [Kno79])

γ -Präparat	Photopeak keV	Comptonkante keV	Rückstreupeak keV	Übergangs= wahrscheinlichkeit %
${}^{22}\text{Na}$	511	341	170	90
	1275	1062	213	100
${}^{152}\text{Eu}$	344	197	147	26.6
	779	587	192	13.0
	964	762	202	14.5
	1112	904	208	13.6
	1408	1192	216	20.8
${}^{207}\text{Bi}$	569	393	176	97.8
	1063	857	206	74.9
	1769	1546	223	6.9
${}^{241}\text{Am}$	60	11.4	48.6	35.7
${}^{109}\text{Cd}$	88	22.5	65.5	3.6
${}^{57}\text{Co}$	122	39.4	82.6	85.5
${}^{133}\text{Ba}$	81	19.5	61.5	34.2
	384	231	153	8.9

 Tab. 3.2: Daten der verwendeten γ -Präparate
 (nach [Bro 86])

Kapitel 4

Experimentelle Methoden und Ergebnisse

4.1 Voruntersuchungen zur Stabilität des Hauptreferenzsystems mit dem Photomultiplier

In diesem Kapitel werden Messungen dargestellt, die zur Untersuchung der Stabilität des Hauptreferenzsystems 1 durchgeführt wurden.

Da die Hauptaufgabe zunächst Untersuchungen zur Stabilität von Photomultipliern sind, wurden die Messungen mit dem Hauptreferenzsystem 2, das mit Photodioden aufgebaut ist, auf die in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Untersuchungen beschränkt.

Um die Ursachen möglicher Verstärkungsschwankungen leicht feststellen zu können, wurde ein möglichst einfacher Meßaufbau gewählt. In Abb. 4.1 ist dieser Meßaufbau dargestellt. Auf die Valvo-Photomultiplerröhre wurde mit optischem Fett ein CsI(Tl)-Kristall angebracht, dessen Oberfläche bis auf die der Photokathode zugewandten Seite mit weißer Reflektorfarbe¹ umgeben ist.

Das Anodensignal wurde in einem Ortec-Verstärker vom Typ 572 ca. 10-fach verstärkt, so daß die Signalhöhen in einem Bereich von 0 bis 8 V und damit im Akzeptanzbereich des Vielkanalanalysators Nuklear Data 4420 lagen.

Bei allen Messungen mit dem Nuklear Data-Vielkanal wurden die Maxima der Photolinien durch Ablesen der Kanäle mit den maximalen Einträgen am Monitor des Vielkanals bestimmt. Um sicherzustellen, daß diese Bestimmung des Peakmaximums hinreichend genau ist, wurden eine Reihe von ²²Na-Spektren sowohl auf diese Weise als auch mit einem Fitprogramm ausgewertet, das an die Photolinien eine Gaußfunktion angepaßt. Dazu wurden die auf Magnetband gespeicherten Spektren der Nuklear Data auf die IBM-Großrechenanlage transferiert und dort ausgewertet. Das Anpassen der Gaußfunktion an die Meßdaten geschah mit Hilfe des Programmpaketes GEP, das die Darstellung und Manipulation von Meßdaten ermöglicht [Bas 85]. Dabei zeigte sich, daß mit der Fitmethode für die in diesem Kapitel beschriebenen Messungen keine weitere Genauigkeit gewonnen werden konnte. Im folgenden wurde deshalb auf die Fit-Prozedur der Spektren zur Bestimmung der Peaklagen verzichtet.

Für die Energiekalibration des Szintillationszählers wurden Spektren verschiedener γ -Präparate aufgenommen. In der Abb. 4.2 wurden die Energien der Photolinien gegen die ADC-Kanalzahl aufgetragen. An die Meßpunkte wurde eine Gerade angepaßt. Die

¹TiO₂

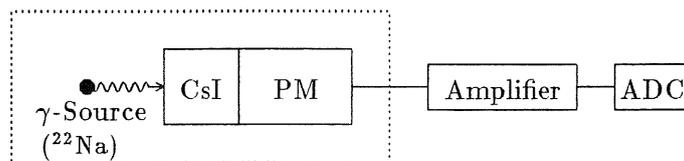


Abb. 4.1: Meßaufbau für die ersten Stabilitätstests und die Messung des Zählrateneffekts mit γ -Quellen

Die Stabilitätstests wurden mit dem Valvo-Photomultiplier durchgeführt. Für die Messungen des Zählrateneffekts wurden der Reflexionsdynodenphotomultiplier von Valvo und der Transmissionsdynodenphotomultiplier von Hamamatsu verwendet.

Fitparameter geben den Offset und die Linearitätskonstante zwischen Energie und ADC-Kanalzahl des Szintillationszählers an.

Für die ersten Stabilitätsmessungen der Photomultiplerverstärkung wurden über mehrere Tage Szintillationsspektren nach Anregung mit einer ^{22}Na -Quelle so lange aufgenommen, daß die Peaklage der 1275 keV Photolinie auf $\approx 0.2\%$ genau bestimmt werden konnte. Ein charakteristisches CsI(Tl)-Szintillationsspektrum von ^{22}Na in halblogarithmischer Darstellung, das mit dem Valvo-Photomultiplier aufgenommen wurde, zeigt Abb. 4.3.

Es wurden Schwankungen der Kalibrationskonstanten von einigen Prozent gemessen. Weitere Untersuchungen zeigten, daß diese Schwankungen auf einen Zählrateneffekt, also eine Veränderung der Verstärkung bei Veränderung der Zählrate zurückgeführt werden konnte.

Obwohl die Zählrate des Hauptreferenzsystems 1 mit dem Photomultiplier 1 kHz nicht überschreiten sollte, wurde der Zählrateneffekt hier bis zu höheren Zählraten systematisch untersucht. Dafür wurden zwei verschiedene Meßmethoden angewendet:

- Messungen mit γ -Präparaten bei Zählratenänderung
- Messung einer gepulsten LED bei verschiedenen Zählraten, Pulsbreiten und Pulshöhen

4.1.1 Meßaufbau und Durchführung zur Untersuchung des Zählrateneffekts mit γ -Quellen

Der beobachtete Effekt einer Veränderung der Verstärkung bei Zählratenänderung wurde mit zwei verschiedenen Photomultipliern und mehreren verschiedenen Spannungsteilern untersucht.

Der prinzipielle Meßaufbau zu diesen Untersuchungen ist in Abb. 4.1 gezeigt. Durch eine Verringerung des Abstandes zwischen radioaktiver Quelle und Szintillator wurde die Zählrate erhöht. Eine weitere Zählratenerhöhung wurde erreicht, indem zum verwendeten

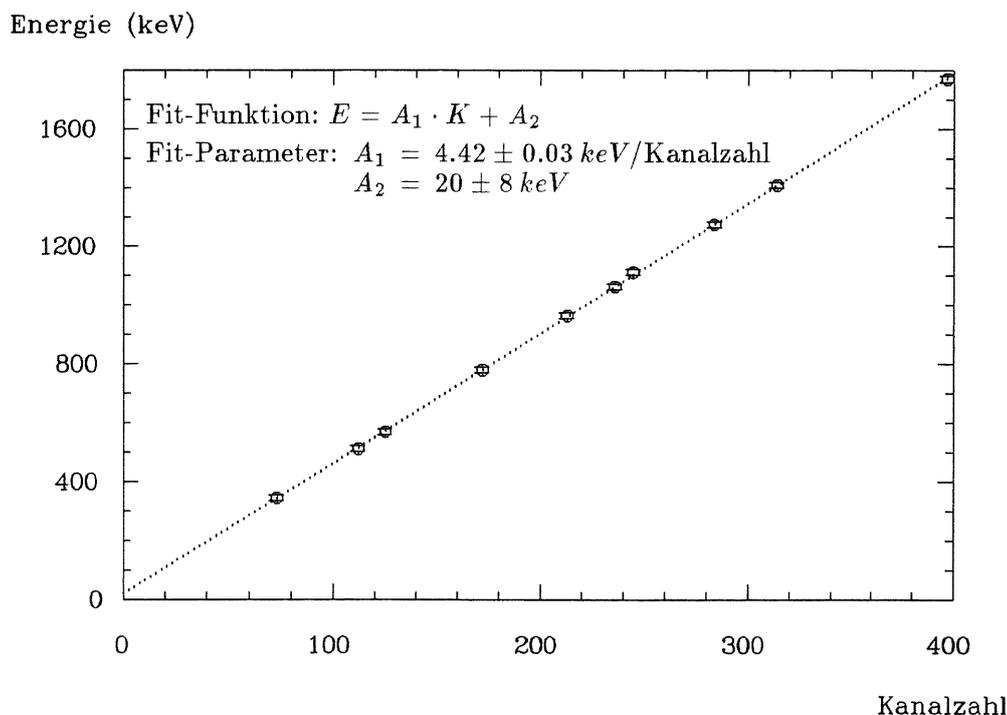


Abb. 4.2: **Energiekalibration des Valvo-Photomultipliers**

Als Kalibrationsquellen wurden die folgenden γ -Präparate verwendet: ^{152}Eu (344 keV, 779 keV, 964 keV, 1112 keV, 1408 keV), ^{22}Na (511 keV, 1275 keV) und ^{207}Bi (569 keV, 1063 keV, 1769 keV).

^{22}Na -Präparat noch ein ^{133}Ba -Präparat hinzugelegt wurde, dessen Photolinien unterhalb von 384 keV liegen (siehe Tab. 3.2 in Kapitel 3.2.5) und die Auflösung der 511 keV und der 1275 keV γ -Linien des ^{22}Na nicht verschlechtert.

Bei allen Messungen wurde die ^{22}Na -Quelle schrittweise dichter an den Szintillator gelegt und ein Spektrum aufgenommen.

Die ersten Messungen wurden mit dem 10-stufigen Valvo-Photomultiplier und einem passiven Spannungsteiler (siehe Abb. C.1 in Anhang C) durchgeführt. Die Zählrate wurde von einigen Hundert Hz bis ca. 15 kHz erhöht. Die Verstärkungserhöhung wurde durch die Bestimmung der Photopeaks der 511 keV und 1275 keV registriert. Die maximale Erhöhung lag bei einer Zählrate von 15 kHz bei ca. 7%. Eine graphische Darstellung des Meßergebnisses für die Änderung der 1275 keV Linie ist, normiert auf den Anfangswert, in Abb. 4.4 gezeigt.

Ein möglicher Zusammenhang zwischen diesem Effekt und dem gewählten Spannungsteiler wurde untersucht, indem die obige Meßreihe mit verschiedenen Modifikationen des Spannungsteilers wiederholt wurde. Zunächst wurden die letzten beiden Dynoden (D 9 und D 10) separat aus stromstabilisierten Quellen mit 26% bzw. 12% der Kathodenspannung versorgt [Gen 87]. Die Spannungsteilerschaltung ist in Anhang C in Abb. C.2 gezeigt. Sättigungseffekte, die durch einen im Vergleich zum Querstrom zu hohen Anodenstrom entstehen, würden dadurch erst bei noch größeren Zählraten auftreten.

Ein Vergleich der Messungen mit dem passiven und dem mit zwei Zusatzspannungsquellen modifizierten Spannungsteiler ist in Abb. 4.4 dargestellt. Es ist keine Veränderung gegenüber der Messung mit dem Standardspannungsteiler zu erkennen.

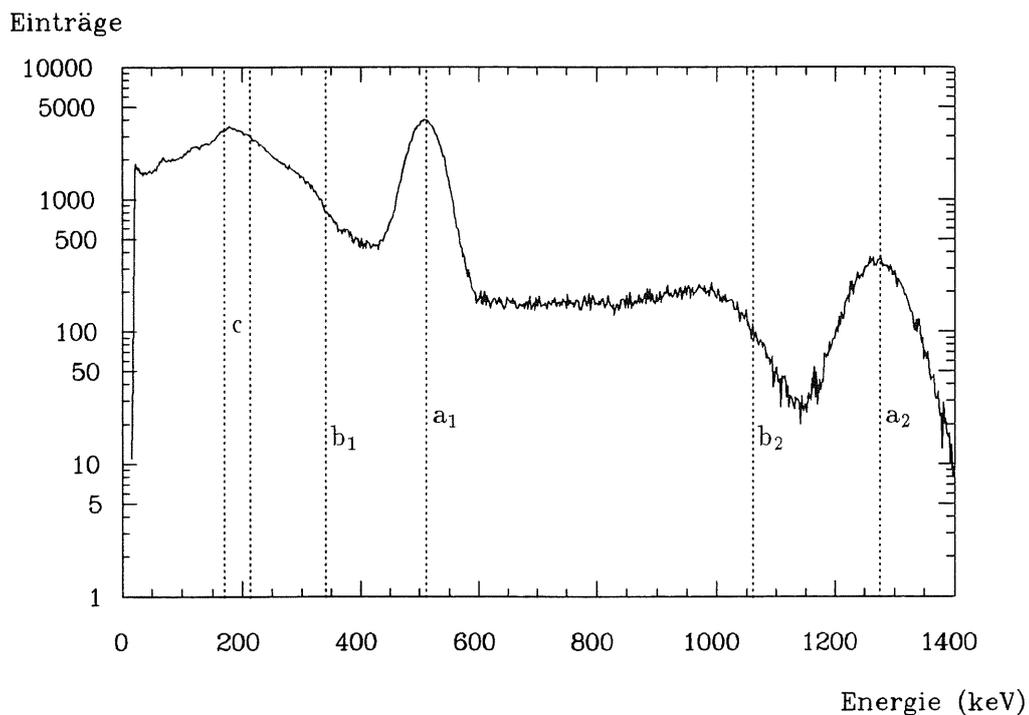


Abb. 4.3: Charakteristisches CsI(Tl)-Szintillationsspektrum von ^{22}Na in halblogarithmischer Darstellung, aufgenommen mit dem Valvo-Photomultiplier

a_1 und a_2 sind die Photopeaks bei 511 bzw. 1275 keV, b_1 und b_2 die zugehörigen Comptonkanten bei 341 bzw. 1062 keV und c kennzeichnet den Rückstreupeak als Überlagerung von 170 und 213 keV (siehe auch Tab. 3.2).

Dieselben Messungen wurden mit dem 16-stufigen Photomultiplier von Hamamatsu durchgeführt. Den hierzu verwendeten Standardspannungsteiler zeigt Abb. C.3 in Anhang C. Zunächst wurde dieser Spannungsteiler dahingehend modifiziert, daß nicht nur zwischen die letzten 6, sondern zwischen allen 16 Dynoden Kondensatoren geschaltet wurden, um den Ladungsverlust an allen Dynoden während der Pulsdauer auszugleichen [Kra 90]. Ein Schaltbild ist in Anhang C in Abb. C.3 dargestellt. Das Ergebnis der Messung im Vergleich zum Meßergebnis bei 6 Kondensatoren zeigt ebenfalls Abb. 4.4. Der Verlauf des Zählrateneffekts ohne bzw. mit dem auf diese Weise modifizierten Spannungsteiler zeigt, daß die Kondensatoren keinen Einfluß auf den Zählrateneffekt haben.

Als letzte Modifikation wurden auch bei diesem Photomultiplier die beiden letzten Dynoden (D 15 und D 16) mit separaten Spannungsquellen versorgt. Den hierzu verwendeten Spannungsteiler zeigt Abb. C.4 in Anhang C. Auch hier kann man keine Unterschiede zwischen den Messungen mit den verschiedenen Spannungsteilern erkennen (siehe Abb. 4.4). Der maximale Zählrateneffekt mit dem Photomultiplier von Hamamatsu ist gegenüber dem mit dem Valvo-Photomultiplier gemessenen Zählrateneffekt um einen Faktor 2 ausgeprägter. Dies liegt an der größeren Anzahl der Dynoden (16 gegenüber 10 Dynoden) und der damit verbundenen höheren Eigenverstärkung des Hamamatsu Photomultipliers.

Abschließend wurde bei gleichem Versuchsaufbau noch das Langzeitverhalten des Valvo-Photomultipliers mit dem durch separate Spannungsquellen modifizierten Spannungsteiler bei Zählratenänderung untersucht.

Die Zählrate und damit der Anodenstrom wurde auch hier durch Veränderung des Abstan-

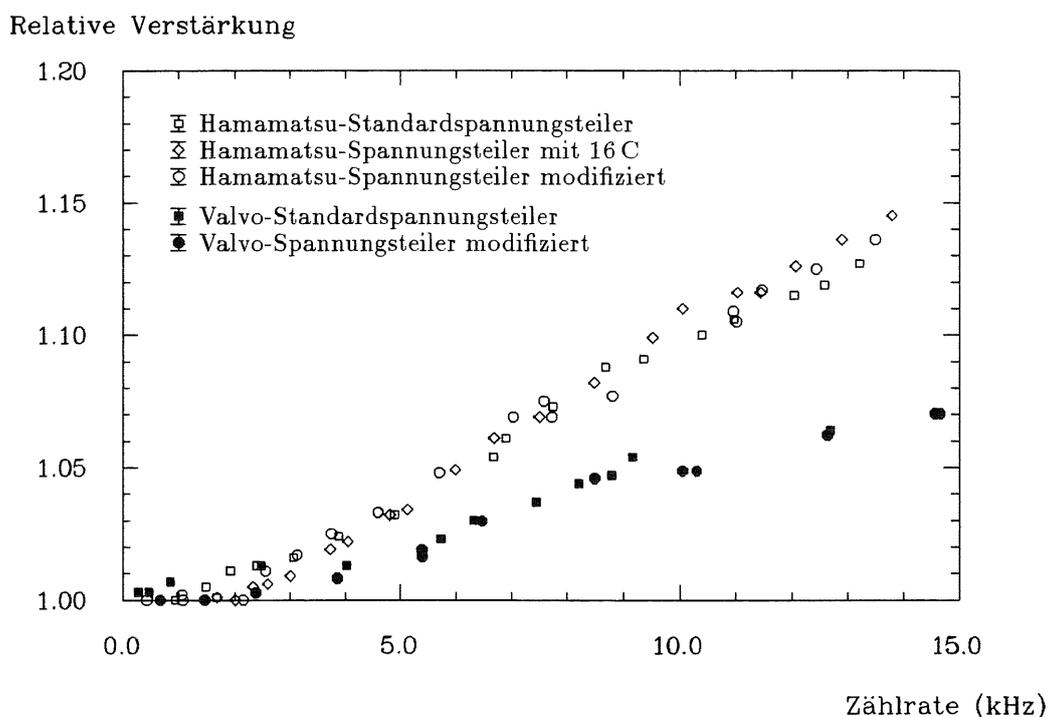


Abb. 4.4: **Zählrateneffekt gemessen mit verschiedenen Photomultipliern und Spannungsteilern**

Die offenen Symbole zeigen den Verlauf des Zählrateneffekts des Hamamatsu-Photomultipliers mit Transmissionsdynoden und die gefüllten Symbole den des Valvo-Photomultipliers mit Reflektionsdynoden. Die genauen Modifikationen der Spannungsteiler sind im Text beschrieben. Die Meßgenauigkeit betrug 0.3%. Der Nullpunkt der y-Achse wurde unterdrückt.

des zwischen γ -Quelle und Szintillator variiert und die resultierende Verstärkungsänderung durch Beobachtung des Maximums der 1275 keV γ -Linie gemessen. Abb. 4.5 zeigt die kontinuierlich im Stundenabstand über $1\frac{1}{2}$ Tage gemessene relative Verstärkung des Photomultipliers bezogen auf den Anfangswert. Nach ca. 6 Stunden wurde der Abstand zwischen dem Präparat und dem Szintillator vergrößert und damit die Zählrate und der Anodenstrom² verringert. Diese Verringerung führt zu einer sofortigen Abnahme der relativen Verstärkung von ca. 5%. Die nachfolgende langzeitliche Drift der Verstärkung deutet auf einen Erholungseffekt hin. Dieser Erholungseffekt zeigt zunächst einen Wiederanstieg der Verstärkung, die sich später auf einen konstanten Wert, der ca. 6% über dem Anfangswert liegt, einstellt. Die Zeitkonstante dieses Erholungseffektes ist sicherlich abhängig von der Zählratenänderung und beträgt bei dieser Messung ca. 13 Stunden. Bei [Nai 81] ist dieser Effekt ähnlich gemessen worden (siehe Abb. 4.6).

4.1.2 Meßaufbau und Durchführung zur Untersuchung des Zählrateneffekts mit einer LED

Um zu untersuchen, ob der oben beschriebene Effekt allein auf die Frequenz des Lichteinfalls auf die Photokathode oder auf die Gesamtbelastung zurückzuführen ist, wurde als

²Die Anodenströme wurden mit einem Elektrometer der Firma Keithley Instruments vom Typ 610 C gemessen

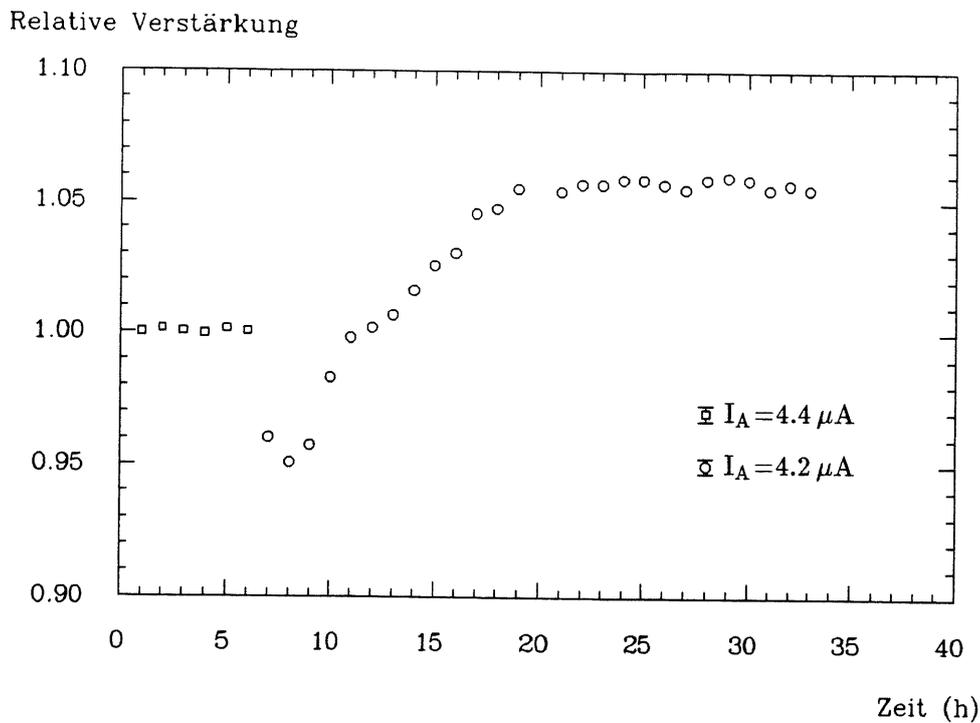


Abb. 4.5: Variation und Drift der relativen Verstärkung des Valvo-Photomultipliers XP 2011 B bei Veränderung der Zählrate

Nach 6 Stunden wurde die Zählrate durch Vergrößerung des Abstandes zwischen dem ^{22}Na -Präparat und dem CsI(Tl) -Kristall verringert. Der Anodenstrom I_A wurde mit einem Elektrometer gemessen.

Der Nullpunkt der y-Achse wurde unterdrückt.

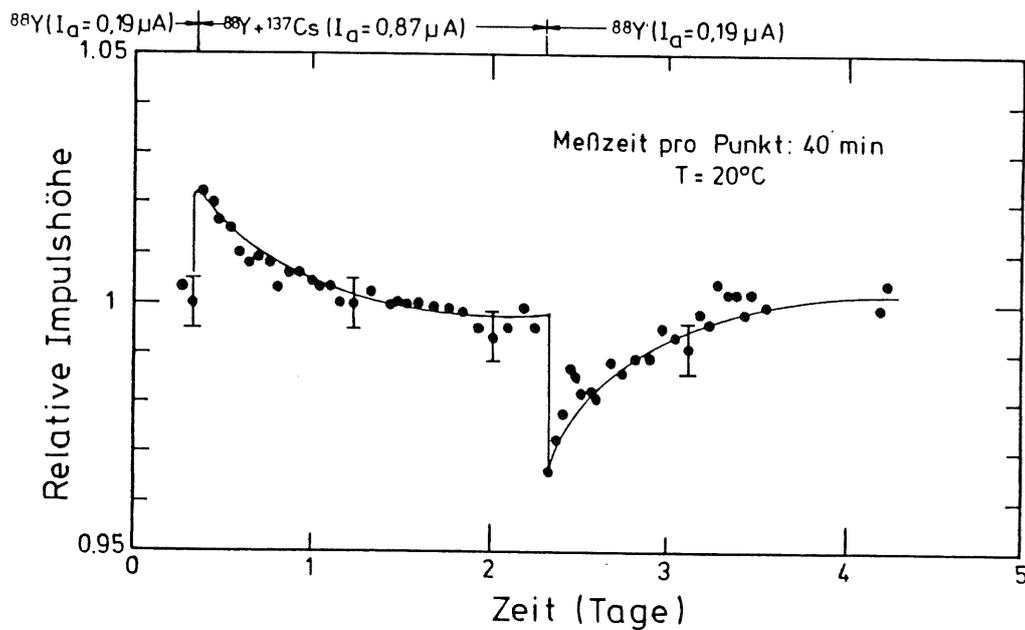


Abb. 4.6: Variation und Drift der relativen Verstärkung des Valvo-Photomultipliers XP 2041

(aus [Nai 81])

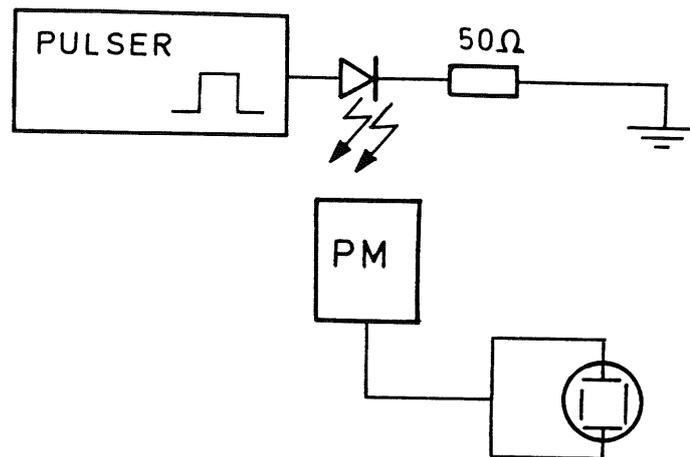


Abb. 4.7: **Meßaufbau zur Messung des Zählrateneffekts mit einer gepulsten LED**

Als Photomultiplier wurde der Valvo- und der Hamamatsu-Photomultiplier verwendet. Die verwendeten Spannungsteiler sind in den Abb. C.1 und C.3 in Anhang C dargestellt.

Lichtquelle eine an einen Pulsgenerator³ angeschlossene grüne LED verwendet, um Amplitude, Pulsbreite und Frequenz variieren zu können.

Den Messaufbau zeigt Abb. 4.7. Als Photomultiplier wurden sowohl der Valvo-Photomultiplier als auch der Hamamatsu-Photomultiplier verwendet. Das Licht der LED traf direkt auf die Photokathode.

Bei verschiedenen Amplituden und Pulsbreiten wurde jeweils die Frequenz variiert und die resultierende Verstärkungsschwankung des Photomultipliers am Oszillographen gemessen.

Eine quantitative Untersuchung des Anstiegs der Verstärkung bei steigender Zählrate oder steigender Pulsbreite war wegen eines hier beobachteten Erholungseffekts, durch den die ursprüngliche Verstärkung nach einigen Sekunden bis Minuten annähernd wieder eingestellt war, nicht möglich. Die Verstärkungsänderung ist also nicht proportional zur Frequenz- oder Pulsbreitenänderung, sondern abhängig von der vorherigen Belastung des Photomultipliers.

Deshalb kann mit dieser Methode nur das Eintreten der maximalen Verstärkung, also der Sättigung, untersucht werden.

Zunächst wurde die Verstärkungsänderung mit wachsender Frequenz ν der LED bei verschiedenen Pulsbreiten τ gemessen. Die maximale Verstärkung sollte, entsprechend den theoretischen Erwartungen nach Kap. 2.5.1, bei einem festen Anodenstrom auftreten, d.h. unabhängig von Tastverhältnis $T = \nu \cdot \tau$ und Pulshöhe sein, solange nur ihr Produkt als Maß für den Anodenstrom fest bleibt. Deshalb wurde jeweils die relative Verstärkung des Photomultipliers gegen das Produkt aus Tastverhältnis und Pulshöhe des Anodensignals

³Marke Philips PM 5770

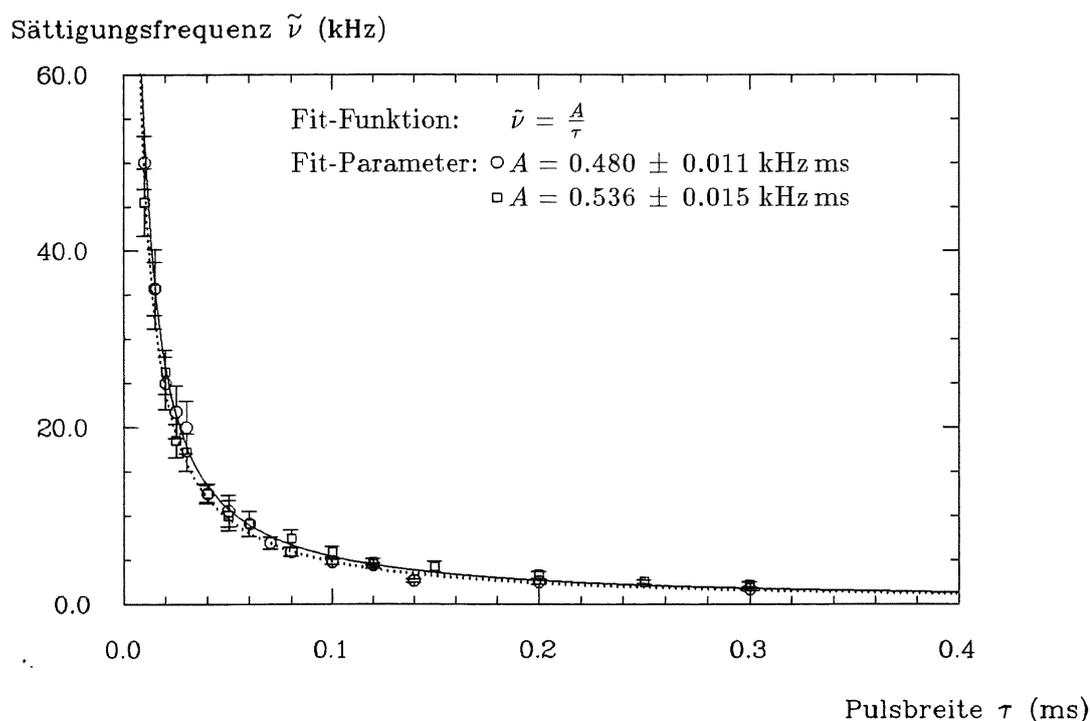


Abb. 4.8: **Sättigungsfrequenz als Funktion der Pulsbreite einer LED**

Mit dem Valvo-Photomultiplier wurde jeweils eine feste Pulsbreite eingestellt und die Frequenz verändert. Die Frequenz, bei der die Verstärkung des Photomultipliers maximal war (Sättigungsfrequenz), wurde gegen die eingestellt Pulsbreite aufgetragen.

aufgetragen. Dabei zeigte sich, daß die Sättigung nicht bei festem Anodenstrom eintrat.

Bei der in Abb. 4.8 dargestellten Messung wurde bei festen Pulsbreiten die Frequenz verändert und jeweils die Sättigungsfrequenz, also die Frequenz, bei der die Verstärkung des Photomultipliers maximal war (Sättigungsfrequenz), gegen die eingestellte Pulsbreite aufgetragen.

Bei wachsender Pulsbreite stieg die Verstärkung in 1. Näherung linear an und ging dann in die Sättigung über.

Die Funktion, die an die Meßwerte angepaßt wurde, lautet:

$$\tilde{\nu} = \frac{A}{\tau}$$

Die Kreise und die gepunktete Linie in Abb. 4.8 zeigen diese Messung. Die Funktion beschreibt den Verlauf der Meßpunkte gut.

In einer zweiten Meßreihe wurde, um den Anstieg der Pulshöhe bei wachsender Pulsbreite auszugleichen, die Amplitude am Pulser nach Einstellung der Pulsbreite so weit heruntergeregelt, daß die Pulshöhe des Photomultipliers zu Beginn jeder Messung gleich war. An diese Meßpunkte wurde ebenfalls die oben genannte Funktion angepaßt. Die Quadrate und die durchgezogene Linie in Abb. 4.8 zeigen, das auch hier die Übereinstimmung gut ist. Die Sättigung der Photomultiplerverstärkung tritt also offensichtlich nicht bei gleicher Belastung, sondern bei gleichem Tastverhältnis ein.

Die Messungen wurden mit dem Hamamatsu-Photomultiplier wiederholt, wobei sich keine anderen Ergebnisse ergaben.

4.1.3 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden Messungen beschrieben, mit denen durch Vergrößerung der Zählrate hervorgerufene Verstärkungserhöhungen des Szintillationszählers untersucht wurden.

Die Ergebnisse der Messungen sind:

- Der hier gemessene Zählrateneffekt konnte nicht mit einfachen Veränderungen der Elektronik, d.h. mit den hier dargestellten Modifikationen an den Spannungsteilern, verhindert werden.
Ein Unterschied des Zählratenverhaltens bei Messungen mit dem Valvo-Photomultiplier mit Reflexionsdynoden und dem Hamamatsu-Photomultiplier mit Transmissionsdynoden wurde nicht festgestellt.
- Bei Langzeit-Beobachtung der Verstärkung nach einer einmaligen Verringerung der Zählrate und damit des Anodenstroms zeigte sich, daß sich nach der Verstärkungsänderung ein Erholungseffekt einstellt. Die Zeitkonstante dieses Effektes liegt bei ca. 13 Stunden.
- Die Messungen des Zählrateneffekts mit der LED zeigten, daß die Verstärkung des Photomultipliers bei einem konstanten Tastverhältnis unabhängig von der Pulshöhe abfällt.

4.2 Die Stabilisierungseinheit

Weil das Monitorsystem mit einer Stabilität von 0.2% über einen langen Zeitraum arbeiten soll, muß für das Referenzsystem während eines Monitorlaufes eine bessere Stabilität vorausgesetzt werden.

Da das Hauptreferenzsystem 1 mit dem Photomultiplier durch einen möglichen Zählrateneffekt in seiner Stabilität beeinträchtigt werden kann, ist der Einsatz einer Stabilisierungseinheit für den Photomultiplier sinnvoll. Diese Stabilisierungseinheit⁴ soll es ermöglichen, den Referenzphotomultiplier auch bei Zählratenänderungen stabil zu halten und gleichzeitig Temperatureffekte zu korrigieren.

In diesem Kapitel soll nach einer Beschreibung des Stabilisators und dessen Justierung die damit erzielte Stabilität des Referenzphotomultipliers dargestellt werden.

4.2.1 Beschreibung der Regelkreise

Die Stabilisierungseinheit arbeitet mit einer Referenzlichtquelle und einer on-line Gegenregelung der Photomultiplier-Hochspannung. Sie enthält einen Regelkreis für den Photomultiplier, in dem als Referenz eine gepulste grüne LED⁵ verwendet wird. Das von der LED in dem Photomultiplier erzeugte Anodensignal wird mit einem vom LED-Pulser erzeugten Signal verglichen, so daß eine Vergrößerung bzw. Verkleinerung des vom Photomultiplier verstärkten LED-Signals zu einer Verkleinerung bzw. Vergrößerung der am Spannungsteiler anliegenden Hochspannung führt. Ein zweiter Regelkreis hält die Lichtstärke der besonders temperaturempfindlichen LED konstant. Dieser Regelkreis enthält als Referenz eine sehr temperaturstabile pin-Photodiode⁶.

⁴ Am I. Institut für Experimentalphysik in Hamburg entwickelt [Nai81,Hol83].

⁵ ED 209 G, European Electronic Products, California, USA.

⁶ HP 5082-4207, Hewlett-Packard, California, USA.

Ein schematisches Schaltbild der beiden Regelkreise ist in Abb. 4.9 dargestellt.

Die LED wird von einem Pulsgenerator mit einer Frequenz von 70 Hz, einer Pulsbreite von 100 ns und einer regulierbaren Amplitude zwischen 1 und 20 V gepulst.

Im Photodioden-Regelkreis wird das von der LED in der pin-Photodiode erzeugte Signal in drei Verstärkerstufen verstärkt. Im Komparator wird das analoge Ausgangssignal der Verstärkerkette mit einer eingestellten Diskriminatorschwelle verglichen, die durch eine stabilisierte Spannungsquelle erzeugt wird und mit einem Potentiometer eingestellt werden kann.

Durch den Vergleich des Analogsignals mit einem Zeitsignal des LED-Pulsers können Weite und Verzögerung des Zeitsignals so eingestellt werden, daß es das Maximum des Analogsignals sicher überdeckt. Das Ausgangssignal des Diskriminators wird durch das so eingestellte Zeitsignal in der Logik abgefragt. Die logischen Signale werden dem Integrator zugeführt, dessen Ausgangsspannung die Betriebsspannung (1-20 V) für den LED-Pulser bestimmt.

Der Regelkreis für den Photomultiplier arbeitet prinzipiell in der gleichen Weise. Hier wird aber das Integratorsignal in einem DC-Verstärker so weit verstärkt, daß die an dem DC-Verstärkerausgang angeschlossene Erdpotentialseite eines Hochspannungsgerätes⁷ im Bereich ± 40 V variiert werden kann. Diese ± 40 V werden zur Hochspannung des Photomultipliers addiert und somit dessen Verstärkung auf den Sollwert gebracht.

4.2.2 Aufbau und Justierung der Stabilisierungseinheit

Für die Messungen mit der Stabilisatoreinheit stand der in Kap. 3.2.2 beschriebene CsI-Kristall zur Verfügung, der mit optischem Fett auf die Photomultiplerröhre aufgebracht wurde. Den Meßaufbau zeigt Abb. 4.10. Photomultiplier und Kristall wurden so in ein spezielles Gehäuse eingebaut, das eine mechanische Verschiebung zwischen CsI-Kristall und Photomultiplier nicht möglich war. An dieses Gehäuse konnte sowohl eine Quarzglasfaser als auch das Gehäuse für die LED und die Photodiode des Stabilisators angebracht werden. Der Kontakt zwischen dem Photomultipliergehäuse und dem Gehäuse der LED und Photodiode wurde so hergestellt, daß das Licht der LED sowohl direkt über einen SMA-Stecker auf den CsI-Kristall als auch direkt auf die Photodiode des Stabilisators gelangen konnte. Das Laserlicht aus der Referenzfaser, die ebenfalls über einen SMA-Stecker an den CsI-Kristall gekoppelt ist, wird durch ein Filter zwischen SMA-Stecker und CsI-Kristall geschickt und kann so für Linearitätstest abgeschwächt werden. Die Lage der LED relativ zum Szintillator muß stabil sein, was durch eine besondere Halterung des Diodengehäuses gewährleistet wurde.

Für die Testmessungen wurde die LED so positioniert, daß die Höhe der LED-Signale im Bereich der von den γ -Quanten des ²²Na-Präparats im CsI-Kristall erzeugten Signale liegt. Die Datenaufnahme erfolgte mit einem PC-Vielkanal⁸, der Signale im Bereich von 0 bis 8 V digitalisiert und verarbeitet. Das Anodensignal des Photomultipliers wird zunächst in einem Ortec 572 Verstärker ca. 10 fach verstärkt und dann in einem Ortec 442 Stretcher auf 2 μ s gedehnt.

Für die Funktion der Stabilisatoreinheit muß das Antwortsignal des Photomultipliers auf das LED-Signal eine Pulshöhe von ca. 2.5 V haben. Dies kann sowohl durch die Positionierung der LED relativ zum CsI-Kristall, als auch durch die Verstärkung erreicht werden. Die γ -Quellensignale des Photomultipliers bestimmen zusätzlich die Verstärkungseinstellung. Das verstärkte und gestretzte Photomultipliersignal wird verzweigt und sowohl in die Stabilisatoreinheit, als auch auf den ADC des PC-Vielkanals gegeben. Der Vor-

⁷NU 1375 B, Nucletron

⁸Es handelt sich um ein IBM-AT, der mit einer Wilkinson-ADC-Karte mit 100 MHz Taktfrequenz und einem Vielkanalprogramm der Firma Nucleus Inc. ausgestattet ist.

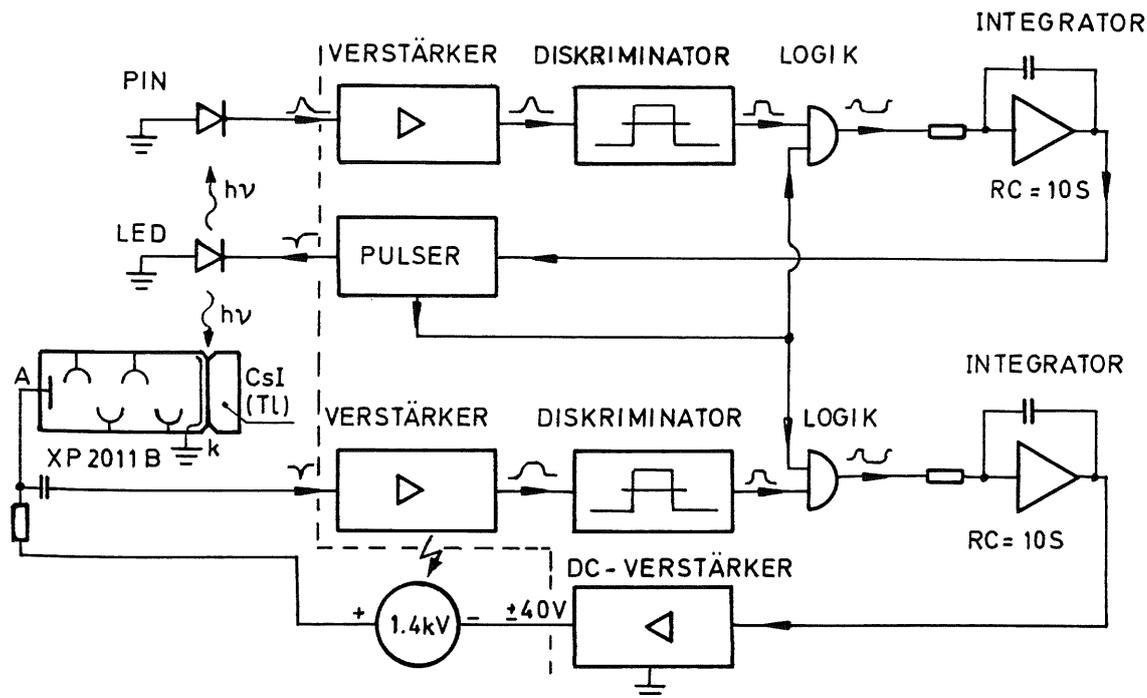


Abb. 4.9: Schematisches Schaltbild der Stabilisator-Regelkreise
(nach [Nai 83])

teil dieser Schaltung ist, daß die durch die Folgeelektronik, d.h. Verstärker und Stretcher, hervorgerufenen Schwankungen von dem Stabilisator ebenfalls erkannt und stabilisiert werden.

Mit diesem Aufbau wurden die beschriebenen Messungen des Zählrateneffekts mit γ -Quellen wiederholt. Die Zählrate wurde auch hier von einigen Hundert Hz bis 15 kHz vergrößert, in dem der Abstand zwischen dem ^{22}Na -Präparat und dem CsI(Tl)-Kristall verringert wurde. Eine graphische Darstellung des Ergebnisses der relativen Verstärkungsänderung der 1275 keV γ -Linie im Vergleich zu den entsprechenden Meßergebnissen mit dem gleichen Photomultiplier ohne Stabilisator zeigt Abb. 4.11. Die mit dem Stabilisator gemessenen Schwankungen liegen bei ca. 0.3% und damit im Bereich der Meßgenauigkeit. Für Zählraten über 10 kHz ist die relative Verstärkungsänderung mit dem Stabilisator ca. 20 mal kleiner als bei der Messung ohne Stabilisator.

Um die Langzeit-Stabilität dieses Meßaufbaus zu untersuchen, wurden über 7 Tage im Abstand von 2 Stunden ^{22}Na -Spektren mit dem PC-Vielkanal aufgenommen. Die Dauer der Einzelmessungen betrug 600 s, was bei einer Zählrate der 1275 keV-Linie von 10 Hz und einem σ dieses Photopeaks von 3.8% einer Meßgenauigkeit von ca. 0.05% entspricht. Zur Bestimmung der Peakmaxima wurde bei den Messungen mit dem PC-Vielkanal ein im Vielkanalprogramm enthaltenes Programm zur Berechnung des Peak Schwerpunktes verwendet.

Abb. 4.12 a) zeigt die graphische Darstellung des Ergebnisses der Langzeitmessung. Aufgetragen sind die Lage der 1275 keV-Photolinie und des LED-Spektrums normiert auf

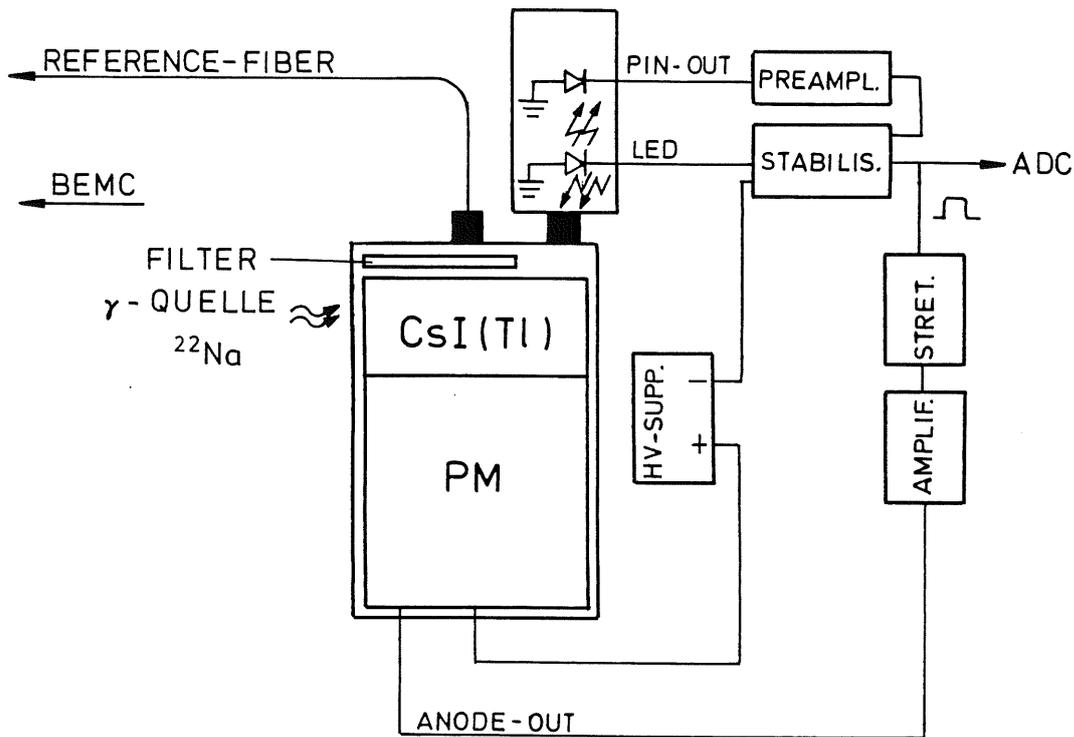


Abb. 4.10: Meßaufbau mit dem Stabilisator

den jeweiligen Anfangswert. Man kann erkennen, daß die Lage des LED-Peaks im Bereich von 0.1% stabil ist und die 1275 keV-Photolinie große Änderungen in der relativen Verstärkung zeigt. Der Verlauf der relativen Verstärkung der 1275 keV-Linie zeigt zwei Charakteristiken. Bis ca. 44 Stunden ist eine relativ geringe Abnahme der relativen Verstärkung um ca. 0.4% zu erkennen und die weiteren Meßwerte zeigen dann eine weit größere Verstärkungsabnahme bis 2% bei 150 Stunden und ebenfalls stärkere Fluktuationen der Einzelmessungen. Temperatureffekte, die eine 24stündige Struktur in den Meßwerten wiedergeben sollten, können zur Erklärung dieses Langzeitverhaltens ausgeschlossen werden.

Der unterschiedliche Verlauf der relativen Verstärkung vor und nach dem Meßwert bei 44 Stunden und die abrupte Verstärkungsabnahme von 1% im Grenzbereich sind auf einen Stromausfall zu diesem Zeitpunkt während der Langzeitmessung zurückzuführen. Die starke Drift zu einer geringeren relativen Verstärkung kann allerdings nur mit Instabilitäten der pin-Photodiode des Stabilisators oder der ihr folgenden Elektronik erklärt werden. Die pin-Photodiode ist als Referenz ausgelegt und soll auf 0.25% genau arbeiten [Hol 83]. Ist sie instabil, so regelt der Stabilisator die Intensität der LED entsprechend dieser Instabilität nach. Im zweiten Regelkreis wird dann die Hochspannung des Photomultipliers so geregelt, daß sich das Verhältnis des Peakmaximums der LED zum Peakmaximum der 1275 keV-Photolinie ändert. An der Stabilität der LED-Signale kann man

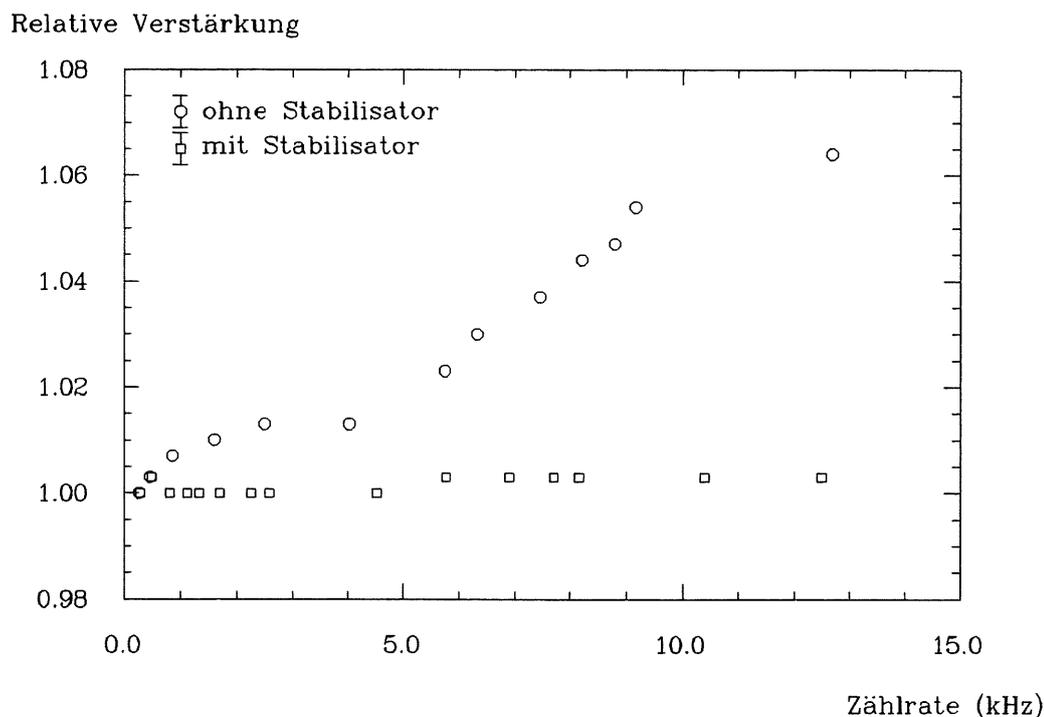


Abb. 4.11: **Zählrateneffekt mit und ohne Stabilisator**

Die Messungen wurden mit dem Valvo-Photomultiplier durchgeführt. Die Meßgenauigkeit betrug 0.3%. Der Nullpunkt der y-Achse wurde unterdrückt.

somit erkennen, daß der Photomultiplierregelkreis stabil arbeitet. Hierin sollte also nicht die Ursache der starken Schwankungen in der relativen Verstärkung zu sehen sein.

Da für das Referenzsystem des BEMC ein solches Langzeitergebnis untragbar ist, wurde zunächst untersucht, ob es sich bei diesem Ergebnis um eine Eigenschaft der verwendeten pin-Photodiode handelt. Hierzu wurde die Messung mit einer pin-Photodiode des Typs BPW 43 von Telefunken wiederholt. Abb. 4.12 b) zeigt das Ergebnis dieser Messungen. Für die Stabilisator-LED ergeben sich keine Änderungen in der relativen Verstärkung. Die geringen Schwankungen von 0.05% sind durch die Meßgenauigkeit bestimmt. Die Schwankungen in der relativen Verstärkung der 1275 keV-Photolinie entsprechen denen der Messung mit der HP-Photodiode. Allerdings sind hier im Anfangszeitraum bis ca. 60 Stunden größere Fluktuationen als im weiteren Meßverlauf festzustellen. Insgesamt stellt sich die relative Verstärkung nach 60 Stunden auf einen Wert der 0.9% unter dem Anfangswert liegt ein, wobei die Schwankungen um diesen Wert bei 0.5% liegen. Für den Bereich bis 60 Stunden können auch hier Temperaturschwankungen als Ursache für diese Instabilitäten ausgeschlossen werden. Die folgenden Meßwerte lassen dagegen eine 24-stündige Struktur erkennen, die ein Indiz für Temperatureffekte ist.

Eine weitere Veränderung des Stabilisatoraufbaus wurde vorgenommen, indem der Vorverstärker der pin-Photodiode ausgewechselt wurde. Der für den Einsatz des Stabilisators verwendete modifizierte Vorverstärker, der eine konstante Biasspannung für die pin-Photodiode liefert, wurde zusätzlich dahingehend verändert, daß die Biasspannung von einem externen Versorgungsgerät⁹ angelegt werden konnte.

⁹Ortec 427

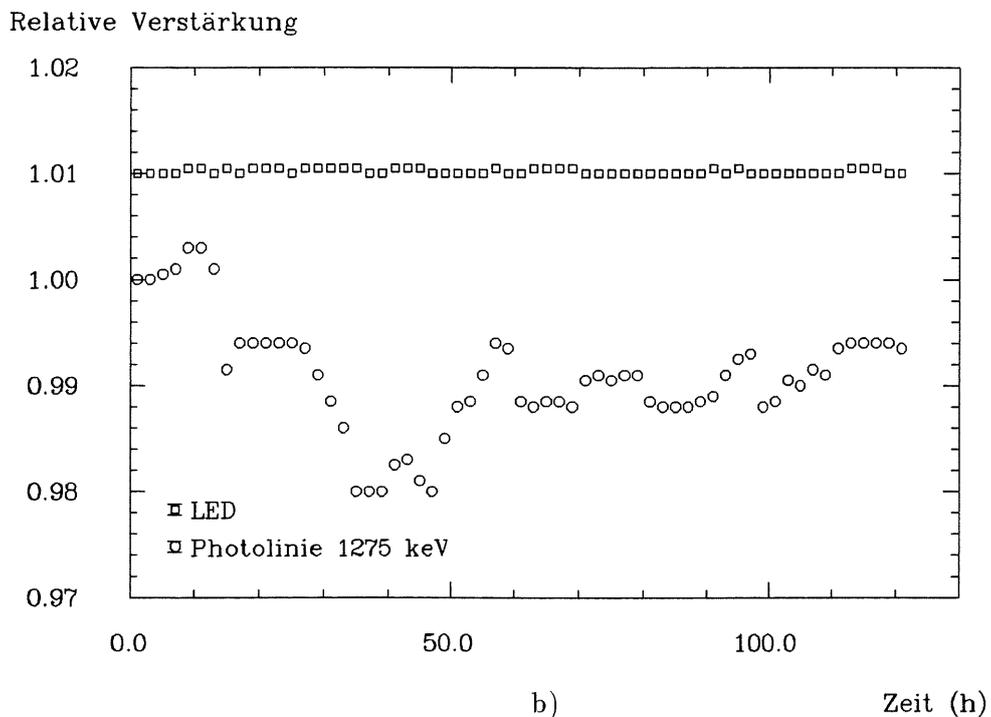
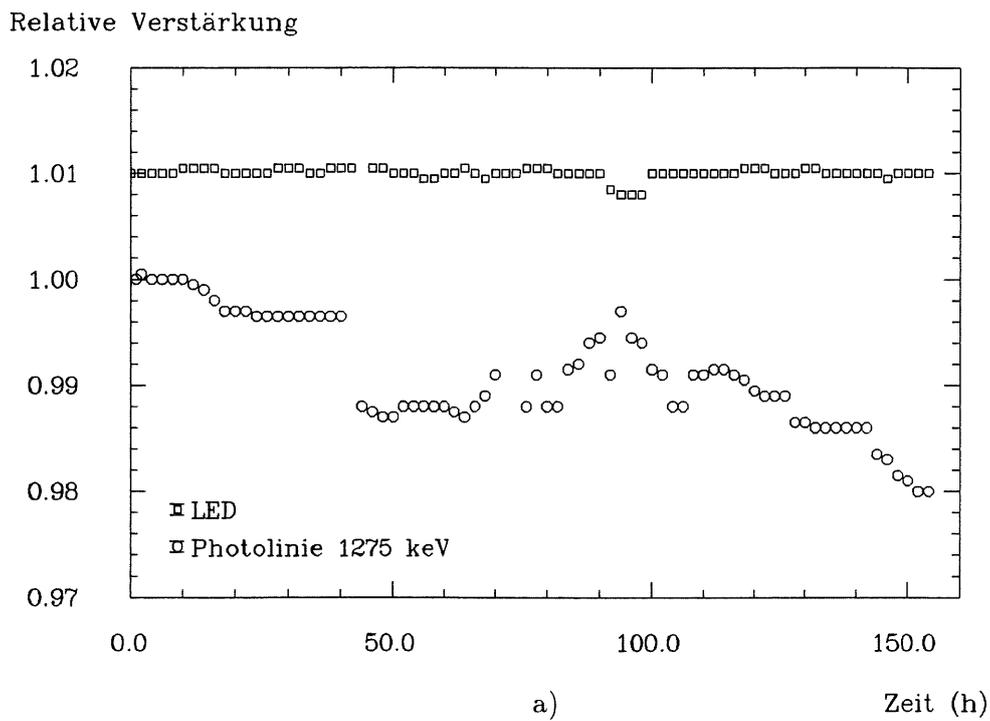
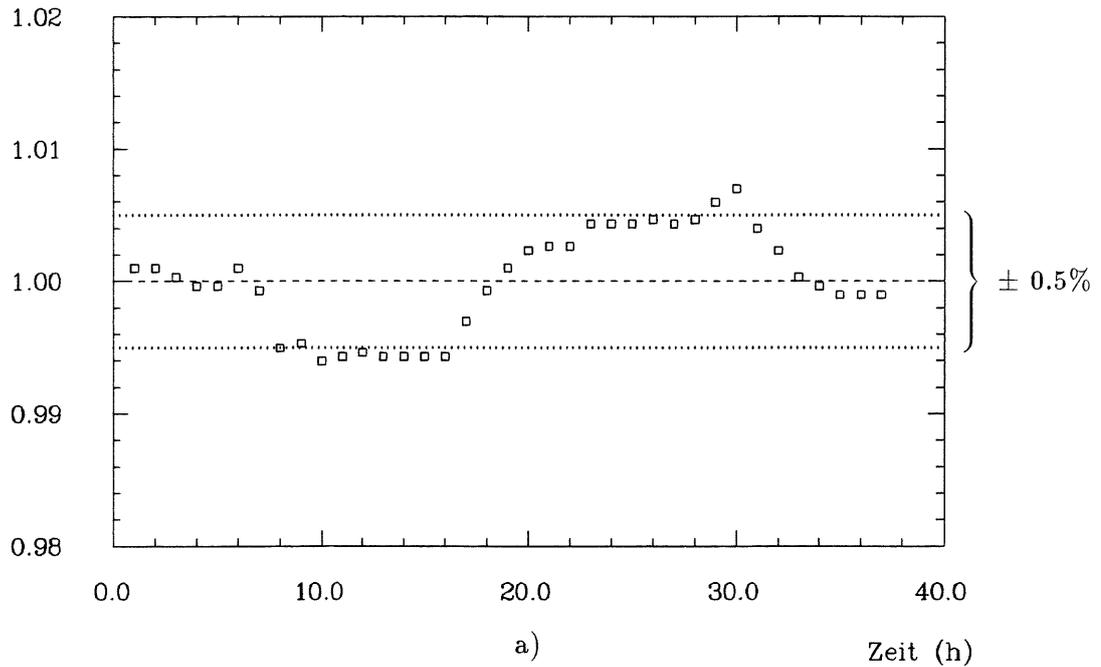


Abb. 4.12: Langzeittest mit dem alten Stabilisator und den pin-Photodioden HP 5082-4207 (a) und BPW 43 (b)

Die Meßgenauigkeit betrug 0.05%. Der Nullpunkt der y-Achse wurde unterdrückt.

Die LED-Peaks wurden separat auf den Anfangswert normiert und willkürlich bei einer relativen Verstärkung von 1.01 eingezeichnet.

Relative Verstärkung



Relative Verstärkung

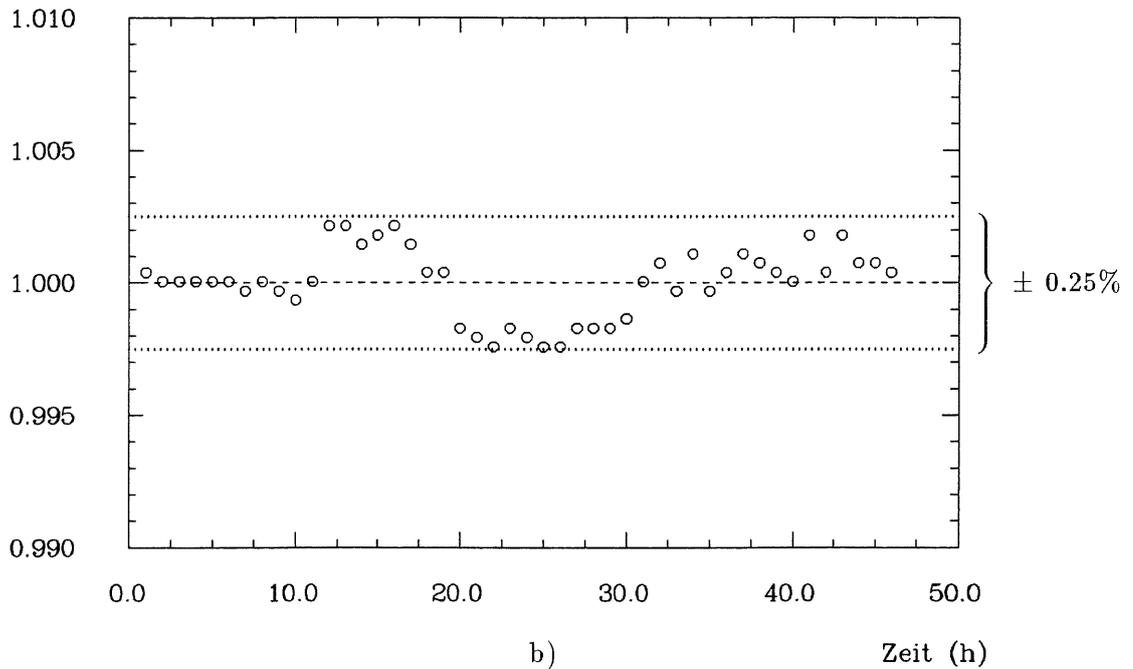


Abb. 4.13: Langzeittest anhand der 1275 keV Photolinie mit dem neuen Stabilisator und den pin-Photodioden BPW 43 (a) und HP 5082-4207 (b)

Die Meßwerte wurden auf den Mittelwert normiert. Die Meßgenauigkeit betrug 0.05%. Der Nullpunkt der y-Achse wurde unterdrückt.

Auf diese Weise kann die Biasspannung optimal eingestellt werden. Es wurde gemäß der Vorgabe aus dem Datenblatt 10 V angelegt. Als Ergebnis dieser Messung wurden ebenfalls Schwankungen von $\approx 1\%$ festgestellt. Auf die graphische Darstellung dieses Ergebnisses wurde hier verzichtet.

Schließlich wurde ein anderer Stabilisator verwendet und die gleiche Messung mit der pin-Photodiode BPW 43 über einen kürzeren Zeitraum von ca. 40 Stunden wiederholt. Das Ergebnis der Messungen normiert auf den Mittelwert zeigt Abb. 4.13 a). Hier ist nur die Schwankung der 1275 keV-Photolinie dargestellt. Auch bei dieser Messung blieb die Lage der LED-Linie im Bereich der Meßgenauigkeit ($\approx 0.05\%$) stabil. Die Meßpunkte der 1275 keV-Photolinie weisen Schwankungen von $\approx 0.5\%$ auf und deuten auf eine Struktur mit einem 24-stündigem Rhythmus hin, der ebenfalls auf einen Temperatureffekt schließen läßt.

Durch den Einbau eines neuen Stabilisators haben sich deutlich geringere Schwankungen der relativen Verstärkung ergeben. Außerdem ist über diesen Zeitraum keine Drift zu geringeren Verstärkungen vorhanden. Dies deutet darauf hin, daß der bei den ersten Messungen verwendete Stabilisator defekt war.

Um mögliche Temperaturschwankungen zu verringern, wurde die temperaturunempfindlichere pin-Photodiode HP 5082-4207 wieder eingebaut. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abb. 4.13 b) dargestellt. Über ca. 50 Stunden wurde eine Stabilität besser als 0.25% gemessen.

Um ein Maß für die Stabilität dieses Meßaufbaus für den Zeitraum eines Monitorlaufs, also bei Durchführung von Linearitätstests von ca. 1 Stunde, zu erhalten, wurden dieselben Messungen im Abstand von 15 min durchgeführt. Bei einer Meßdauer der Einzelmessungen von 300 s wurde eine Meßgenauigkeit von 0.07% erreicht. Innerhalb dieser Meßgenauigkeit wurden keine Schwankungen registriert.

4.2.3 Verbesserung des Photomultiplierverhaltens durch Stabilisation

Die angestrebte Stabilität des Referenzphotomultipliers von 0.25% über einen Zeitraum, der groß ist gegen die Dauer eines Monitorlaufs, und von 0.1% über die Dauer eines Monitorlaufs konnten mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Meßaufbau realisiert werden. Für die Langzeitstabilität wurde auch die durch die Stabilität der pin-Photodiode begrenzte maximale Konstanz der Stabilisierungseinheit von 0.25% erreicht.

Da die Elektronik zur Weiterverarbeitung der Anodensignale des Photomultipliers vor den Stabilisator geschaltet wurde, konnten mögliche Schwankungen dieser Elektronik ebenfalls stabilisiert werden.

Dieser Meßaufbau kann beim Referenzsystem für das BEMC zum Einsatz kommen. Die Erfahrungen mit dem Stabilisator haben gezeigt, daß eine besondere Wartung (z.B. Nachregeln der Diskriminatorschwelle) nicht erforderlich ist.

4.3 Simulationsmessung von Monitorläufen

In den abschließenden Messungen sollten Monitorläufe simuliert werden.

Der dazu verwendete Meßaufbau und die Ergebnisse sollen in diesem Kapitel beschrieben werden. Um die Stabilität eines simulierten "BEMC-Moduls" mit diesen Messungen untersuchen zu können, muß zunächst für eine möglichst spannungsfreie Verlegung der verwendeten Fasern gesorgt werden, da nur dann eine Stabilität der Fasertransmissi-

onseigenschaften von 0.2% erreicht werden kann (siehe Kapitel 3.2). Schwankungen der Referenzsysteme $>0.1\%$ sind während eines Simulationslaufes nicht zu erwarten.

4.3.1 Der Meßaufbau

Da ein Kalorimetermodul für diese Messungen nicht zur Verfügung stand, wurde es durch eine einfache Meßanordnung simuliert, in der eine auch in den Kalorimetermodulen verwendete Photodiode mit einem SCSN 38-Szintillator versehen und an einen Vorverstärker vom Typ Canberra 2003 BT angeschlossen wurde. Als Hauptverstärker wurde ein Emetron-Verstärker vom Typ e.m. 1003 verwendet. Die Signale wurden mit einem Canberra-Stretcher 1454 auf $2\mu\text{s}$ verlängert. Im Unterschied zum Kalorimetermodul wurde das vom Laser im SCSN 38 erzeugte Szintillationslicht hier nicht über einen Wellenlängenschieber mit einer Photodiode, sondern von der Photodiode direkt ausgelesen. Die spektrale Empfindlichkeit der Photodioden ist zwar im Wellenlängenbereich des vom Szintillator emittierten Lichts nicht optimal, die Stabilität des Lichtauslesesystems wird dadurch aber nicht beeinträchtigt.

Damit die Meßanordnung gerade an dem kritischen Punkt der Verteilung des Laserlichts auf die verschiedenen Fasern ähnlich dem späteren Aufbau am BEMC ist, wurde mit einem der Faserbündel gemessen, die später an die Kalorimetermodule installiert werden sollen. Das Laserlicht wurde über die in Kapitel 3.1.2 beschriebene Optik zum Faserbündel ("rot") geleitet. Die beiden für die Hauptreferenzsysteme vorgesehenen Fasern des Faserbündels, die mit SMA-Steckern versehen sind, wurden über ein Verbindungsstück mit 5 m langen Fasern eines Kerndurchmessers von $600\mu\text{m}$ verbunden. Diese "Referenzfasern" sind an ihren Enden ebenfalls mit SMA-Steckern versehen, so daß sie an die beiden Hauptreferenzsysteme gekoppelt werden können. Als Hauptreferenzsystem 1 (stabilisierter Photomultiplier) diente der in Kapitel 4.2 beschriebene Meßaufbau, der Aufbau des Hauptreferenzsystems 2 (Photodiodensystem) ist in Kapitel 3.2.3 dargestellt.

Dieser Meßaufbau unterscheidet sich also in fünf Punkten von dem endgültigen Aufbau des Monitorystems am BEMC:

- Statt eines Kalorimetermoduls wurde hier ein einfacher Aufbau aus SCSN 38 Szintillator, Photodiode und Vorverstärker verwendet.
- Die Referenzfasern sind nur 5 m statt im Experiment 17 m lang.
- Die Primärfaser ist eine einfache Faser von 5 m Länge mit einem Kerndurchmesser von $200\mu\text{m}$, im Gegensatz zur eigentlichen Primärfaser, die 17 m lang ist und einen Kerndurchmesser von $1000\mu\text{m}$ hat.
- Es wurde nur mit einem Lichtweg, also einem Faserbündel gemessen.
- Die Fixierung der Fasern ist provisorisch.

Trotz dieser fünf Punkte wird erwartet, daß der Modellversuch bereits über die Funktionsfähigkeit des Monitorprinzips gemäß Kapitel 3.1.1 Auskunft geben kann. Der in Kapitel 3.1.1 genannte Ausdruck

$$MON_{BEMC}(\tau) = \frac{L_{BEMC}(\tau)}{L_{ref1,2}(\tau)} \cdot \langle p_{ref1,2\gamma}(\tau) \rangle$$

ist durch die Korrektur des Quotienten aus der Antwort des "BEMC-Moduls" L_{BEMC} und der Referenzsysteme $L_{ref1,2}$ auf die Lasersignale mit den Quellensignalen des jeweiligen Referenzsystems $p_{ref1,2\gamma}$ unabhängig von langfristigen Schwankungen der Referenzsysteme.

4.3.2 Durchführung der Messungen

Da die Meßdaten aus den drei Detektoren, d.h. "BEMC-Modul" und beide Referenzsysteme, gleichzeitig aufgenommen werden müssen, wurden diese Messungen mit dem Vielkanalanalysator Nuklear Data 4420 vorgenommen, der über acht ADCs verfügt. Zur Überwachung der relativen Konstanz der Systeme untereinander wurden mit Hilfe eines Kalkulationsprogramms die Quotienten der in den Detektoren registrierten koinzidenten Lasersignale ereignisweise berechnet (siehe dazu auch Kapitel 3.2). Korrelierte Schwankungen der beiden Terme

$$\left\langle \frac{L_{BEMC}}{L_{ref1}} \right\rangle \cdot \langle p_{ref1} \rangle$$

$$\left\langle \frac{L_{BEMC}}{L_{ref2}} \right\rangle \cdot \langle p_{ref2} \rangle$$

L_{ref1}	=	Laserpuls registriert im Hauptreferenzsystem 1
L_{ref2}	=	Laserpuls registriert im Hauptreferenzsystem 2
L_{BEMC}	=	Laserpuls registriert im simulierten BEMC-Modul
p_{ref1}	=	Kalibrationssignale (1275 keV-Linie) im Hauptreferenzsystem 1
p_{ref2}	=	Kalibrationssignale (88 keV-Linie) im Hauptreferenzsystem 2

lassen auf eine Instabilität des simulierten "BEMC-Moduls" schließen. Die eckigen Klammern deuten eine geeignete Mittelwertbildung zur Bestimmung der Quotienten- und Photolinienmaxima an.

Abb 4.14 a) zeigt ein Photomultiplierspektrum mit dem γ -Quellensignal, dem LED-Peak der Stabilisatoreinheit und dem Laserspektrum. In Abb 4.14 b) ist der Quotient aus den im Hauptreferenzsystem 1 und im "BEMC-Modul" registrierten Laserpuls dargestellt. Die gleichen Spektren sind in Abb. 4.15 a) und 4.15 b) für das Hauptreferenzsystem 2 dargestellt. Die Meßzeit pro Spektrum betrug jeweils 600 s. Die Abb. 4.16 a) und 4.16 b) zeigen den Verlauf der mit $\langle p_{ref} \rangle$ korrigierten Quotientenmaxima. Eine korrelierte Schwankung der beiden Quotientenwerte ist zu erkennen, allerdings sind die Schwankungen im Hauptreferenzsystem 2 um den Faktor 2 größer.

Aus technischen Gründen mußte auf das Fitten der Spektren verzichtet werden. Daher ist die Genauigkeit bei der Bestimmung der Quotienten- und Photolinienmaxima durch die Ablesegenauigkeit am ADC-Monitor begrenzt. Der durch die Ablesegenauigkeit von einem Kanal bedingte Fehler ist bei der Berechnung der obigen Ausdrücke für beide Referenzsysteme $\left\langle \frac{L_{BEMC}}{L_{ref1,2}} \right\rangle \cdot \langle p_{ref1,2} \rangle$ nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zu berücksichtigen und liegt jeweils bei 0.22%.

Nach den oben genannten Voraussetzungen für die Stabilität der einzelnen Komponenten sollte die Schwankung des einen Quotienten von der Schwankung des anderen Quotienten nur um die Instabilität der Fasertransmissionseigenschaften, also 0.2% abweichen. Bei einer Meßgenauigkeit von 0.22% sollte keine unkorrelierte Schwankung eines der Quotienten zu beobachten sein. Die größte Abweichung der Messungen mit den beiden Hauptreferenzsystemen liegt jedoch bei 0.55%.

4.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Das Ergebnis der unterschiedlichen Schwankungen der beiden hier gemessenen Quotienten zeigt, daß zusätzliche Instabilitäten während der Messungen aufgetreten sind. Eine mögliche Ursache dafür ist eine größere Instabilität der Transmissionseigenschaften, als sie in den obigen Voraussetzungen aufgrund vorheriger Messungen angenommen wurden, obwohl bei der Installation der Fasern auf spannungsfreie Verlegung geachtet wurde.

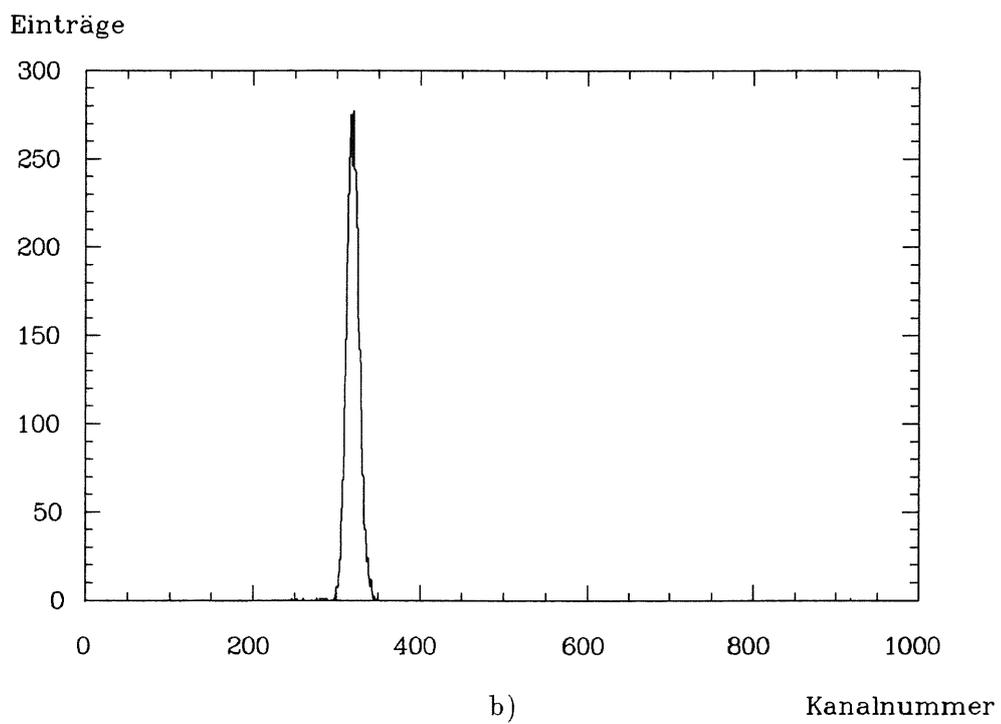
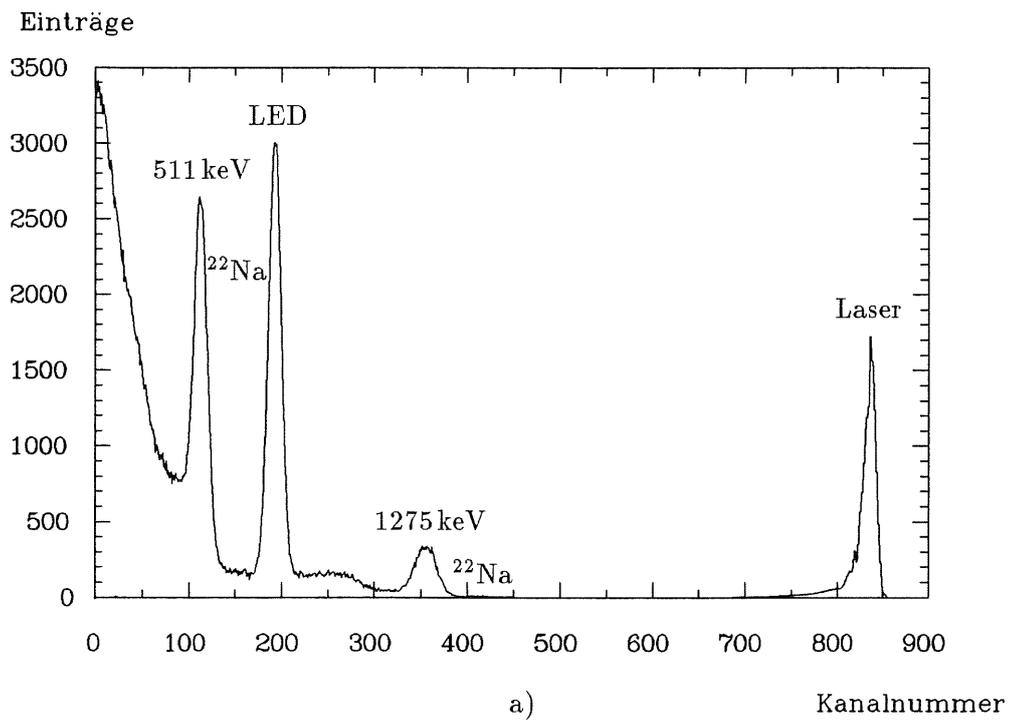
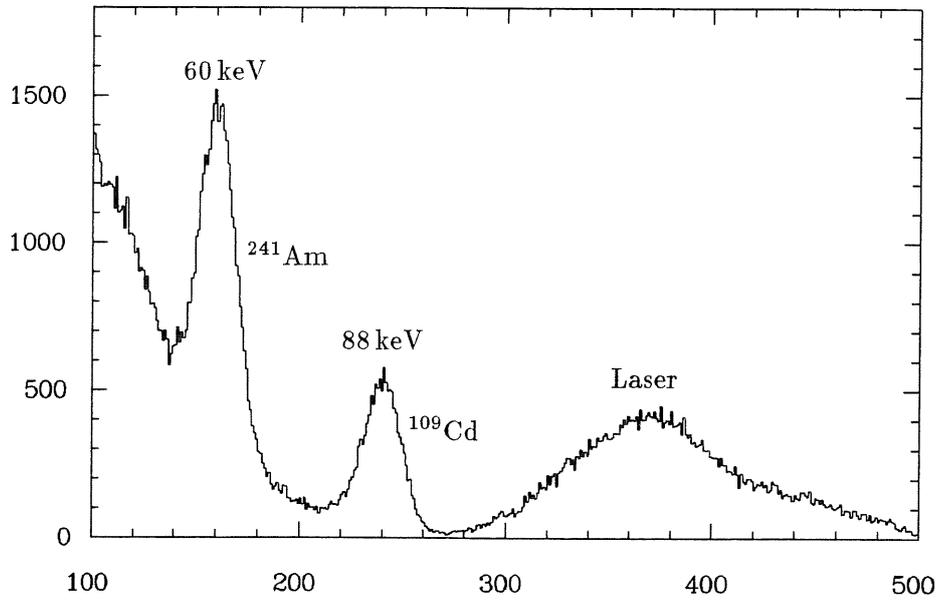


Abb. 4.14: Pulshöhenspektrum (a) und Quotientenspektrum (b) im Hauptreferenzsystem 1

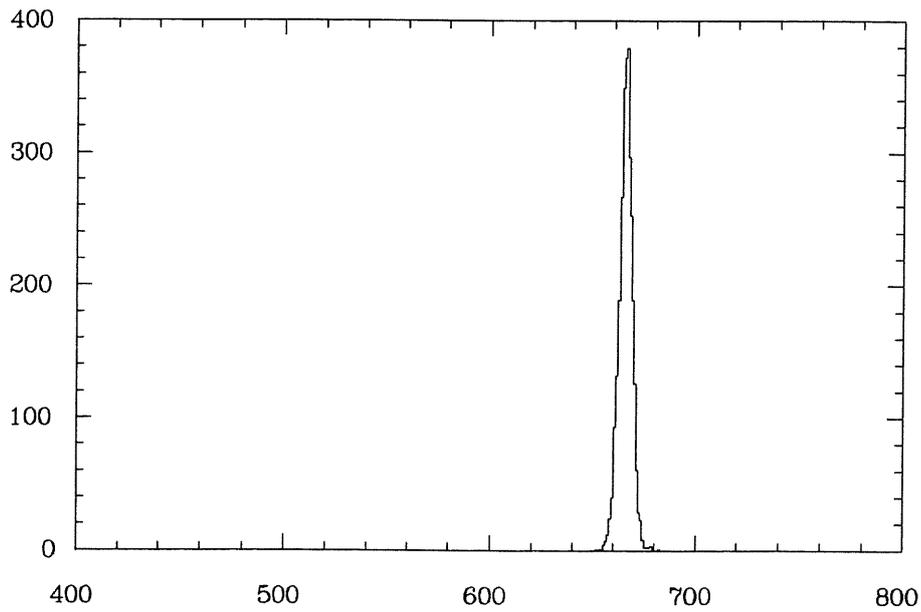
Einträge



a)

Kanalnummer

Einträge

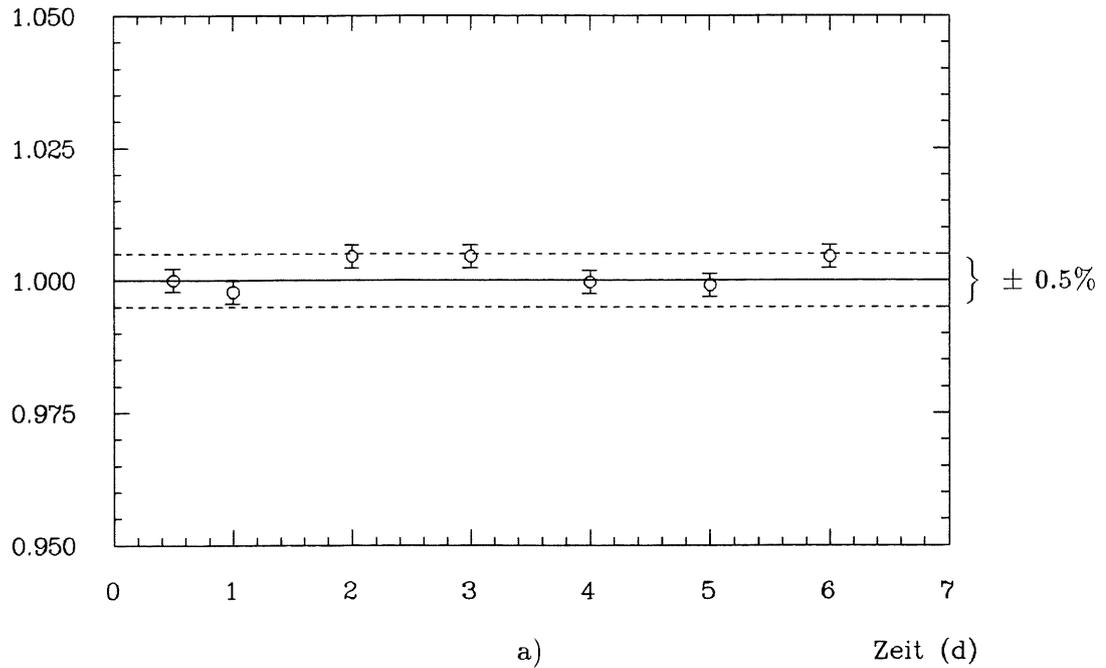


b)

Kanalnummer

Abb. 4.15: Pulshöhenspektrum (a) und Quotientenspektrum (b) im Hauptreferenzsystem 2

Korrigierter Quotient der Lasersignale



Korrigierter Quotient der Lasersignale

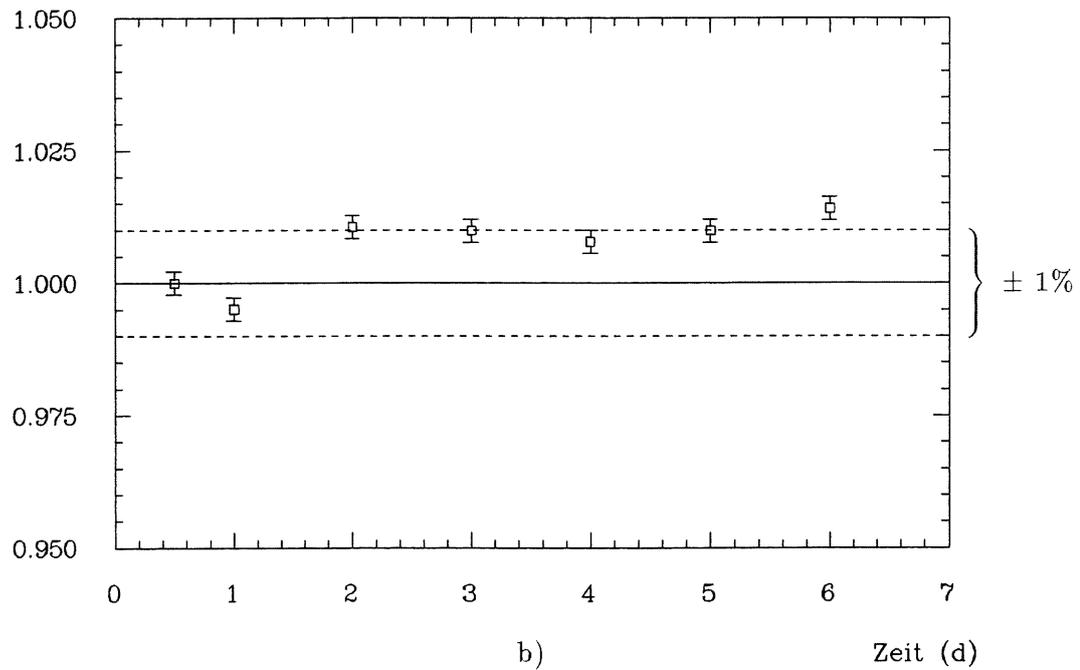


Abb. 4.16: **Korrigierter Quotientenverlauf der Lasersignale von Hauptreferenzsystem 1 (a) und Hauptreferenzsystem 2 (b)**
 Die Meßwerte sind auf den Anfangswert normiert. Die Genauigkeit des einzelnen Meßpunktes lag bei 0.22%. Der Nullpunkt der Y-Achse wurde unterdrückt.

Weil zum Zeitpunkt der Messungen die Installation der Faserbündel an die Kalorimetermodule des BEMC stattfinden sollte, konnte eine weiterführende Messung nicht durchgeführt werden.

Nach Installation des BEMC in den H1-Detektor und des Monitorsystems sollte daher das Faserverhalten noch einmal geprüft werden.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Für die Inter- und Intrakalibration der Module des elektromagnetischen Rückwärtskalorimeters (BEMC) am HERA-H1-Detektor ist ein Monitorsystem mit einem UV-Laser als zentrale Lichtquelle vorbereitet worden [Fle90]. Das UV-Licht wird über ein Lichtverteilungssystem und Bündel gleichlanger Fasern den Modulen sowie zwei Referenzsystemen zugeführt.

Entwurf und Erprobung der Referenzsysteme sind Gegenstand dieser Arbeit. Die mit γ -Präparaten kalibrierten Referenzsysteme dienen zur absoluten Kalibration des Lasermonitorsystems.

In Hinblick auf die zu erwartende Stabilität des Monitorsystems von 0.2% [Fle90] ist für die Referenzsysteme für die Dauer eines Monitorlaufs, die mit Linearitätstests ca. 1 Stunde beträgt, eine bessere Stabilität erforderlich.

Weil das Referenzsystem redundant aufgebaut werden soll, besteht es aus zwei verschiedenen Auslesesystemen:

Einem Photomultiplier mit einem CsI(Tl)-Kristall und einer Photodiode mit einem aufgeklebten SCSN 38-Szintillatorstück.

In diesen Detektoren werden sowohl die Lasersignale des Monitorsystems als auch die Referenzsignale der γ -Präparate registriert.

Um Zählraten- und Temperatureffekte an dem Referenzsystem mit dem Photomultiplier auszugleichen, wird dieser mit einer Stabilisatoreinheit stabilisiert.

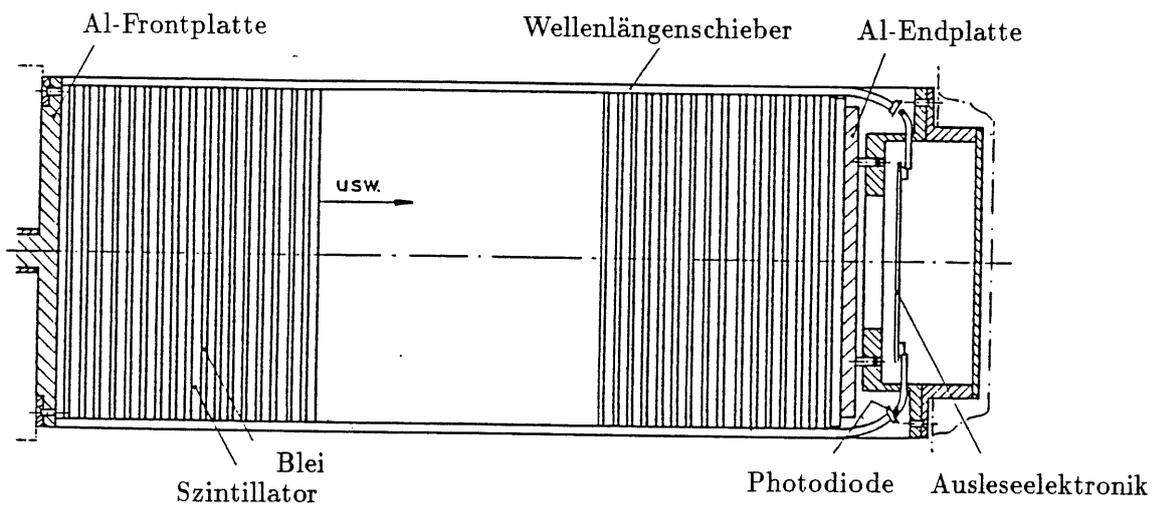
Die Messungen der Stabilität beider Referenzsysteme ergaben, daß im Zeitraum von einer Stunde keine Schwankungen $>0.08\%$ zu erwarten sind.

Dieses Referenzsystem kann bei dem Monitorsystem für das BEMC zum Einsatz kommen.

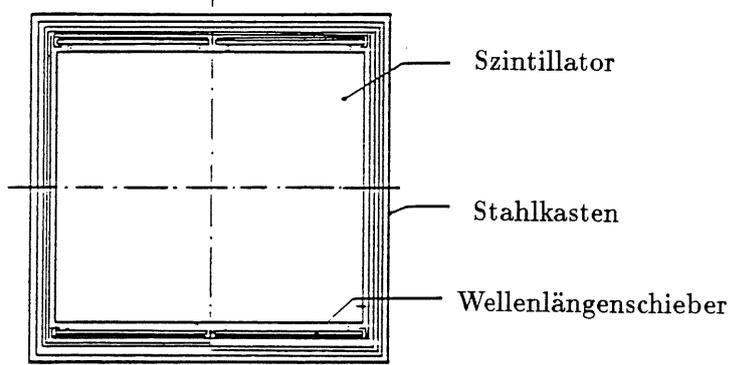
Die Simulationsmessungen von Monitorläufen haben größere Schwankungen der Lichtverteilung ergeben, als erwartet. Nach Installation aller Fasern für das Monitorsystem sollte die Stabilität des Fasertransmissionsverhaltens noch einmal überprüft werden.

Anhang A

Aufbau eines Kalorimetermoduls



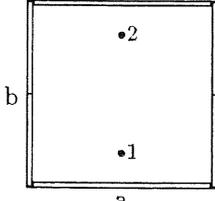
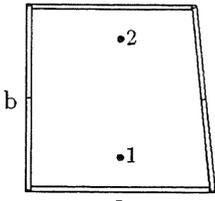
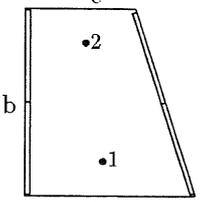
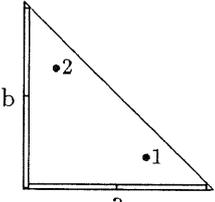
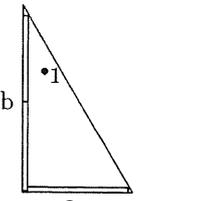
a) Längsschnitt



b) Querschnitt
(nicht maßstabgerecht)

Abb. A.1: Aufbau eines Kalorimeter-Moduls

a) Längsschnitt und b) Querschnitt eines quadratischen Moduls.

Modulform	Ankopplung der Fasern	Koordinaten (mm)
Quadrat-Modul		$a=158.4$ $b=158.4$ $1=(79.2,29.2)$ $2=(79.2,129.2)$
gr. Trapez-Modul		$a=158.4$ $b=158.4$ $c=142.4$ $1=(79.2,29.2)$ $2=(79.2,129.2)$
kl. Trapez-Modul		$a=142.3$ $b=158.4$ $c=92.1$ $1=(65.3,29.2)$ $2=(50.3,129.2)$
gr. Dreieck-Modul		$a=158.1$ $b=158.1$ $1=(102.0,27.0)$ $2=(27.0,102.0)$
kl. Dreieck-Modul		$a=91.2$ $b=157.9$ $1=(18.5,102.0)$

Tab. A.1: Ankopplungspunkte der Fasern an die BEMC-Module

Die (x,y) -Koordinaten der Ankopplungspunkte der Fasern beziehen sich auf die linke untere Ecke der dargestellten Module $(0,0)$. Alle Werte beziehen sich auf die Außenmaße der Module.

Die Lage der langen und kurzen Wellenlängenschieber ist ebenfalls bei allen Modulen eingezeichnet. Die kurzen Wellenlängenschieber haben die doppelte Breite und werden nur in den Quadrat- und den großen Trapez-Modulen verwendet.

Anhang B

Daten der Photodioden, Photomultiplier und Lichtfasern

Photodiode	S 2575	BPW 43	5082-4207
Hersteller	Hamamatsu	Telefunken	Hewlett-Packard
Sensitive Fläche (mm ²)	3.4×30=102	0.25 (rund)	0.81 (rund)
Sensitiver Wellenlängenbereich (nm)	320-1060	400-1100	400-1100
Maximale Empfindlichkeit bei (nm)	900	900	800
Quantenausbeute ≥75% (nm)	600-940	-	-
Spektrale Empfindlichkeit im Maximum (A/W)	0.60	0.55	0.43
Bias-Spannung (V)			
-optimal	30	10	10
-maximal	50	32	50
Dunkelstrom bei optimalem Bias (nA)			
-Typischer Wert	1.5	1	-
-Maximaler Wert	5	10	2.5
Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms pro °C (25-65°C)	×1.15	×1.15	×1
Übergangskapazität bei optimalem Bias (pF)	80	2	5,5
Fenstermaterial	Resinglas	Kunststoff	Glas

Tab. B.1: **Daten der verwendeten Photodioden**
(nach [Ham 86, Manuals])

Photomultiplier	XP 2011 B	R 2490
Hersteller	Valvo	Hamamatsu
Fokussierungstyp	linear	Netz
Zahl der Dynoden	10	16
Abmessungen (mm)		
-Maximaler Durchmesser	39.5	51
-Kathodendurchmesser	32	38
-Gesamtlänge	127	116
Maximale Spannung Anode-Kathode (V)	1800	2700
Maximale Spannung Anode-letzte Dynode (V)	300	250
typischer Dunkelstrom (nA)	10 (1600 V)	600 (2400 V)
Kathode		
-Material	SbRbCs	Bialkali
-Fenstermaterial	Kalkglas	Borosilikat
Dynodenmaterial	CuBe	Bialkali
Sensitiver Wellenlängenbereich (nm)	280-680	300-650
Maximale Empfindlichkeit bei (nm)	440	420
Quantenausbeute bei 390 nm	-	22%
Verstärkungsfaktor	ca. $7 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^6$

Tab. B.2: Daten der verwendeten Photomultiplier
(nach [Val 85, Ham 85])

Quarzglasfaser	Primärfaser HCN-M1000T-14	Sekundärfaser HCR-M0200T-12	Referenzfaser HCR-M0600T-06
Durchmesser (μm)			
-Kern	1000 \pm 15	200 \pm 5	600 \pm 10
-Cladding	1035 \pm 15	230 +0,-10	630 \pm 10
-Mantel	1400 \pm 50	500 \pm 50	1040 \pm 40
Minimaler Verlegeradius (mm)	200	12	150

Tab. B.3: Daten der verwendeten Quarzglasfasern
(nach [Fle 90])

Anhang C

Spannungsteiler-Schaltungen

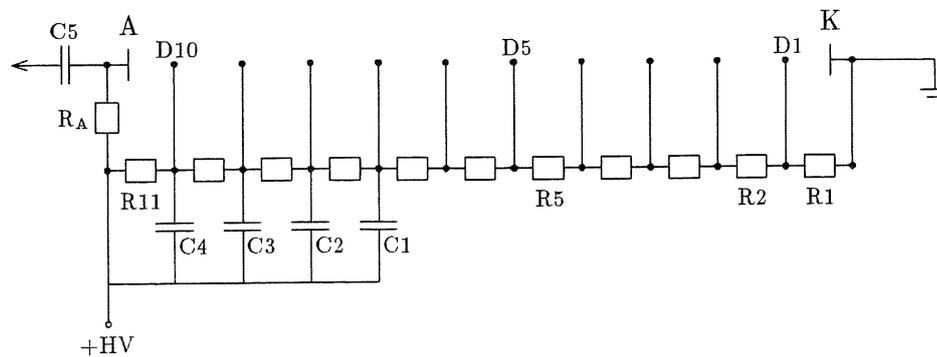


Abb. C.1: Standardspannungsteiler für den 10-stufigen Valvo-Photomultiplier XP 2011 B
(nach [Val 85])

Betriebsspannung: 1400 V

$$R1 = 220 \text{ k}\Omega$$

$$R2=R3=\dots=R11 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_A = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C1=C2=\dots=C4 = 10 \text{ nF}$$

$$C5 = 13.6 \text{ nF}$$

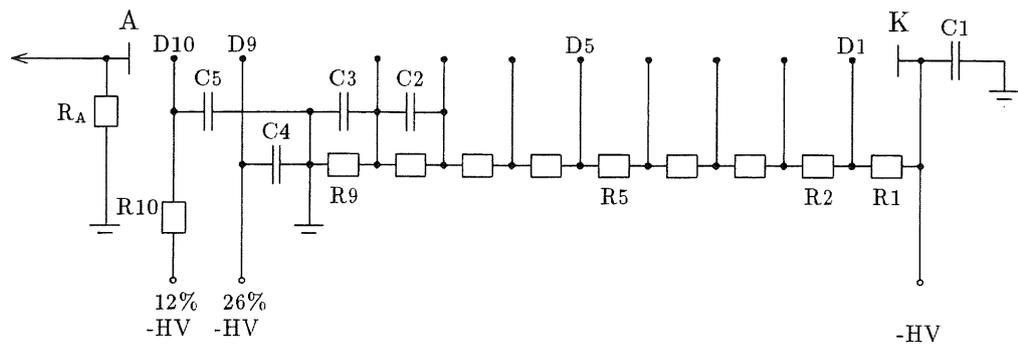


Abb. C.2: Spannungsteiler für den 10-stufigen Valvo-Photomultiplier XP 2011 B

Die Dynoden 9 und 10 wurden separat aus stromstabilisierten Quellen mit 26% bzw. 12% der Kathodenspannung versorgt.

Betriebsspannung: 1400 V

R_1	=	220 k Ω
$R_2=R_3=R_4$	=	100 k Ω
$R_5=R_6$	=	120 k Ω
R_7	=	150 k Ω
R_8	=	220 k Ω
R_9	=	680 k Ω
R_{10}	=	50 Ω
R_A	=	10 k Ω
C_1	=	10 nF
$C_2=C_3=\dots=C_5$	=	22 nF

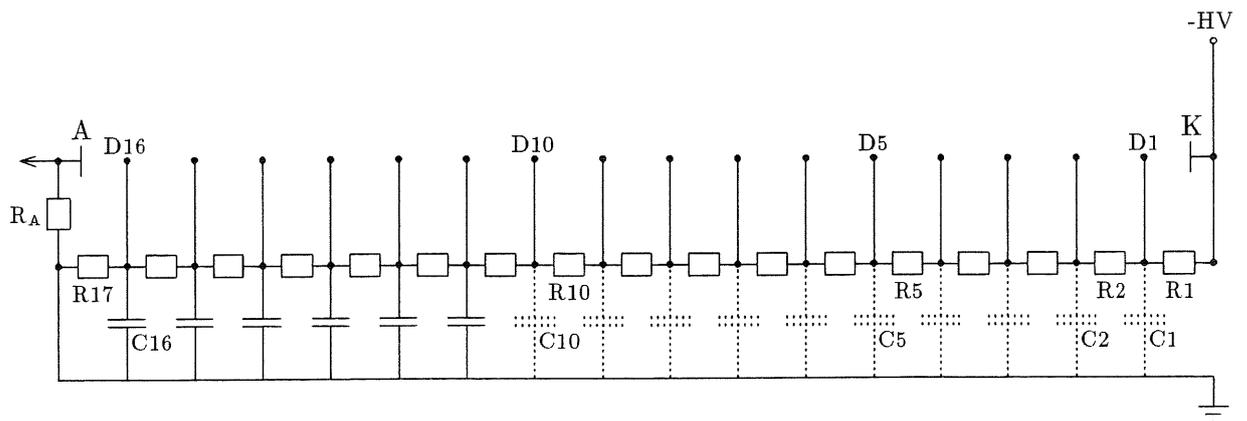


Abb. C.3: Standardspannungsteiler für den 16-stufigen Hamamatsu-Photomultiplier R 2490 mit 6 bzw. 16 Kondensatoren

Betriebsspannung: 1900 V

$R1 = 330 \text{ k}\Omega$

$R2=R3=\dots=R17 = 150 \text{ k}\Omega$

$R_A = 10 \text{ k}\Omega$

$C1=C2=\dots=C9 = 2.2 \text{ nF}$

$C10=C11=\dots=C16 = 22 \text{ nF}$

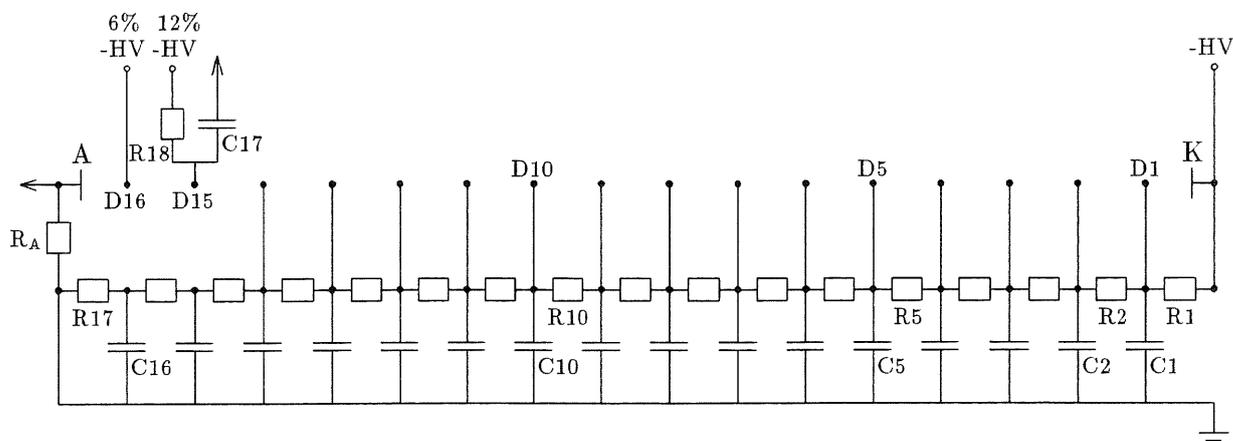


Abb. C.4: Spannungsteiler für den 16-stufigen Hamamatsu-Photomultiplier R 2490

Die Dynoden 15 und 16 wurden separat aus stromstabilisierten Quellen mit 12% bzw. 6% der Kathodenspannung versorgt [Mor 89].

Betriebsspannung: 1900 V

R1	=	330 k Ω
R2=R3=...=R17	=	150 k Ω
R18	=	50 Ω
R _A	=	10 k Ω
C1=C2=...=C9	=	2.2 nF
C10=C11=...=C16	=	22 nF
C17	=	50 nF

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der Speicherring HERA und seine Vorbeschleuniger	3
1.2	Schnittbild des H1-Detektors	5
1.3	Aufbau des BEMC aus Elektronen-Richtung gesehen	7
2.1	Wirkungsquerschnitte für γ -Wechselwirkungen mit Blei, Silizium und SCSN 38-Plastiksintillator	11
2.2	Dominierende Prozesse der Wechselwirkungen von γ -Strahlung mit Absorbieren verschiedener Ordnungszahl Z	12
2.3	Bändermodell für anorganische Halbleiter	13
2.4	Energieschema eines organischen Szintillators	14
2.5	Absorptions- und Emissionsspektren von SCSN 38 und Y 7	16
2.6	Spektrale Empfindlichkeit der Photokathode des Valvo-Photomultipliers vom Typ XP 2011 B	17
2.7	Schematischer Aufbau von Photomultipliern	19
2.8	Reflektion in einem Lichtleiter	22
3.1	Laserseitiger Aufbau des Monitorsystems	25
3.2	BEMC-seitiger Aufbau des Monitorsystems	26
3.3	Transmissionsverhalten der Quarzfasern	27
3.4	Aufbau des Hauptreferenzsystems 1 mit dem Photomultiplier	31
3.5	Konstruktionszeichnung des für die Testmessungen verwendeten und des für das BEMC geplanten CsI(Tl)-Kristalls	33
3.6	Reproduzierbarkeit der Faserkopplung	35
3.7	Energieauflösung des CsI(Tl)-Kristalls	36
3.8	Aufbau des Hauptreferenzsystems 2 mit der Photodiode	37
3.9	Meßaufbau mit der Photodiode	37
3.10	Energiekalibration des Hauptreferenzsystems 2 mit der Photodiode	38
3.11	Energieauflösung des Hauptreferenzsystems 2 mit der Photodiode	39
3.12	Zerfallsschema von ^{22}Na	40
4.1	Meßaufbau für Stabilitätstests und die Messung des Zählrateneffekts mit γ -Quellen	42
4.2	Energiekalibration des Valvo-Photomultipliers	43
4.3	Szintillationsspektrum von ^{22}Na	44
4.4	Zählrateneffekt gemessen mit verschiedenen Photomultipliern und Spannungsteilern	45
4.5	Variation und Drift der relativen Verstärkung des Valvo-Photomultipliers XP 2011 B bei Veränderung der Zählrate	46
4.6	Variation und Drift der relativen Verstärkung des Valvo-Photomultipliers XP 2041	46
4.7	Meßaufbau zur Messung des Zählrateneffekts mit einer gepulsten LED	47

4.8	Sättigungsfrequenz als Funktion der Pulsbreite einer LED	48
4.9	Schematisches Schaltbild der Stabilisator-Regelkreise	51
4.10	Meßaufbau mit dem Stabilisator	52
4.11	Zählrateneffekt mit und ohne Stabilisator	53
4.12	Langzeittest mit dem alten Stabilisator und den pin-Photodioden HP 5082-4207 und BPW 43	54
4.13	Langzeittest mit dem neuen Stabilisator und den pin-Photodioden BPW 43 und HP 5082-4207	55
4.14	Pulshöhen- und Quotientenspektrum im Hauptreferenzsystem 1	59
4.15	Pulshöhen- und Quotientenspektrum im Hauptreferenzsystem 2	60
4.16	Korrigierter Quotientenverlauf der Lasersignale von beiden Hauptreferenzsystemen	61
A.1	Aufbau eines Kalorimeter-Moduls	64
C.1	Standardspannungsteiler für den 10-stufigen Valvo-Photomultiplier XP 2011 B	68
C.2	Spannungsteiler für den 10-stufigen Valvo-Photomultiplier XP 2011 B mit drei getrennten Spannungsversorgungen	69
C.3	Standardspannungsteiler für den 16-stufigen Hamamatsu-Photomultiplier R 2490	70
C.4	Spannungsteiler für den 16-stufigen Hamamatsu-Photomultiplier R 2490 mit drei getrennten Spannungsversorgungen	71

Tabellenverzeichnis

2.1	Strukturformeln der Szintillatorstoffe	15
3.1	Daten des verwendeten N_2 -Lasers	28
3.2	Daten der verwendeten γ -Präparate	40
A.1	Ankopplungspunkte der Fasern an die BEMC-Module	65
B.1	Daten der verwendeten Photodioden	66
B.2	Daten der verwendeten Photomultiplier	67
B.3	Daten der verwendeten Quarzglasfasern	67

Literaturverzeichnis

- [Ame 90] Amersham Buchler; Zertifikate der γ -Präparate ^{241}Am und ^{109}Cd , Braunschweig (1990)
- [Bas 85] E. Bassler; GEP-Graphical Editor Programm for Presenting User Data, DESY R02-81/02 Internal-Report (1985)
- [Ber 76] E. Bergmann; uv TEA laser with 760-Torr N_2 , Applied Physics Letters, Vol. 28, No. 2 (1976)
- [Bia 85] Z. Bian, J. Dobbins, N. Mistry; The Use of Silicon Photodiodes in a CsI(Tl) Calorimeter, Nucl. Instr. and Meth. A239 (1985) 518
- [Bau 89] W. Bauhoff; unveröffentlichte Simulationsrechnungen mit EGS4 und GEANT, I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1989)
- [Bro 86] E. Brown, R. Firestone; Table of Radioactive Isotopes, John Wiley & Sons, New York (1986)
- [Dre 86] A. Drescher et al.; Calibration and Monitoring of the Argus Shower Counters, DESY 86-019 (1986)
- [Esc 91] M. Eschweiler; Untersuchungen zur Lichtsammeleffizienz der dreieckigen und trapezförmigen Szintillatorplatten für die BEMC-Module des HERA H1-Detektors, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1991)
- [Fel 85] J. Feltesse; Systematic Shifts in Structure Functions and absolute Calibrations, H1-04/8504 Internal-Report (1985)
- [Fel 87] J. Feltesse; Measurement of inclusive Differential Cross Sections, in Proceedings of the HERA Workshop Vol. I (1987) 33
- [Fin 89] G. Finsel; Untersuchungen zum Verhalten von Trioden, Tetroden und 8-stufigen Photomultipliern in Magnetfeldern bis zu 1.5 T, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Fin 90] G. Finsel et al.; Performance of Transmission Dynode Photomultipliers in Magnetic Fields up to 1.5 Tesla, Nucl. Instr. and Meth. A290 (1990) 450
- [Fle 90] M. Fleischer; Entwicklung eines Lasermonitorsystems für das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter des HERA-H1-Detektors, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1990)
- [Fri 89] J. Friedrich; Lichtpulsersystem zur Überwachung und Messung der Kennlinien der Kalorimerelektronik des CRYSTAL BARREL Detektors, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)

- [Gen 87] M. Gennis; Entwurf und Test eines Elektromagnetischen Kalorimeters, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1987)
- [Gro 84] D.E. Groom; Silicon Photodiode Detection of Bismuth Germanate Scintillation Light, Nucl. Instr. and Meth. 219 (1984) 141
- [Hal 86] 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
- [Har 90] T. Hartmann; Untersuchungen zum Verhalten von Plastiksintillatoren in Magnetfeldern bis 1.65 T, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1990)
- [Ham 85] HAMAMATSU; Photomultiplier Tubes (1985)
- [Ham 86] HAMAMATSU; Technical Data Sheet No. S-504-01 (1986)
- [Hen 83] C. Henschel; Fiber Optics Handbook, Hewlett-Packard GmbH (1983)
- [Hec 90] E. Hecht; Bicron Corporation, private Mitteilung (1990)
- [Hol 83] Y. Holler, J. Koch, A. Naini; A stabilized NE213 Scintillator for Neutron Time-of-Flight Spectroscopy, Nucl. Instr. and Meth. 204 (1983) 485
- [Hom 89] U. Holm, K. Wick, Radiation Stability of Plastic Scintillators and Wave-Length Shifters, IEEE Transactions on Nucl. Science Vol. 36 (1989) 579
- [Käm 89] B. Kämmler; Aufbau des Lichtpulsers für den CRYSTAL BARREL Detektor und Untersuchungen der Eigenschaften und Funktionsweise von Xenon-Blitzlampen, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Kam 83] T. Kamon et al.; A new Scintillator and Wavelength Shifter, Nucl. Instr. and Meth. 213 (1983) 261
- [Kas 90] H.-P. Kasselmann; Untersuchungen zur Zeit- und Energieauflösung und zum Rauschverhalten der Module für das elektromagnetische Rückwärts-Kalorimeter des HERA H1-Detektors, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1990)
- [Kel 74] H.-J. Kellermann et al.; Zur Messung der Empfindlichkeitsverteilung von Photovervielfachern auf deren Eintrittsfenster; Nucl. Instr. and Meth. 115 (1974) 301
- [Kle 87] K. Kleinknecht; Detektoren für Teilchenstrahlung, Teubner Studienbücher (1987)
- [Kno 79] G.F. Knoll; Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, New York (1979)
- [Koc 90] J. Koch; private Mitteilung (1990)
- [Kra 90] H. Krause; private Mitteilung (1990)
- [Lan 66] R. Langkau; Szintillationszähler; in H. Neuert, Kernphysikalische Meßverfahren, Verlag G. Braun, Karlsruhe (1966)
- [Lip 91] M. Lipka; Diplomarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg (1991)

- [Loh 86] E. Lohrmann; Hochenergiephysik, Teubner Studienbücher (1986)
- [Mar 90] T. Marckmann; Einfluß von Gasatmosphären auf die Lichtausbeute von Szintillatoren, in Jahresbericht I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1990)
- [Mei 90] K. Meier; private Mitteilung (1990)
- [Mor 89] S. Mordhorst; Untersuchungen von Photomultiplier im Magnetfeld, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Mus 88] G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger; Kern- und Elementarteilchenphysik, VCH, Weinheim (1988)
- [Nai 81] A. Naini; Bau und Erprobung eines stabilisierten Szintillationszählers für Neutronen-Flugzeitmessungen, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1981)
- [Par 88] Particle Data Group; Review of Particle Properties, Physics Letters B Vol.204, North-Holland Pub., Amsterdam (1988)
- [Pau 85] R. Paul; Optoelektronische Halbleiterbauelemente, Teubner Studienbücher (1985)
- [Pep 89] E. Peppel; Untersuchungen an einem Prototyp-Segment aus vier Modulen des elektromagnetischen Rückwärtskalorimeters für den H1-Detektor bei HERA, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Pep 90] E. Peppel; private Mitteilung (1990)
- [Per 87] D.H. Perkins; Introduction to High Energy Physics, Addison-Wesley Pub.Inc. (1987)
- [PRA 88] PRA Laser Inc.; LN 120 C-Operating Manual (1988)
- [Rat 91] K. Rathje; Diplomarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg (1991)
- [Röm 73] Römpps Chemie-Lexikon, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart (1973)
- [Sac 78] L. Sachs; Angewandte Statistik, Springer-Verlag (1978)
- [Sca 89] C. Schrader; Ein Monitorsystem für das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter bei H1-HERA, Diplomarbeit, Universität Hamburg (1989)
- [Sch 91] S. Schrieber; Diplomarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg (1991)
- [Scd 86] B. Schmid; Photodioden als Detektoren von Szintillationslicht, Diplomarbeit, Universität Zürich (1986)
- [Scm 86] H.U. Schmidt; Meßelektronik in der Kernphysik, Teubner Studienbücher (1986)
- [Scu 90] P. Schmüser; Zur Fertigstellung von HERA, in Physikalische Blätter 46, Nr. 12 (1990)
- [Sku 85] B. Skutnik et al.; High Strength, Reliable, Hard Clad Silica (HCS) Fibers, in FOC/LAN 85 Proc., (1985) 232
- [Sku 88] B. Skutnik et al.; Radiation Behaviour of Pure Silica Core Optical Fibers, SPIE Vol. 992 (1987)

- [Spi 87] Spindler & Hoyer; Präzisionsoptik-Katalog, Göttingen (1987)
- [Tay 88] J.R. Taylor; Fehleranalyse, VCH, Weinheim (1988)
- [Tec 86] Technical Proposal for the H1-Detektor; H1 Collaboration (1986)
- [Tec 87] Technical Progress Report; H1 Collaboration (1987)
- [Thi 85] D. Thiesmeyer; Aufbau und Test eines Laser-Kalibrations-Systems für den SAPHIR-Detektor, Diplomarbeit, Universität Bonn (1985)
- [Val 85] Valvo Datenbuch (1985)
- [Wii 89] B.H. Wiik; HERA Status, DESY HERA 89-11 (1989)
- [Wol 86] G. Wolf; HERA: Physics, Machine and Experiments, DESY-Preprint 86-089 (1986)
- [Zeu 87] Zeus Collaboration; Status Report (1987)
- [Manuals] -Manuals der verwendeten Elektronik und Datenblätter der Photodioden

Danksagung

Hiermit möchte ich allen, die mir bei der Erstellung dieser Diplomarbeit geholfen haben, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei:

- Herrn Prof. Dr. W. Scobel für die Aufgabenstellung und die freundliche Unterstützung bei der Fertigstellung der Diplomarbeit;
- Herrn Prof. Dr. R. Langkau für die Hilfe und Unterstützung insbesondere bei Problemen mit den Photomultipliern und dem Zählrateneffekt;
- Herrn Prof. Dr. H. H. Duhm für die hilfreichen Diskussionen aller Kalibrationsfragen;
- allen Mitgliedern der H1-Gruppe des Institutes für das angenehme Arbeitsklima und die Hilfsbereitschaft;
- Götz Korf für die Unterstützung im Umgang mit NEWLIB, JCL und GEP und die Hilfe beim Datentransfer;
- Sönke Stamer und Eberhard Mordhorst für die Hilfe bei dem Umgang mit dem Stabilisator;
- Stefan Schriber für die Hilfe bei der Bewältigung von Monitorproblemen;
- Herrn N. Schirm, Herrn M. Matysek und Herrn W. Gärtner für die Beantwortung vieler technischer Fragen;
- Herrn B. Leicht und seinen Mitarbeitern in der Werkstatt des I. Institutes, für ihre Hilfsbereitschaft und Sorgfalt bei der Anfertigung der notwendigen Teile für die Experimente;
- Herrn H. Krause für seine Unterstützung im Umgang mit dem Vielkanalanalysator, dem Datentransfer und die Hilfe bei dem Kampf mit der Elektronik;
- Herrn J. Koch und Herrn H. Buhr für Hilfe bei elektronischen Problemen;
- Frau Berghaus für das Anfertigen vieler Zeichnungen;
- Hans-Peter Kasselmann

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

Hamburg, im März 1991