Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 3

2. Das H1 Experiment 5

2.1. Der H1-Detektor 5

2.2. Ereignis Selektion bei H1 6

3. Physikalische Grundlagen 9

3.1. Kalorimetrie 9

3.1.1. Elektromagnetische Schauer 9

3.1.2. Homogene und Sampling-Kalorimeter 10

3.1.3. Energieauflösung von Sampling-Kalorimetern 11

3.2. Physik der Elektron-Proton-Streuung 12

3.2.1. Definition der Kinematik 12

3.2.2. Der Bereich des Kinematischen-Peaks 14

4. Das Rückwärtige Kalorimeter 16

4.1. Aufbau des BEMC 17

4.2. Die Ausleseelektronik des BEMC 19

4.3. Der BEMC-Trigger BSET 20

4.4. Kalibration des BEMC vor der ersten Datennahme 22

4.4.1. Kalibration der Elektronik 22

4.4.2. Kalibration des optischen Systems vor der ersten Datennahme 23

4.5. Kalibration des BEMC während der Datennahme 1992 25

4.6. Rekonstruktion der BEMC Energien 25

5. Kalibration des BEMC 28

5.1. Selektion der zur Kalibration verwendeten Daten 29

5.2. Beschreibung der Methode 32

5.3. Ergebnisse der Kalibration 37

5.4. Statistischer Fehler 43

5.5. Systematischer Fehler 44

5.5.1. Einfluß der Strukturfunktion des Protons 45

5.5.2. Zeitliche Veränderung der Kalibration 46

5.5.3. Monte Carlo Unsicherheit 46

6. Energieauflösung des BEMC 48

7. Zusammenfassung 51

Literaturverzeichnis 53

1 Einleitung

Seit Anfang des Jahrhunderts wird mit Hilfe von Streuexperimenten versucht die innere Struktur der Materie zu ergründen. Dabei bedient man sich einer Methode, die Rutherford erstmals bei der Erforschung des Aufbaus eines Atoms eingesetzt hat.
Teilchen mit bekannter Energie wurden auf ein Target geschossen und aus der Statistik der Streuwinkel wurden die Größen der Streupartner abgeschätzt. Seine Entdeckung, daß ein Atom aus Kern und Hülle besteht, veränderte unser Weltbild. Das scheinbar unteilbare Atom zeigte plötzlich eine innere Struktur. Im Laufe der nächsten Jahrzehnte konnte mit der gleichen Methodik und verbesserter Technik die Struktur des Atomkernes untersucht werden. Die Neutronen und Protonen, die man dabei fand, nannte man Elementarteilchen, weil man nun von ihnen annahm, daß sie unteilbar seien.
Durch Einsatz immer höherer Strahlenergien gelang es schließlich, auch innerhalb dieser Elementarteilchen Strukturen nachzuweisen.

Seit 1992 ist am DESY (**D**eutsches **E**lektronen **SY**nchrotron) in Hamburg die Beschleunigeranlage HERA (**H**adron-**E**lektron-**R**ing-**A**nlage) in Betrieb. Durch sie erhofft man sich neue Erkenntnisse über die Struktur des Protons.
HERA beschleunigt Elektronen und Protonen gegensinnig. An zwei von vier möglichen Wechselwirkungspunkten sind zur Zeit Experimente aufgebaut.

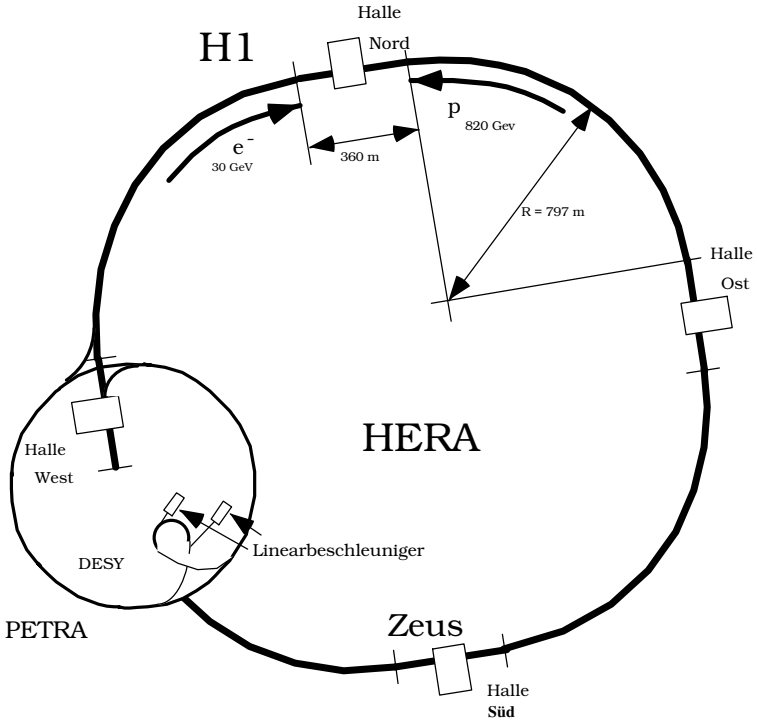


Abb. 1 Der Speicherring HERA

Die Strahlenergie bei HERA beträgt 26.7 GeV für Elektronen und 820 GeV für Protonen, dies entspricht einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s}$ = 296 GeV. Die angestrebte integrierte Luminosität von HERA beträgt pro Jahr 100 pb^{-1}. Während der Datennahme im Jahr 1992 konnten davon 25 nb^{-1} erreicht werden. Für 1993 konnte sie auf 570 nb^{-1} gesteigert werden.

An den Wechselwirkungspunkten von HERA sind die beiden Experimente H1 (Halle Nord) und ZEUS (Halle Süd) aufgebaut.
Wie beim Rutherford'schen Streuversuch, am Anfang des Jahrhunderts, werden aus der Winkel- und Energieverteilung der Reaktionsprodukte Rückschlüsse auf den Aufbau der Streupartner gezogen.

Zur Energiebestimmung der Reaktionsprodukte werden in der Hochenergiephysik sogenannte Kalorimeter eingesetzt. Eines dieser Kalorimeter im H1-Experiment ist das Rückwärtige Kalorimeter BEMC. Es soll die Energien der Streuprodukte im rückwärtigen Bereich des Detektors bestimmen.
Um reproduzierbare und vergleichbare Meßergebnisse zu erhalten, muß das Kalorimeter geeicht sein.

Ziel dieser Arbeit war es, eine Kalibrationsmethode für das BEMC zu entwickeln, die gestreute Elektronen im Energiebereich des sogenannten Kinematischen-Peaks, benutzt. Elektronen, die in diesen Bereich gestreut werden stellen eine Art Teststrahl bekannter Energie dar.
In Kapitel 2 wird zunächst kurz der Aufbau des H1-Experimentes beschrieben. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die physikalischen Grundlagen, die zum Verständnis dieser Arbeit nötig sind. Danach wird, in Kapitel 4, das rückwärtige Kalorimeter und seine Arbeitsweise beschrieben. Kapitel 5 beschreibt die zur Kalibration angewandte Methode und ihre Ergebnisse. Im Kapitel 6 wird die Auswirkung der Kalibration auf die Energieauflösung des rückwärtigen Kalorimeters gezeigt. Kapitel 7 gibt eine Zusammenfassung dieser Arbeit.

2 Das H1 Experiment

2.1 Der H1-Detektor

Der H1-Detektor ist eines der zur Zeit installierten Experimente am Speicherring HERA. Abbildung 2.1 zeigt den Detektor in einem Längsschnitt.
Auf Grund der höheren Protonenenergie erwartet man im Laborsystem eine asymmetrische Impulsverteilung der Reaktionsprodukte um den Wechselwirkungspunkt. Der größte Teil des Energieflusses der Reaktionsprodukte bewegt sich somit in Protonenstrahlrichtung, die nach H1 Konvention als Vorwärtsrichtung definiert wird. Sie definiert die positive z-Achse.
Aus diesem Grund wurde der H1-Detektor asymmetrisch um den Wechselwirkungspunkt aufgebaut. Vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen gliedert sich der Detektor wie folgt:

- Das Strahlrohr wird von gasgefüllten Proportionalkammern und Driftkammern umgeben. Diese sind in einen Vorwärts- (1) und einen Zentralbereich (2) unterteilt. Sie dienen der Identifikation und der Impulsmessung geladener Wechselwirkungsprodukte, sowie der Bestimmung des Wechselwirkungspunktes.

- Die Teilchenenergien werden in Kalorimetern bestimmt. Der größte Teil des Vorwärtsbereichs sowie der gesamte Zentralbereich wird von einem Flüssig-Argon-Kalorimeter abgedeckt. Als Nachweismedium wird flüssiges Argon, als Absorber im elektromagnetischen Teil (3) Blei und im hadronischen Teil (4) Stahl verwendet.

- Im Vorwärtsbereich wird das Flüssig-Argon-Kalorimeter ergänzt durch ein Kalorimeter bestehend aus Siliziumzählern mit Absorberplatten aus Kupfer, dem sogenannten Plug-Kalorimeter (5).

- Im Rückwärtsbereich befindet sich ein Sampling-Kalorimeter mit Blei als Absorbermaterial und einer Auslese über Szintillatorplatten, Wellenlängenschieber und Photodioden, das sogenannte Rückwärtige Kalorimeter (6) BEMC [1].

- Vor dem BEMC befindet sich zur Unterstützung der Spurrekonstruktion eine vierlagige Vieldrahtproportionalkammer (7) BPC [2]. Die BPC erlaubt eine Ortsbestimmung in der x-y Ebene. Mit Hilfe dieser Koordinaten und dem Ort des Wechselwirkungspunktes kann der Streuwinkel, der Teilchen die im BEMC nachgewiesen werden, bestimmt werden.

- Hinter dem BEMC befindet sich das Flugzeit Meßsystem (8) TOF [3].

- Die Kalorimeter, BEMC und Flüssig-Argon, werden von einer supraleitenden Magnetspule (9) umschlossen, welche im Inneren ein homogenes axiales Magnetfeld von 1,2 Tesla erzeugt.

---

[1] BEMC, Abk. für Backward-Electro-Magnetic-Calorimeter
[2] BPC, Abk. für Backward-Proportional-Chamber
[3] TOF, Abk. für Time-of -Flight

- Die Spule ist umgeben von einem Eisenjoch (10) durch das der Rückfluß des Magnetfeldes erfolgt. Zur Unterstützung des Liquid-Argon-Kalorimeters ist das Eisenjoch mit "Streamer-Röhren" durchsetzt.

- Den äußersten Teil des Detektors bilden Myonen-Kammern (11).

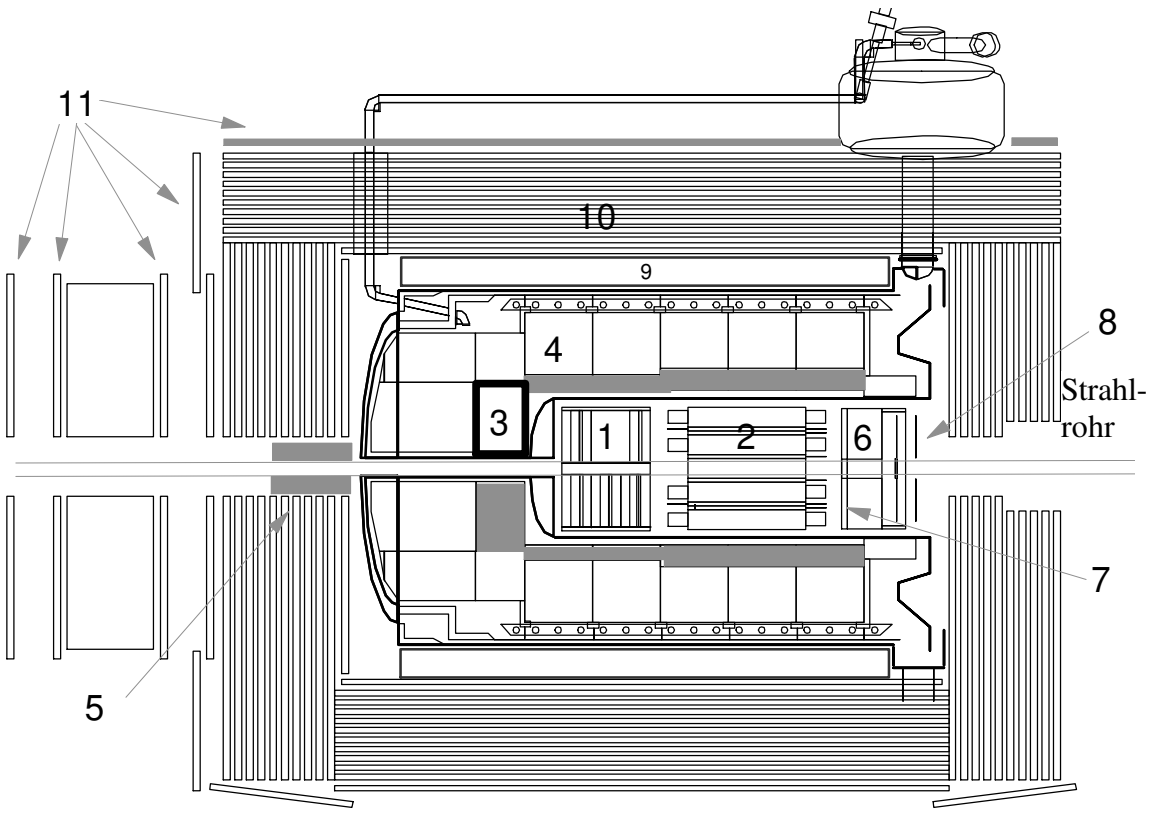


Abb. 2.1 Der H1 Detektor

2.2 Ereignis Selektion bei H1

Bei HERA werden Elektronen und Protonen gegensinnig beschleunigt und in Paketen mit jeweils ca. 10^{11} Teilchen zur Kollision gebracht. Der zeitliche Abstand zwischen den Paketen beträgt 96 ns, so daß es mit einer Frequenz von ca. 10 MHz Kollisionen stattfinden.
Aufgrund des Wirkungsquerschnitts der tief-inelastischen Elektron-Proton-Streuung werden, bei der Designluminosität von $1.5 * 10^{31}\ cm^{-2}s^{-1}$, Ereignisse dieser Art mit einer Rate von ca. 1 Hz erwartet. Zusätzlich entstehen sogenannte Untergrundereignisse, die je nach Strahlbedingungen mit einer Rate von bis zu 100 kHz auftreten können.
Als Untergrundereignisse bezeichnet man Reaktionen die zwar Spuren im Detektor hinterlassen aber aus physikalischer Sicht weniger interessant sind. Bei H1 ergeben sich solche Ereignisse hauptsächlich durch Synchrotron-Strahlung des Elektronenstrahls, Wechselwirkung der Protonen mit Restgasatomen im Vakuum der Strahlröhre oder Wechselwirkung der Protonen mit Teilen des Beschleunigers.
Da man, nur an Ereignissen bestimmter Klassen interessiert ist und es unsinnig wäre alle Daten aufzuzeichnen, wird noch während der Datennahme eine Auswahl getroffen. Diese Aufgabe wird von einem sogenannten *Trigger* übernommen. Der Trigger bei H1 besteht aus insgesamt vier Stufen.

Die erste Stufe (Level 1 Trigger) besteht aus mehreren verschiedenen Beiträgen die auf Informationen bestimmter Subdetektoren basieren, zum Beispiel dem BEMC. Auf dessen Trigger wird im Kapitel 4.3 noch näher eingegangen. Die Trigger der Stufe 1 sind mit dem Takt der Kollisionen (HERA-Uhr) synchronisiert. Somit wird sichergestellt, daß die Daten der einzelnen Subdetektoren aus ein und derselben Kollision stammen.
Die Trigger dieser Stufe stellen nur einfache Bedingungen an ein Ereignis, z.B. ob die Energie in einem Kalorimeter eine bestimmte Schwelle überschreitet. Die Informationen der einzelnen Subdetektoren werden *Trigger-Elemente* genannt. Diese Trigger-Elemente werden in einer zentralen Trigger-Logik zusammen gefaßt und bilden dort miteinander kombiniert sogenannte *Subtrigger*.
Die Zeit, die ein Trigger braucht, um die Daten eines Ereignisses zu analysieren und zu entscheiden, ob die Daten ausgelesen werden, liegt bei ca. 2 µs. Die Signale der Daten werden während dieser Zeit in sogenannte *Pipelines* verzögert. Maximal können die Daten von 22 Kollisionen auf diese Weise zwischengespeichert werden. Somit dürfen höchstens 22 * 96 ns = 2.12 µs vergehen, bis entschieden ist, ob ein Ereignis akzeptiert oder verworfen wird. Die Trigger der Stufe 1 sind somit schnell genug, um eine totzeitfreie Datennahme zu erlauben.
Erfüllt das Ereignis die Bedingung eines Subtriggers, werden die Pipelines angehalten, die Signale ausgelesen und digitalisiert. Jetzt beginnt die primäre Totzeit des Detektors, da zum Auslesen des gesamten Detektors ca. 800 µs benötigt werden. Während dieser Zeit können keine neuen Daten aufgenommen werden.

Die Trigger der Stufe 2 (Level 2 Trigger) und der Stufe 3 (Level 3 Trigger) sollen in der Lage sein komplexere Berechnungen und Entscheidungen durchzuführen als die Trigger der Stufe 1. Sie arbeiten parallel zur Auslese des Detektors und werden daher auch als synchrone Trigger bezeichnet. Sie haben somit 800 µs Zeit, eine Entscheidung zu treffen. Wird ein Ereignis schon vor dieser Zeit verworfen wird die Datenauslese gestoppt und der Detektor kann wieder neue Daten aufnehmen.

Erst wenn ein Ereignis von beiden Triggern akzeptiert wurde, gelangen die Daten in die zentrale Datennahme (Central Data Aquisition). Da die Übernahmerate der Daten ca. 50 Hz beträgt und dieses System asynchron sowohl zu den Trigger der Stufe 2 und Stufe 3 als auch zur HERA-Uhr arbeitet ergibt sich keine erneute Totzeit des Detektors, solange der Trigger der Stufe 3 Ereignisse nicht mit einer Rate größer als 50 Hz akzeptiert. Für die Datennahme 1992 und 1993 waren die Trigger der Stufe 2 und der Stufe 3 allerdings noch nicht installiert.

Der Trigger der Stufe 4 (Level 4 Trigger; Filter Farm) ist ein asynchron arbeitender Software-Trigger, der in die zentrale Datennahme integriert ist. Er besteht aus vierzehn einzelnen Rechnern, jeder bestückt mit einem Risc R3000 Hauptprozessor. Für die Triggerentscheidung kann auf die Rohdaten aller Subdetektoren eines Ereignisses zurückgegriffen werden. Als Software stehen speziell für die Filter-Farm entwickelte Algorithmen zur Verfügung. Es können aber auch Teile der Standard H1-Rekonstruktions Software verwendet werden. Jeder der vierzehn Rechner bearbeitet ein Ereignis bis eine Entscheidung getroffen ist. Um diese Entscheidung in der kürztest möglichen Zeit zu treffen, ist der Level 4 Algorithmus in verschiedene logische Module unterteilt. Wobei ein Module nur aufgerufen wird, wenn die von ihm berechnete Größe für die anstehende Entscheidung nötig ist.
Da der Filter-Farm die vollständig rekonstruierten Ereignisdaten zur Verfügung stehen, können auf dieser Ebene sehr viel härtere Bedingungen an ein Ereignis gestellt werden als in den drei vorher gehenden Stufen.
So können zum Beispiel im Fall des BEMC die sogenannten 'Single-Diode' Ereignisse aussortiert werden. Bei 'Single-Diode' Ereignissen werden in einer der vier Photodioden eines BEMC

Moduls überproportional viel Energie deponiert. Wahrscheinlich werden diese Ereignisse von Synchrotron-Strahlung ausgelöst. Der Stufe-1-Trigger des BEMC (BSET) ist nicht in der Lage solche Ereignisse zu erkennen.
Von den Ereignissen, die von den ersten Stufen akzeptiert wurden verwirft die Filter-Farm noch einmal 70-90%.

Eine weitere Aufgabe der Filter-Farm ist es den Betrieb des Detektors zu kontrollieren. Zur Überwachung der Subdetektoren werden eine Vielzahl von Histogrammen gefüllt die noch während der Datennahme analysiert werden können. Um die Triggerfunktionen zu kontrollieren werden ca. 1% aller verworfenen Ereignisse gespeichert und analysiert.
Mit Hilfe der Filter-Farm können auch spezielle Datensätze selektiert werden, z.B. Ereignisse die sich für Kalibrationszwecke eignen.

Für weiter Information bezüglich der Trigger sei auf [1] verwiesen.
Informationen bezüglich der zur Zeit im Experiment implementierten Subtrigger kann man über die DESY-IBM mit dem Befehl 'H1 TRIG' erlangen.

3 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel soll kurz auf die physikalischen Grundlagen eingegangen werden die für diese Arbeit von Bedeutung sind.

3.1 Kalorimetrie

Um die Energien von Teilchen zu bestimmen, werden unter anderem sogenannte Kalorimeter eingesetzt. Ein Kalorimeter ist im Prinzip ein Materieblock, der die Energie des Teilchens absorbiert und ein zu dieser Energie proportionales Signal liefert.

Beim Durchgang durch Materie erzeugen hochenergetische Teilchen durch Wechselwirkung Sekundärteilchen, welche wiederum Sekundärteilchen erzeugen können. Auf diese Weise entstehen Teilchenkaskaden sogenannte Schauer. Man unterscheidet zwischen elektromagnetischen und hadronischen Schauern, je nachdem welche Art von Teilchen den Schauer ausgelöst hat. Elektromagnetische Schauer entstehen durch Elektronen, Positronen oder Photonen, hadronische durch Baryonen und Mesonen.
Da das Kalorimeter, mit dem sich diese Arbeit beschäftigt, konstruiert wurde um die Energien der am Proton gestreuten Elektronen im rückwärtigen Bereich des H1-Detektors zu bestimmen, soll im weiteren nicht näher auf hadronische Schauer eingegangen werden.

3.1.1 Elektromagnetische Schauer

Beim Durchgang durch Materie verlieren Elektronen ihre Energie durch Wechselwirkung. Im Wesentlichen wird der Energieverlust der Elektronen pro Wegstrecke durch zwei Prozesse bestimmt. Bei hohen Energien wird der Energieverlust durch Bremsstrahlung, bei niedrigen Energien durch Ionisation dominiert.
Beim Durchgang durch Materie werden die Elektronen im Coulomb-Feld der Kerne abgebremst. Dies führt nach den Gesetzen der Elektrodynamik zur Emission von Bremsstrahlung. Die dadurch entstehenden Photonen können im Prinzip jede beliebige Energie haben, wobei die Obergrenze bei der Gesamtenergie des erzeugenden Elektrons liegt. Die erzeugten Photonen ihrerseits geben ihre Energie wieder durch Photo-Effekt, Compton-Streuung und Paarbildung ab. Für Photonenenergien oberhalb von 10 MeV ist dabei die Paarbildung dominierend. Die durch diesen Prozeß entstehenden Elektronen und Positronen sind wieder in der Lage Bremsstrahlung zu emittieren wodurch erneut Elektron-Positron Paare entstehen. Es entsteht ein Schauer. Der Schauer bricht ab, wenn die Energie der Photonen nicht mehr zur Paarbildung ausreicht oder die entstandenen Teilchen ihre Energie durch Ionisation abgeben. Die Energie ab der der Energieverlust durch Ionisation gleich dem der Bremsstrahlung ist wird kritische Energie genannt. Diese Energie ist von der Kernladungszahl des Absorbers abhängig.

Für Kernladungszahlen Z > 13 gilt folgende Näherungsformel : $E_{krit}(MeV) \cong \frac{550}{Z}$

Beschränkt man sich bei der Schauerentwicklung auf eine eindimensionale Betrachtungsweise. Sowie die Näherung, daß die Energieverluste durch Ionisation nicht von der Energie abhängen und vernachlässigt man weiterhin Vielfach- und Compton-Streuung, dann ergeben Berechnungen von B. Rossi [2], für Elektronen der Primärenergie E_0, folgende Ergebnisse:

Die Strecke auf der die Energie des Elektrons auf 1/e des Anfangswertes abgenommen hat nennt man Strahlungslänge X_0. Die Strahlungslänge ist eine absorberspezifische Größe und läßt sich nach folgender Formel berechnen:

$$\frac{1}{X_0} = \left[4\alpha\rho r_e^2 N_A \frac{Z(Z+1)}{A} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right)\right]$$

mit :

a	=	Feinstrukturkonstante
r_e	=	klassischer Elektronenradius
ρ	=	Massendichte des Absorbers
A	=	Massenzahl des Absorbers
Z	=	Kernladungszahl des Absorbers

Für Bremsstrahlung ist der mittlere Energieverlust pro Wegstrecke proportional der mittleren Energie E der Schauerelektronen.
Die Energie E nimmt exponentiell mit dem im Medium zurückgelegten Weg x ab.

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Bremsstr.} = \frac{E}{X_0} \Rightarrow E = E_0 \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right)$$

Der Ort des Schauermaximums x_{max} - in Strahlungslängen X_0 - wächst mit dem Logarithmus der Primärenergie E_0 des Elektrons.

$$x_{\max} \cong \ln\left(\frac{E_0}{E_{krit}}\right) - 1$$

Das für die Energiebestimmung wichtigste Ergebnis besagt, daß die Summe aller Spurlänge der am Schauer beteiligten Teilchen proportional zur Primärenergie des auslösenden Teilchens ist. Daher gilt:

$$\text{Gesamtspurlänge } T \sim E_0$$

Die wesentlichste Einschränkung für die oben genannten Ergebnisse ist die eindimensionale Betrachtung der Schauerentwicklung. In der Praxis führt jedoch insbesondere die Vielfach-Streuung der Elektronen zu einer transversalen Aufweitung des Schauers. Aus diesem Grund wurde der ebenfalls absorberspezifische Moliere-Radius R_M eingeführt. Er definiert dabei einen Zylinder mit dem Radius r = R_M in dem 90% der Primärenergie deponiert werden. Für Absorber mit Ordnungszahlen Z > 13 läßt er sich wie folgt berechnen:

$$R_M = \frac{21MeV}{E_{krit}} X_0$$

3.1.2 Homogene und Sampling-Kalorimeter

Nach den Berechnungen aus Kapitel 3.1 ist die in einem Absorber deponierte Energie proportional der Gesamtspurlänge T. Das Kalorimeter muß also, ein Signal liefern, daß proportional zu T ist.

Kalorimeter werden in zwei Gruppen unterteilt, *homogene* und *Sampling*-Kalorimeter.

Homogene Kalorimeter bestehen aus nur einem Material, das als Absorber und als Nachweismedium dient, z.B. Bleiglas. Der Vorteil dieses Kalorimetertyps besteht in der guten Energieauflösung. Der Nachteil ist allerdings, daß Materialien, die zum Nachweis geeignet sind, oft sehr große Strahlungslängen aufweisen, so daß das Kalorimeter eine große longitudinale Ausdehnung aufweisen würde. Materialien mit kleinen Strahlungslängen, die eine kompaktere Bauweise zulassen, sind sehr teuer.

Sampling-Kalorimeter bestehen aus zwei Materialien, einem passiven, das als Absorber dient, und einem aktiven, welches das Energiesignal liefert.
Als Absorber werden Materialien mit möglichst geringen Strahlungslängen benutzt, z.B. Blei, Eisen oder Uran. Im Absorber wird der größte Teil der Energie deponiert.
Das aktive Material hat meistens eine große Strahlungslänge und trägt zur Energiedeposition wenig bei. Seine Aufgabe ist es ein Signal zu liefern, das der Anzahl der Teilchen, die es durchqueren, proportional ist. Als aktives Material verwendet man zum Beispiel Plastikszintillatoren. Elektronen, die einen Plastikszintillator durchqueren, regen dessen Hüllenatome an, die ihre Energie an Farbstoffmoleküle abgeben, die im Szintillator eingelagert sind. Die Farbstoffmoleküle ihrerseits emittieren Licht einer Wellenlänge für die der Szintillator durchsichtig ist, so daß das Licht ausgelesen werden kann. Die Größe des Lichtsignals ist dabei proportional zum Weg, den das Teilchen im Szintillator zurückgelegt hat. Man kann also die Spurlänge der Teilchen im Szintillator bestimmen. Die im aktiven Material deponierte Energie, also die Energie die man tatsächlich nachweisen kann, nennt man sichtbare Energie (visible energy). Die Energie die im Absorber deponiert wird kann nicht nachgewiesen werden. Entscheidend ist daher, daß die sichtbare Energie tatsächlich proportional zur Primärenergie E_0 ist.

3.1.3 Energieauflösung von Sampling-Kalorimetern

Unter der Energieauflösung eines Kalorimeter versteht man die Genauigkeit, mit der die Energie eines Teilchens bestimmt werden kann. Es ist üblich diese Meßungenauigkeit σ_E als relativen Fehler der Energie in der Form $\frac{\sigma_E}{E}$ anzugeben.

Da bei einem Kalorimeter die Energie eines Teilchens über die Gesamtspurlänge der Schauerteilchen bestimmt wird, muß zunächst gesichert werden, daß sich der gesamte Schauer auch innerhalb des Kalorimeters befindet. Als Leckverlust bezeichnet man den Teil des Schauers und damit den Anteil der Primärenergie, der nicht im Kalorimeter nachgewiesen werden kann. Bei der Dimensionierung eines Kalorimeters muß daher drauf geachtet werden, daß die longitudinalen und transversalen Leckverluste klein sind.
Die Größe L(98%) gibt einen Richtwert für die longitudinale Ausdehnung des Kalorimeters an, wenn 98% der Primärenergie eines Teilchens darin deponiert werden sollen. Für Energien $E_0 < 100$ GeV kann diese Größe - in Einheiten der Strahlungslänge X_0 - folgendermaßen beschrieben werden:

$$L(98\%) = 2.6 * \ln\left(\frac{E_0}{E_{krit}}\right) + 1$$

Die Größe R(95%) gibt einen entsprechenden Richtwert bezüglich der transversalen Leckverluste an. Für ein Kalorimeter, das die Schauerachse mit einem Radius von $R(95\%) = 2R_M$ zylinderförmig umschließt, gehen 5% der Primärenergie seitlich verloren. Für einen Radius von $3R_M$ beträgt der Verlust nur noch 1%.

Ist das Kalorimeter groß genug dimensioniert um den Schauer vollständig einzuschließen, wird die Energieauflösung bei Sampling-Kalorimetern theoretisch dadurch limitiert, daß die Anzahl der Teilchen die während eines Schauers entstehen, statistischen Fluktuationen, sogenannten Sampling-Fluktuationen, unterworfen ist.
Die im Kalorimeter deponierte Energie ist proportional der beim Schauer entstandenen Teilchen N_{ges}.

$$N_{ges} \sim E_0$$

Fluktuationen dieser Anzahl werden nach der Poisson-Statistik behandelt und führen zu einer endlichen Energieauflösung σ_E des Kalorimeters. Eine genau Berechnung von [3] ergab für Sampling-Kalorimeter in Sandwich-Bauweise folgende Formel:

$$\frac{\sigma_E(E)}{E} = 3.2\% \sqrt{\frac{E_{krit}[MeV]D}{X_0 F(z)}} \frac{1}{\sqrt{E[GeV]}}$$

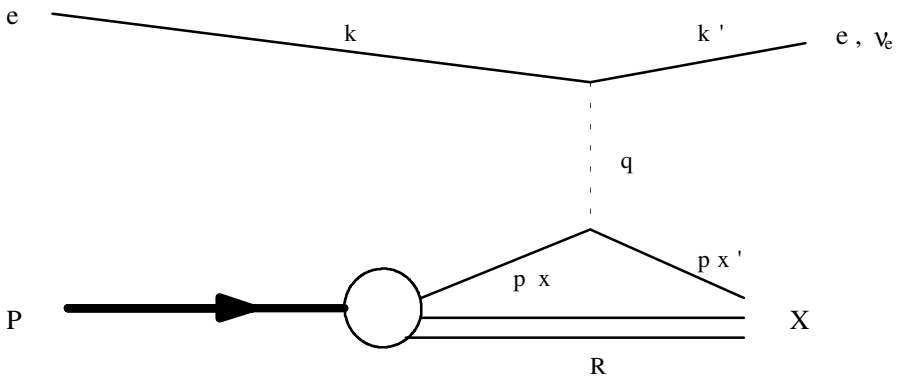
mit :

E_{Krit}	= kritische Energie
D	= Dicke einer Sampling Zelle in Strahlungslängen
F(z)	= Korrekturfunktion, die berücksichtigt, daß Teilchen unterhalb einer Energieschwelle nicht mehr nachgewiesen werden können.

3.2 Physik der Elektron-Proton-Streuung

3.2.1 Definition der Kinematik

Bei HERA werden Elektronen ***e*** der Energie E_e = 26.7 GeV mit Protonen ***p*** der Energie E_p=820 GeV zur Kollision gebracht. Im Partonmodell findet die Wechselwirkung zwischen dem Elektron und einem Parton statt, wobei das Parton einen Teil des Impulses des Protons trägt. Das auslaufende Parton bildet zusammen mit dem nichtwechselwirkenden Protonenrest ***R***, nach der Hadronisierung, den hadronischen Endzustand ***X***.
Um die Reaktionen unabhängig vom Bezugssystem beschreiben zu können, ist es sinnvoll die kinematischen Variablen lorentzinvariant zu definieren. Lorentzinvariante Größen sind Skalarprodukte von Viererimpulsen.
Der tief-inelastischen Streuprozeß ist in Abbildung 3.1 dargestellt.



Viererimpulse :

k	: einlaufendes Elektron
k'	: auslaufendes Elektron
p	: einlaufendes Proton
px	: wechselwirkendes Parton
px'	: gestreutes Parton
q	: Impulsübertrag

Abb. 3.1 Kinematik der tief-inelastischen Streuung

Es gelten folgende Relationen :

px + q	=	px'
k - k'	=	q

Mit den in Abb. 3.1 angegebenen Viererimpulsen lassen sich die lorentzinvarianten Größen $\boldsymbol{Q^2}$ und $\boldsymbol{s}$, sowie die dimensionslosen Bjorken-Variablen $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$ definieren.

$$Q^2 \equiv -q^2 = -(k-k')^2 \approx 2E_k E_{k'}(1+\cos\Theta_{k'})$$

$$s = (\ k + p\ )^2$$

$$x \equiv \frac{Q^2}{2 * p * q}$$

$$y \equiv \frac{p * q}{p * k}$$

$\boldsymbol{Q^2}$ ist das Quadrat des Viererimpulsübertrags des Elektrons auf das Proton und ist gegeben durch die Differenz der Viererimpulse von einlaufendem und auslaufendem Elektron. Nach H1-Konvention ist $\Theta_{k'}$ der Winkel zwischen einlaufendem Proton und gestreutem Elektron. Der maximale Impulsübertrag ist durch die ebenfalls lorentzinvariante (Schwerpunktsenergie)^2 $\boldsymbol{s}$ gegeben. Bei HERA beträgt sie:

$$\boldsymbol{s} \approx 4E_eE_P = 87576\ \mathrm{GeV}^2$$

Die Größe x gibt an, welchen Bruchteil des Gesamtimpuls des Protons, das an der Wechselwirkung beteiligt Parton hat. Die Variable y gibt den normierten Impulsübertrag an. Definiert sind die Variablen **x**, y im Bereich zwischen Null und Eins, $0 \leq x, y \leq 1$. Für $x = 1$ wird das Elektron elastisch, für $0 < x < 1$ inelastisch am Proton gestreut.

Der Wirkungsquerschnitt der tief-inelastischen Streuung wird in der Born Näherung, in der bei der Kollision von Elektron und Proton nur ein einziges virtuelles Boson ausgetauscht wird, durch die zwei Strukturfunktionen F_2 und F_1 bestimmt:

$$\frac{d^2\sigma}{dxdQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{Q^4}\left((1-y)\frac{F_2(x,Q^2)}{x} + \frac{y^2}{2}\frac{2xF_1(x,Q^2)}{x}\right)$$

3.2.2 Der Bereich des Kinematischen-Peaks

Im Quark-Parton Modell wird die tief-inelastisch Elektron-Proton-Streuung als elastische Streuung der Elektronen an punktförmigen Konstituenten des Protons, den Partonen, beschrieben. An Hand der Bjorken-Variable x läßt sich sagen, welchen Impulsbruchteil vom Gesamtimpuls des Protons das Parton hatte, an dem das Elektron gestreut wurde.
Wenn für das Parton gilt:

$$x * 820\ \text{GeV} = 26.7\ \text{GeV} \Rightarrow x \approx 3 \cdot 10^{-2}$$

Ist die Streuung elastisch und das einlaufende Elektron behält seine Energie.
In Abbildung 3.2 sind in einer Q^2-x Ebene Linien konstanter Streuenergie und Streuwinkel der Elektronen eingezeichnet. Man stellt fest, daß der Winkelbereich des BEMC zu einem großen Teil durch diese Ereignisse abgedeckt wird. Man erwartet daher im Energiespektrum des BEMC einen deutlichen Peak bei der Elektronstrahlenergie.

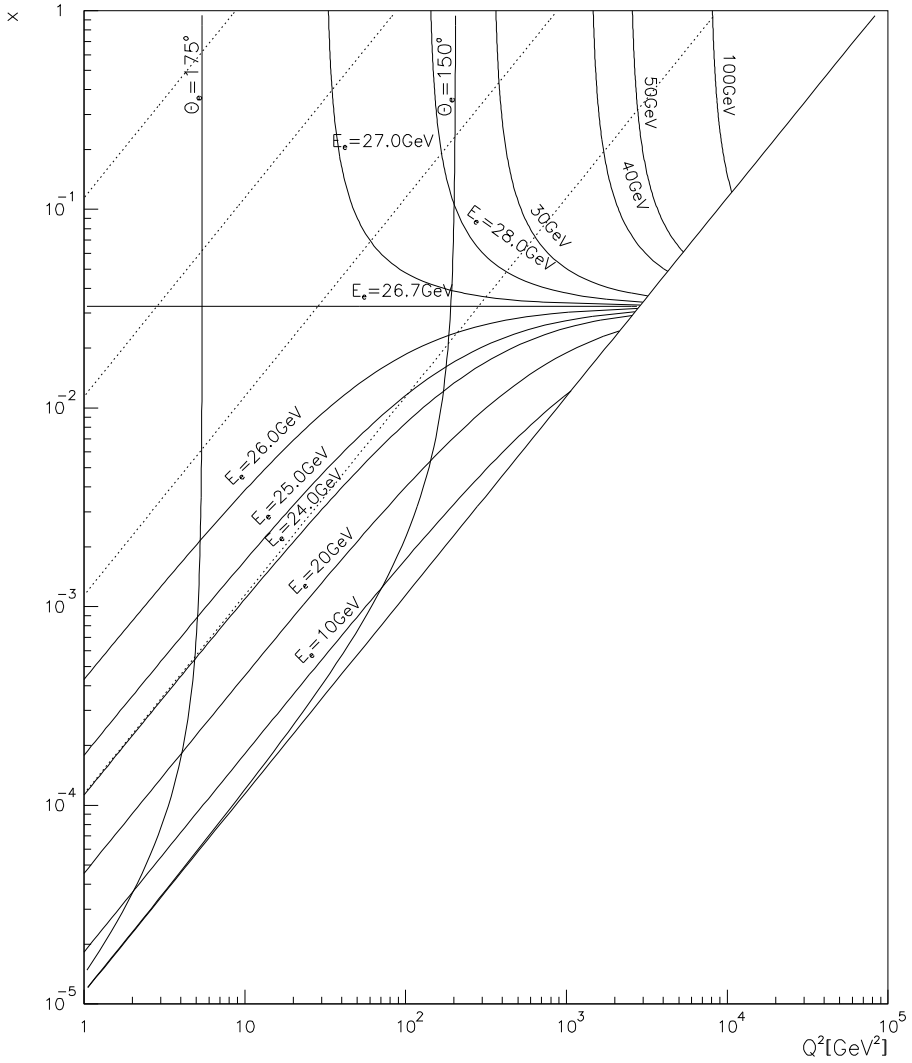


Abb. 3.2 x-Q^2 Ebene der Elektron-Proton Streuung mit $E_{Elektron}$= 26.7 GeV und E_{Proton}= 820 GeV. Eingezeichnet sind Linien konstanter Energie E und Linien konstanten Streuwinkels Θ_k der gestreuten Elektronen.

4 Das Rückwärtige Kalorimeter

Das BEMC wurde konstruiert um die Energien der am Proton gestreuten Elektronen im rückwärtigen Bereich des H1-Detektors zu bestimmen. Das Kalorimeter deckt dabei den Winkelbereich zwischen $\Theta_1 = 151.4°$ und $\Theta_2 = 176.5°$ ab (Abb. 4.1). Für Winkel kleiner als 154° oder größer als 175° treten allerdings signifikante Leckverluste auf. Verwertbare Ergebnisse sind daher nur für Winkel zwischen 154° und 175° zu erwarten [10]. Das BEMC ist vom Wechselwirkungspunkt 145,8 cm entfernt und liegt somit noch innerhalb des Magnetfeldes.

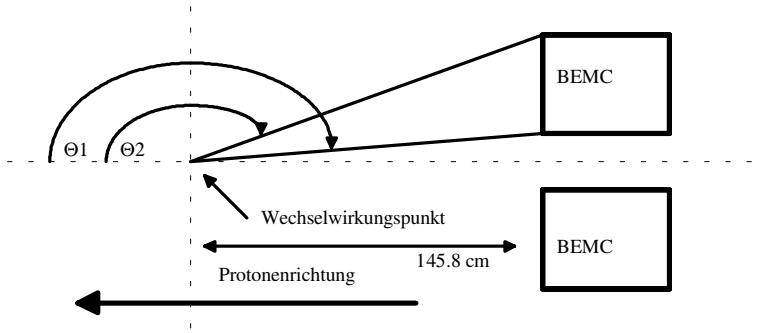


Abb. 4.1 : Position des BEMC im H1 Detektor. Die Abbildung ist nicht maßstabsgerecht.

Abbildung 4.2 zeigt einen Querschnitt des BEMC senkrecht zur Strahlrichtung.

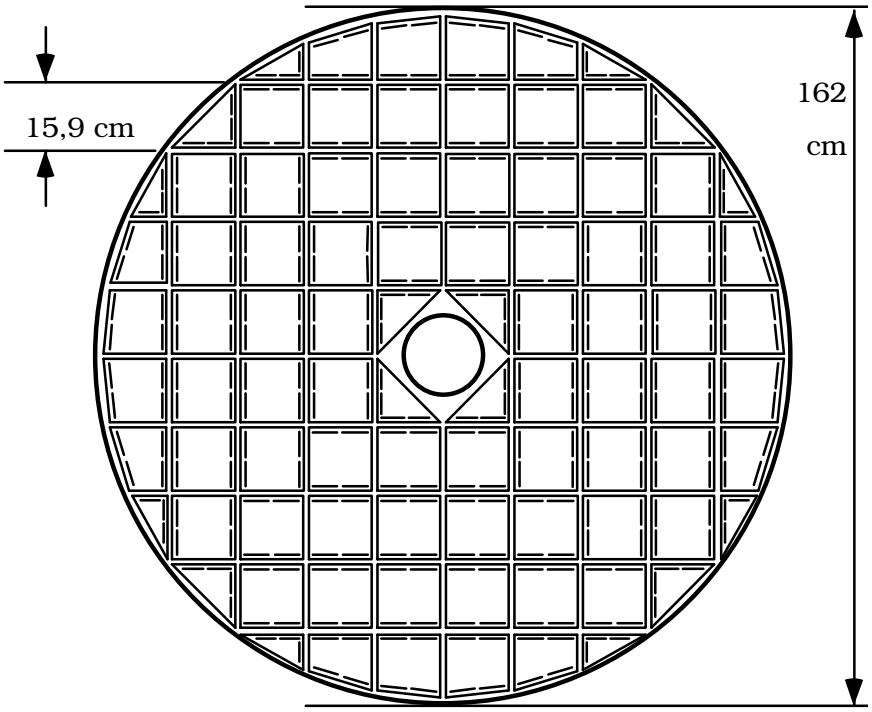


Abb. 4.2 Ansicht des BEMC in der x-y Ebene. Die kurzen Linien innerhalb der Module stellen die Anordnung der langen Wellenlängenschieber dar. In der Mitte ist der innere Trägerring zu sehen durch den das Strahlrohr geführt wird

4.1 Aufbau des BEMC

Das BEMC ist ein konventionelles Blei-Szintillator Sampling-Kalorimeter in Sandwich-Bauweise [11]. Es setzt sich aus insgesamt 88 einzelnen Modulen zusammen. Diese Module sind in einer Aluminiumtonne mit einem Durchmesser von 162 cm und einer Länge von ca. 39 cm, untergebracht. Das Gesamtgewicht des Kalorimeters beträgt ca. 3 t.
Alle Module besitzen denselben prinzipiellen Aufbau aus aufeinander folgenden Lagen Plastikszintillator[4] und Blei. Der Plastikszintillator dient als aktives, das Blei als passives Material. Insgesamt besteht die Sandwich-Struktur aus 50 Lagen Szintillator und 49 Lagen Blei. Die Schichtdicke der Szintillatorlagen beträgt 4 mm, die der Bleilagen 2,5 mm.
Die Blei- bzw. Szintillatorschichten sind zusammen mit den Wellenlängenschieber[5] in lichtundurchlässige Folie eingeschweißt und von einem 0.2 mm starken Stahlmantel umgeben. Zur Halterung der Module sind an der Vorder- und Rückseite 18 mm starke Aluminiumplatten angebracht .

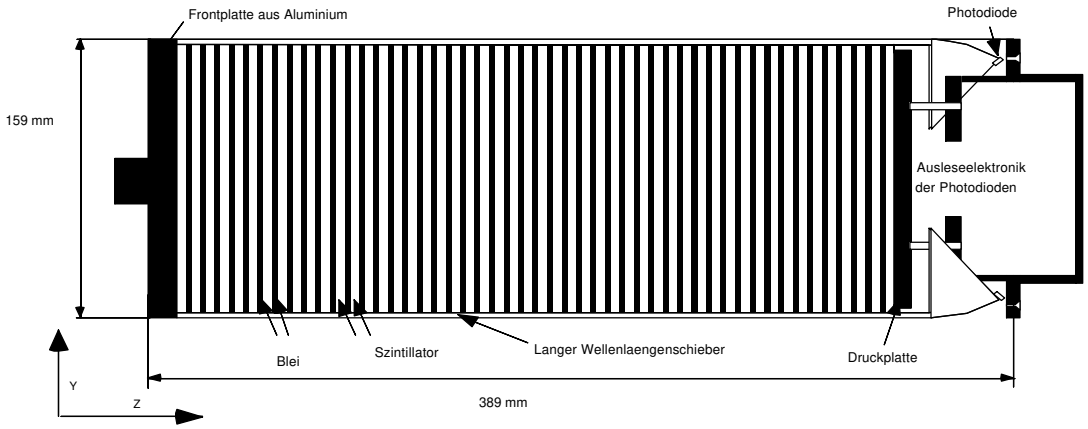


Abb. 4.3 Längsschnitt eines quadratischen Moduls

Das in den Szintillatorplatten entstandene Licht wird überwiegend durch Totalreflexion zur sogenannten Auslesekante transportiert. Dort wird es über einen 0.3 mm starken Luftspalt in die Wellenlängenschieber eingekoppelt. Dort wird es absorbiert und mit vergrößerter Wellenlänge wieder emittiert. Das emittierte Licht gelangt dann wiederum durch Totalreflexion zu den Photodioden[6].
Der verwendete Szintillator ist ein Plastikszintillator auf Polystyrolbasis, dem ca. 1% Farbstoffe beigemischt sind. Polystyrol selbst szintilliert im UV-Bereich., die Farbstoffe verschieben die Wellenlänge des Szintillationslichtes in den blauen Bereich. Die verwendeten Photodioden besitzen in diesem Spektralbereich nur eine geringe Empfindlichkeit. Daher ist es notwendig die Wellenlänge des Lichts in einen für sie günstigeren Bereich zu verschieben, um so eine möglichst hohe Lichtausbeute zu gewährleisten. Dies wird durch die sogenannten Wellenlängenschieber realisiert. Der im Wellenlängenschieber eingelagerte Farbstoff verschiebt die Wellenlänge des Lichts in den grünen Spektralbereich. Für diesen weisen die Photodioden ein höhere Empfindlichkeit als für den blauen Spektralbereich auf.

---

[4] Der verwendete Szintillator SCSN-38 ist ein Plastikszintillator auf Polystyrolbasis mit Beimengungen von 1 % b-PBD und 0,02 % BDP. Diese Farbstoffe verschieben das Szintillationslicht des Polystyrols vom UV-Bereich in den Bereich blauen Lichts.

[5] Die Wellenlängenschieber bestehen aus Plexiglas dem der Farbstoff Y-7 beigemischt ist.

[6] Es werden Photodioden der Firma Hamamatsu vom Typ S2575 verwendet.

Um den kreisrunden Querschnitt des BEMC (s. Abb. 4.2) optimal auszunutzen, wurden 5 verschiedene Modulformen verwendet (s. Abb. 4.4)

Bei den Typen A und B, Quadrate und große Trapeze, sind an zwei gegenüberliegenden Seiten jeweils zwei lange Wellenlängenschieber angebracht. Diese überdecken die gesamte Länge des Moduls und lesen somit alle 50 Lagen Szintillator aus. Jeder Wellenlängenschieber wird von einer Photodiode ausgelesen. Zusätzlich werden bei diesen Modulen noch die vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen letzten 15 Lagen durch kurze Wellenlängenschieber ausgelesen. Diese sind doppelt so breit wie die langen Wellenlängenschieber und werden von jeweils zwei Photodioden ausgelesen.
Bei den Modultypen C, D und E muß aus Platzgründen auf die kurzen Wellenlängenschieber verzichtet werden. Die Anordnung der langen Wellenlängenschieber ist in Abb. 4.4 dargestellt, sie überdecken alle 50 Lagen Szintillator und werden von jeweils einer Photodiode ausgelesen.

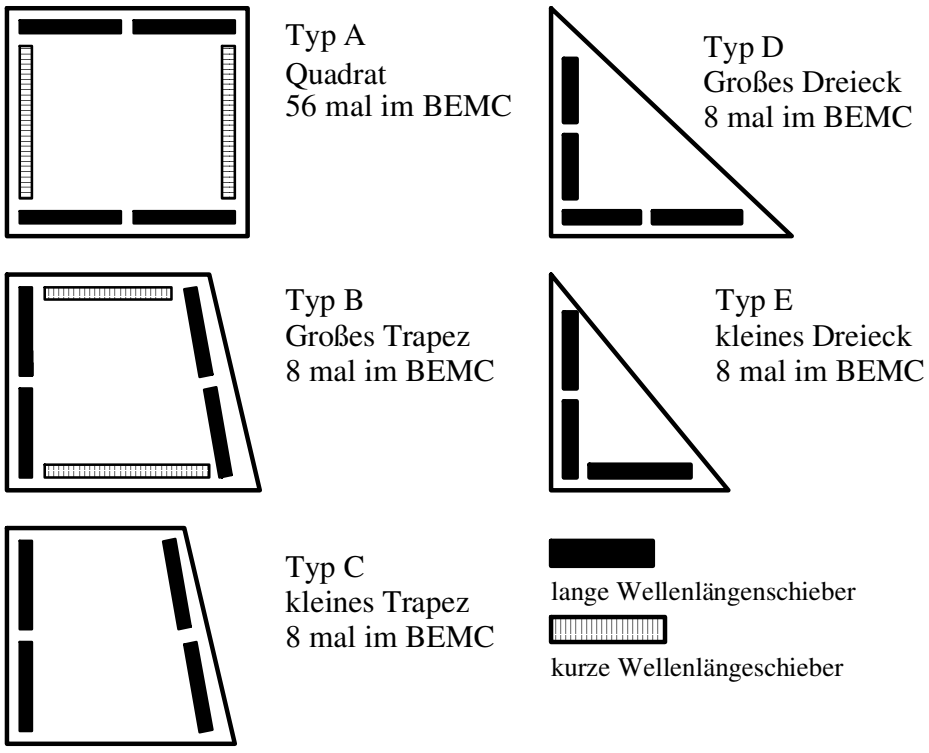


Abb. 4.4 Formen der im BEMC verwendeten Module mit Wellenlängenschiebern.
(Die Darstellung ist nicht maßstabsgerecht)

Aus den Schichtdicken und Strahlungslängen von Szintillator und Blei lassen sich die wichtigsten Größen für das BEMC ableiten.

Die effektive Strahlungslänge der Sampling-Struktur beträgt X_0^{BEMC} **= 1.43 cm**

Insgesamt hat die Sampling-Struktur eine longitudinale Ausdehnung von 34.25 cm, was **22.5 elektromagnetischen Strahlungslängen** X_0 oder **0.97 hadronischen Wechselwirkungslängen** entspricht.

Die kritische Energie der Struktur beträgt E_{krit} **= 8.9 MeV**

Der Moliere-Radius ist R_M **= 3.4 cm**.

4.2 Die Ausleseelektronik des BEMC

Auf der Rückseite jedes Moduls befindet sich ein Gehäuse in dem die Ausleseelektronik der Photodioden untergebracht ist.
Die analogen Signale der Photodioden werden über einen Vorverstärker PA auf einen Kabeltreiber LD geleitet. Dieser ist nötig, da sich die eigentliche BEMC Elektronik in einem 30 m entfernten Container befindet. Die Leitung der Signale erfolgt über ein Vielfach-Twisted-Pair Kabel. Empfangen werden die Signale in der Cable-Distribution-Unit CDU von einem Empfänger LR. Von dort wird das Signal zur einer Analogkarte ANCA weiter geleitet. Zusätzlich wird in der Cable-Distribution-Unit noch die Summe der vier anlogen Signale der langen Wellenlängenschieber jedes Moduls gebildet. Dieses Summensignal wird zu dem Trigger des BEMC weiter geleitet.

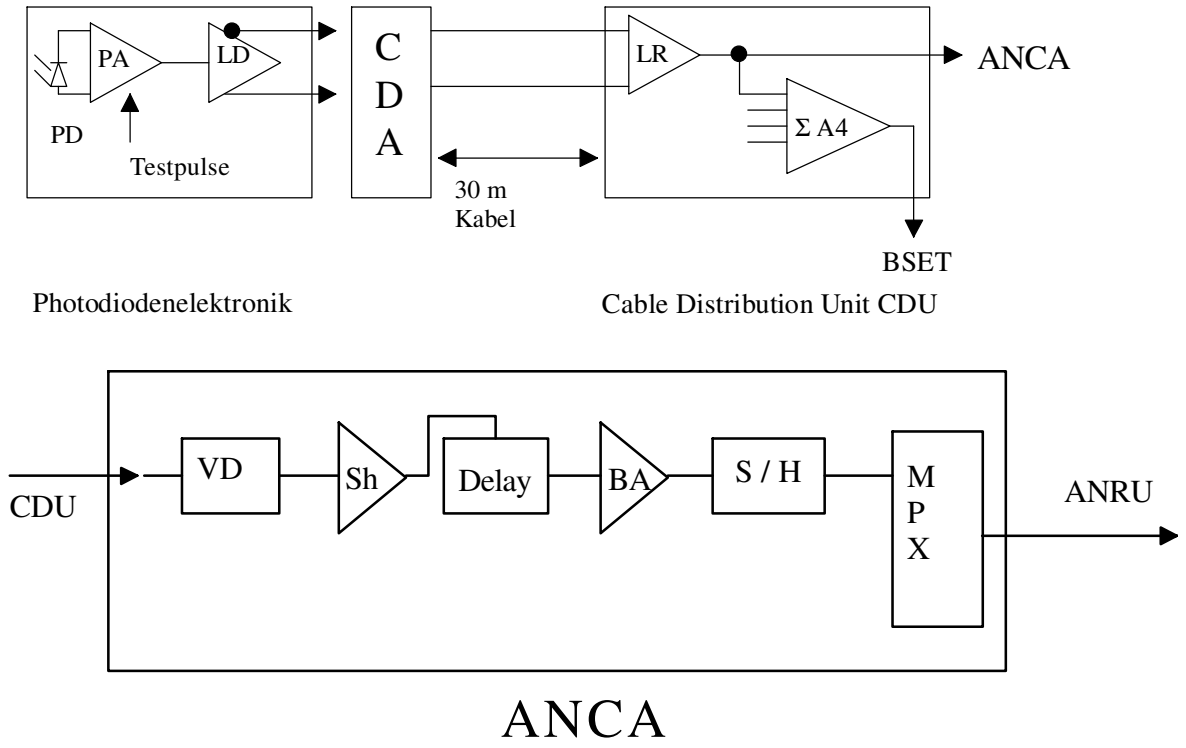


Abb. 4.5 Schema der BEMC Signalauslese für eine Photodiode.

In der sogenannten Analogkarte ANCA wird das Signal über einen Spannungsteiler auf einen Signal-Former Sh geleitet. Dieser erzeugt ein unipolares Signal mit einer Anstiegszeit von 200 ns und einer Breite von 500 ns. Das Signal wird danach analog verzögert (Delay) um sicher zustellen, daß das Maximum des Signals exakt nach 2.48 µs erreicht wird. Die Verzögerung kann manuell über einen Bereich von 200 ns in Schritten von 20 ns justiert werden.
Das geformte und verzögerte Signal wird über einen Pufferverstärker BA zu einer 'Sample and Hold' Schaltung S/H geleitet. Sendet der Trigger das Signal zur Auslese der Daten, wird von der 'Sample and Hold' Schaltung die zu diesem Zeitpunkt anliegende Pulshöhe des unipolaren Signals bestimmt. Da dies am Maximum des Signals geschehen soll, muß die Verzögerungszeit so justiert sein, daß das Signal sein Maximum zum gleichen Zeitpunkt erreicht an dem auch das Triggersignal vorliegt.

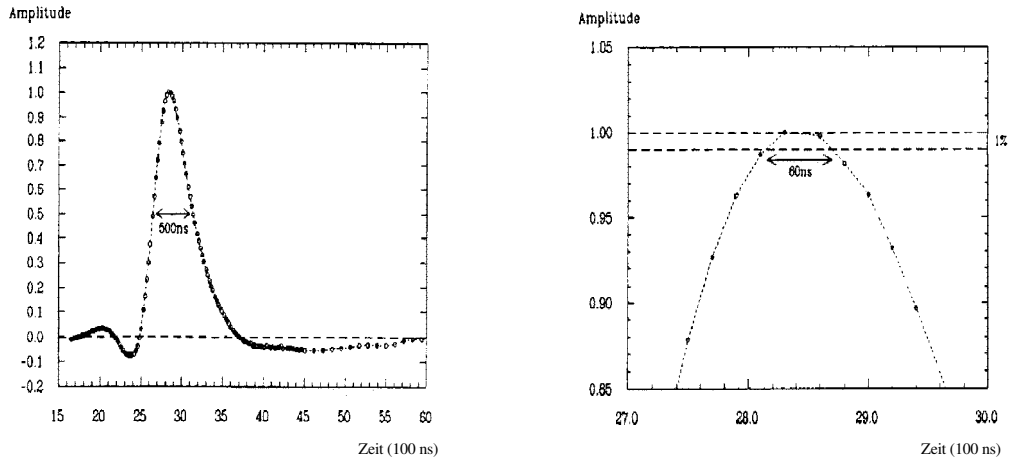


Abb. 4.6 Normalisiertes unipolares Signal des Signal-Formers.
a.) das gesamte Signal b.) die Region des Maximums. Die gestrichelte Linie gibt den Bereich einer 1% Abnahme vom Maximum an.

Die Ausgabe der 'Sample and Hold' Schaltung durchläuft danach einen Multiplexer der alle S/H Signale einer ANCA zu einem einzigen sequentiellen Signal umwandelt. Jede ANCA hat 16 einzelne Kanäle von denen jeder ein S/H Signal liefert. Die Ausgabe der ANCA wird zu einer Analog Receiving Unit ANRU weitergeleitet und danach von einem Analog-Digital-Wandler ADC digitalisiert. Die digitalisierten Daten gelangen dann in die zentrale H1-Datennahme.

4.3 Der BEMC-Trigger BSET

Wie schon in Kapitel 2.2 erwähnt, sind die Trigger der Stufe 1 mit Subdetektoren von H1 verknüpft. Als Beispiel eines solchen Stufe-1-Triggers soll hier der Trigger des BEMC, der BEMC-Single-Electron-Trigger BSET, beschrieben werden.
Eine detaillierte Beschreibung des BSET-Triggers kann in [4] nachgelesen werden. Hier soll nur ein kurzer Überblick gegeben werden.

Beim BSET-Trigger werden die analogen Signale der Photodioden verarbeitet.
Die Aufgabe des BSET-Triggers ist es, Energiedeposition im BEMC zu erkennen und diese mit gesetzten Energieschwelle zu vergleichen. Dazu werden zunächst die Energien der einzelnen Module bestimmt, d. h. es werden die Summen der Signale der langen Wellenlängenschieber gebildet und durch die Anzahl der Wellenlängenschieber geteilt. Dieser Wert ist proportional der im Modul deponierten Energie. Für die Module des BEMC wurden zwei Schwellen definiert, eine niedrige Energieschwelle LT von 1 GeV und eine hohe Energieschwelle HT von 3 GeV pro Modul.
Gruppen von Modulen mit Signalen über einer gesetzten Schwelle werden zu sogenannten Clustern zusammengefaßt. Die Clustererkennung verläuft in mehreren Schritten.

Die programmierbare Elektronik des BSET Triggers erlaubt es, bis zu vier verschiedene Bedingungen, ***C1-C4***, abzufragen die ein Ereignis erfüllen muß bevor es akzeptiert wird.

C1: Anzahl der Cluster mit Modulen deren Energien über der niedrigen Energieschwelle LT liegen.

Um die Anzahl der Cluster zu bestimmen werden die Signalsummen der Module mit der niedrigen Schwelle verglichen. Wird ein Modul gefunden, dessen Signal über LT liegt, bildet dieses Modul zusammen mit benachbarten Modulen einen Cluster, ein Cluster kann bis zu 2×2 Module umfassen. Die räumliche Verteilung der Module, die über LT liegen wird dann von sogenannten CIM Modulen, Cluster-Identification-Modul, in drei Schritten analysiert.
Der erste Schritt überprüft, ob eines der innersten vier Module über LT liegt. Ist dies der Fall, bildet dieses Modul zusammen mit den drei benachbarten Modulen ein Cluster, wobei die Energie der benachbarten Modulen ebenfalls über LT liegen muß. Diese Information wird gespeichert und die Signale dieser Module werden nicht weiter analysiert.
Im zweiten Schritt werden die X-Y Projektionen der räumlichen Verteilung, der übrig gebliebenen Module, mit Tabellen verglichen.
Der dritte Schritt summiert die, in den vorhergehenden Schritten, gefundenen Cluster.

C2: Anzahl der Cluster mit Modulen deren Energien über der hohen Energieschwelle HT liegen.

Wird ein Modul gefunden, dessen Gesamtenergie über HT liegt, dient dieses Modul als Initiator eines Clusters. Mit einer zweiten CIM Schaltungen wird die räumliche Verteilung dieser Module analysiert. Die Vorgehensweise ist dabei die gleiche wie in C1.

Die CIM Module sind programmierbar und können Auslesesignale für sechzehn verschieden Fälle produzieren (z.B. nur ein Cluster wurde gefunden, mindestens ein Cluster wurde gefunden, mindestens zwei Cluster wurden gefunden usw.). Der erste Schritt kann manuell deaktiviert werden, was für die Datennahme 1993 auch der Fall war. Konkret bedeutet das, daß die inneren Dreiecke nicht als Initiatoren eines hochenergetischen Clusters fungieren können.

C3: Bestimmen der Clusterenergie

Wenn in C2 mindestens ein Modul gefunden wurde, dessen Signal über HT liegt, wird die Energie des Clusters bestimmt. Ein Cluster setzt sich aus dem Initiatormodul plus aller angrenzenden Module über LT zusammen. Die Clusterenergie ist dann die Summe der Signale aller Module eines Clusters.
Falls mehr als ein Cluster gefunden wurde, ist es nicht möglich die Energien der Cluster getrennt zu bestimmen. Die Clusterenergie ist in diesen Fällen die Summe der Energien aller Cluster.
Nachdem die Clusterenergien gebildet sind können sie mit drei verschiedenen Energieschwellen, CL1 = 3 GeV, CL2 = 5 GeV und CL3 = 15 GeV verglichen werden.

C4: Bestimmen der Gesamtenergie des BEMC

Die Gesamtenergie des BEMC ist die Summe der Signale aller Module, die über LT liegen. Für diese Energie wurde eine Schwelle gesetzt.

Die eben beschriebenen Bedingungen bilden sogenannte Trigger-Elemente. Diese werden zur zentralen H1-Triggerlogik weitergeleitet, wo sie kombiniert mit Trigger-Elementen anderer Subdetektoren die in Kapitel 2.2 beschriebenen Subtrigger bilden.
Als Beispiel dafür sei das TOF erwähnt. Die Koinzidenz zwischen BSET und TOF stellt eine der wichtigsten Bedingung zur Unterdrückung von Untergrundereignissen dar.

Mittels des TOF kann entschieden werden, ob Teilchen die im BEMC nachgewiesen werden aus tief-inelastischen Streuprozessen stammen, oder ob es sich um Untergrundereignisse handelt.
Das TOF besteht aus zwei hintereinander aufgestellten Szintillatorebenen. Mittels der HERA-Uhr werden zwei Zeitfenster definiert, ein sogenanntes Wechselwirkungs-Fenster und ein Untergrund-Fenster. Passiert ein Teilchen das TOF während das Wechselwirkungsfenster offen ist, stammt es mit großer Wahrscheinlichkeit aus einem tief-inelastischen Ereignis. Das TOF sendet in diesem Fall das Trigger-Element TOF-WW. Wird ein Teilchen nachgewiesen während das Untergrundfenster offen ist, sendet das TOF das Trigger-Element TOF-UN. Das TOF hat sich als eines der wirksamsten Mittel zur Unterdrückung von Untergrundereignissen erwiesen. Das Trigger-Element TOF-UN ist in den meisten Subtriggern als Veto Bedingung enthalten.
Die Unterscheidung zwischen Untergrund- und tief-inelastischen Ereignissen mittels zweier Zeitfenster läßt sich leicht mit Abbildung 4.7 verstehen. Findet ein Untergrundereignis statt, also eine Wechselwirkung der Protonen mit Restgasatomen im Strahlrohr oder mit dem Strahlrohr selbst, erreichen die erzeugten Teilchen, auf Grund des kürzeren Weges, das TOF ca. 10-12 ns eher als Teilchen aus Elektron-Proton Wechselwirkungen.

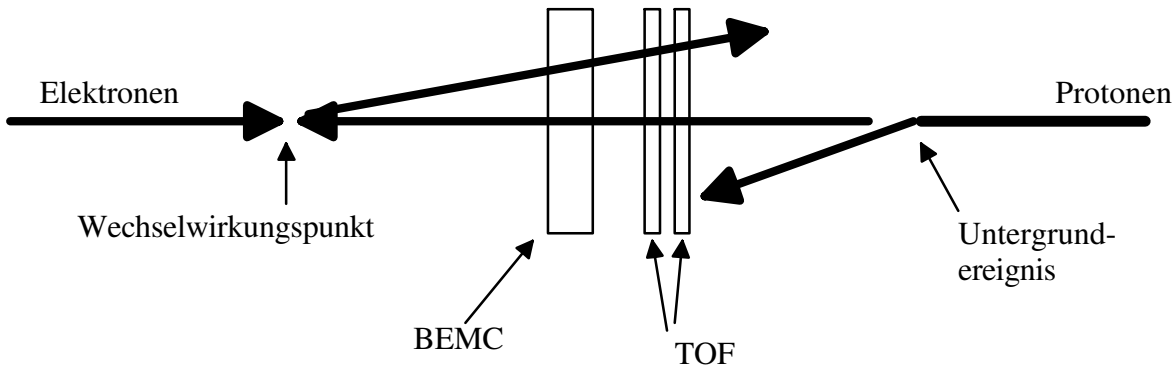


Abb. 4.7 Schematische Darstellung der Funktionsweise des TOF-Triggers.

4.4 Kalibration des BEMC vor der ersten Datennahme

Die Kalibration des BEMC läßt sich in zwei Schritte zerlegen. Im ersten Schritt wird die Elektronik des BEMC kalibriert. Der zweite Schritt kalibriert das optischen System, bestehend aus Szintillator, Wellenlängenschieber und Photodiode.

4.4.1 Kalibration der Elektronik

Zur Kalibration der Elektronik des BEMC können geeichte Testpulse in den Vorverstärker der Photodiode eingekoppelt werden (s. Abb. 4.5). Auf diese Weise läßt sich die gesamte Elektronik des BEMC inklusive der verbindenden Kabel kalibrieren, sowie das Rauschen der Verstärker bestimmen. Jedes Modul des BEMC ist mit einem eigenen Pulsgenerator verbunden.

Eine weiter Aufgabe dieser Kalibration ist es die Verzögerungszeiten (s. Abschnitt 3.2) der Analogsignale abzugleichen. Das Triggersignal welches den Zeitpunkt der Auslese festlegt kommt für alle Kanäle gleich. Zu diesem Zeitpunkt muß in jedem Kanal das Maximum des Signals anliegen, da nur das Maximum des Signals der entstanden Lichtmenge und damit der deponierten Energie entspricht. Der Bereich in dem das Maximum des Signals um 1% abgefallen ist entspricht einem Zeitintervall von 60 ns (s. Abb. 4.6.b). Daher müssen die Verzögerungszeiten präzise bestimmt werden. Das Abgleichen und Einstellen der Verzögerungszeiten erfolgt einmal pro Jahr.

Nach [5] ist die Elektonik, über einen Zeitraum von einem Monat, bis auf einige Promille stabil. Da die Kalibration der Elektronik während der Datennahme einmal pro Woche durchgeführt wird, liegen die Unsicherheiten bezüglich der Elektronik unter einem Promill.

Für weitere Details der Kalibrationsprozedur und ihrer Ergebnisse sei auf [5] verwiesen.

4.4.2 Kalibration des optischen Systems vor der ersten Datennahme

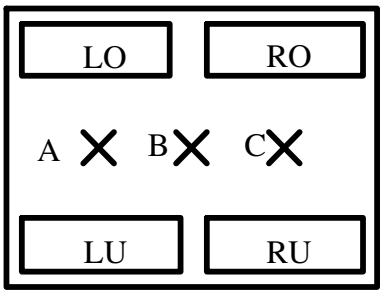
Die Kalibration der Energieskala des BEMC vor der ersten Datennahme basiert auf folgenden Teststrahlmessungen:

Elektron-Teststrahldaten aufgenommen am DESY (1990)

Elektron-, Pion- und Myon-Teststrahldaten aufgenommen am CERN (1991)

Untersuchungen mit kosmischer Strahlung

Die Energieskala fast aller quadratischen Module wurden mit einem 5 GeV Elektronenstrahl am DESY Synchrotron festgelegt. Vier Module konnten Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Datennahme nicht auf diese Weise kalibriert werden.
Das Festlegen der Energieskala erfolgte in drei Schritten und ist in [6] genau beschrieben. Hier soll nur ein kurzer Überblick gegeben werden.



LO = linker oberer Wellenlängenschieber
LU = Linker unterer Wellenlängenschieber
RO = rechter oberer Wellenlängenschieber
RU = rechter unterer Wellenlängenschieber

Abb. 4.8 Darstellung der Einschußpunkte bei der Kalibration

Im ersten Schritt wurden die gegenüberliegenden Wellenlängenschieber gegeneinander abgeglichen. Auf Grund der Symmetrie des Moduls müssen der rechte obere Kanal und der rechte untere Kanal die gleiche Energie anzeigen, wenn in Punkt A (s. Abb. 4.8) eingeschossen wird.

Das Gleiche gilt für die Kanäle links, wenn in Punkt C eingeschossen wird. Daraus ergibt sich für jeden der vier Kanäle ein Korrekturfaktor b_i (mit i=LO, LU, RO, RU).

Im zweiten Schritt wurden mögliche Ortsungenauigkeiten des Einschußpunktes korrigiert. Die Gesamtenergie eines Moduls ist definiert als die Summe aller Kanäle geteilt durch die Anzahl der Kanäle. Auf Grund der Symmetrie muß die Gesamtenergie für einen Einschuß in A bzw. in C gleich sein. Auf diese Weise läßt sich ein Verschiebungsfaktor g ermitteln. Die daraus resultierenden Korrekturfaktoren für die einzelnen Kanäle ergeben sich dann zu :

$$\beta_{LU,\,LO} = b_{LU,\,LO} * g$$
$$\beta_{RU,\,RO} = b_{RU,\,RO} / g$$

Wobei g in der Größenordung von $|1 - g| < 1\%$ liegt.

Im dritten und letzten Schritt wurde in die Mitte des Moduls (Punkt B) eingeschossen. Die Gesamtenergie des Moduls wurde dann durch einen Faktor α auf die nominale Energie des Teststrahls von 5 GeV kalibriert. Somit ergeben sich die endgültigen Kalibrationskonstanten der einzelnen Kanäle zu :

$$\alpha_i = \alpha * \beta_i \quad (\text{mit i = LO, LU, RO, RU})$$

Wie eingangs erwähnt, konnten nicht alle quadratischen Module auf diese Weise kalibriert werden. Für diese vier Module wurde als Kalibrationsfaktor der Mittelwert der Kalibrationskonstanten der übrigen Module verwendet. Die Verteilung der Faktoren hatte eine Standardabweichung von ca. ±5.3%, die maximale Abweichung war ca. ±20%.

Für die nicht quadratischen Module konnte die eben beschriebene Kalibrationsmethode nicht verwendet werden, da sie im Gegensatz zu den quadratischen Modulen keine Symmetrien auf weisen, die für eine Kalibration geeignet wären. Zusätzlich zeigte sich, daß diese Module eine deutlich größere Lichtausbeute haben, die von [12] mittels kosmischer Strahlung relativ zu den Quadraten ermittelt wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Modul Formen	Anzahl der vermessenen Module	relative Lichtausbeute
quadratisch	40	1
großes Trapez	4	1.05
kleines Trapez	4	1.34
großes Dreieck	10	1.89
kleines Dreieck	10	2.9

Tab. 4.1 Relative Lichtausbeute der verschiedenen Modulformen

Der absolute Kalibrationsfaktor eines Wellenlängenschieber eines nicht quadratischen Modul ist somit :

$$\alpha_i = G_A * L_t * \omega_{ti}$$

mit :

- α_i = Kalibrationsfaktor
- G_A = Mittelwert der Kalibrationsfaktoren der quadratischen Module. (Der Fehler wurde auf ±5.3% abgeschätzt.)
- L_t = relative Lichtausbeute (Tabelle 4.1), t steht für die verschiedenen Modultypen.(Der Fehler wurde auf ca. ±10% abgeschätzt.)
- ω_{ti} = Gewichtungsfaktor für Wellenlängenschieber i des Moduls t. (Der Fehler wurde auf ±2.4% abgeschätzt.)

Der Fehler dieser Kalibration liegt insgesamt bei ca. ±12%.

4.5 Kalibration des BEMC während der Datennahme 1992

Zu Beginn der Datennahme 1992 wurde eine Verschiebung der BEMC-Energieskala beobachtet. Ereignisse, die dem Kinematischen-Peak zu zuordnen sind, lagen in ihrer Energie zu hoch. Die Größe der Verschiebung und damit die erforderliche Kalibrationskonstante wurde von [7] bestimmt.
Zur Kalibration wurden Elektronen aus dem Bereich des Kinematischen-Peaks benutzt. Ihre Energieverteilung wurde mit der einer Monte Carlo Simulation, im Energiebereich > 25 GeV, verglichen. Durch Variation der Kalibrationskonstante und der Normalisierung der BEMC Energieverteilung wurde die beste Übereinstimmung mit den Monte Carlo Daten gesucht. Die Übereinstimmung zwischen Monte Carlo Daten und H1 Daten wurde durch einen χ^2-Test [8] bestimmt. Mit dieser Methode konnte eine Verschiebung der Energieskala um 7% festgestellt werden. Die Energieskala des BEMC wurde global um 7% korrigiert.
Der Fehler der Kalibration wurde mit ±1% statistischer Fehler und ±2% systematischer Fehler angegeben.

4.6 Rekonstruktion der BEMC Energien

Die Rekonstruktion der BEMC Energien wird in 4 Schritten durchgeführt.

1. Umwandlung der Photodiodensignale in kalibrierte Energien.
   Mit den in Kapitel 4.5 beschriebenen Kalibrationsfaktoren werden den Diodensignalen Energien zugeordnet.

2. Kombinieren der einzelnen Wellenlängenschieber Energien E_i zu Modul Energie E_M.

   Es gilt : $E_M = \frac{\sum E_i}{\text{Anzahl der Wellenlängenschieber}}$

3. Bestimmen der Clusterenergie.
   Die Clusterenergie ist die Summe aller Modulenergien eines Clusters.

4. Korrigieren der Energieverluste, die durch totes Material und Inhomogenitäten zwischen den Modulen entstehen.

Bevor die Elektronen im BEMC nachgewiesen werden können, durchqueren sie ca. 1-2 Strahlungslängen Material. Die Energie, die dort deponiert wird, kann nicht nachgewiesen werden. Es wird daher auch als 'totes Material' bezeichnet. Zum einen sind dies Zuleitungen und Elektronikbauteile anderer Subdetektoren, zum anderen aber auch Subdetektoren selbst, wie zum Beispiel die BPC. Die Korrekturen, die durch totes Material nötig werden, sind abhängig von der Energie des Teilchens. Für Primärenergien im Bereich von 26 GeV beträgt die Korrektur ca. 2%.

Ein zusätzlicher Energieverlust kommt durch Inhomogenitäten des BEMC zustande. Wird ein Teilchen in den Bereich zwischen den Modulen eingeschossen oder dehnt sich ein Schauer über mehrere Module aus, kommt es in den Übergängen zwischen den einzelnen Modulen, den sogenannten Cracks, zu Energieverlusten. Dieser Energieverlust wurde mit Monte Carlo Studien untersucht [6], das Ergebnis ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Man sieht, daß die Energieverluste bis zu 8% betragen können. An Hand dieser Simulationen kann der Energieverlust korrigiert werden. In Abbildung 4.10 ist der Bereich des BEMC dargestellt für den diese Korrekturen implementiert sind.

Für beide Korrekturen, totes Material und Cracks, muß die Lage des Wechselwirkungspunktes sowie die Spur des Teilchens bekannt sein. Kann die Spur nicht vollständig rekonstruiert werden, muß zumindest ein rekonstruierter BPC Treffer vorliegen. Mit Hilfe der x-y Koordinate der BPC und der Lage des Wechselwirkungspunktes kann dann die Spur des Teilchens angenähert werden.

Die genaue Beschreibung der Rekonstruktion, welche Programme aufgerufen werden und welche Ergebnisse in welchen Datenbänken abgespeichert werden, ist in [6] beschrieben.

BEMC Energien, die bezüglich des toten Materials und der Inhomogenitäten korrigiert sind, werden im weiteren als korrigierte BEMC Energie bezeichnet. Wurden die oben beschriebenen Korrekturen nicht gemacht, werden sie als unkorrigierte BEMC Energien bezeichnet.

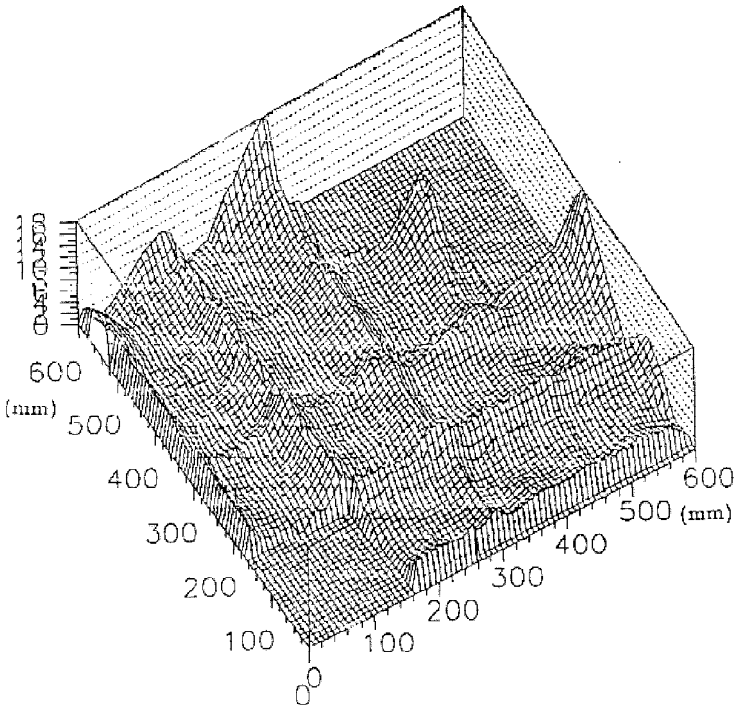


Abb. 4.9
Monte Carlo Studie der Energieverluste in den Inhomogenitäten zwischen den Modulen. Aufgetragen ist der Energieverlust in Prozent für 30 GeV Elektronen, in Abhängigkeit von der Einschußposition.

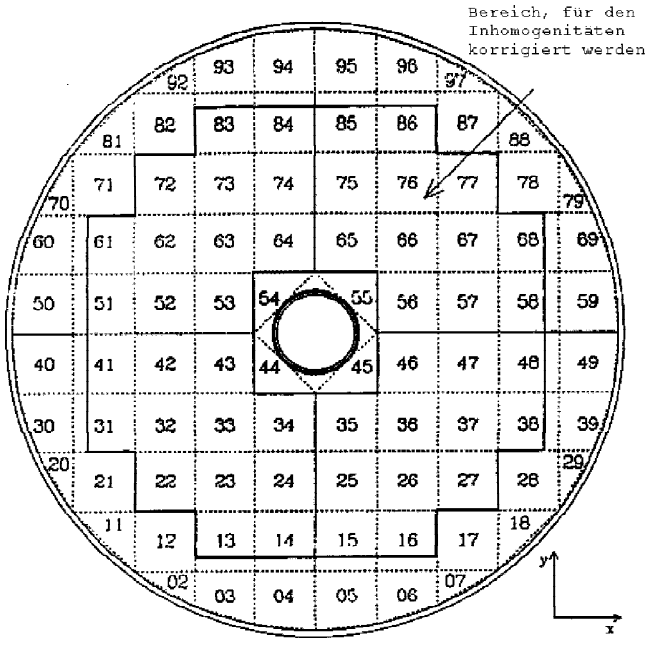


Abb. 4.10
Ansicht des BEMC in der x-y Ebene.
Der Bereich für den Inhomogenitäten korrigiert werden können ist schwarz umrandet.

5 Kalibration des BEMC

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, wurde die Energieskala aller Module des BEMC vor dem Einbau kalibriert. Aus verschiedenen Gründen kann sich diese Kalibration allerdings mit der Zeit ändern. Gründe können sein:

- Alterungseffekte des Szintillators.
  Die Lichtausbeute des Szintillators wird mit zunehmenden Alter geringer, d. h. Teilchen erzeugen bei gleicher Energie in älterem Szintillatormaterial weniger Licht als in neuem. Dadurch wird die Energie der Teilchen vom Kalorimeter systematisch zu niedrig angezeigt.

- Strahlungsschäden am Szintillator
  Strahlungsschäden wirkten sich auf den Szintillator ähnlich wie Alterungseffekte aus.

- Mechanische Veränderung.
  Wenn man in Abbildung 4.2 die Anordnung der Wellenlängenschieber in den einzelnen Module betrachte, stellt man fest, daß sie bei einigen Modulen horizontal zur Strahlachse liegen. Auf ihnen lastet so das gesamte Gewicht der Bleiplatten. Es ist denkbar, daß dies auch zu einer geringeren Lichtausbeute führen kann.

- Einfluß des Magnetfeldes

- Effekte hervorgerufen durch den Einfluß der N_2 - Atmosphäre
  Die vor dem BEMC installierte Proportional-Kammer (BPC) wird mit einem brennbaren Gasgemisch betrieben. Aus Sicherheitsgründen wird deshalb die gesamte Umgebung, und damit auch das BEMC, mit Stickstoff geflutet. Eine Arbeit von [9] zeigt, daß Stickstoff die Lichtausbeute des Szintillators vergrößert.

All diese Gründe machen es nötig die Kalibrationsfaktoren der Module zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren.
Ziel dieser Arbeit war es, für jedes Modul einen individuellen Kalibrationsfaktor zu bestimmen.

Die Physik der tief-inelastischen Elektron-Proton Streuung bietet dazu ein gute Möglichkeit. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, erwartet man im Energiespektrum der gestreuten Elektronen einen deutlichen Peak bei der Strahlenergie der Elektronen. Mit Hilfe dieses Peaks soll die Energieskala des BEMC festgelegt und damit die Kalibrationsfaktoren bestimmt werden.
Abbildung 5.1.a zeigt eine simulierte Energieverteilung der gestreuten Elektronen im Bereich des BEMC wie man sie erwarten würde, hätte man ein perfektes Kalorimeter in dem die Energie des Elektrons ohne jegliche Verluste und Unsicherheiten nachgewiesen werden könnte. Die Verteilung, die man jedoch tatsächlich sieht, hat aus unterschiedlichen Gründen ein anderes Aussehen.
Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, besitzt das BEMC eine endliche Energieauflösung. Dadurch wird die Energieverteilung verschmiert, d.h. verbreitert. Da es sich um eine unsymmetrische Verteilung mit einem Übergewicht auf der niederenergetischen Seite (s. Abb. 5.1.a) handelt, wird das Maximum der Verteilung zu kleineren Energie hin verschoben. Zusätzlich muß noch berücksichtigt werden, daß die Elektronen, bevor sie im BEMC nachgewiesen werden können, ca. 1 -1.5 Strahlungslängen totes Material durchqueren müssen, wodurch sie an Energie verlieren. Da die Kalibration auf dem Niveau der unkorrigierten BEMC Energie durchgeführt

wurde, mußten alle Effekte, die durch die Unvollkommenheit des Detektors zustande kommen, berücksichtigt werden. Dazu wurde mit einer Monte Carlo Simulation eine Energieverteilung generiert, die mit den im Experiment aufgenommenen Daten verglichen werden konnte. Es wurde dabei vorausgesetzt, daß die Simulation den Zustand eines optimal kalibrierten BEMC beschreibt. Dies schließt im Besonderen ein, daß alle Module gegeneinander richtig kalibriert sind.

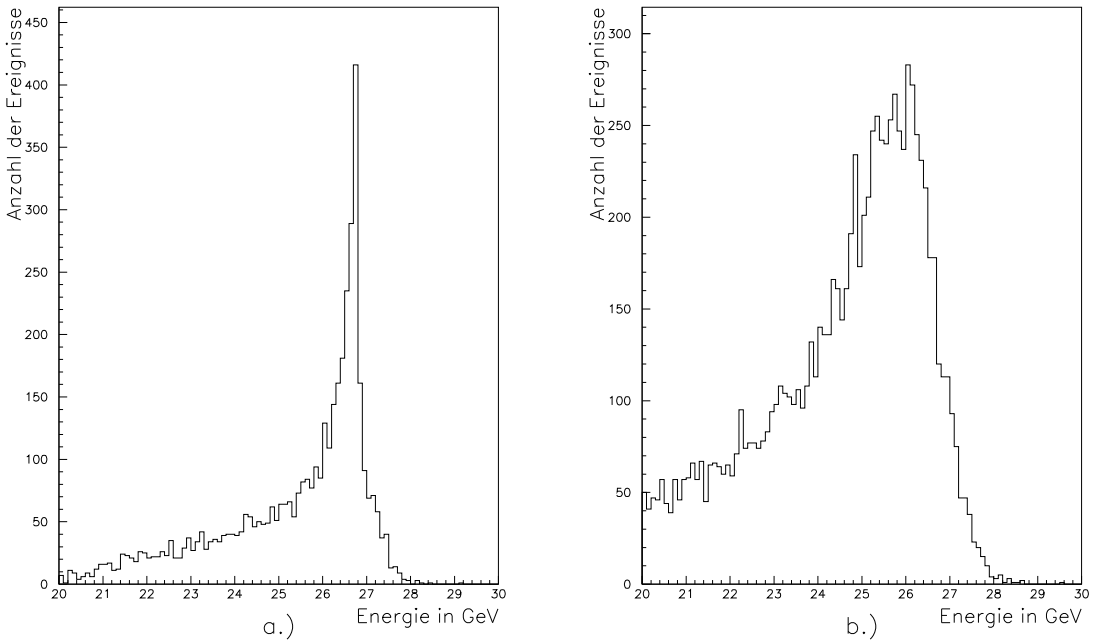


Abb. 5.1 Die abgebildeten Energieverteilungen des gestreuten Elektrons ergeben sich aus eine Monte Carlo Simulation bei der als Strukturfunktion des Protons MRSD- angenommen wurde
a.) Kinematischer-Peak ohne Detektor Simulation
b.) Kinematischer-Peak mit Detektor Simulation auf dem Niveau unkorrigierter BEMC Energien.

Die Monte Carlo Simulation besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden mit einem sogenannten Ereignis-Generator die physikalischen Prozesse der Elektron-Proton Streuung simuliert. Im zweiten Teil, der Detektorsimulation, wird die Wechselwirkung der so generierten Teilchen mit dem Detektor simuliert, z.B. die Energieauflösung eines Kalorimeters, totes Material oder die begrenzte Ansprechwahrscheinlichkeit von Proportionalkammern.

5.1 Selektion der zur Kalibration verwendeten Daten

Mit Hilfe des in Kapitel 2.2 beschriebenen Stufe-4-Triggers (Filter Farm) wurden Ereignisse speziell für die Kalibration des BEMC selektiert. Die vom Stufe-4-Trigger akzeptierten Ereignisse werden zur DESY-IBM weitergeleitet und dort von einem 'Data-Logging' Programm verteilt. Dieses Programm speichert die Ereignisdaten zum einen als 'Rohdaten', zum anderen werden die Daten kopiert und zu SGI-Workstations transferiert von denen sie rekonstruiert und auf sogenannten Data-Summary-Tapes (DST) gespeichert werden.
Während der Datennahme 1993 wurde vom Data-Logging Programm noch ein weiteres File geschrieben, das sogenannte BEMC-MONITOR-File. Für Kalibrationsereignisse, die als solche von der Filter-Farm gekennzeichnet wurden, wurden die Daten des BEMC, der BPC und des TOF auf dieses File geschrieben. Das File enthält im einzelnen die nicht rekonstruierten Daten des BEMC, der BPC und des TOF, sowie die rekonstruierten Daten des BEMC.

Im Fall der rekonstruierten Daten des BEMC wurde ausgenutzt, daß Ereignisse auf der Filter-Farm ganz oder teilweise rekonstruiert werden können, um detaillierte Bedingungen zu stellen. Zur Selektion der Kalibrationsereignisse war dies für das BEMC nötig.
Das BEMC-MONITOR-File stellt ein Daten-Sample dar, welches unabhängig von der eigentlichen H1 Datenrekonstruktion rekonstruierte Daten zur Analyse zur Verfügung stellt.

Zur Selektion der Kalibrationsereignisse wurden auf der Filter-Farm folgende Bedingungen gestellt.

- **Die Ereignisse müssen der BSET Trigger-Bedingung CL2 genügen und dürfen kein TOF-Veto aufweisen.**
  Diese Bedingung stellt sicher, daß die Teilchen die im BEMC nachgewiesen werden, vom Wechselwirkungspunkt stammen.

- **Das Ereignis darf nur einen BEMC-Cluster aufweisen.**

- **Die Energie des BEMC-Clusters muß größer als 15 GeV sein.**
  Die Strahlenergie der Elektronen beträgt 26.7 GeV, dadurch liegt der für die Kalibration interessante Energiebereich sicher oberhalb 15 GeV.

- **Der Clusterradius muß kleiner als 6 cm sein.**
  Der Clusterradius C_R ist ein Maß für die transversale Ausdehnung eines Schauers.
  Da die transversale Ausdehnung eines hadronische Schauers größer ist als die eines elektromagnetischen Schauers, kann mit dieser Bedingung eine grobe Elektronenselektion durchgeführt werden. Wie man in Abbildung 5.2 sieht ist ein Clusterradius größer als 6 cm für Elektronen kaum zu erwarten.

Abb. 5.2 Monte Carlo Simulation des BEMC-Clusterradius für Elektronen.

- **Das Verhältnis Clusterenergie zu der gesamten im BEMC nachgewiesenen Energie muß größer 0.5 sein.**

- **In einer Diode darf nicht mehr als 70% der gesamten Modulenergie deponiert werden.**
  Diese Bedingung soll sogenannte 'Single-Diode' Ereignisse ausschließen.

Es zeigte sich, daß die Selektionsbedingungen auf der Filter-Farm nicht ausreichend sind. An die letztendlich zur Kalibration verwendeten Ereignisse mußten noch weitere Bedingungen gestellt werden. Zudem war es für eine befriedigende Elektronenidentifikation notwendig die auf dem BEMC-MONITOR-File enthaltenen nicht rekonstruierten Daten der BPC zu rekonstruieren. Diese zusätzlichen Bedingungen werden im Folgenden besprochen

Da zur Kalibration gestreute Elektronen im Bereich des Kinematischen-Peaks (s. Kapitel 3.2.2) verwendet werden sollen, mußte sicher gestellt werden, daß sowohl die Elektronen als auch die Protonen, die an der Reaktion beteiligt waren, die nominale Strahlenergie hatten. Dazu wurde gefordert

- **Strahlenergie der Elektronen = 26.7 GeV**

- **Strahlenergie der Protonen = 820 GeV**

Da die Kalibration auf einem Vergleich mit einer Monte Carlo Simulation beruht mußte sicher gestellt werden, daß die Daten des Experiments die gleichen Rahmenbedingungen erfüllen. Dazu wurden folgende Bedingungen gefordert:

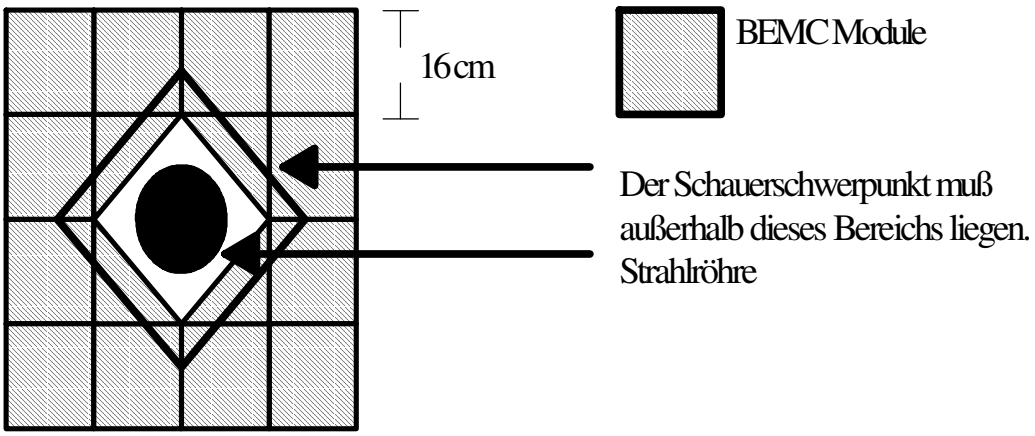
- **Die Stärke des Magnetfeldes der Spule mußte 1.2 Tesla betragen**

- **Für Ereignisse, die den größten Teil ihrer Energie in einem inneren Dreieck deponiert haben, wurde gefordert, daß im Modul mit der zweit höchsten Energiedeposition mindestens 3 GeV deponiert wurden.**
  Diese Bedingung wurde sowohl für die Daten des Experiments als auch für die Simulationsdaten gefordert. Sie war nötig, da im Experiment die inneren Dreiecke nicht als Initiator eines Clusters fungieren können. Elektronen, die in diesen Bereich gestreut werden, werden also von einem der umliegenden Module getriggert. Dessen Energie muß allerdings zumindest über der hohen Energieschwelle des BSET Triggers liegen.

- **Der Schauerschwerpunkt darf nicht weiter als 3 cm von einem BPC Treffer entfernt sein**.
  Diese Bedingung stellt sicher, daß der im BEMC ausgelöste Schauer von einem geladenen Teilchen stammt. Die Bedingung kann als grobe Elektronenidentifikation angesehen werden.

- **Der kinematische Bereiche wurde auf 20 GeV < $E_{Cluster}$ < 30 GeV beschränkt**
  Da nur Ereignisse aus dem Bereich des Kinematischen-Peaks von Interesse sind und die nominale Strahlenergie des Elektronenstrahl bei 26.7 GeV liegt, kann sich auf diesen Bereich beschränkt werden.

- **Der Schauerschwerpunkt muß 3 cm vom inneren Rand des BEMC entfernt sein.** Um Ereignisse die hohe Leckverluste aufweisen auszuschließen wurde gefordert, daß der Schauerschwerpunkt mehr als 3 cm, d.h. ca. ein Moliere-Radius, vom inneren Rand der Module entfernt ist. Der Bereich der dadurch ausgeschlossen wurde ist in der untenstehenden Abbildung eingezeichnet.



Die zum Vergleich verwendeten Monte Carlo Daten wurden auf der DESY-IBM generiert, simuliert und rekonstruiert. Als Strukturfunktion des Protons wurde MRSD- [14] verwendet.
Die Ereignisse wurden auf die gleiche Weise wie Daten des BEMC-MONITOR Files selektiert

5.2 Beschreibung der Methode

Für jedes Modul wird eine eigene Energieverteilung erstellt. Die Ereignisse werden immer den Modulen zugeordnet, die im Cluster die meiste Energie aufwiesen. Module mit dem größten Energieanteil in einem Cluster, werden im Folgenden als 'führendes Modul' bezeichnet. Alle Ereignisse müssen den in Kapitel 5.1 beschriebenen Bedingungen genügen. Insbesondere die Bedingung, daß nur ein BEMC-Cluster pro Ereignis auftreten durfte, gewährleistet eine eindeutige Zuordnung der Ereignisse zu einem Modul.
Der Mittelwert der resultierenden Energieverteilungen wurde in unterschiedlichen Energieintervallen berechnet und mit dem Mittelwert einer Monte Carlo simulierten Energieverteilung verglichen.
Der Methode liegt die Annahme zu Grunde, daß die Energieskala des BEMC bis auf einen multiplikativen Faktor F_{kor} richtig ist und die des Monte Carlo richtig ist. Es soll gelten:

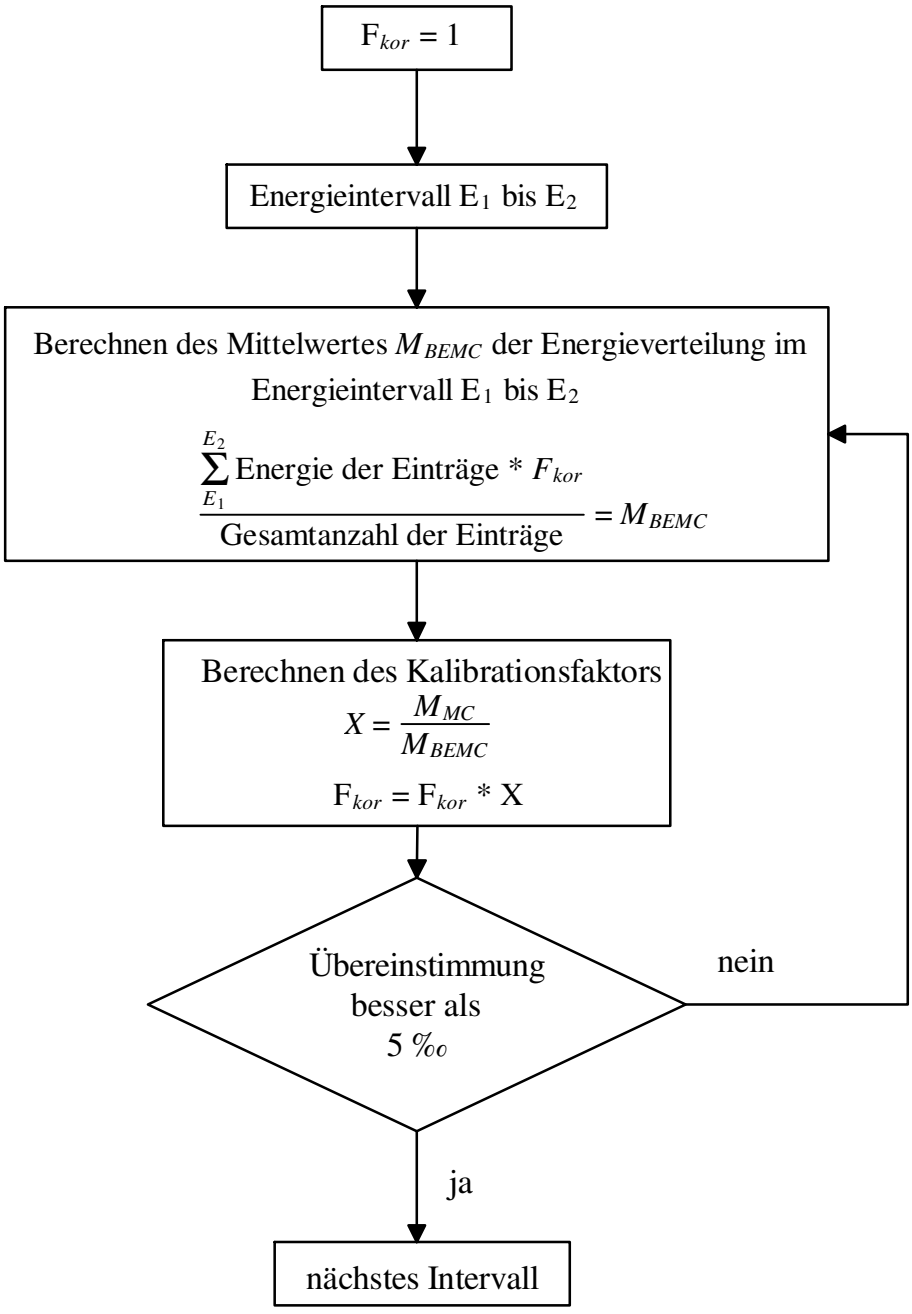
$$\text{Energieskala}_{BEMC} * F_{kor} = \text{Energieskala}_{MC}$$

Die Mittelwerte der Monte Carlo Verteilung M_{MC} und der Energieverteilung des Experiments M_{BEMC} sollten sich daher nur um diesen Faktor unterscheiden.
Damit gilt:

$$M_{BEMC} * F_{kor} = M_{MC}$$

Somit kann der Kalibrationsfaktor zu $F_{kor} = M_{MC} / M_{BEMC}$ bestimmt werden.

Da sich die Mittelwertbildung immer auf ein bestimmtes Intervall bezieht, können Ereignisse die vor der Korrektur innerhalb dieses Intervalls lagen danach außerhalb liegen und umgekehrt. Die nach der Korrektur entstehende Verteilung muß demnach auf ihre Übereinstimmung mit der Monte Carlo Verteilung überprüft werden. Es zeigt sich, daß der Kalibrationsfaktor nicht in einem Schritt bestimmt werden kann. Es sind dazu mehrere Iterationsschritte nötig. Die Iteration wird erst abgebrochen, wenn die Übereinstimmung besser als 5 ‰ ist. Die Prozedur wird dann für das nächste Intervall wiederholt, wobei der Kalibrationsfaktor, der im vorher gehenden Intervall bestimmt wurde, berücksichtigt wird. Abbildung 5.3 zeigt schematisch den Ablauf der Prozedur



.

Abb. 5.3 Schema der Kalibrationsmethode

Berechnet die Kalibrationsprozedur einen positiven Kalibrationsfaktor, bedeutet das, die Energieverteilung lag zu niedrig und muß nach oben korrigiert werden. Ist der Kalibrationsfaktor negativ, lag die Energieverteilung zu hoch und muß nach unten korrigiert werden.
Wie beschreiben wird der Mittelwert der Monte Carlo Verteilung M_{MC} mit dem der Daten M_{BEMC} in verschiedenen Intervallen verglichen um so den Kalibrationsfaktor F_{kor} zu bestimmen. Für die quadratischen Module wurden vier Intervalle, für die Dreiecke drei Intervalle verwendet. Die Intervalle sind in Tabelle 5.1 zusammen mit den jeweiligen Mittelwerten M_{MC} der Monte Carlo Verteilung angegeben.

Um den Einfluß der Strukturfunktion des Protons klein zu halten, wurden die Intervalle so gewählt, daß sie in immer kleiner werdenden Abständen das Maximum der Verteilung einschließen. Das Maximum und die zur hochenergetischen Seite abfallende Flanke sind von der Strukturfunktion weitgehend unabhängig und werden nur von der Energieauflösung des Kalorimeters bestimmt.
Die Intervalle Nr. 1 und Nr. 2 haben die Aufgabe, den Kalibrationsfaktor grob zu bestimmen und den Peak ungefähr an die richtige Stelle zu rücken. Intervall Nr. 1 gewährleistet, daß auch Verschiebungen bis zu ± 18% korrigiert werden können. Die Intervalle Nr. 3 und Nr. 4 schließen nur den Peak und die hochenergetische Flanke ein, sie sorgen für die eigentliche Kalibration.

Intervall	Module mit mindestens 95% der Clusterenergie		Module mit mindestens 50% der Clusterenergie		innere Dreiecke	
	Energie Intervall [GeV]	M_{MC} in GeV	Energie Intervall [GeV]	M_{BEMC} in GeV	Energie Intervall [GeV]	M_{MC} in GeV
Nr. 1	20.00-30.00	24.84792	20.00-30.00	24.61824	20.00-30.00	24.27093
Nr. 2	24.50-26.50	25.62014	24.50-26.50	25.5589	23.00-27.00	24.95064
Nr. 3	25.00-26.20	25.64852	25.00-26.20	25.62323	24.75-26.20	25.45191
Nr. 4	25.725-27.250	26.3165	25.00-27.50	26.00282	----------	---------

Tab. 5.1 Intervalle und Monte Carlo Mittelwerte zur Bestimmung des Kalibrationsfaktor

Abbildung 5.4 zeigt die Monte Carlo Energieverteilungen die zur Berechnung der Mittelwerte in Tabelle 5.1 verwendet wurden.

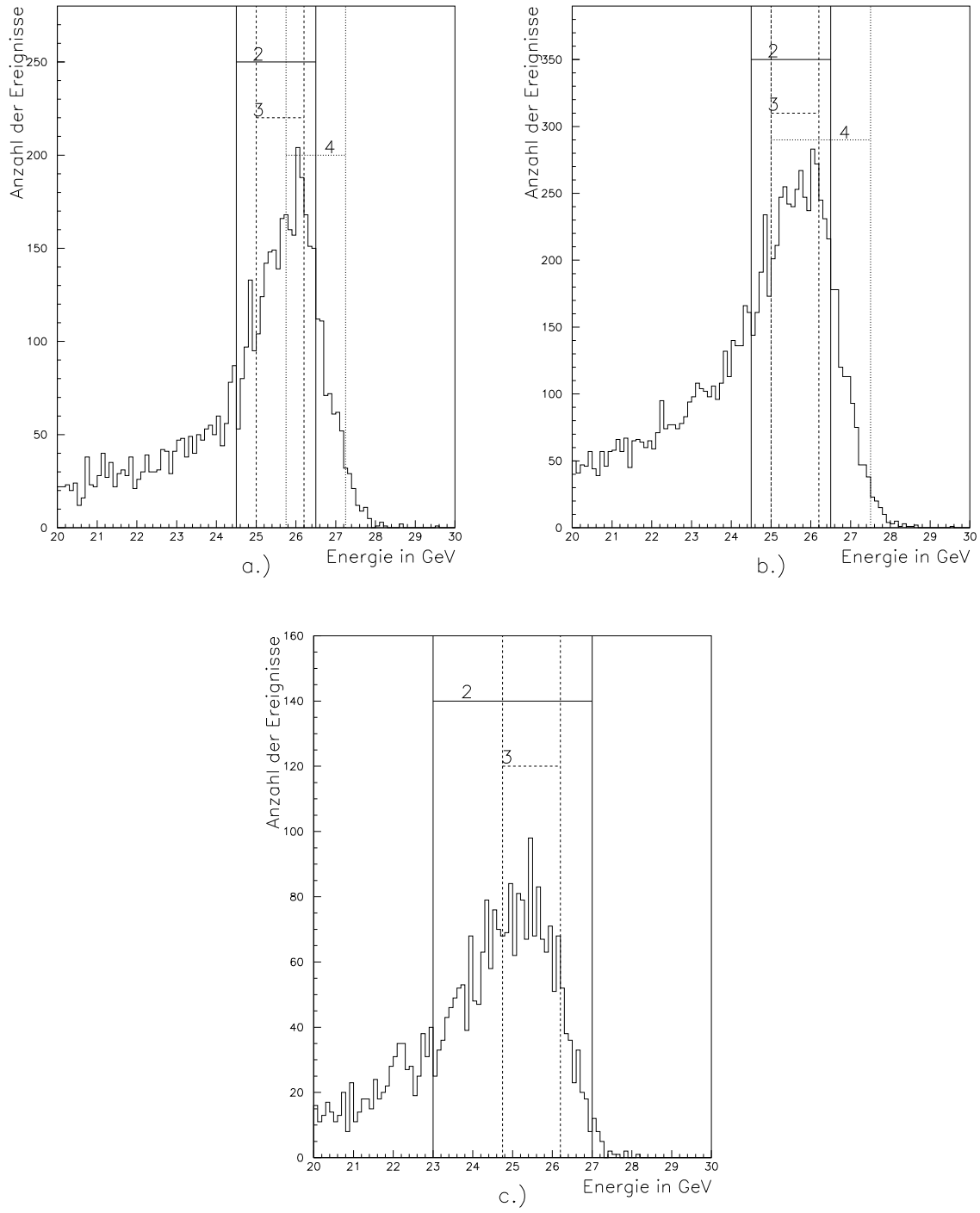


Abb. 5.4 Monte Carlo Energieverteilungen mit der Protonstrukturfunktion MRSD-. Die Energiesskala erstreckt sich von 20 GeV bis 30 GeV und umfaßt so das gesamte erste Intervall. Die weiteren Intervalle sind mit 1,2 und 3 bezeichnet und beziehen sich auf die in Tab. 5.1 angegebenen Werte.

a.) Energieverteilung der Ereignisse die der 95% Bedingung genügen und innerhalb eines quadratischen Moduls liegen.
b.) Energieverteilung der Ereignisse die der 50% Bedingung genügen und innerhalb eines quadratischen Moduls liegen.
c.) Energieverteilung der Ereignisse die innerhalb der inneren Dreiecke liegen.

Der durch ein hochenergetisches Teilchen ausgelöste elektromagnetische Schauer kann sich je nach Einschußpunkt über mehrere Module ausdehnen. Die Energie des auslösenden Teilchens setzt sich somit aus der Energie des führenden Moduls, plus der Energiesumme aller umliegender Module zusammen. Folglich würde man mit der oben beschriebenen Methode nicht nur ein Modul kalibrieren sondern die Energieskala des gesamten Clusters. Da es allerdings nicht zu erwarten ist, daß alle Module eines Clusters um den gleichen Faktor verschoben sind, müßten so zusätzlich die Unterschiede in der Kalibration zwischen den einzelnen Modulen korrigiert werden. Der Kalibrationsfaktor des betreffenden Moduls würde somit verfälscht. Der Fehler ist dabei von zwei Größen abhängig, vom relativen Kalibrationsunterschied der Module und dem Energieanteil der umliegenden Module an der Gesamtenergie.

Um den Einfluß der umliegenden Module so klein wie möglich zu halten, werden für die Ereignisse, die einem quadratischen Modul zugeordnet werden, zwei Klassen definiert.

- Ereignisse werden einem Modul nur zugeordnet, wenn mindestens 95% der Gesamtenergie in diesem Modul deponiert werden.

- Kann das Ereignis die 95% Bedingung nicht erfüllen wird es dem Modul dennoch zugeordnet, wenn mindestens 50 % der Gesamtenergie deponiert werden.

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, wird in einem Kalorimeter, welches die Schauerachse zylinderförmig mit dem Radius $2R_M$ umschließt, 95% der Primärenergie deponiert.
Der Moliere-Radius des BEMC beträgt R_M = 3.14 cm. Somit beträgt der 95% Durchmesser eines solchen Zylinders 12.56 cm.
Da die Seitenlänge der BEMC Module nur 16 cm beträgt, müßte das Elektron das Modul zentral treffen, um mehr als 95% der Gesamtenergie deponieren zu können. Es ist nicht damit zu rechnen, daß eine statistisch ausreichende Anzahl dieser Ereignisse eintritt, siehe dazu Abbildung 5.5 .

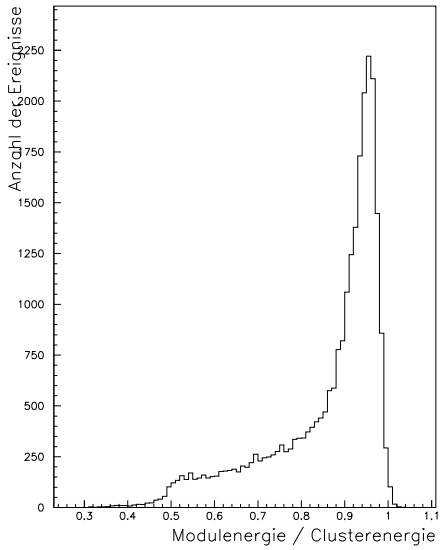


Abb. 5.5 Anteil der Energie des führenden Moduls an der Gesamtenergie des Clusters.
Modulenergie = Energie des führenden Moduls
Clusterenergie= Gesamtenergie des Clusters

Für die inneren Dreiecke wird keine zusätzlich Bedingung bezüglich der in diesen Modulen deponierten Energie gestellt.
Wie in Kapitel 4.3 erwähnt können die inneren Dreiecke nicht als Initiator eines Clusters fungieren. Um ein Elektron zu triggern, das in eins dieser Module gestreut wird, muß in einem der umliegenden quadratischen Modulen Energie von mindestens 3 GeV deponiert werden. Der Einfluß dieser Module auf die Kalibration der inneren Dreiecke ist somit nicht zu umgehen. Es wurde daher zu Gunsten einer höheren Statistik darauf verzichtet Bedingungen bezüglich der in den inneren Dreiecken deponierten Energie zu stellen.

Die Kalibration des BEMC verläuft in drei Schritten:

- Im ersten Schritt werden die quadratischen Module des BEMC kalibriert.
  Ein Modul wird individuell kalibriert, wenn ihm mindestens 100 Ereignisse zwischen 20.0-30.0 GeV zu geordnet werden können, die der 95% Bedingung genügen.

  Können einem Modul nicht genügend Ereignisse zugeordnet werden die der 95% Bedingung genügen, wird es individuell kalibriert, wenn ihm mindestens 100 Ereignisse zwischen 20.0-30.0 GeV zugeordnet werden können, die der 50% Bedingung genügen.

  Kann auch diese Bedingung nicht erfüllt werden wird das betreffende Modul nicht individuell kalibriert.

- Im zweiten Schritt werden die inneren vier Dreiecke kalibriert. Ein Dreieck wird individuell kalibriert wenn ihm mindestens 100 Ereignisse zwischen 20.0-30.0 GeV zugeordnet werden.
  Um die Verfälschung des Kalibrationsfaktors so klein wie möglich zu halten werden die umliegenden quadratischen Module zuerst kalibriert. Diese Module konnten alle mit der 95% Bedingung kalibriert werden.

- Im dritten Schritt wird allen Modulen die nicht individuell kalibriert werden konnten, als Kalibrationsfaktor der Mittelwert der Kalibrationsfaktoren aus Schritt 1 zugeordnet.

5.3 Ergebnisse der Kalibration

Insgesamt umfaßt das BEMC-Monitor-File ca. 80000 Ereignisse, von denen 29000 den in Kapitel 5.1 angegebenen Bedingungen genügen.
Die Statistik war ausreichend um insgesamt 21 Module individuell zu kalibrieren, 17 quadratische Module und die inneren vier Dreiecke. Von den 17 quadratischen Modulen wiesen 11 Module genügend Statistik auf, um sie mit der 95% Bedingung zu kalibrieren, 6 Module mußten mit der 50% Bedingung kalibriert werden.
Die Kalibrationsfaktoren der einzelnen Module sind in Abb. 5.12 aufgeführt.

Der statistische Fehler liegt je nach Anzahl der Ereignisse zwischen ±1.0 % und ±0.1 %.
Der systematische Fehler wurde auf ±1.7% abgeschätzt.
Die Fehlerabschätzung wird in Kapitel 5.4 und 5.5 angegeben

Die übrig bleibenden 67 Module wurden nicht individuell kalibriert. Ihnen wurde der Mittelwert der individuell bestimmten Faktoren zugewiesen, die mit der 95% Bedingung bestimmt wurden. Für den Mittelwert der Kalibrationsfaktoren erhält man:

$$\overline{F_{kor}} = 2.05 \pm 1.56\ \%$$

Als Fehler wurde die Standardabweichung der Verteilung angenommen

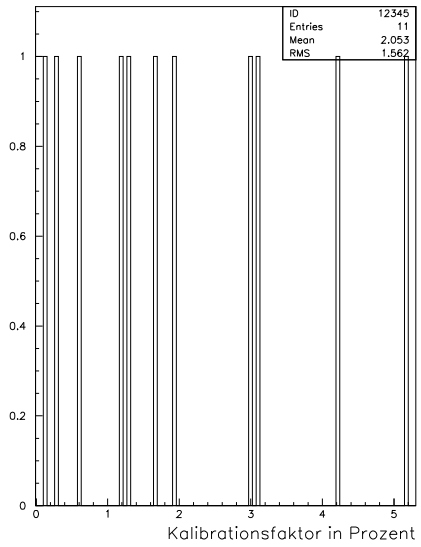


Abb. 5.6 Verteilung der Kalibrationsfaktoren die mit der 95% Bedingung bestimmt werden konnten

Im Folgenden werden die Energieverteilung der Ereignisse die der 95%, bzw. 50% Bedingung genügen und die der inneren Dreiecke vor und nach der Kalibration gezeigt.
Um die Auswirkung der Kalibration zu verdeutlichen wurden die entsprechenden Mont Carlo Verteilung, mit MRSD- als Protonstrukturfunktion, über die des Experimentes gelegt.

Als Beispiele der individuellen Kalibration werden noch die Energieverteilung der Module Nr. 25 und Nr. 35, vor und nach der Kalibration gezeigt. Modul Nr. 25 wurde mit Ereignisse die der 50% Bedingung genügen, Modul Nr. 35 mit Ereignissen die der 95% Bedingung genügen kalibriert.

- Insgesamt 7100 Ereignisse erfüllten die 95% Bedingung.

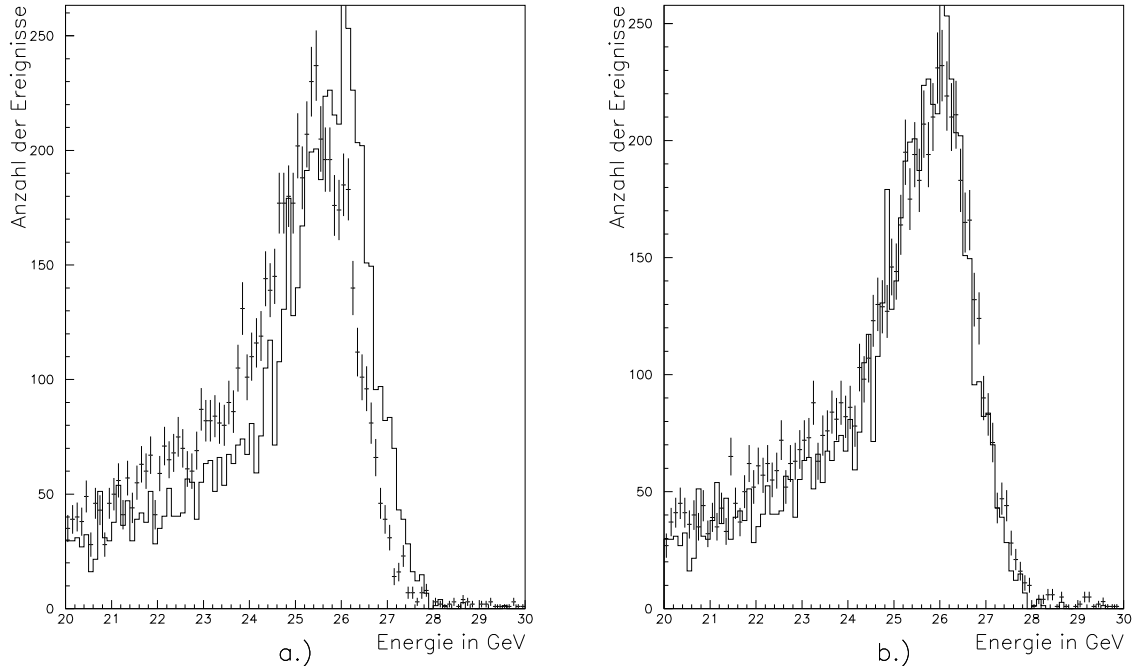


Abb. 5.7 Energieverteilung der Ereignisse die der 95% Bedingung genügen. H1 Daten (+), Monte Carlo (-)
a.) vor der Kalibration b.) nach der Kalibration

- 25000 Ereignisse genügen der 50% Bedingung und liegen innerhalb eines quadratischen Moduls.

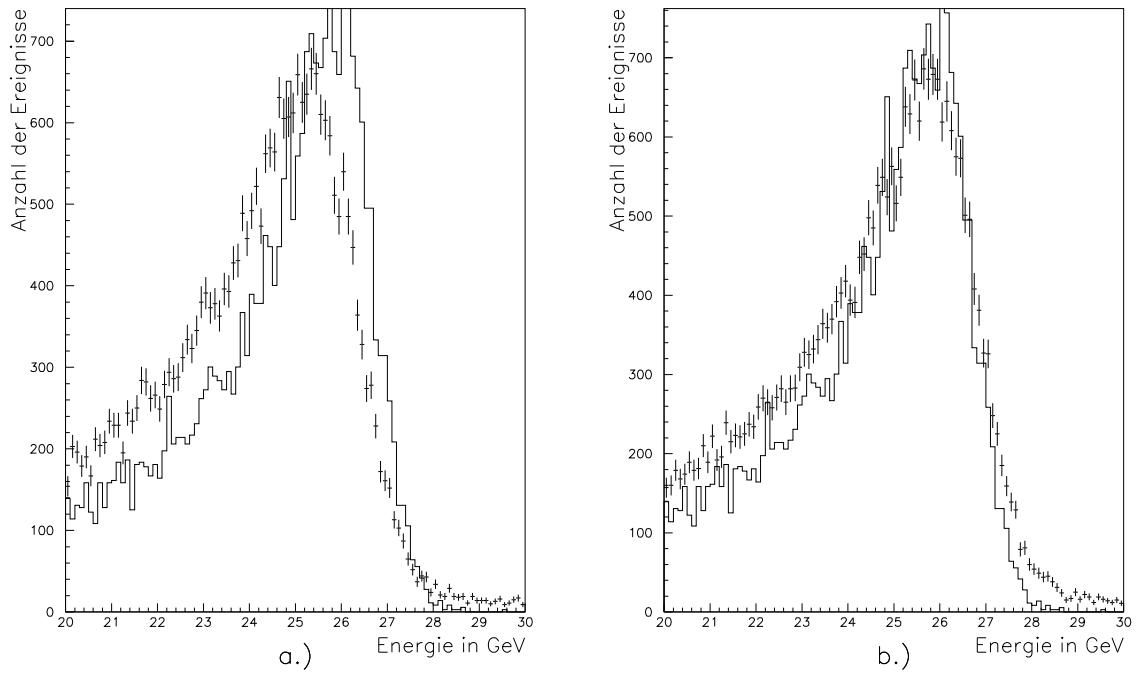


Abb. 5.8 Energieverteilung der Ereignisse die der 50% Bedingung genügen. H1 Daten (+), Monte Carlo (-)
a.) vor der Kalibration b.) nach der Kalibration

- 3000 Ereignisse liegen innerhalb der inneren Dreiecke

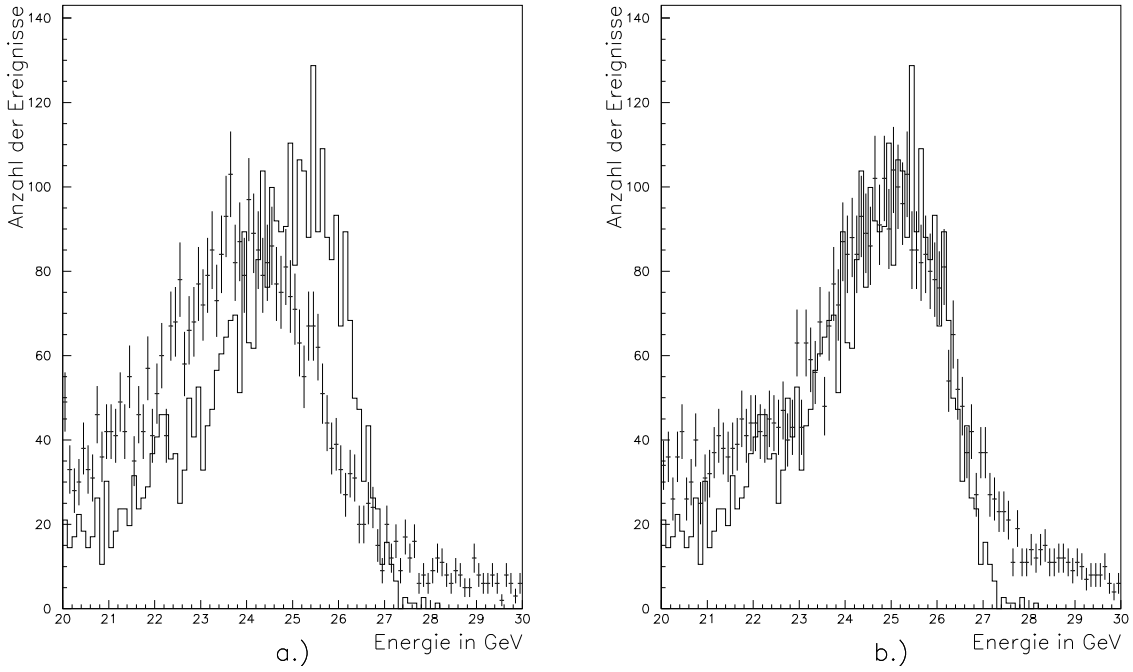


Abb. 5.9 Energieverteilung der Ereignisse die in den inneren Dreiecken liegen. H1 Daten (+), Monte Carlo (-)
a.) vor der Kalibration b.) nach der Kalibration

- Modul Nr. 25 zeigte mit +9.91% die größte Verschiebung und hat mit 131 Ereignissen eine sehr niedrige Statistik. Wie die Abbildungen 5.10 a.) und b.) zeigen, war Kalibration trotz der niedrigen Statistik im Rahmen des Statistischen Fehlers erfolgreich.

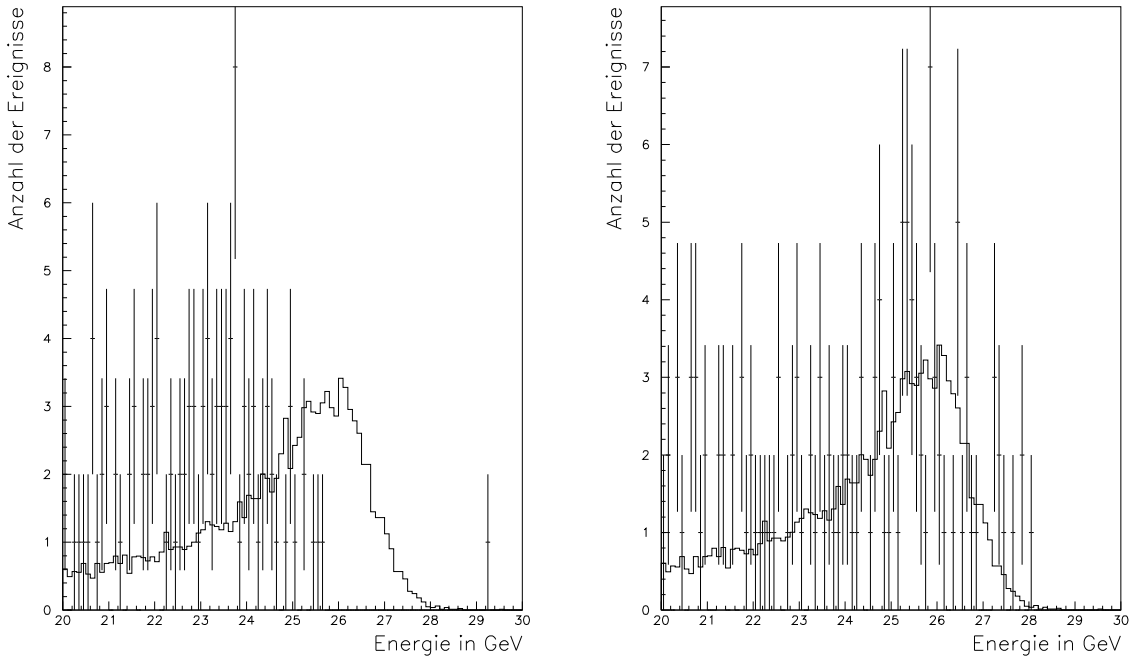


Abb. 5.10 Energieverteilung Modul Nr. 25. H1 Daten (+), Monte Carlo (-)
a.) vor der Kalibration b.) nach der Kalibration

- Modul Nr. 35 konnte, mit Ereignissen die der 95% Bedingung genügen, kalibriert werden.

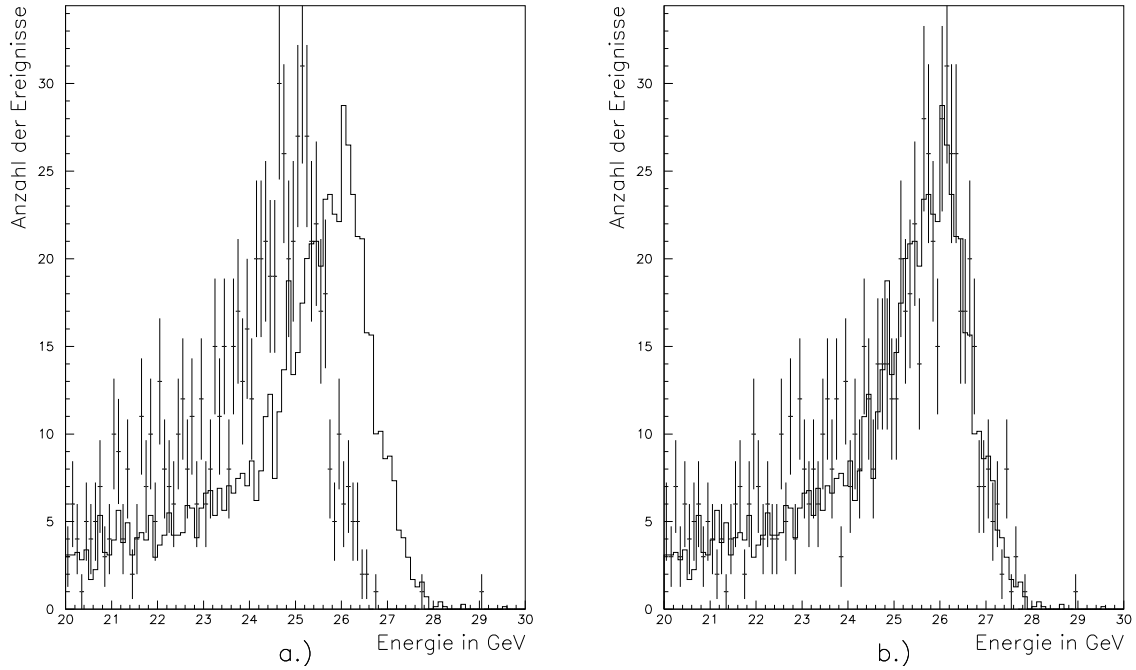


Abb. 5.11 Energieverteilung Modul Nr. 35. H1 Daten (+), Monte Carlo (-)
a.) vor der Kalibration b.) nach der Kalibration

Erklärung zu Abbildung 5.12.
In der Abbildung 5.12 sind die individuellen Kalibrationsfaktoren der Module angegeben. Die Einträge in den Zellen ist am Beispiel von Modul Nr. 35 erklärt.

Modul Nummer	*35*
individueller Kalibrationsfaktor	+4.21%
statistischer Fehler	±0.2%
Kalibrations Bedingung	A
Anzahl der Ereignisse	777

Unter Kalibrationsbedingung ist folgendes zu verstehen:

A Es konnte mit Ereignissen kalibriert werden die der 95% Bedingung genügen

B Es konnte mit Ereignissen kalibriert werden die der 50% Bedingung genügen

C Bei diesen Modulen handelt es sich um die inneren Dreiecke.

D Diese Module wurden nicht individuell kalibriert.

		92 **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*93* **+ 2.05** ± 1.56 D 1	*94* **+ 2.05** ± 1.56 D 1	*95* **+ 2.05** ± 1.56 D 4	*96* **+ 2.05** ± 1.56 D 1	*97* **+ 2.05** ± 1.56 D 0		
	81 **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*82* **+ 2.05** ± 1.56 D 2	*83* **+ 2.05** ± 1.56 D 3	*84* **+ 2.05** ± 1.56 D 16	*85* **+ 2.05** ± 1.56 D 24	*86* **+ 2.05** ± 1.56 D 10	*87* **+ 2.05** ± 1.56 D 2	*88* **+ 2.05** ± 1.56 D 0	
70 **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*71* **+ 2.05** ± 1.56 D 1	*72* **+ 2.05** ± 1.56 D 11	*73* **+ 2.05** ± 1.56 D 41	*74* **+ 2.05** ± 1.56 D 82	*75* **+ 2.05** ± 1.56 D 55	*76* **+ 2.05** ± 1.56 D 28	*77* **+ 2.05** ± 1.56 D 13	*78* **+ 2.05** ± 1.56 D 2	*79* **+ 2.05** ± 1.56 D 0
60 **+ 2.05** ± 1.56 D 1	*61* **+ 2.05** ± 1.56 D 9	*62* **+ 2.05** ± 1.56 D 44	*63* **+ 1.29** ±0.7 A 127	*64* **+ 3.08** ±0.2 A 710	*65* **+ 2.98** ±0.2 A 545	*66* **+ 2.47** ±0.4 B 422	*67* **+ 2.05** ± 1.56 D 41	*68* **+ 2.05** ± 1.56 D 4	*69* **+ 2.05** ± 1.56 D 0
50 **+ 2.05** ± 1.56 D 7	*51* **+ 2.05** ± 1.56 D 21	*52* **+ 0.32** ±1.1 B 158	*53* **+ 0.12** ±0.2 A 873	*54* **+ 8.86** ±1.0 C 740	*55* **+ 1.81** ±1.0 C 682	*56* **+ 1.66** ±0.2 A 689	*57* **+ 2.05** ± 1.56 D 95	*58* **+ 2.05** ± 1.56 D 11	*59* **+ 2.05** ± 1.56 D 2
40 **+ 2.05** ± 1.56 D 9	*41* **+ 2.05** ± 1.56 D 35	*42* **- 0.54** ±1.0 B 200	*43* **+ 1.20** ±0.2 A 864	*44* **+ 1.63** ±1.0 C 941	*45* **+ 6.91** ±1.0 C 571	*46* **+ 0.27** ±0.2 A 810	*47* **+ 0.98** ±1.0 B 112	*48* **+ 2.05** ± 1.56 D 16	*49* **+ 2.05** ± 1.56 D 2
30 **+ 2.05** ± 1.56 D 1	*31* **+ 2.05** ± 1.56 D 11	*32* **+ 2.05** ± 1.56 D 48	*33* **+ 0.59** ±0.9 A 140	*34* **+ 1.91** ±0.2 A 882	*35* **+ 4.21** ±0.2 A 777	*36* **+ 5.18** ±0.9 A 132	*37* **+ 2.05** ± 1.56 D 37	*38* **+ 2.05** ± 1.56 D 9	*39* **+ 2.05** ± 1.56 D 0
20 **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*21* **+ 2.05** ± 1.56 D 3	*22* **+ 2.05** ± 1.56 D 11	*23* **+ 2.05** ± 1.56 D 59	*24* **+ 0.87** ±1.1 B 148	*25* **+ 9.91** ±1.1 B 131	*26* **+ 2.05** ± 1.56 D 37	*27* **+ 2.05** ± 1.56 D 7	*28* **+ 2.05** ± 1.56 D 1	*29* **+ 2.05** ± 1.56 D 0
	11 **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*12* **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*13* **+ 2.05** ± 1.56 D 6	*14* **+ 2.05** ± 1.56 D 10	*15* **+ 2.05** ± 1.56 D 13	*16* **+ 2.05** ± 1.56 D 7	*17* **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*18* **+ 2.05** ± 1.56 D 0	
		2 **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*3* **+ 2.05** ± 1.56 D 0	*4* **+ 2.05** ± 1.56 D 4	*5* **+2.05** ± 1.56 D 11	*6* **+ 2.05** ± 1.56 D 2	*7* **+ 2.05** ± 1.56 D 0		

Abb. 5.12 Individuelle Kalibrationsfaktoren

5.4 Statistischer Fehler

Der statistische Fehler wurde mittels der Monte Carlo Daten abgeschätzt. Dazu wurde die Energieverteilung der Monte Carlo Ereignisse um Faktoren F_{Ver}, zwischen $-10\% < F_{Ver} < +10\%$, verschoben. Danach wurden die Daten in Gruppen von jeweils 100, 200, 300, 500 und 1000 Ereignisse unterteilt. Wenn Ereignisse in der vorgegeben Anzahl im Energiebereich zwischen 20-30 GeV lagen, wurde die Kalibrationsprozedur gestartet. Funktioniert die Methode, sollte der von der Prozedur bestimmte Kalibrationsfaktor F_{kor} die Verschiebung rückgängig machen. Daher sollte die Summe aus der Korrektur und der Verschiebung null sein.

So daß gilt: $F_{kor} + F_{Ver} = 0$

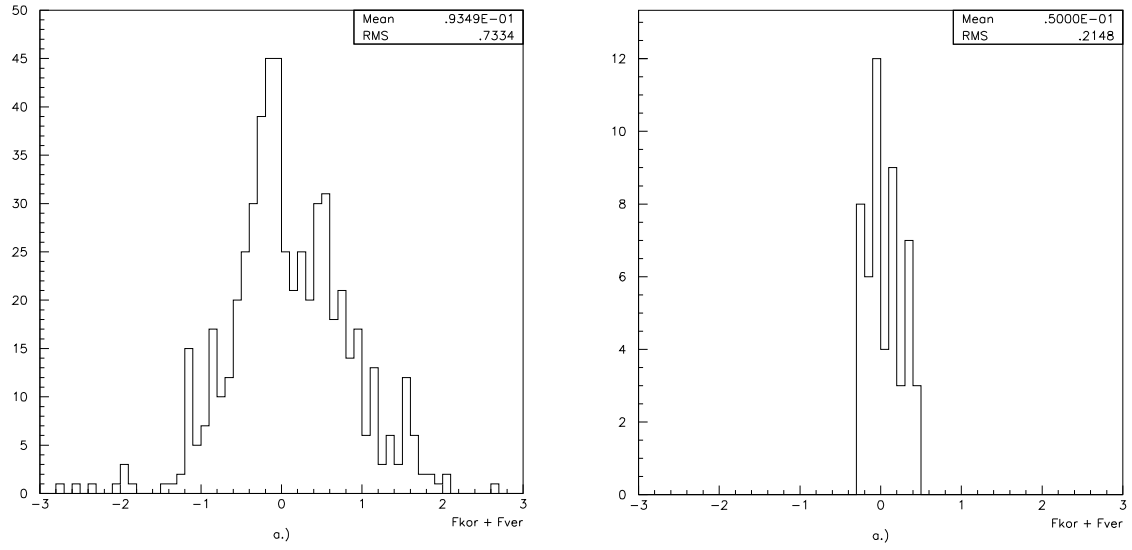


Abb. 5.13 Verteilung von $F_{kor}+F_{Ver}$ für Ereignisse die der 95% Bedingung genügen und innerhalb eines quadratischen Moduls liegen.
a.) für jeweils 100 Ereignisse
b.) für jeweils 1000 Ereignisse

Die Mittelwerte der Verteilungen, für die jeweilige Anzahl der Ereignisse, liegen nahe Null. In Abbildung 5.13, sieht man, daß dies gut erfüllt ist.

Die Standardabweichung einer Verteilung gibt die mittlere Abweichung einer Einzelmessung vom Mittelwert an. Daher läßt sich die Standardabweichung in unserem Fall als statistischer Fehler der Kalibration für die jeweilige Anzahl an Ereignissen interpretieren. Die so ermittelten statistischen Fehler sind in Abbildung 5.14 aufgeführt.

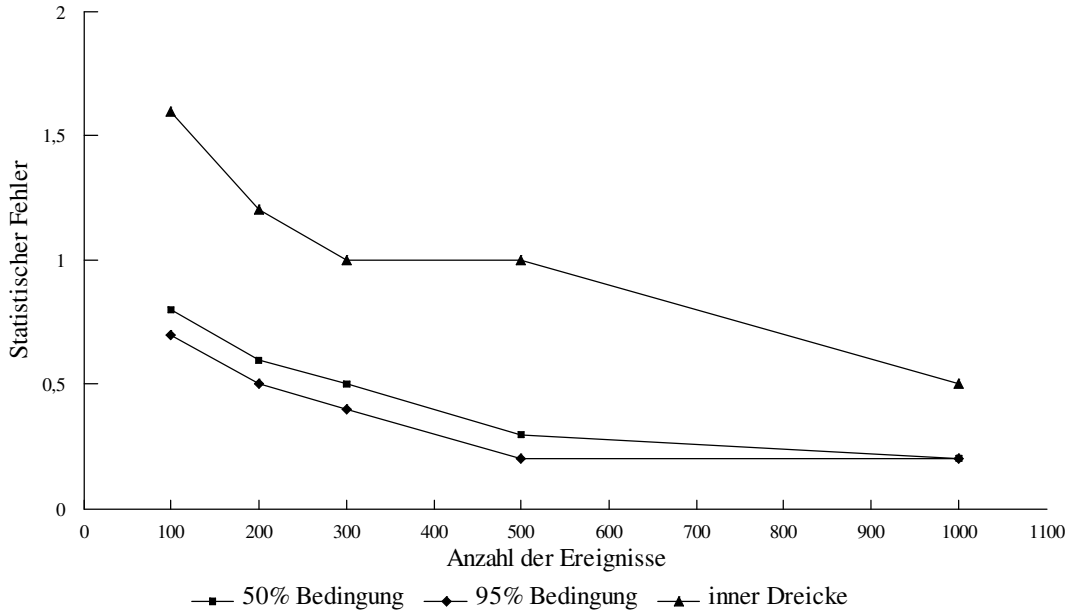


Abb. 5.14 Statistischer Fehler der Kalibrationsfaktoren

Wie zu erwarten war, nimmt der Fehler mit zunehmender Statistik ab. Schon ab 1000 Ereignissen pro Modul ist er kleiner als 2‰. Bei der, für künftige Datennahmeperioden, erwarteten Luminosität dürfte er keine Rolle mehr spielen.

5.5 Systematischer Fehler

Bei der Abschätzung, des systematischen Fehlers müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Nach dem Wiedereinbau des BEMC im Jahr 1993 wurde die Linearität der Energieskala auf besser als ± 0.5% bestimmt [7]
- Es ist bekannt, daß die Multiplizität der BPC in den H1 Daten etwas höher liegt als in den Monte Carlo Simulationen. Der Grund für diesen Unterschied könnte sein, daß mehr totes Material vor dem BEMC ist als in der Simulation des Detektors angenommen. Der Fehler wurde auf ±0.7% abgeschätzt, siehe Kapitel 5.5.3.
- Ein Einfluß der Protonstrukturfunktion konnte innerhalb des statistischen Fehlers nicht festgestellt werden, siehe Kapitel 5.5.1.
- Durch die zeitliche Veränderung der Kalibrationsfaktoren, tritt ein systematischer Fehler von ± 0.5% auf, siehe Kapitel 5.5.2.

Bei einer konservativen Abschätzung des gesamten Fehlers, bei der alle Beiträge linear addiert werden, ist der systematische Fehler auf die Energieskala ± 1.7%.

5.5.1 Einfluß der Strukturfunktion des Protons

Für die Simulation der Elektron-Proton Streuung können verschiedene Protonstrukturfunktionen verwendet werden. Um ihren Einfluß auf die Kalibration zu bestimmen, wurden die Strukturfunktionen MRSD- [13], MRSD0 [13] und KMRSB- [14] miteinander verglichen.
Die Strukturfunktionen MRSD- und KMRSB- sagen einen schnelleren Anstieg der Partonendichte bei kleiner werdendem x voraus als MRSD0, die einen eher modaraten Anstieg beschreibt. Der Unterschied der Strukturfunktionen drückt sich in den Energieverteilungen der gestreuten Elektronen durch eine unterschiedliche hohe Statistik im Bereich kleiner Energie aus. MRSD- und KMRSB- weisen im Bereich kleiner Energien mehr Einträge auf als MRSD0. Berechnet man den Mittelwert der Energieverteilung, erwartet man folglich, daß er für MRSD0 niedriger liegt als für die beiden anderen Strukturfunktionen.
Um den Einfluß der Strukturfunktionen auf die verwendete Kalibrationsmethode zu untersuchen wurden die Mittelwerte der verschiedenen Energieverteilungen in den Intervallen berechnet, die auch bei der Kalibration verwendet werden.

Strukturfunktion	Energieintervall 20.00-30.00 GeV	Energieintervall 24.50-26.50 GeV	Energieintervall 25.00-26.20 GeV	Energieintervall 25.725-27.250 GeV
MRSD-	24.84792	25.62014	25.64852	26.3165
MRSD0	24.6825	25.55034	25.63058	26.32853
KMRSB-	24.80533	25.60316	25.63659	26.31393

Tab. 5.2 Mittelwerte für die Energieintervalle die zur Kalibration quadratischer Module mit Ereignissen die der 95% Bedingung genügen verwendet werden.

Wie erwartet, liegt der Mittelwert für MRSD0 in den beiden ersten Intervallen niedriger als der von MRSD- und KMRSB-. Der Unterschied zwischen MRSD- und MRSD0 beträgt im ersten Intervall 0.7%. Der zwischen MRSD- und KMRSB- 0.2%. Für die Kalibration entscheidend ist das letzte Intervall von 25.725-27.250 GeV. Dieses schließt nur den Kinematischen-Peak und dessen hochenergetischen Flanke ein. Der Unterschied der Mittelwerte zwischen MRSD0 und MRSD- beträgt für diese Intervall nur 0.05%, der zwischen MRSD- und KMRSB- nur 0.01%. Da letztendlich die Kalibration mit diesem Intervall erfolgt, ist kein Einfluß auf die Kalibration zu erwarten.
Um diese Behauptung zu überprüfen, wurden die kalibrierten H1 Daten mit den verschiedenen Strukturfunktionen verglichen. Dazu wurden die oben berechneten Mittelwerte von MRSD0 und KMRSB- in das Kalibrationsprogramm eingesetzt. Da die H1 Daten schon kalibriert sind, sollte der Kalibrationsfaktor Null sein.

Strukturfunktion	Korrekturfaktor der sich für Ereignisse mit 95% der Gesamtenergie in einem Modul ergibt
MRSD-	(-0.01 ± 0.10)%
MRSD0	(0.06 ± 0.10)%
KMRSB-	(0.06 ± 0.10)%

Tab. 5.3 Korrekturfaktoren der kalibrierten H1 Daten.

Innerhalb des statistischen Fehlers kann keine Abhängigkeit von der Strukturfunktion des Protons festgestellt werden.

5.5.2 Zeitliche Veränderung der Kalibration

Die Datennahme 1993 erstreckte sich über 100 Tage. Teilt man die kalibrierten H1 Daten in Intervalle von 10 Tagen und überprüft die Kalibration für Ereignisse die der 95% Bedingung genügen stellt man eine Zeitabhängigkeit fest, siehe Abbildung 5.15. Die Daten am Anfang werden um 0.5% zuviel, die am Ende um 0.5% zu wenig korrigiert. Der Fehler der durch diese Zeitabhängigkeit entsteht, wurde daher auf ±0,5% abgeschätzt.

Der Anstieg des Kalibrationsfaktors ist vermutlich auf Alterung und auf Strahlungsschäden zurückzuführen. Gegen Ende der Datennahme war die Luminosität deutlich höher als zu Beginn, so daß die Strahlenbelastung für den Szintillator gegen Ende größer war. Betrachtet man nur die letzten vierzig Tage, von Tag 260 bis Tag 310, sieht man einen fast linearen Anstieg von ca. 0.5%. In der Periode davor ist keine eindeutige Korrelation festzustellen ist.

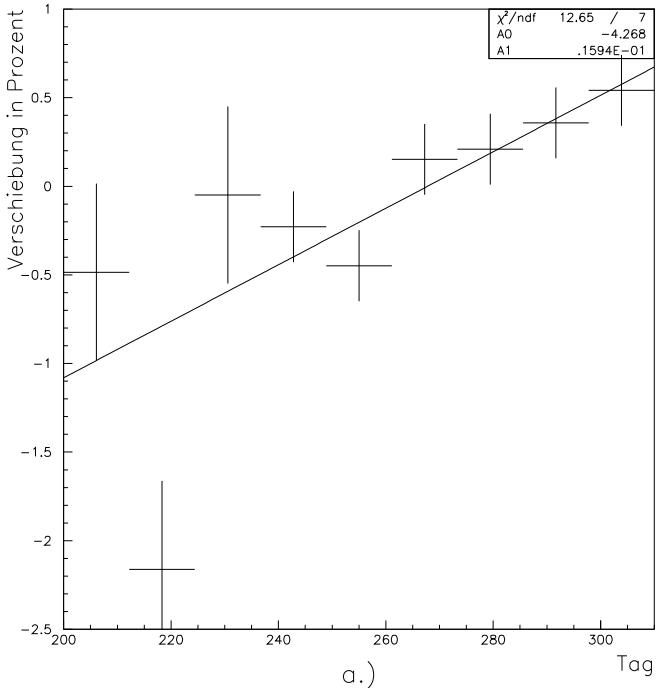


Abb. 5.l5 Kalibrationsfaktor in Abhängigkeit von der Zeit. Als Fehler ist der statistische Fehler eingetragen, der von der Anzahl der Ereignisse abhängt. Auf der x-Achse ist der Tag angegeben (1.Januar: Tag=1, 31.Dezember: Tag=365)

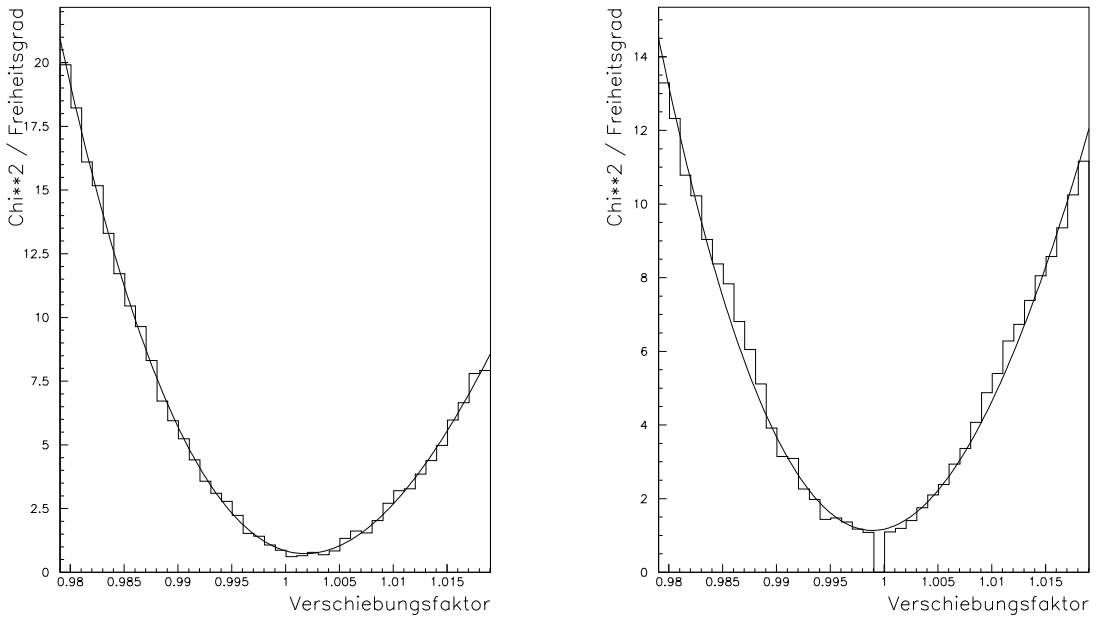
5.5.3 Monte Carlo Unsicherheit

Bei der verwendeten Kalibrationsmethode wurde vorausgesetzt, daß die Energieverteilung der Monte Carlo Simulation den Zustand eines perfekt kalibrierten BEMC darstellt. Ist die Simulation aber ungenau, überträgt sich dieser Fehler auch auf die Kalibration. Eine Unsicherheit bei der Simulation ist die Strahlungslänge des toten Materials vor dem BEMC. Wird zum Beispiel in der Simulation weniger totes Material angenommen als tatsächlich im Experiment vorhanden, wird der Energieverlust der Elektronen falsch beschrieben. Die Energie der Elektronen würde somit in der Simulation überschätzt. Die mittels des Monte Carlo bestimmten Mittelwerte wären so mit systematisch zu hoch.

Um diesen Effekt abzuschätzen wurde die Energieverteilung des Ereignis-Generator mit der theoretischen Energieauflösung des BEMC verschmiert. Die Energieverteilung des Ereignis-Generators entspricht der eines perfekten Kalorimeters ohne jegliche Energieauflösung, Leckverluste oder Inhomogenitäten. Die durch die Verschmierung entstandene Verteilung entspricht also der Situation eines perfekt kalibrierten BEMC ohne einen Energieverlust der Elektronen durch totes Material. Diese Verteilung wurde mit der Energieverteilung der korrigierten und kalibrierten H1 Daten mit einem χ^2-Test verglichen. Das Vergleichsintervall erstreckte sich von 25-28 GeV um den Einfluß der Protonstrukturfunktion klein zu halten. Die H1 Daten wurden im Bereich von $-2\% < F_{Ver} < +2\%$ verschoben und das χ^2 Minimum bestimmt.

Bei den Energieverteilungen des Experimentes wurden nur Ereignisse berücksichtigt die der 95% Bedingung genügen. Auf diese Weise konnte der Einfluß der durch Inhomogenitäten des BEMC entsteht vernachlässigt werden.

Das berechnete χ^2 pro Freiheitsgrad wurde gegen die Verschiebung aufgetragen. Die Verteilung kann durch ein Polynom dritter Ordnung beschrieben werden, deren Minimum bei +0.3% liegt, der Bereich in dem sich das χ^2 pro Freiheitsgrad um eins ändert, erstreckt sich von -0.3% bis +0.7%, siehe Abbildung 5.16.a .
Die Kalibration wurde auf dem Niveau der unkorrigierten Energien durchgeführt. Wendet man das gleiche Verfahren auf die unkorrigierten BEMC Daten an, d.h. man vergleicht die Monte Carlo Verteilung die sich mit Detektorsimulation ergibt mit den unkorrigierten H1 Daten, liegt das Minimum bei einer Verschiebung von 0%, siehe Abbildung 5.16.b .
Man kann daher schließen, daß die beobachtete Verschiebung die sich für die korrigierten Daten ergibt auf die Korrekturen bezüglich des toten Materials zurückzuführen sind. Der Fehler der sich daraus ergibt wird auf ±0.7% abgeschätzt.



a.) b.)

Abb. 5.16
χ^2 pro Freiheitsgrad zwischen H1 Daten und Monte Carlo in Abhängigkeit der Verschiebung der H1 Daten.
a.) kalibrierte und korrigierte H1 Daten b.) kalibrierte H1 Daten

6 Energieauflösung des BEMC

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben wird die theoretische Energieauflösung eines Sampling-Kalorimeters durch statistische Fluktuationen der Schauerteilchen bestimmt. Der relative Fehler der Energiemessung der sich daraus ergibt ist beträgt für das BEMC [7]:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%\sqrt{GeV}}{\sqrt{E}}$$

In der Praxis wird diese Energieauflösung durch verschiedene Ursachen jedoch noch zusätzlich verschlechtert.

Im Fall des BEMC werden zur Auslese der Lichtsignale Photodioden mit Verstärkern verwendet. Dieses System weist ein endliches Rauschen auf. Der Fehler, der dadurch auftritt ist unabhängig von der Energie und kann mit einem konstanten Term σ_R parametrisiert werden. Für das BEMC wurde er zu $\sigma_R = \pm 420$ MeV bestimmt. Der relative Fehler ist somit:

$$\frac{\sigma_R}{E} = \frac{0.42\ \text{GeV}}{E} \qquad \text{,(mit E in GeV)}$$

Unsicherheiten, die durch Leckverluste, Inhomogenitäten und Mißkalibration zwischen den Modulen entstehen, werden durch einen Term σ_M proportional der Energie beschrieben. Dieser Term wurde 1992 von [7] auf 3% bestimmt.

$$\frac{\sigma_M}{E} = 0.03 \qquad \text{,(mit E in GeV)}$$

Die Energieauflösung des BEMC ist, mit der 1992 vorgenommenen Kalibration:

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{0.1}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0.42}{E}\right)^2 + (0.03)^2}$$

Für den Term σ_M wurden hauptsächlich Kalibrationsunterschiede zwischen den einzelnen Modulen verantwortlich gemacht. Diese sollten durch eine individuelle Kalibration der BEMC Module, wie in Kapitel 5 beschriebenen, beseitigt werden. Dadurch sollte der Term σ_M deutlich kleiner sein, als 1992 bestimmt.
Um dies zu überprüfen, wurde ein χ^2-Test zwischen Monte Carlo und H1 Daten durchgeführt. Verglichen wurden die kalibrierten und korrigierten BEMC Energien mit der Energieverteilung eines Ereignis-Generators, die mit der Energieauflösung des BEMC verschmiert wurde.
Der Term σ_M wurde dabei im Bereich zwischen 0 - 5% in Schritten von 0.1% variiert.
Der Vergleich erstreckte über den Energiebereich zwischen 25-28 GeV.
Der Term σ_M wurde gegen das χ^2 pro Freiheitsgrad aufgetragen, Abbildung 6.1 und 6.2. Um das Minimum der Verteilung zu bestimmen wurde ein Polynom zweiter Ordnung angepaßt.

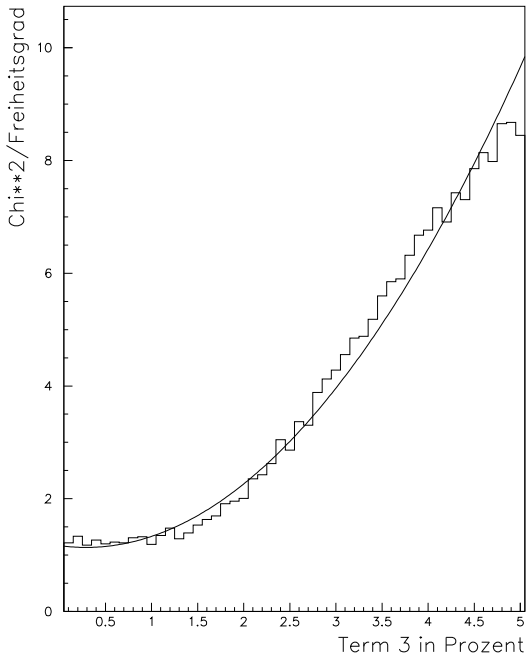


Abb. 6.1 $\chi 2$ pro Freiheitsgrad in Abhängigkeit von σ_M für Ereignisse die der 95% Bedingung genügen.

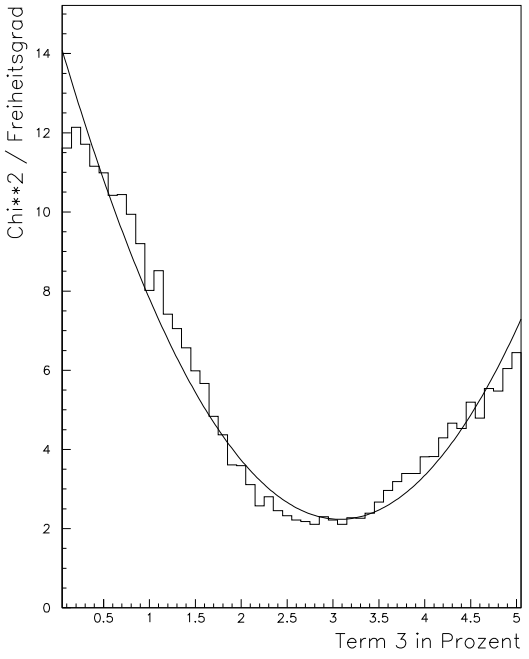


Abb. 6.2 χ^2 pro Freiheitsgrad in Abhängigkeit von σ_M für Ereignisse die der 50% Bedingung genügen.

Abbildung 6.1 zeigt das Ergebnis des χ^2-Test zwischen Monte Carlo und einer Energieverteilung von Ereignissen die der 95% Bedingung genügen. Das Minimum der angepaßten

Funktion liegt bei 0.3%. Der Bereich, in dem sich χ^2 pro Freiheitsgrad um eins ändert beträgt ca. 1.5%
Abbildung 6.2 zeigt das Ergebnis des χ^2-Tests für Ergebnisse die der 50% Bedingung genügen. Die angepaßte Funktion hat ihr Minimum bei 3.07%, der Bereich in dem sich das χ^2 pro Freiheitsgrad um eins ändert beträgt ca. ±1.5%.

Abbildung 6.3 zeigt die Verteilungen der kalibrierten und korrigierten BEMC Energien für :

a.) Ereignisse die der 95% Bedingung genügen.

b.) Ereignisse die der 50% Bedingung genügen.

Darüber gelegt wurde jeweils die in der Energie verschmierte Verteilung des Ereignis-Generators.
Der Term σ_M konnte für Ereignisse die der 95% Bedingung genügen fast auf null reduziert werden, was darauf hindeutet, daß die Kalibrationsunterschiede zwischen den einzelnen Modulen beseitigt werden konnten.
Für Ereignisse, die der 50% Bedingung genügen stellt sich die Situation anders dar. Hier wurde der Term σ_M auf 3.07% bestimmt, dies entspricht dem Wert der 1992 von [7] bestimmt wurde.
Bei den Ereignissen die der 50% Bedingung genügen müssen Korrekturen bezüglich der Inhomogenitäten des BEMC, die sogenannten Crack-Korrekturen, gemacht werden. Diese spielen für Ereignisse, die der 95% Bedingung genügen, kaum eine Rolle, da sich der Schauer eines solchen Ereignisses fast vollständig in einem Modul befindet. Auch kann ausgeschlossen werden, daß Leckverluste in einer Größe auftreten, die eine derartige Verschlechterung bewirken. Es wird daher vermutet, daß die Verschlechterung der Energieauflösung auf die Korrekturen bezüglich der Cracks zurückzuführen ist.

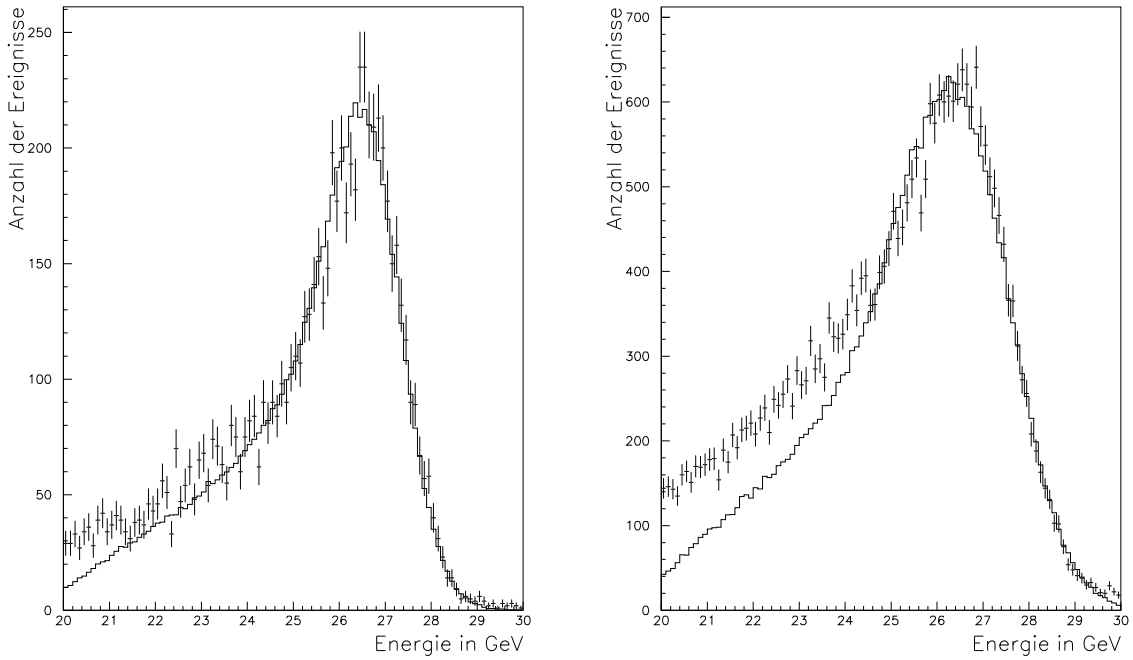


Abb. 6.3 Energieverteilung der korrigierten und kalibrierten BEMC Energien (+),
unterlegt mit den in der Energie verschmierten Energieverteilung des Ereignis-Generators (-).
a.) Ereignisse die der 95% Bedingung genügen, im Monte Carlo σ_M = 0.03%
b.) Ereignisse die der 50% Bedingung genügen, im Monte Carlo σ_M = 0.30%

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Kalibration des Rückwärtigen Kalorimeters im H1 Detektor entwickelt. Dieses Verfahren nutzt die Elektronen, die bei der Elektron-Proton Streuung in den Bereich des Kinematischen-Peaks gestreut werden. Diese Elektronen besitzen eine bekannte Energie, die bei der Strahlenergie der Elektronen von 26.7 GeV liegt.
Das Verfahren ist in der Lage, die Module des BEMC individuell zu kalibrieren, wenn diesen eine ausreichende Anzahl von Ereignissen zu geordnet werden. Bei der Zuordnung der Ereignisse wird zwischen drei verschiedenen Fällen unterschieden.

1. Das Ereignis deponiert mindestens 95% seiner Energie in diesem Modul
2. Das Ereignis deponiert mindestens 50% seiner Energie in diesem Modul
3. Das Ereignis deponiert den größten Teil seiner Energie in einem der inneren Dreiecke

Die Fallunterscheidung bezüglich der Energiedeposition soll dabei sicherstellen, daß wirklich nur ein Modul kalibriert wird. Verteilt sich die Energie auf mehrere Module wird der zu bestimmende Kalibrationsfaktor verfälscht.
Mit den im Laufe des Jahrs 1993 aufgenommenen Daten war es möglich, 21 der insgesamt 88 Module des BEMC individuell zu kalibrieren.

11 Module konnten mit der 95% Bedingung kalibriert werden.

6 Module wurden mit der 50% Bedingung kalibriert.

Die 4 inneren dreieckigen Module konnten kalibriert werden.

Der Fehler der Kalibration setzt sich zusammen aus systematischen und statistischen Fehler.
Der systematische Fehler wurde auf ±1.7% bestimmt.
Der statistische Fehler ist abhängig von der Anzahl der Ereignisse die einem Modul zugeordnet werden konnte. Er schwankt zwischen ±0.1% und ±1.0%.

Bei der Untersuchung des systematischen Fehlers wurde eine leichte Zeitabhänigkeit des Kalibrationsfaktors beobachtet. Er steigt gegen Ende der Datennahme an. Da in diesem Zeitraum eine hohe Luminosität erreicht wurde, kann vermutet werden, daß der Anstieg des Kalibrationsfaktors auf Strahlungsschäden am Szintillator zurück zuführen ist. Bei einer gleichbleibend hohen Luminosität kann es daher nötig sein, die Kalibration in kurzen Zeitabständen zu wiederholen.

Mit den kalibrierten Energien konnte die Energieauflösung des BEMC bestimmt werden.
Betrachtet man nur Ereignisse, die der 95% Bedingung genügen, ist sie:

$$\frac{\sigma_{95\%}}{E} = \sqrt{\left(\frac{0.1\sqrt{GeV}}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0.42\ GeV}{E}\right)^2 + (0.003)^2}$$

Betrachtet man Ereignisse die der 50% Bedingung genügen, verschlechtert sich der konstante Term erheblich.

$$\frac{\sigma_{50\%}}{E} = \sqrt{\left(\frac{0.1\sqrt{GeV}}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0.42\ GeV}{E}\right)^2 + (0.03)^2}$$

Für Ereignisse, die nur 50% ihrer Energie in einem Modul deponieren, müssen sogenannte Crack-Korrekturen gemacht werden, die den Energieverlust zwischen den Modulen korrigieren sollen. Diese Korrekturen spielen bei Ereignissen die der 95% Bedingung genügen keine Rolle.
Es liegt daher die Vermutung nahe, daß diese Korrektur noch nicht optimiert ist.

Literaturverzeichnis

[1] *H1 Collaboration*, The H1 detector at HERA, DESY 93-103 (1993)

[2] *B. Rossi*, High-Energy Particles, Prentice Hall, New York (1964)

[3] *U. Amaldi*, Fluctuation in Calotimetry Measurements, Physica Scripta Vol.23: 409-424, 1981

[4] *J. Bàn et al.,* The BEMC Single Electron Trigger (BSET), H1 Internal Report, (H1-07/92-235), 1992

[5] *M. Fleischer*, Electronic Calibration of the Backward Electromagnetic Calorimeter, H1 Internal Report, (H1-07/92-236), 1992

[6] *BEMC Group*, Calibration and Reconstruction of the BEMC, H1 Internal Report, (H1-08/92-234), 1992

[7] *M. Fleischer und E. Peppel*, BEMC energy calibration from quasi-elaszic scattered electrons, H1 Internal Report, (H1-07/93-304), 1993

[8] *P. Murin*, 1993 auf der DESY-IBM: Filenamen H1KMUR.ENORM.FOR, H1KMUR.ENORM.KUMAC

[9] *C. Gülk*, Diplomarbeit in Vorbereitung, 1993

[10] *C. Brune*, Untersuchungen zum Elektronennachweis für kleine Winkel am H1-Detektor, Diplomarbeit, Dortmund 1992

[11] *BEMC Group*, The H1 Backward Electromagnetic Calorimete (BEMC), H1 Internal Report, (H1-07/92-233), 1992

[12] *K. Rathje*, Relativkalibration der Module des rückwärtigen elektromagnetischen Kalorimeters für den H1-Detektor mit kosmischen Muonen, Diplomarbeit, 1.Inst. für Experimentalphysik, Universität Hamburg, 1992

[13] *A.D. Martin, W.J. Stirling and R.G. Roberts,* Phys. Rev. D47:867-882, 1993

[14] *J. Kwiecinski, A.D. Martin, W.J. Stirling and R.G. Robert*, Physical Review, D42:3645-3659, 1990

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. K. Meier bedanken, der mir die Möglichkeit für diese Arbeit gab. Bedanken möchte ich mich auch für seine intensive Betreuung

Bei allen Mitgliedern der H1-Gruppe am Institut für Hochenergiephysik in Heidelberg möchte ich mich nicht nur für die fachlichen Diskussionen bedanken, die dazu beitrugen technische Problem zu lösen, sondern auch für die gewaltigen nicht fachlichen Diskussionen, die den Aufenthalt in dieser Gruppe angenehm und interresant gestalteten.
Mein besonderer Dank gilt Christoph Brune der durch seine Betreuung maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Instituts für Hochenergiephysik Heidelberg durch die ein angenehmes und produktives Arbeitsklima geschaffen wurde.

Meinen Eltern möchte ich danken für den Zuspruch und die Unterstützung die sie mir in allen Phasen meines Studiums und der Arbeit zukommen ließen.

'Last but not least' möchte ich Thormud Schöll für die Hilfe in der allerletzten Phase der Arbeit danken.