

B. Fahr

**Untersuchungen an einem Spurdetektor
aus szintillierenden Fasern und
positionsempfindlichem Photomultiplier**

Experimentelle physikalische Diplomarbeit
vorgelegt von
Arndt Boris Fahr

**II. Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg**



**Untersuchungen an einem Spurdetektor
aus szintillierenden Fasern und
positionsempfindlichem Photomultiplier**

Experimentelle physikalische Diplomarbeit
vorgelegt von
Arndt Boris Fahr

II. Institut für Experimentalphysik
Fachbereich Physik
Universität Hamburg

Hamburg, im Juli 1995

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 HERA und H1.....	1
1.2 Vorwärts-Proton-Spektrometer.....	1
1.2.1 Physikalische Prozesse.....	1
1.2.2 Der Aufbau.....	3
2 Physikalische Voraussetzungen	7
2.1 Szintillierende Fasern.....	7
2.2 Hodoskope.....	8
2.3 Photomultiplier.....	8
3 Aufgabenstellung	12
4 Versuchsaufbau	12
4.1 Mechanischer Aufbau.....	14
4.2 Elektronik.....	19
4.3 Computerprogramm.....	20
5 Messungen und Ergebnisse	23
5.1 Eichungen der Elektronik.....	23
5.2 Messungen am Photomultiplier.....	23
5.2.1 Empfindlichkeit der Photomultiplierkanäle.....	23
5.2.2 Empfindlichkeit einzelner Kathodenpixel.....	26
5.2.3 Crosstalk.....	27
5.2.4 Bestimmung der Photoelektronenzahl.....	30
5.3 Messungen mit Myonen.....	33
5.3.1 Triggereinstellungen für Myonmessungen.....	33
5.3.2 Beispiele von Ereignissen.....	35
5.3.3 Spurensuchalgorithmus.....	37
5.3.4 Effizienz von Einzel- und Doppellagen.....	39
6 Zusammenfassung und Ausblick	45
Anhang	47
Empfindlichkeitsverteilung.....	47
Literaturverzeichnis.....	48

1 Einleitung

1.1 HERA und H1

Bei der am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) betriebenen Hadron-Elektron-Ringanlage (HERA) handelt es sich um einen 6,8 km langen Ringbeschleuniger, in dessen gegenläufigen Bahnen Elektronen auf 27,6 GeV und Protonen auf 820 GeV beschleunigt und gespeichert werden. Mit einer Schwerpunktsenergie von 314 GeV können alle 96 ns Elektronen und Protonen in zwei Wechselwirkungspunkten innerhalb unterirdischer Hallen aufeinandertreffen.

In Halle Nord wird der Wechselwirkungspunkt schalenförmig vom Experiment H1 umschlossen. Die wesentlichen Komponenten dieses $16 \times 10 \times 12$ m³ großen Detektors sind Spurkammern im Zentrum und ein daran anschließendes Flüssig-Argon-Kalorimeter, umgeben von einer supraleitenden Spule.

Mit den Spurdetektoren kann man die Trajektorien geladener Teilchen rekonstruieren, die Krümmung der Flugbahnen gibt Aufschluß über Impulse und Ladung der Reaktionsprodukte. Das Kalorimeter besteht aus einem elektromagnetischen und einem hadronischen Teil und dient zur Energiemessung von Teilchen.

Durch das Identifizieren der Teilchen des Endzustands erhält man Informationen über die Struktur des Protons und die Mechanismen der fundamentalen Wechselwirkungen. Eine genaue Beschreibung des Detektors findet sich in [H1C94.1].

Der blinde Fleck des Detektors ist das Strahlrohr selbst: Durch das 10 cm breite Strahlrohr verlassen die Teilchen mit einem Streuwinkel kleiner als 12,5 mrad ungesehen den gesamten Detektor. Dadurch entgeht dem Experiment eine wichtige Klasse von Ereignissen – die diffraktiven Prozesse –, welche ein zusätzliches Spektrometer im HERA-Tunnel erfassen könnte.

1.2 Vorwärts-Proton-Spektrometer

1.2.1 Physikalische Prozesse

Im Regge-Modell werden diffraktive Prozesse erklärt durch den Austausch eines farblosen Objekts mit den Quantenzahlen des Vakuums, des sogenannten Pomerons.

Diffraktive Prozesse treten bei allen Sorten physikalischer Wechselwirkungen auf, so z.B. bei tiefunelastischer Streuung (Abbildung 1.1) oder bei Photo-produktionsereignissen (Abbildung 1.2).

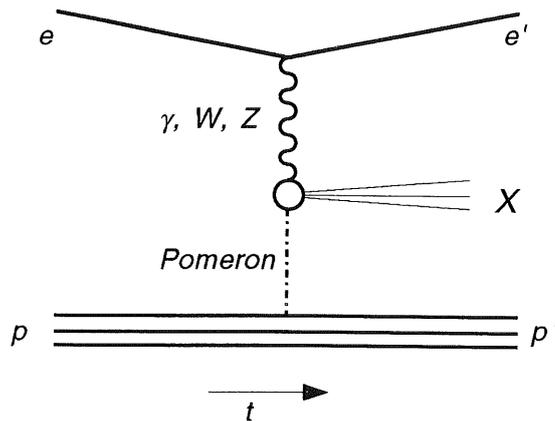


Abb. 1.1: Tiefunelastischer diffraktiver Prozeß

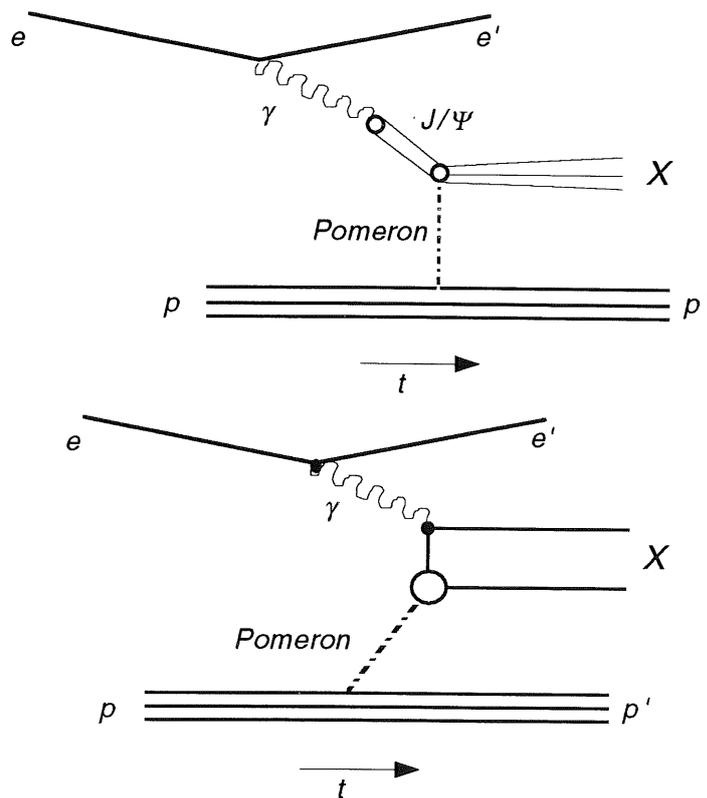


Abb. 1.2: Diffraktive Photoproduktion

Das Proton wird hier nur um einen sehr kleinen Winkel gestreut (einige mrad) und kann im Detektor nicht nachgewiesen werden. Ist im Endprodukt ein nicht-dissoziiertes, hochenergetisches Proton enthalten, so kann es in einem Vorwärtspektrometer identifiziert werden. Durch den dort bestimmten Protonimpuls wird das Erkennen der diffraktiven Prozesse erleichtert.

Um die Verteilung der longitudinalen Impulse der produzierten Teilchenjets darzustellen, benutzt man die Größen Rapidity y und ihre Hochenergienäherung, die Pseudorapidity η [Perk87]:

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_L}{E - p_L} \right) \approx \ln \left(\frac{E + p_L}{\sqrt{m^2 + p_T^2}} \right)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|\vec{p}| + p_L}{|\vec{p}| - p_L} \right) \approx -\ln \tan \frac{\vartheta}{2}$$

Es beschreiben E die Energie, m die Masse, p den Impuls, p_L den longitudinalen und p_T den transversalen Impuls des produzierten Teilchens im Schwerpunktsystem, ϑ gibt den Produktionswinkel an.

Bei HERA wurden 1993 in etwa 5% aller Ereignisse mit Impulsübertrag $Q^2 \geq 10$ (GeV/c)² die für diffraktive Prozesse charakteristische Rapiditylücke gefunden [H1C94.2].

1.2.2 Der Aufbau

Das Vorwärts-Proton-Spektrometer von H1 (eng. Forward Proton Spectrometer, FPS) besteht aus HERA-Ablenkmagneten für die Impulsselektion und einem ortsauflösenden Detektor für den Teilchennachweis.

Die im Tunnel bereits vorhandenen Ablenkmagnete spalten Proton- und Elektronstrahl 10 m hinter H1 wieder in getrennte Bahnen auf (siehe Abbildung 1.3), der Protonstrahl wird fokussiert und nach oben abgelenkt. Für Protonen mit einem geringeren Impuls als 820 GeV/c bewirkt die Lorentzkraft eine stärkere Ablenkung als nötig. So kann man diese, offensichtlich an der Reaktion teilgenommenen Protonen, oberhalb der Sollage des Strahls finden (s. Abbildung 1.4). Die Flugbahnen von Protonen mit einem Impuls zwischen 500 und 780 GeV liegen in 81 m und 90 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt 2 bis 5 cm oberhalb der Protonstrahlachse. } A

Forward Beamline Layout

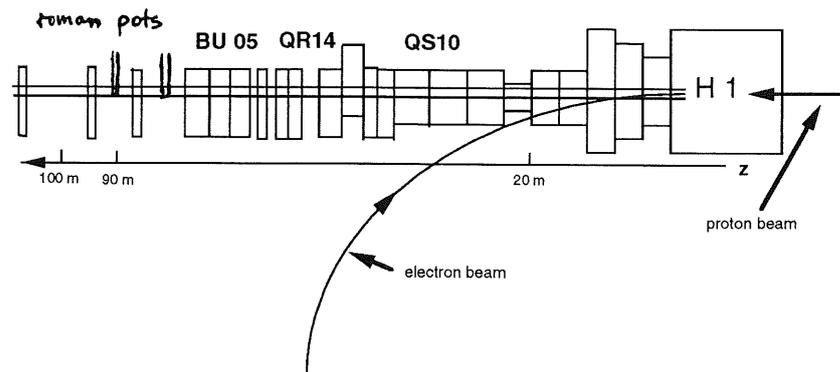


Abb. 1.3: Spektrometernaufbau im HERA-Tunnel

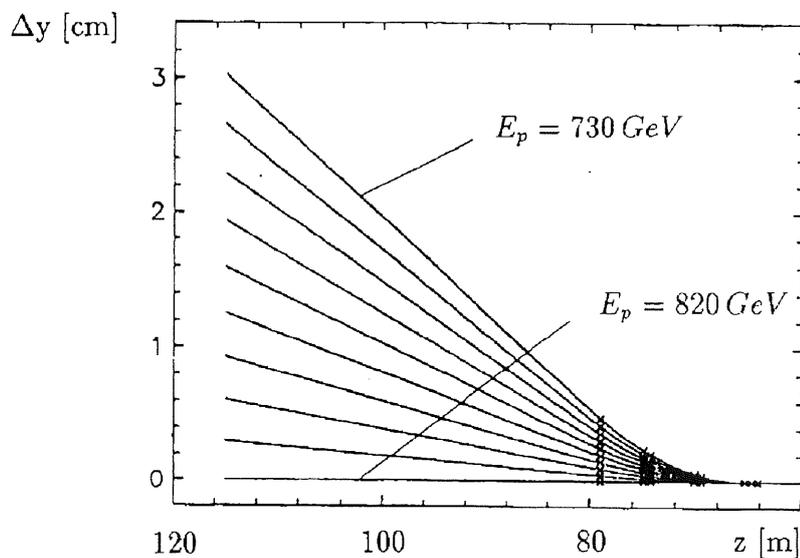


Abb. 1.4: Dispersionskurve des BU-Magneten

An diesen beiden Stellen befinden sich in zwei Vakuumeinsätzen Teilchendetektoren aus szintillierenden Fasern, die mit positionsempfindlichen Photomultipliern ausgelesen werden.

Die Vakuumbehälter werden mit Feintrieben in das Stahlrohr bis 6 mm an die Strahlachse positioniert (siehe Abbildung 1.5). Nach ihrem ersten Hersteller¹ werden die Einsätze allgemein *roman pots* ("römische Töpfe") genannt.

¹ Sanita-Institute of Rome

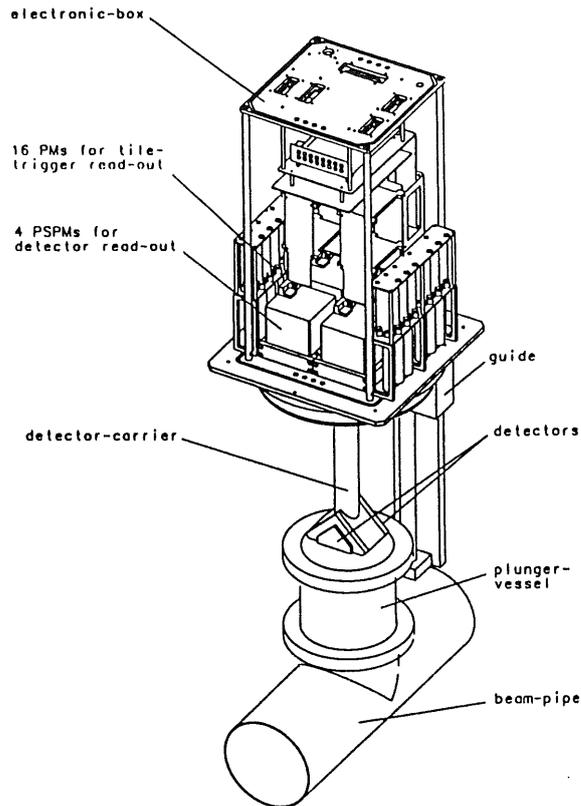


Abb. 1.5: roman pot

Seit 1995 sind in ihrem Inneren strahlungsresistente, szintillierende Fasern so angeordnet, daß sie auf einer Fläche von 15 cm² Protonendurchgänge auf 100x100 µm² genau registrieren können. Dazu werden mehrere Fasern aus 1 mm dickem Szintillator zu sogenannten Hodoskopern zusammengeklebt (Beispiel in Abbildung 1.6).

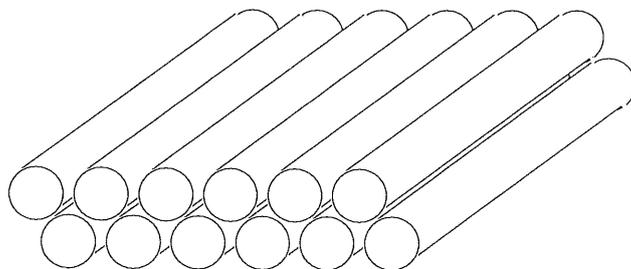


Abb. 1.6: Faserdetektor

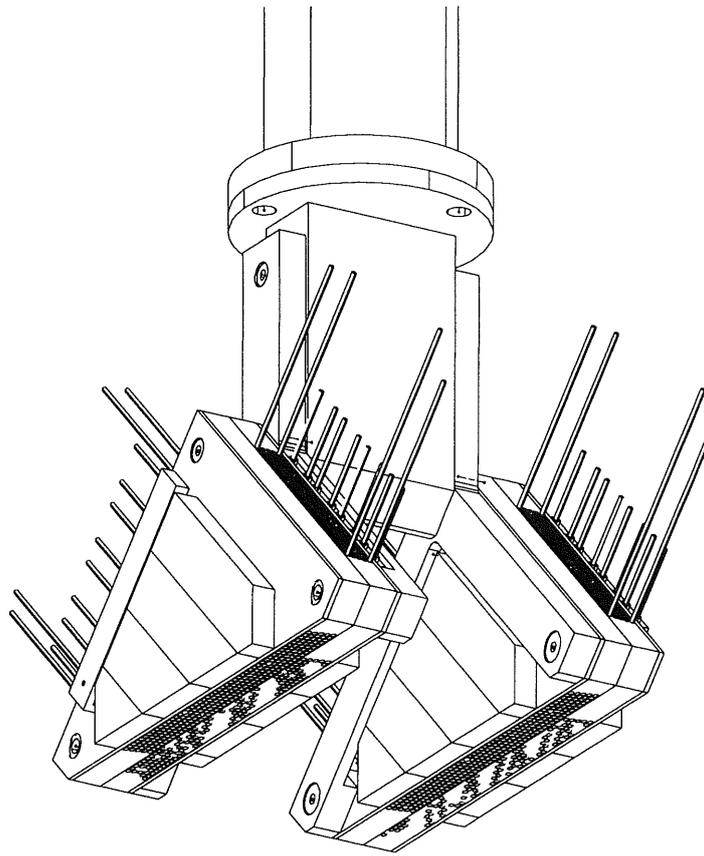


Abb. 1.7: Zwei Subdetektoren eines roman pots

Zwei um 90° gekreuzte Hodoskope aus je fünf Einzellagen bilden einen Subdetektor eines roman pots, der beide Koordinaten der Protonspur erkennt. Mit zwei Subdetektoren im Abstand von 6 cm (siehe Abbildung 1.7) kann man aus der Steigung der Spur den Impuls bestimmen; nimmt man noch die zweite Station (9 m weiter) hinzu, so werden die Aussagen unabhängig vom Wechselwirkungspunkt in H1.

Das Licht am Ende der szintillierenden Fasern wird über einzelne, 45 cm lange Lichtleiter zu acht positionsempfindlichen Photomultipliern mit je 64 Kanälen geführt und in Spannungsimpulse umgewandelt. Photomultiplier und szintillierende Fasern werden in Kapitel 2 ausführlicher erläutert.

2 Physikalische Voraussetzungen

2.1 Szintillierende Fasern

Aufgrund der kurzen Abklingzeit des Szintillationslichts sowie der Unempfindlichkeit von Plastikmaterial gegen Strahlung sind organische Szintillatoren für den Einsatz im Vorwärts-Proton-Spektrometer bei H1 gut geeignet.

Szintillationslicht entsteht, wenn beim Durchgang schneller geladener Teilchen durch Materie Atome und Moleküle durch Energie- und Impulsübertrag angeregt werden. Die anschließend ausgesandten Photonen werden bei organischen Szintillatoren mit Wellenlängenschiebern (*wave length shifter*), häufig sind das in den Kunststoff eingeschmolzene Moleküle, in sichtbares Licht umgewandelt.

In der vorliegenden Diplomarbeit werden szintillierende Fasern für einen Spurdetektor für kosmische Myonen verwendet. Die nach dem Prinzip der Lichtleiter funktionierenden 2 mm dünnen Fasern vom Typ BCF12 der Firma Bicron bestehen aus einem szintillierenden Polystyrolkern (1,88 mm Durchmesser) und einem Mantel aus PolyMethylMetaAcrylat (PMMA). Der kleinere Brechungsindex des Mantels ermöglicht dem Lichtstrahl einen Totalreflexionswinkel von $21,4^\circ$ (siehe Abbildung 2.1).

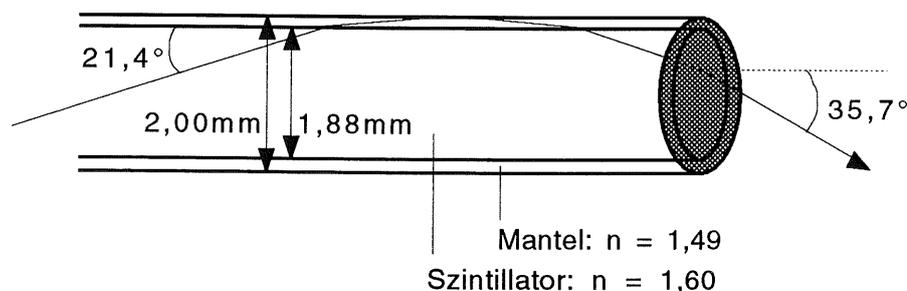


Abb. 2.1: Längsschnitt durch eine szintillierende Faser

Das blaue Szintillationslicht ($\lambda \approx 435 \text{ nm}$) erreicht das Ende der Fasern und wird im günstigsten Fall direkt vom Photomultiplier in elektrische Signale umgewandelt. Anderenfalls kann man auch nicht-szintillierende Lichtleiter von bis zu 1 m Länge an die szintillierenden Fasern ankleben oder anschmelzen (thermisches Spleißen), ohne nennenswerte Verluste in der Lichtmenge zu haben.

Lässt man jedoch einen Spalt zwischen Faser und Photomultiplier, so hat man erhebliche Nachteile, weil der Lichtstrahl mit einem Öffnungswinkel von $35,7^\circ$ auffächert.

Warum?

2.2 Hodoskope

Szintillierende Fasern können parallel in Bündeln zu sogenannten Hodoskopen angeordnet und zusammengeklebt werden, so daß ein Spurdetektor entsteht, in dem die Flugbahn eines Teilchens als Reihe von Lichtblitzen in verschiedenen Fasern registriert wird. Dabei ist es üblich, die einzelnen Fasern in Ebenen gegeneinander zu versetzen (s. Abbildung 2.2). Durch diese Anordnung – im Englischen *staggering* genannt – erhält man eine Auflösung, die um den Faktor der Anzahl der Lagen besser ist als diejenige der Einzellage.

Ist z.B. die Auflösung einer 2 mm dicken Faser $2000 \mu\text{m} / \sqrt{12} = 600 \mu\text{m}$, so kann man mit vier, um je $d/4$ versetzten Lagen $150 \mu\text{m}$ Auflösung erreichen². Dies gilt theoretisch nur für den senkrechten Einfall von Teilchen.

Die Projektion der Teilchenspur auf die Ebene der Faserstirnflächen läßt sich aus den Lichtblitzen der getroffenen Fasern rekonstruieren. Ist man am Verlauf der Spur im Raum interessiert, braucht man noch ein zweites, um 90° gedreht ausgerichtetes Faserbündel.

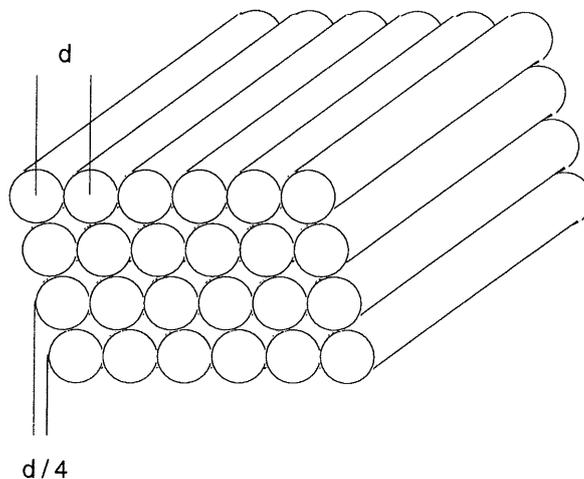


Abb. 2.2: Faserdetektor

2.3 Photomultiplier

Photomultiplier können kleinste Lichtmengen in elektrische Signale umwandeln, indem einzelne, von Photonen ausgelöste Elektronen im Vakuum beschleunigt werden und an sogenannten Dynoden eine Lawine von Sekundärelektronen erzeugen.

Das Licht aus 2 mm dicken Fasern besteht nur aus einigen wenigen Photonen, so daß Photomultiplier zur Messung nötig sind, um die kurzen Lichtblitze zu registrieren.

² Der Faktor $1/\sqrt{12}$ entsteht durch Berechnen der Standardabweichung einer Kastenverteilung.

Positionsempfindliche Photomultiplier (engl. position sensitive photomultiplier, PSPM) sind zur Auslese von szintillierenden Faserhodoskopen besonders geeignet, da mehrere Kanäle gleichzeitig ausgelesen werden können. So kann man ein ganzes Faserbündel an einen Photomultiplier führen.

Im Unterschied zu Einkanal-Photomultipliern besitzen Mehrkanal-Photomultiplier unterteilte Kathoden, Dynoden und Anoden. Jedem Eintrittsbereich auf der Photokathode ist ein Anodenpin am Ausgang zugeordnet.

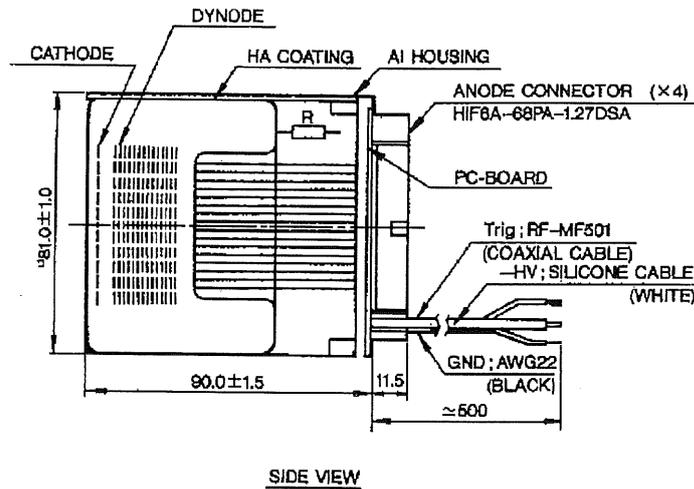


Abb. 2.3: Seitenansicht des PSPM H4140-20 [Hama94]

In dieser Diplomarbeit wird der 256-Kanal-Photomultiplier H4140-20 der Firma Hamamatsu untersucht (siehe Abbildung 2.3). Die 40x40 mm² große Kathode, sowie die Anode und alle 19 Dynoden sind hier innerhalb der Vakuumröhre in eine Matrix von 16x16 Elementen unterteilt (Abbildung 2.4).

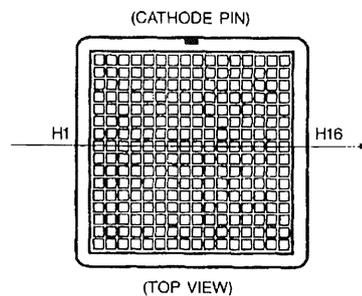


Abb. 2.4: Ansicht des Photoneneintrittsfensters [Hama94]

So entstehen auf der Bialkali-Kathode 256 je $2,54 \times 2,54 \text{ mm}^2$ große Bereiche, aus denen sich mittels Photonen Elektronen herauslösen können. Die höchste Quantenausbeute dieses Kathodenmaterials liegt bei einer Wellenlänge von $420 \pm 50 \text{ nm}$ [Hama94].

Mit einer Gesamtspannung von 2450 Volt werden die Elektronen über Dynoden zur Anode beschleunigt. Bei jedem Aufprall auf die Drahtnetzdynoden werden neue Sekundärelektronen herausgeschlagen, die dann im gleichen Kanal zur nächsten Dynodenstufe beschleunigt werden. Am Ende treffen ungefähr 5×10^6 Elektronen auf dem korrespondierenden Anodenpixel auf und werden als elektrisches Signal herausgeleitet.

Die Entstehung der Sekundärelektronenlawine an den flachen Dynoden ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt.

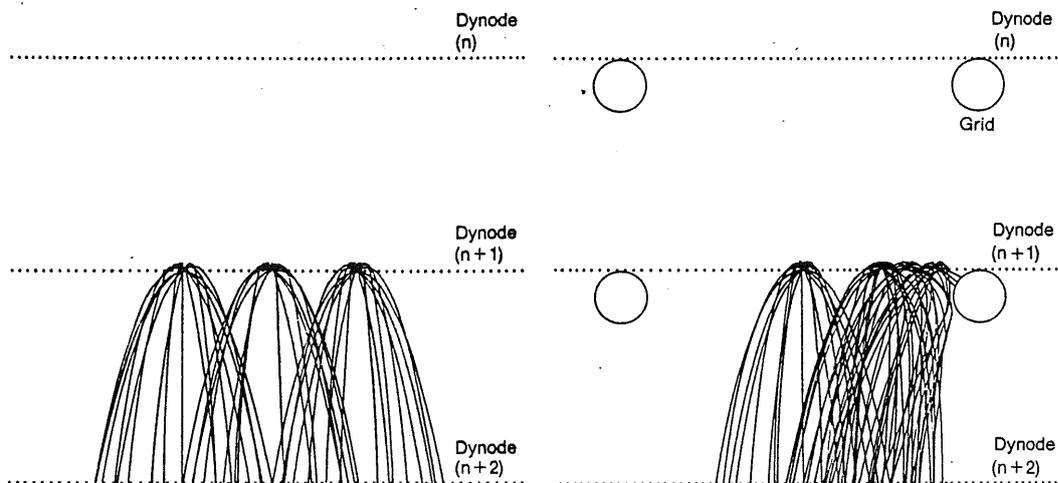


Abb. 2.5: Elektronenlawine zwischen Dynoden [Suz88]
 links: ohne zusätzliche Fokussierdrähte
 rechts: mit leicht negativ geladenen Fokussierdrähten

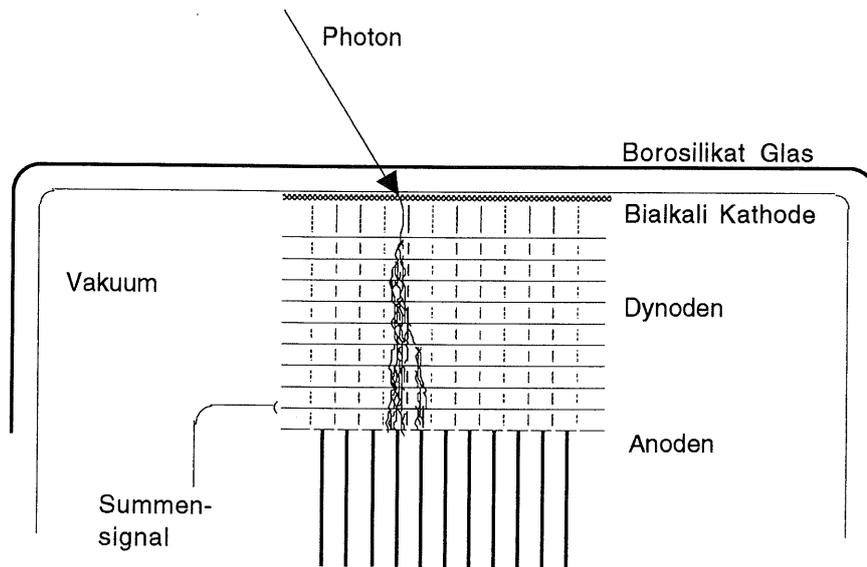


Abb. 2.6: Innenaufbau des PSPM (schematisch)

Ein Übersprechen der Elektronen innerhalb des Photomultipliers von einem Pixel zum nächsten ist möglich, indem Sekundärelektronen beim Beschleunigen von Dynode zu Dynode auf das Nachbarsegment treffen. Ein neuer Zweig der Elektronenlawine kann sich von jeder beliebigen Dynodenstufe aus bilden, so daß dann an zwei benachbarten Anodenpins ein Signal anliegt (siehe Abbildung 2.6).

Dieses unter dem Stichwort *Crosstalk* bekannte Phänomen wurde bisher bei allen positionsempfindlichen Photomultipliern beobachtet [Tak87], [Suz88], [Bähr92], [Hama94], [Reich94], [Witt94].

Ein Maß für die Summe aller 256 Signale stellt der Spannungsabfall an der 19. Dynode dar. Dieses positive Summensignal wird zusätzlich zu den 256 einzelnen Anodenanschlüssen herausgeführt und kann z.B. zum Triggern verwendet werden. *lehde*

3 Aufgabenstellung

Mit dem Ziel, den Aufbau des Vorwärts-Proton-Spektrometers von H1 zu verbessern und zu erweitern, sollen im Rahmen dieser Diplomarbeit Laborversuche an einem 256-Kanal-Photomultiplier mit szintillierenden Fasern gemacht werden.

Der Photomultiplier H4140-20 von Hamamatsu ist eine Weiterentwicklung des 64-Kanal-PSPM H4139-20. Dieser sowie der 96-Kanal-Photomultiplier XP1724 von Philips wurden bereits ausführlich getestet [Bähr92] [Chen95].

Aufgabe ist es nun, einen kompletten Versuchsaufbau zum Testen des H4140-20 zu erstellen. Dazu gehört eine Justiervorrichtung, die gesamte Ausleseelektronik bis hin zum Computerprogramm, welches die Daten sichert und auswertet.

Dem Photomultiplier ist auf definierte Weise Licht zuzuführen, um seine Effizienz und die Empfindlichkeit seiner 256 Kanäle zu untersuchen. Das oben genannte Übersprechen von Kanal zu Kanal soll ebenfalls quantifiziert werden.

Weiterhin ist der Photomultiplier auf seine Brauchbarkeit in einem Spurdetektor zu untersuchen. Dazu soll aus 256 szintillierenden Fasern ein Detektor gebaut werden, in dem Spuren kosmischer Myonen identifiziert werden können. Dies geschieht mit Richtung auf den geplanten Einsatz bei H1: Im Vorwärtsspektrometer benötigt man Spurdetektoren für hochenergetische Protonen.

Es soll geprüft werden, ob durch eine einfache Halterung der Fasern die bisher aufwendige Klebung aller Fasern umgangen werden kann.

Durch eine geeignete Anordnung der Fasern vor dem Photomultiplier sollen nachteilige Effekte des Übersprechens möglichst verhindert werden.

Ein Computerprogramm soll die Myonspuren erkennen und auswerten, wobei die Ansprechwahrscheinlichkeit der einzelnen Fasern für Myonen untersucht und mit einer Monte-Carlo Simulation verglichen werden soll.

4 Versuchsaufbau

Der gesamte Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 4.1 zu erkennen. Er besteht aus dem zu untersuchenden Photomultiplier und 256 szintillierenden Fasern. Zum Aufbau gehören weiter die signalverarbeitende Elektronik und ein Computer zur Datenaufnahme.

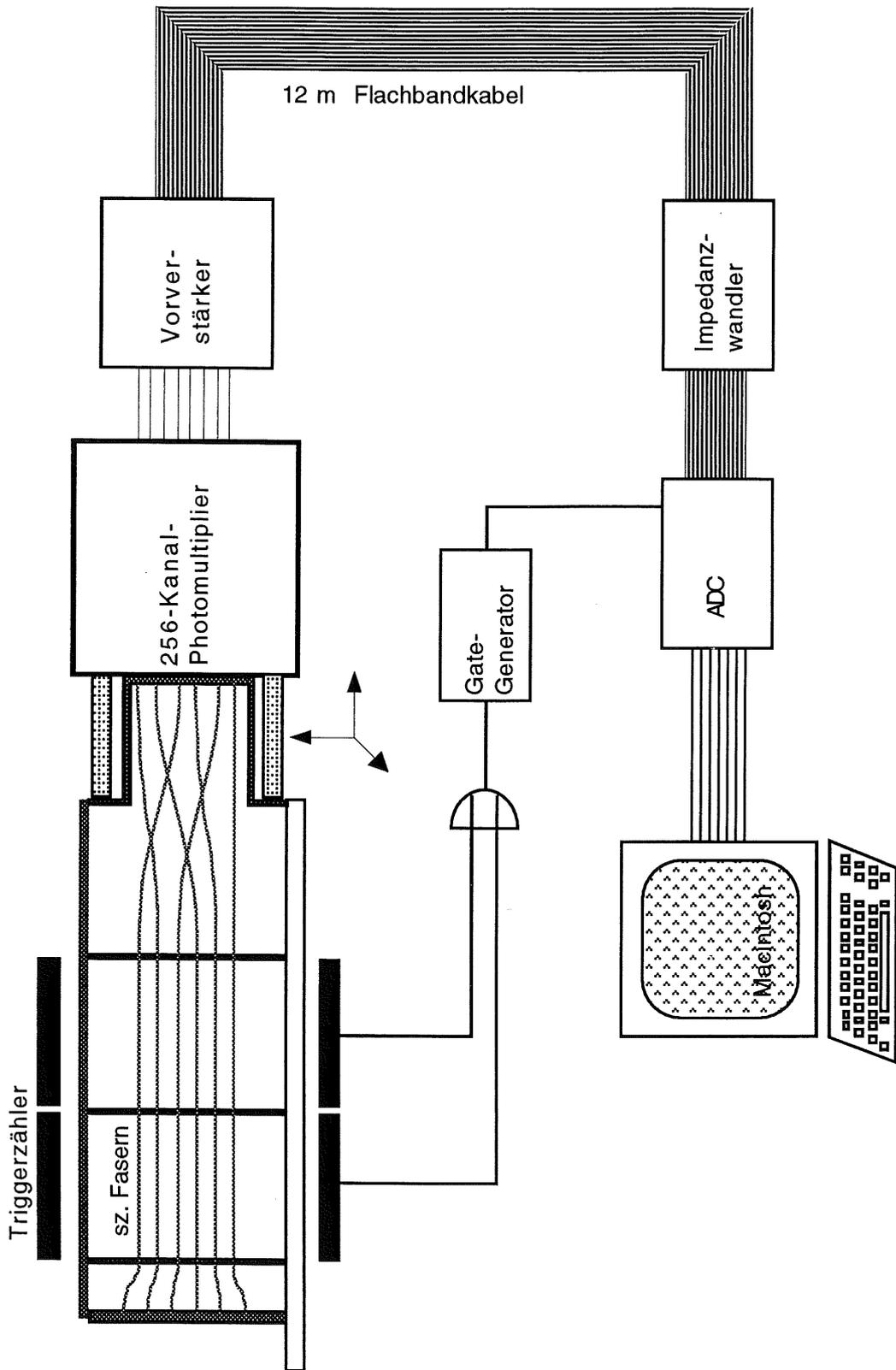


Abb. 4.1: Versuchsaufbau

4.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau besteht aus der Halterung und Positionierung des Photomultipliers sowie dem Faserdetektor (siehe Abbildung 4.2) aus 256 szintillierenden Fasern (Typ Bicon BCF12).

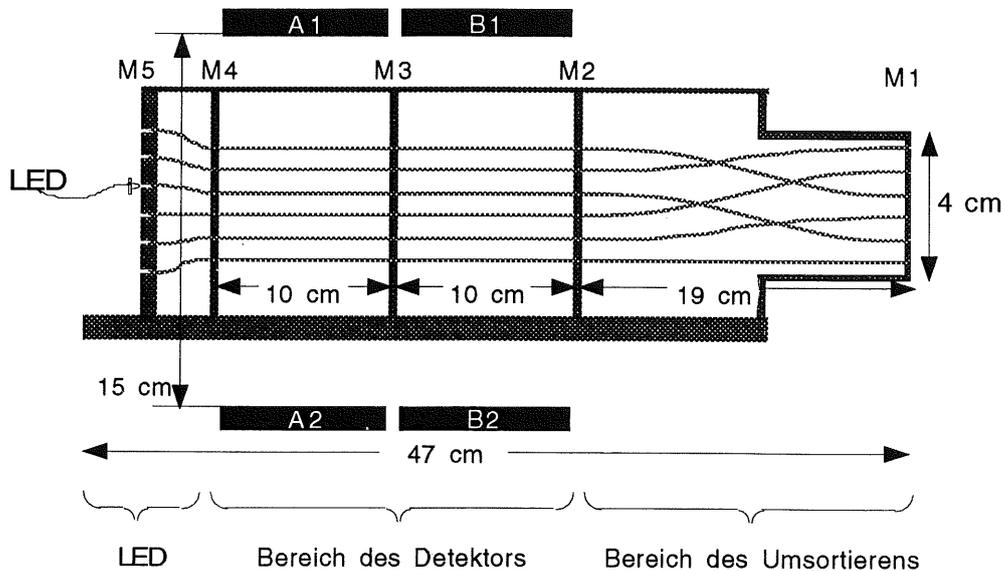


Abb. 4.2: Faserdetektor (Seitenansicht)

Ein Aluminiumgehäuse umfaßt den Photomultiplier und schützt ihn vor Umgebungslight. Das Gehäuse läßt sich mittels dreier Lineartriebe und einem Drehtrieb vor die Fasern justieren, die direkt an das Eintrittsfenster des positionsempfindlichen Photomultipliers geführt werden (siehe Abbildung 4.3). Hierbei wird jedem der 256 PSPM-Kanäle eine Faser zugeordnet.

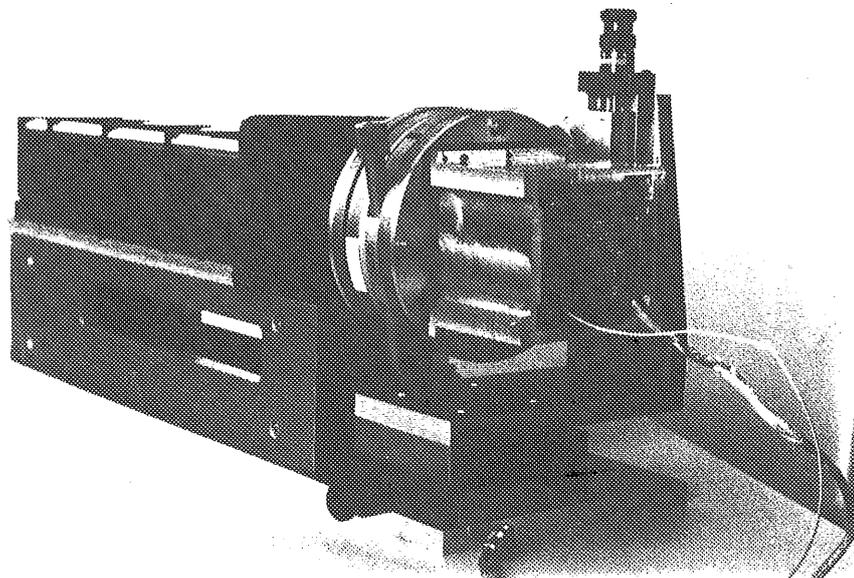


Abb. 4.3: Ablichtung von Faserdetektor, Drehtrieb und Photomultiplier

Eine schwarze Kunststoffmaske (M1) mit runden Bohrungen hält alle Fasern vor den Photomultiplier. Genau wie im Photomultiplier sind die 16x16 Bohrungen in einem Abstand von 2,54 mm angeordnet. Die Genauigkeit der Periodizität beträgt $5\ \mu\text{m}$, die Bohrungen selbst sind $2,05\ \text{mm}$ ($+0,01 / -0$) groß, um den Schwankungen des Faserdurchmessers (nominell $2,00\pm 0,02\ \text{mm}$) Rechnung zu tragen. Beim Einfädeln der Fasern in die Lochmasken zeigte sich, daß ungefähr 30 Fasern von insgesamt 300 aufgrund ihres zu großen Durchmessers nicht benutzt werden konnten³.

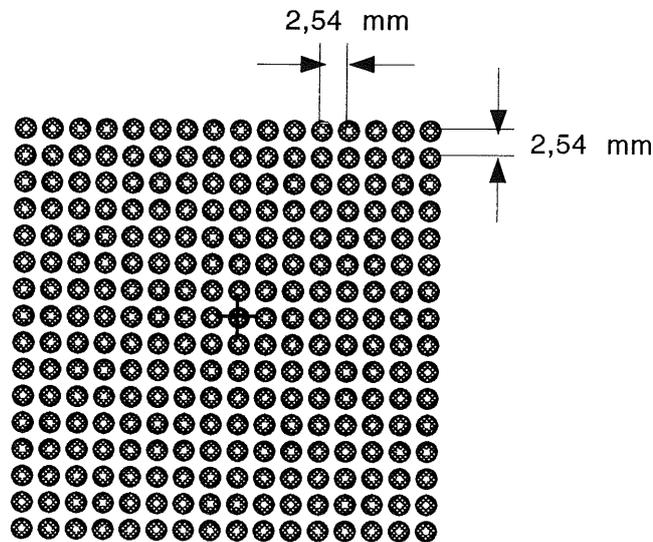


Abb. 4.4: Faseranordnung vor dem Photomultiplier

Das Positionieren des Photomultipliers vor den Fasern ist mit einer Genauigkeit von $10\ \mu\text{m}$ in einem Bereich von 10 mm in jeder Raumrichtung möglich; das Drehen des Eintrittsfensters gegenüber der Fasermaske geht über 360° auf 1 Minute genau. Drehpunkt ist dabei die Mitte eines der zentralen Photomultiplier-Pixel (Kreuz in Abbildung 4.4).

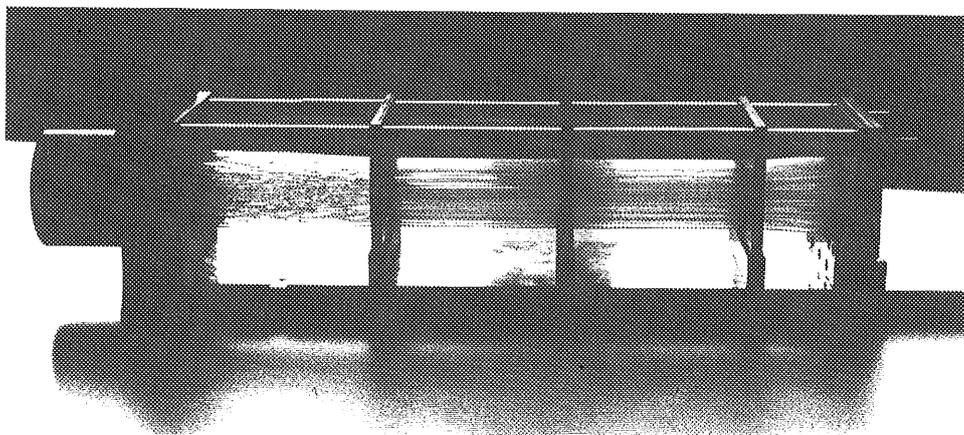


Abb. 4.5: Ablichtung des Faserdetektors

³ Messung der BCF-12-Faserdicken unter [Chen95]

Von drei Kunststoffstützen (M2-M4) gehalten, bildet der Mittelteil der 50 cm langen szintillierenden Fasern einen $4,0 \times 3,6 \times 20 \text{ cm}^3$ großen Spurdetektor (s. Abbildung 4.5), der es ermöglicht, die Projektion einer Myonspur zu erfassen. Die maßstabsgetreue Anordnung der Fasern zeigt Abbildung 4.6.

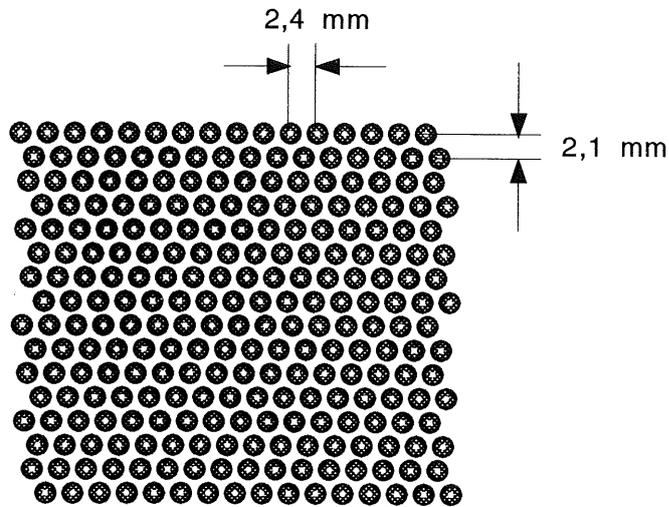


Abb. 4.6: Faseranordnung als Faserdetektor

Wie? Durch das Versetzen der einzelnen Ebenen gegeneinander erreicht man für senkrecht einfallende Teilchen rechnerisch eine Auflösung von

$$\frac{2400 \mu\text{m}}{16\sqrt{12}} \approx 40 \mu\text{m}.$$

Als Trigger für die kosmischen Myonen dienen vier Szintillationszähler (A1, A2, B1, B2) von je $5 \times 10 \text{ cm}^2$ Fläche, die von herkömmlichen Photomultiplerröhren (Valvo 56 AVP) ausgelesen werden. Je zwei Zähler befinden sich im Abstand von 15 cm ober- und unterhalb der Fasern (Abbildung 4.7).

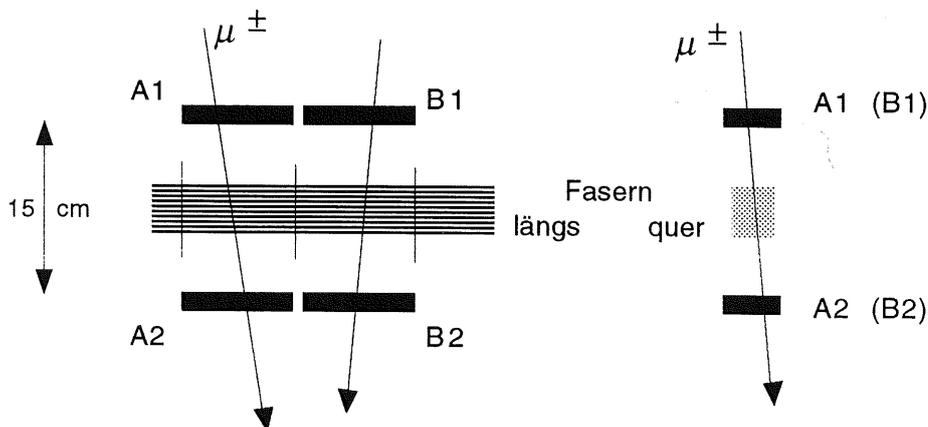


Abb. 4.7: Anordnung der Triggerpaare A+B

Es werden Koinzidenzen zwischen Signalen aus A1 und A2 oder Koinzidenzen zwischen B1 und B2 als Auslöser für die Datennahme verwendet. Mit dieser geteilten Triggeranordnung werden nur Myonen mit Einschußwinkeln von $\varphi > 57^\circ$ gezählt. Zu flache Myonen (siehe Abbildung 4.8) ergäben - wegen ihres längeren Wegabschnitts in der szintillierenden Faser - ein anderes, zu hohes Signal. Die Ereignisse wären dann nicht miteinander vergleichbar.

Def?

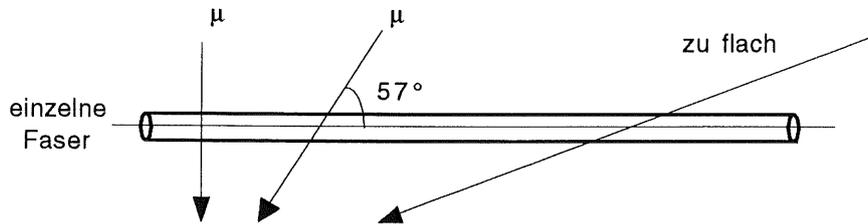


Abb. 4.8: Längsansicht einer Faser

An das offene Ende der szintillierenden Fasern können Lichtdioden angekoppelt werden, indem eine weitere Kunststoffstütze (M5) mit wiederum 256 Löchern auf der einen Seite die Faserenden und auf der anderen Seite LEDs von 1,8 mm Größe hält.

Die Leuchtdioden dienen zu Testzwecken der Apparatur sowie zur genauen Ausrichtung des verstellbaren 256-Kanal-Photomultipliers. Beim Justieren beleuchtet eine Leuchtdiode das auf der Drehachse liegende Photomultiplierpixel. Dessen Ausgangssignal wird durch Verschieben des PSPM mit den Lineartrieben maximiert. Hat man dieses erste Pixel zentriert, kann man durch einfaches Drehen des Photomultipliers alle weiteren Pixel justieren. Dazu beleuchtet man vier weit vom Zentrum liegende Photomultiplierkanäle - z.B. die Ecken des Eintrittsfensters - und verstellt den Drehtrieb solange, bis die vier korrespondierenden Signale ihr Maximum erreichen (siehe Abbildung 4.9).

? A

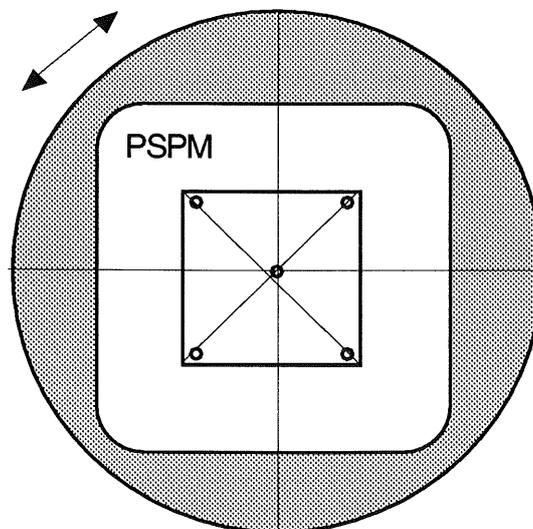


Abb. 4.9: LED-Positionen beim Justieren

An der Photomultiplierseite beginnend werden die 50 cm langen Fasern durch die einzelnen Bohrungen der Kunststoffstützen eingefädelt (von M1 zu M5). Dabei entstehen kleine Risse auf der Oberfläche des Fasermantels. Diese unter dem Mikroskop sichtbaren Verletzungen sind aber vernachlässigbar klein, zumal wegen der Ummantelung kein Szintillatormaterial eingeritzt wird. Desweiteren erkennt man aber noch große Splitter des Mantels an der Faserspitze. Deshalb werden am Lichtdiodenende ca. 3 cm der durch das Hindurchstecken verletzten Fasern abgefräst.

Festgeklebt werden die Fasern lediglich in der Photomultipliermaske M1; wegen ihrer Steifheit bleiben die Fasern zwischen den Masken M2 und M4 ausgerichtet. Durch die Verwendung der drei Stützen fällt somit die aufwendige und schwierige Klebung aller Fasern auf der gesamten Länge weg.

Aufgrund des zu erwartenden Signalübersprechens im Photomultiplier werden die 16x16 Fasern der Photomultiplier-Maske nicht 1:1 auf die Anordnung im Detektorbereich übergeführt – was eine Verschlechterung der Spur verursachen würde –, sondern die Reihenfolge der Fasern wird Spalte für Spalte und Zeile für Zeile vertauscht, wie es die Vorschrift in Tabelle 4.1 zeigt und das Beispiel in Abbildung 4.10 verdeutlicht.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	B2	D2	A2	E2	C2	F2	H2	J2	G2	I2	K2	N2	L2	O2	M2	P2
2	B4	D4	A4	E4	C4	F4	H4	J4	G4	I4	K4	N4	L4	O4	M4	P4
3	B1	D1	A1	E1	C1	F1	H1	J1	G1	I1	K1	N1	L1	O1	M1	P1
4	B5	D5	A5	E5	C5	F5	H5	J5	G5	I5	K5	N5	L5	O5	M5	P5
5	B3	D3	A3	E3	C3	F3	H3	J3	G3	I3	K3	N3	L3	O3	M3	P3
6	B6	D6	A6	E6	C6	F6	H6	J6	G6	I6	K6	N6	L6	O6	M6	P6
7	B8	D8	A8	E8	C8	F8	H8	J8	G8	I8	K8	N8	L8	O8	M8	P8
8	B10	D10	A10	E10	C10	F10	H10	J10	G10	I10	K10	N10	L10	O10	M10	P10
9	B7	D7	A7	E7	C7	F7	H7	J7	G7	I7	K7	N7	L7	O7	M7	P7
10	B9	D9	A9	E9	C9	F9	H9	J9	G9	I9	K9	N9	L9	O9	M9	P9
11	B11	D11	A11	E11	C11	F11	H11	J11	G11	I11	K11	N11	L11	O11	M11	P11
12	B14	D14	A14	E14	C14	F14	H14	J14	G14	I14	K14	N14	L14	O14	M14	P14
13	B12	D12	A12	E12	C12	F12	H12	J12	G12	I12	K12	N12	L12	O12	M12	P12
14	B15	D15	A15	E15	C15	F15	H15	J15	G15	I15	K15	N15	L15	O15	M15	P15
15	B13	D13	A13	E13	C13	F13	H13	J13	G13	I13	K13	N13	L13	O13	M13	P13
16	B16	D16	A16	E16	C16	F16	H16	J16	G16	I16	K16	N16	L16	O16	M16	P16

Tab. 4.1: Zuordnungstabelle für Fasern vom Detektor auf den Photomultiplier
Pixel A1 wird die Faser B2 zugeführt, usw.

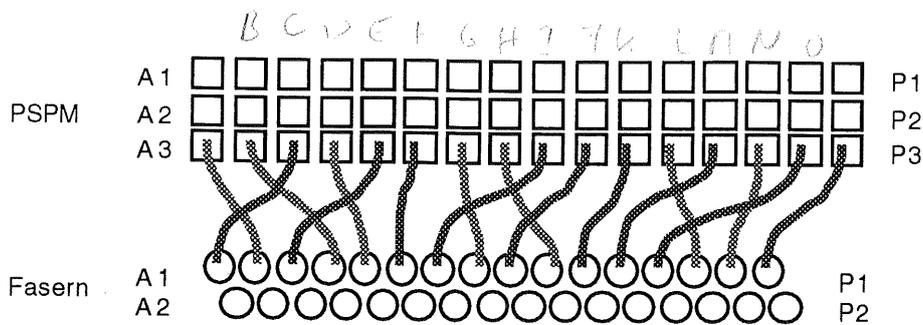


Abb. 4.10: Beispiel der Zuordnung (Faserlage 1 auf PSPM-Lage 3)

Um die Plastik-Fasern nicht zu sehr zu verbiegen, werden sie beim Umsortieren um höchstens zwei Plätze nach links oder rechts, oben oder unten versetzt (z.B. Faser A1 auf C3 diagonal).

Dieses aufwendige Vertauschen (engl. *twist*) läßt sich folgendermaßen erklären: Durch Crosstalk eines Signals im Photomultiplier sprechen auch die jeweiligen Nachbarkanäle an. Deshalb sollten zwei benachbarte, getroffene Fasern ihre Lichtsignale nicht nebeneinander im Photomultiplier abgeben. Durch das oben beschriebene Vermischen aller Plätze werden im Faserdetektor benachbarte Fasern getrennt und an weit voneinander entfernten Orten in den Photomultiplier geleitet, so daß sie sich nicht gegenseitig stören können. Da die Zuordnung aber bekannt ist, kann man die Myonspur rekonstruieren.

Der Erfolg des *Fibertwist* wird in Kapitel 5.3.2 anhand von Meßdaten erläutert.

Die lichtempfindliche Faseranordnung mit allen Stützen befindet sich in einem schwarz lackierten Aluminiumgehäuse. Nur die Leuchtdiodenplätze müssen getrennt abgeklebt werden.

4.2 Elektronik

Die Photomultipliersignale werden verstärkt, digitalisiert und einem Computer zugänglich gemacht.

Die 256 Ausgangssignale des Photomultipliers gelangen auf kürzestem Wege zu elf Vorverstärkerplatinen mit je 24 integrierenden Vorverstärkern (VV). Die Verbindung zwischen Photomultiplier und Vorverstärkern besteht aus 25 cm langen Flachbandkabeln. Durch die Verstärker (Tiefpaßzeitkonstante von $\tau=22$ ns) sind die Pulse des Photomultipliers um den Faktor 80 verstärkt. Um Resonanzen der in SMD-Technik⁴ gefertigten Vorverstärkerkarten zu vermeiden, werden diese mit einer eigenen Spannungsquelle und einem eigenen Massekabel versorgt.

Zum Schutz der störanfälligen Analogsignale werden am Ausgang der Vorverstärker Flachbandkabel verwendet, wobei zwischen den signaltragenden Leitungen jeweils eine Masseleitung liegt. Dieses auch bei *twisted-pair*-Kabeln

⁴ SMD - surface mount device:

Oberflächenlöttechnik für kleinste elektronische Bauteile

benutzte Verfahren schirmt die Signale ab. Die elf 50-adrigen Flachbandkabel sind zwölf Meter lang, um die Signale um 70 ns zu verzögern. Diese Zeit ist nötig, um Myonen mittels Koinzidenzschaltung der externen Triggerpaddel (A1-B2) zu triggern.

Zum Digitalisieren der Photomultipliersignale wird der ADC 2249A der Firma LeCroy verwendet. ADC steht für *Analog to Digital Converter* (Analog-Digital-Wandler). Je zwölf Wandler sind zu einem Camac⁵-Einschub zusammengefaßt, so daß 22 Einschübe benötigt werden, um alle 256 Pulse gleichzeitig zu digitalisieren.

Die LEMO⁶-Eingänge der ADCs sind mit 50 Ω abgeschlossen, Flachbandkabel dagegen haben eine Impedanz von 120 Ω . Damit keine Reflexionen auftreten können, wird die Impedanz jedes einzelnen Kanals mit einer passiven Widerstandsbrücke angepaßt.

Die ADC 2249A sammeln über eine frei wählbare Zeit (hier 160 ns) alle hineinfließenden Ladungen auf und wandeln die Summe in eine 10-bit-Zahl um.

Die Umwandlung wird durch ein externes Signal (Myon-Trigger) gestartet.

Das Ergebnis liegt 60 μ s später am Ausgang an und, solange es nicht gelesen und wieder gelöscht wird, bleibt der Eingang für neue Signale des Photomultipliers gesperrt. Ein Computer (Apple Macintosh IICI) kann über zwei Interfacekarten⁷ die ADCs auslesen und zur erneuten Datennahme freigeben.

4.3 Computerprogramm

Die Photomultiplierdaten sollen von einem Rechner aufgenommen, dargestellt und gespeichert werden. Ein objektorientiertes Computerprogramm, das auf die Bedürfnisse dieser Diplomarbeit Rücksicht nimmt, wurde in der Programmiersprache C++ entwickelt.

Das Programm liest die Zahlenwerte der einzelnen ADCs aus und stellt sie in Fenstern auf dem Bildschirm dar (siehe Beispiel in Abbildung 4.11). Dabei kann man zwischen verschiedenen Anordnungen der 256 Zahlen wählen:

Die Zahlen können als Matrix mit 16 Zeilen und 16 Spalten angeordnet werden, wie es der Anordnung im Photomultiplier entspricht, oder aber auch umsortiert, wie bei der Anordnung der Fasern im Detektor.

Man kann sich auch die Meßwerte als 11x24-Matrix anzeigen lassen, dabei entspricht einer Spalte eine Vorverstärkerplatine mit 24 Kanälen. Um den Weg der Signale vollständig zurückverfolgen zu können, ist auch die Darstellung der ADC-Anordnung nötig, d.h. 22 Camac-Einschübe mit je 12 Kanälen als 22x12 Matrix.

Mit diesen Bildschirmfenstern läßt sich z.B. ein defekter Kanal im Versuchsaufbau schnell finden.

⁵ Computer Aided Measurement And Control: Bussystem

⁶ LEMO - Kabel- und Steckernorm mit 50 Ω -Impedanz

⁷ MICRON-Karte im Rechner und Mac-CC-Karte am Camac-Bus

Maske Matrix																
Mode: Camac			26.01.1995				9:45:55 Uhr									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	3	91	0	5	3	9	0	6	3	11	0	2	0	13	0	3
2	61	519	3	10	0	7	1	6	1	9	1	11	2	20	8	11
3	253	174	40	8	1	4	2	3	2	5	0	4	1	11	-3	11
4	17	167	3	3	2	3	1	2	1	2	0	3	2	4	10	18
5	86	306	194	9	65	5	3	2	3	3	3	1	5	2	7	5
6	185	366	26	27	11	7	10	5	10	3	8	2	9	1	4	7
7	197	577	69	139	61	11	13	7	12	15	11	7	16	6	11	11
8	235	241	71	5	24	2	2	10	1	10	1	12	3	25	12	8
9	48	196	23	52	1	3	0	4	0	4	0	6	2	8	7	0
10	69	159	62	5	1	4	1	7	2	9	2	10	4	40	20	57
11	30	171	142	6	4	5	3	5	4	10	4	8	7	46	29	70
12	51	558	100	18	6	11	5	6	2	6	2	15	10	20	21	34
13	28	655	180	14	7	7	4	5	5	6	3	4	3	3	5	4
14	23	205	17	28	9	80	8	7	3	5	4	4	4	3	5	6
15	48	54	29	6	3	5	2	1	3	1	2	1	3	0	7	5
16	61	434	41	5	2	3	3	3	4	0	6	2	6	-1	20	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Abb. 4.11: Teil der Benutzeroberfläche
(Anordnung der 256 Kanäle wie im PSPM)

Optisch ansprechender als in Zahlen zwischen 0 und 1024 ist die Darstellung eines Ereignisses als Graustufen (Abbildung 4.12). Für noch größere Übersichtlichkeit lassen sich mit einer Schwelle (*threshold*) kleine Signale ausblenden.

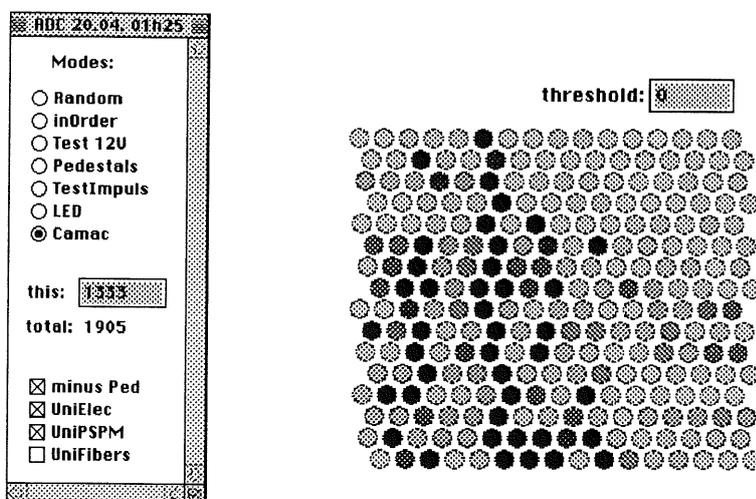


Abb. 4.12: Teile der Benutzeroberfläche
(Kontrollfenster und Darstellung des Faserdetektorquerschnitts)

Die Daten der ADCs können fortlaufend aufgenommen werden. Dies ermöglicht auch über längere Zeiträume eine selbständige Datennahme. Dabei speichert der Computer immer 3000 Datensätze gemeinsam in ein binäres Datenfile.

Gespeicherte Daten können mit dem gleichen Programm wieder gelesen und analysiert werden. Zur Aufbereitung und Analyse der Daten stehen mehrere Optionen zur Verfügung:

- Der konstante ADC-Sockelbetrag (engl. *Pedestal*) jedes Kanals läßt sich messen und abziehen (Schalter "minusPed" im Kontrollfenster Abb. 4.12).
- Die Unterschiede in der Verstärkung der Vorverstärker werden während der

Anzeige der Daten mit einer Korrekturtabelle ("UniElec") ausgeglichen. Auch die gemessene Empfindlichkeitsverteilung der einzelnen Photomultiplierkanäle kann mit Faktoren berücksichtigt werden, die sich in der Tabelle "UniPSPM" befinden.

- Von einzelnen oder allen Kanälen lassen sich Histogramme bilden und anzeigen; dabei werden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Ein Beispiel eines solchen Histogramms zeigt Abbildung 4.13.
- Es besteht die Möglichkeit, bis zu 3000 Ereignisse kanalweise zu mitteln.
- Jedes Ereignis kann mit Hilfe der Befehle 'Kopieren' und 'Einfügen' in ein anderes Programm transferiert werden, z.B. in ein Textverarbeitungs- oder Tabellenkalkulationsprogramm.

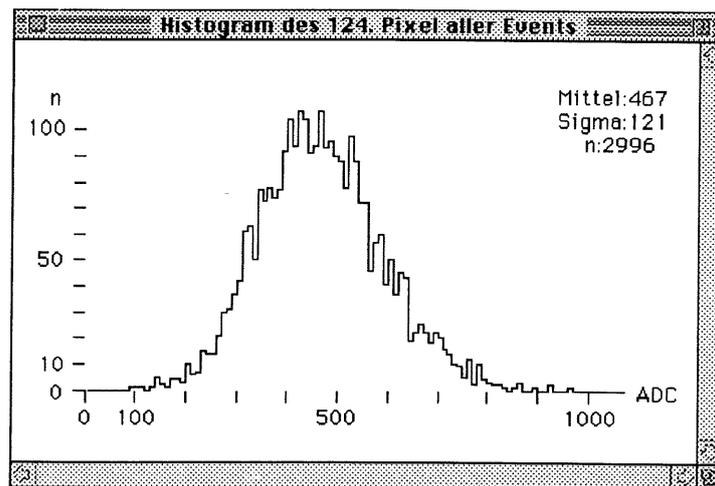


Abb. 4.13: Histogramm einer Lichtdiodenmessung

5 Messungen und Ergebnisse

Bevor mit dem Detektor Teilchenspuren kosmischer Myonen gemessen werden können, muß die Apparatur geeicht und justiert werden.

5.1 Eichung der Elektronik

Mit einer Verteilerkappe werden an die 256 Eingänge der Vorverstärker Testimpulse von 100 ns und 50 mV gelegt.

Die Linearität der ADCs und der Vorverstärker wird überprüft; die einzelnen Komponenten sind in den Diplomarbeiten [Witt94] und [Reich94] genauestens untersucht worden.

Die Pedestalmessung ohne Testsignal wird im Computer als Korrekturtabelle ("minusPed") für alle künftigen Messungen abgespeichert.

Das Pedestal beträgt zwischen 10 und 22 ADC-Einheiten pro Kanal und schwankt zeitlich höchstens um ± 1 Einheit⁸. (Zur Erinnerung: Meßbereich bis 1024 ADC-Einheiten.)

Mit dem Testsignal wird die unterschiedliche Verstärkung der Vorverstärker ausgemessen. Es stellt sich heraus, daß die nominelle Verstärkung von 80 in einem Bereich von 66 bis 89 von Kanal zu Kanal variiert (1:1,36); die Unterschiede aber zeitlich konstant bleiben.

Nach Korrektur auf diese Empfindlichkeit ("UniElec") schwankt das Signal nur um ± 1 ADC-Einheit.

Diese Eichungen sind regelmäßig wiederholt worden, ohne daß wesentliche Abweichungen festzustellen waren.

5.2 Messungen am Photomultiplier

5.2.1 Empfindlichkeit der Photomultiplierkanäle

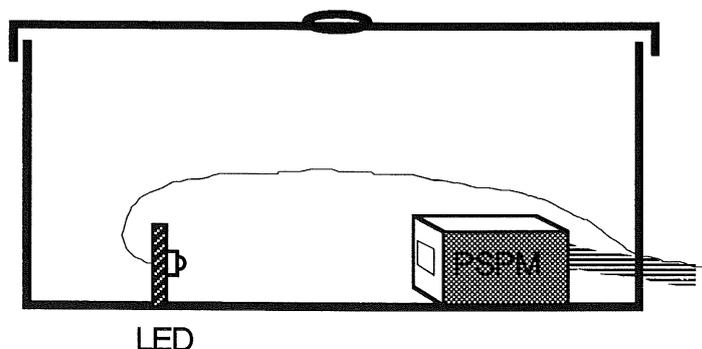


Abb. 5.1: Aufbau für die Empfindlichkeitsmessung

⁸ genaue Untersuchung unter [Chen95]

Der Aufbau aus Elektronik und Photomultiplier, aber ohne Fasern, wird integral beleuchtet, indem 30 cm vor der 4x4 cm² großen Photokathode eine Leuchtdiode plaziert wird (siehe Abb. 5.1). Mit einem Öffnungswinkel von 4° wird so jedem Photomultiplierkanal gleichzeitig die gleiche Lichtmenge zugefügt.

Die Spannung der Lichtdiode wird so eingestellt, daß im Mittel ca. 200 ADC-Einheiten pro Kanal gezählt werden, was ungefähr vier Photoelektronen entspricht (siehe Kapitel 5.2.4).

Es entstehen Werte zwischen 46 und 308 ADC-Einheiten, deren Verteilung in Abbildung 5.2 dargestellt ist.

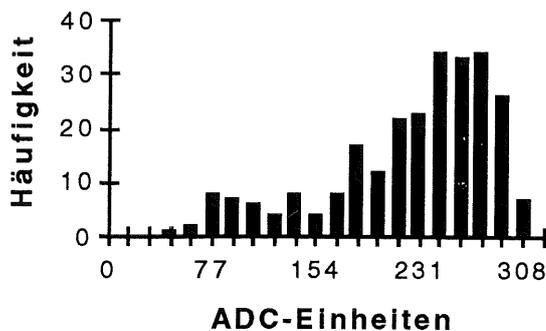


Abb. 5.2: Histogramm der Pixelempfindlichkeiten

Zwischen dem besten und dem schlechtesten Photomultiplierkanal besteht demnach ein Unterschied von Faktor 6,7. Hamamatsu gibt für dasselbe Gerät einen Faktor 4,0 an [Hama94].

Die Empfindlichkeit jedes einzelnen Kanals ist in Abbildung 5.3 veranschaulicht und im Anhang tabellarisch aufgeführt. Die 256 Kanäle sind dabei in 16 Reihen (1-16) und 16 Spalten (A-P) aufgeteilt.

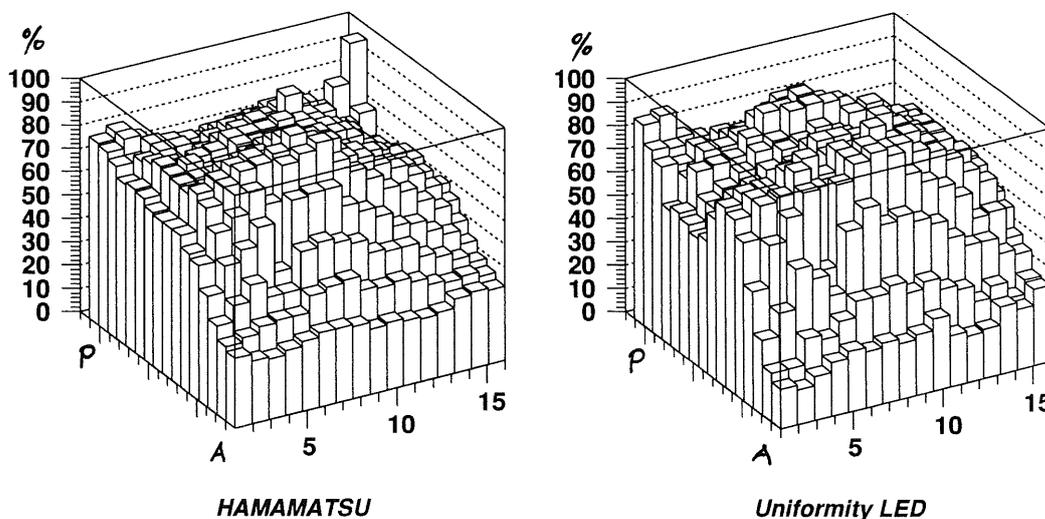


Abb. 5.3: relative Pixelempfindlichkeiten
links: die Herstellerangaben, rechts: die Messung mit der Leuchtdiode

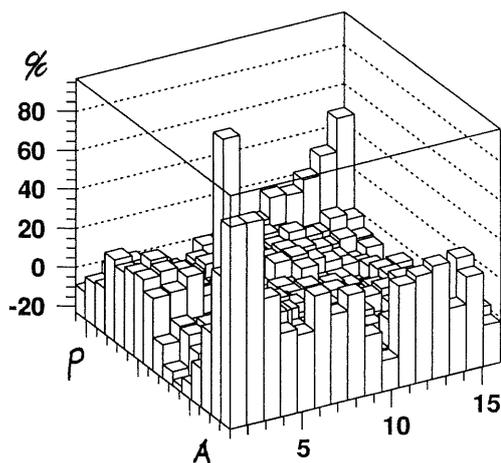


Abb. 5.4: relative Unterschiede der Pixelempfindlichkeiten
(Hamamatsu/Messung - 100%)

Die relativen Unterschiede in Prozent zwischen der Messung und dem Datenblatt sind kanalweise in Abbildung 5.4 angezeigt.

Die Empfindlichkeitsmessung, eine Mittelung aus 1000 LED-Blitzen, wird als Korrekturtabelle für alle künftigen Photomultiplier-Messungen im Rechner abgespeichert (- abrufbar mit "UniPSPM").

Eine Überprüfung dieser Empfindlichkeitsmessung wird mit einer anderen Lichtquelle gewonnen: Die Szintillationsblitze der von Myonen getroffenen Fasern leuchten den Detektor gleichmäßig aus, wenn man nur genügend viele Ereignisse nimmt.

Es wird davon ausgegangen, daß die Summe 40.000 gemessener und, wie in Kapitel 5.3.3 erläutert, rekonstruierter Spuren ausreicht, um jede Faser und damit jeden Photomultiplierkanal gleich häufig anzusprechen.

Abbildung 5.5 zeigt die Summe der Einträge in jedem Kanal.

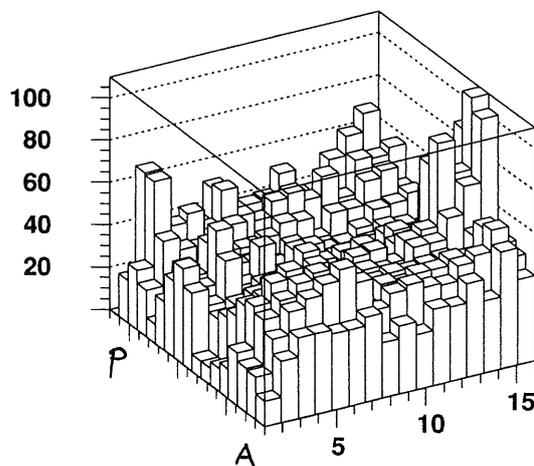


Abb. 5.5: Empfindlichkeitskorrekturen für Fasern aufgrund von Spurdaten

Da in diesem Bild die Korrekturtabelle "UniPSPM" angewendet wurde, erwartet man eine Gleichverteilung.

Man erkennt aber, daß die Empfindlichkeiten sich bis zu einem Faktor 10 unterscheiden, was auf Unterschiede in den Fasern oder in der Ankopplung einzelner Fasern an den Photomultiplier zurückzuführen ist.

Diese Verteilung wird deshalb als zusätzliche Korrekturtabelle für die Spuranalyse verwendet.

5.2.2 Empfindlichkeit einzelner Kathodenpixel

Um die Empfindlichkeit einzelner Pixelflächen auszumessen, werden sie mit einer beleuchteten Faser abgetastet.

Dazu wird eine Leuchtdiode an das Ende einer Faser montiert. Der gesamte Faserdetektor und der Photomultiplier werden mit der Mikrometerjustiervorrichtung waagrecht gegeneinander verschoben. In Millimeterschritten werden so je drei Pixel in Reihe 7 und 10 nacheinander beleuchtet (siehe Abbildung 5.6).

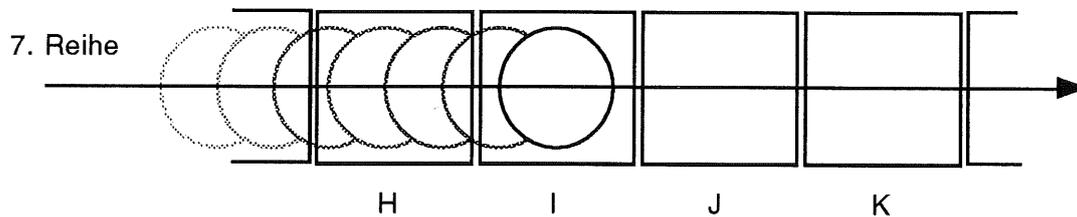


Abb. 5.6: Weg der Faserstirnläche entlang der Pixel
(Faserdurchmesser 2,0 mm; Pixelbreite 2,34 mm)

Ihre jeweiligen Signalthöhen (in relativen Einheiten) sind in Abb. 5.7 dargestellt.

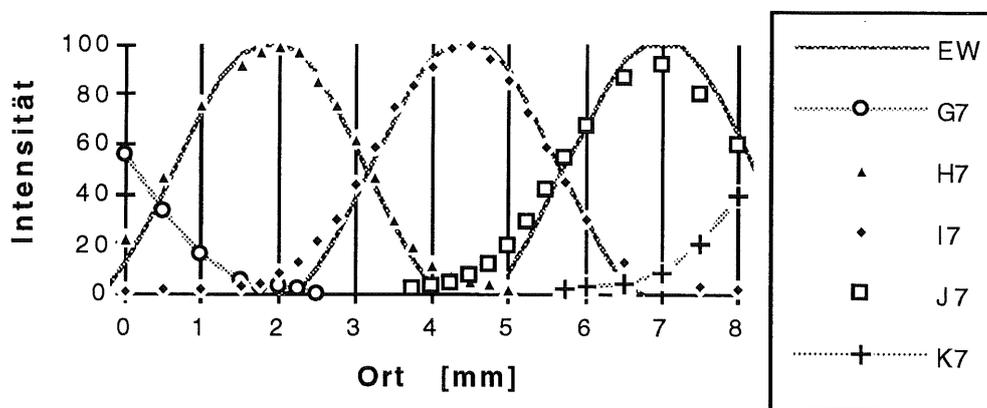


Abb. 5.7: Ausgangssignale beim Durchfahren des Photomultipliers
Erwartete Meßwerte (EW) gestrichelt

Diese Abbildung zeigt deutlich die Intensitäten der drei benachbarten Pixel H7, I7, J7 in Abhängigkeit des Faserorts. Am linken und rechten Rand des Bildes

erkennt man die Fortsetzung zu den Pixeln G7 bzw. K7. Das Überlappen zweier Intensitätsverteilungen entsteht beim Übergang der Faserstirnfläche von einem Pixel auf das nächste. Da die Faser dann zwei Pixel je zur Hälfte beleuchtet, erscheint in beiden Kanälen ein Signal.

Die Erwartungswerte der Meßreihe sind in die Abbildung als gestrichelte Linie eingezeichnet. Die Rechnung berücksichtigt die Photomultipliergeometrie, sowie den Bruchteil der Faserstirnfläche, die aus dem Pixel herausragt.

Auf einer Strecke von 0,34 mm bleibt die Faser vollständig vor einem Pixel. Die gemessene Intensität müßte hier konstant 100% sein, erreicht aber nur einmal das Maximum. Der statistische Fehler beträgt 5%, die Abweichungen zwischen Meßwerten und erwarteten Werten sind von gleicher Größe. Im Rahmen der Meßgenauigkeit liegt somit die Fluktuation der Homogenität der untersuchten Pixel bei unter 5%.

Lediglich am Rand der Pixel stellt man eine überhöhte Empfindlichkeit der Pixel fest: die Ausläufer der gemessenen Verteilungen liegen oberhalb der Erwartungen. Die Ursache liegt möglicherweise im *Crosstalk*, dem Übersprechen des viel stärker beleuchteten Nachbarpixels. Dieses im folgenden Kapitel untersuchte Phänomen ist beim Justieren der Fasern ein Vorteil:

Die Lochmaske vor dem Photomultiplier ist dann genau ausgerichtet, wenn ein *beleuchtetes* Pixel maximiert wird und die vier *Nachbarpixel* kleine, gleichhohe Signale ergeben. Man erkennt in Abbildung 5.7 deutlich, daß in der Mitte jedes Kanals das Übersprechen in die Nachbarn minimal und die Intensität des beleuchteten Pixels maximal wird.

5.2.3 Crosstalk

Um das Übersprechen von Photoelektronen im Photomultiplier von Kanal zu Kanal zu messen, wird eine Leuchtdiode direkt vor ein Photomultiplierpixel gehalten. Eine Maske mit 256 Bohrungen von 1,8 mm ermöglicht die Beleuchtung eines beliebigen Pixels und die Abdeckung aller übrigen Kanäle (siehe Abbildung 5.8).

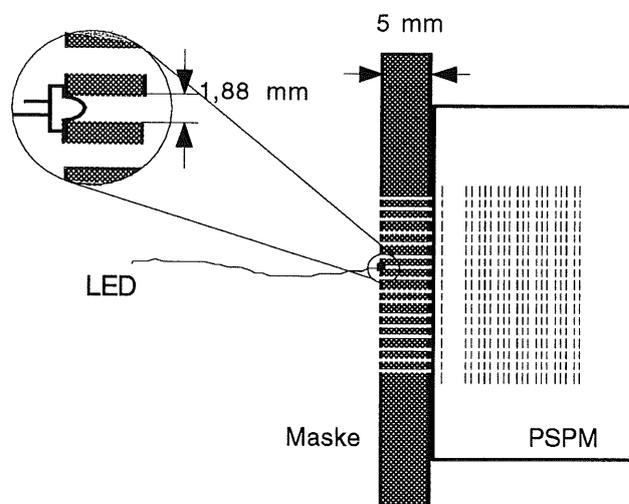


Abb. 5.8: Versuchsaufbau für Crosstalkmessungen

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																

Abb. 5.9: Auf Crosstalk untersuchte Pixel des PSPM

Es wurden 20 verschiedene Pixel (in Abbildung 5.9 markiert) nacheinander beleuchtet und jeweils aus 500 Messungen Mittelwerte genommen. Ein Beispiel der Verteilung der Meßwerte ist Abbildung 4.13 des vorigen Kapitels zu entnehmen.

Ein Ergebnis der Mittelwerte zeigt Tabelle 5.1:

	1	2	5	2												
	2	13	60	11	2		0,1%	0,3%	0,6%	0,3%						
	5	55	494	46	4		0,3%	1,7%	7,6%	1,4%	0,3%					
	2	14	46	13	2		0,6%	7,0%	62,8%	5,9%	0,5%					
		2	3	2			0,3%	1,8%	5,9%	1,7%	0,3%					
								0,3%	0,4%	0,3%						

Tab. 5.1 Crosstalk-Beispiel
gemessene ADC-Einheiten⁹ (links), normiert auf Summe (rechts),
Mittel von 500 Messungen an Pixel L8

Man erkennt, daß die direkten, senkrechten Nachbarn stärker vom Übersprechen beeinflußt werden, als die diagonalen oder noch weiter entfernten Pixel. Unterschiede in den vier direkten Nachbarn können durch fehlerhafte Justierung der Maske vor dem Photomultiplier mitverursacht werden.

Normiert auf die Summe aller vom Photomultiplier gesehenen Signale, stellt sich im obigen Beispiel heraus, daß nur 62,8% der deponierten Lichtmenge im beleuchteten Kanal selbst registriert werden. Dieser Prozentsatz ist unabhängig von den absoluten ADC-Einheiten, das Übersprechen also nicht von der Intensität der Lichtdiode abhängig.

Im Mittel aller 20 Kanäle findet man 67,7% im zugeordneten Pixel. Die Verteilung zeigt Abbildung 5.10:

⁹ Diese Werte sind bereits auf Pixelempfindlichkeit korrigiert.

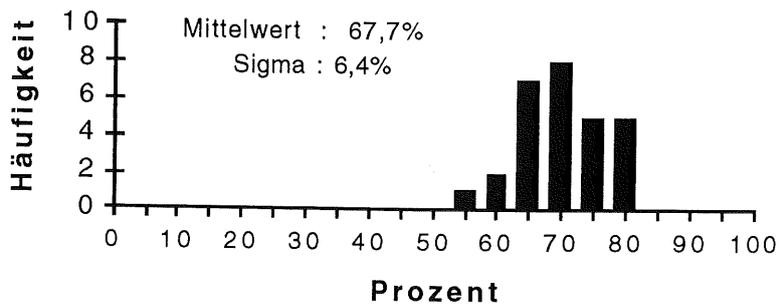


Abb. 5.10: Anteil des beleuchteten Pixels an der gesamten deponierten Lichtmenge

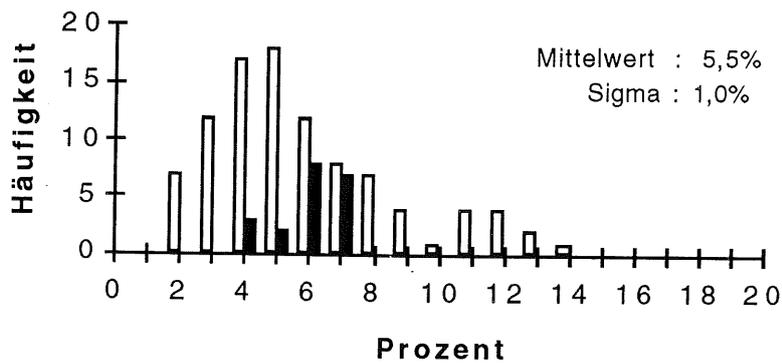


Abb. 5.11: Anteil der vier direkten Nachbarn (schwarz: Mittelwerte der vier Nachbarn, weiß: Verteilung im einzelnen)

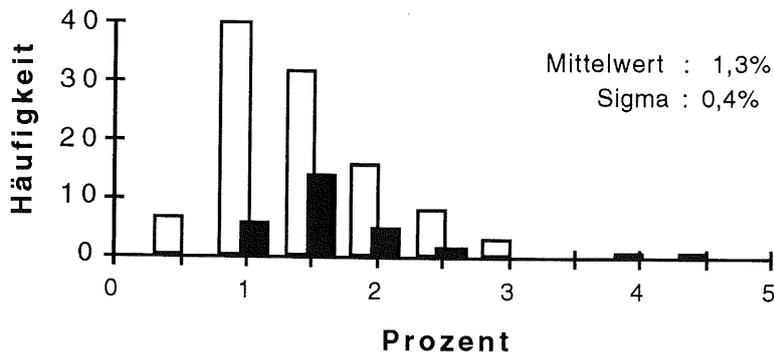


Abb. 5.12: Anteil der vier diagonalen Nachbarn (schwarz/weiß: wie oben)

Der Crosstalk der orthogonalen Nachbarn beträgt im Mittel aller beleuchteten Pixel 5,5% (Abbildung 5.11), der Crosstalk in den diagonalen beträgt 1,3% (Abbildung 5.12). In weiter entfernten Kanälen liegt das Übersprechen unter 0,5% (0 bis 5 ADC-Einheiten).

Die Messungen wurden auch mit Fasern zwischen Lichtdiode und Photomultiplier wiederholt – ohne signifikante Abweichung von der ersten Messung.

5.2.4 Bestimmung der Photoelektronenzahl

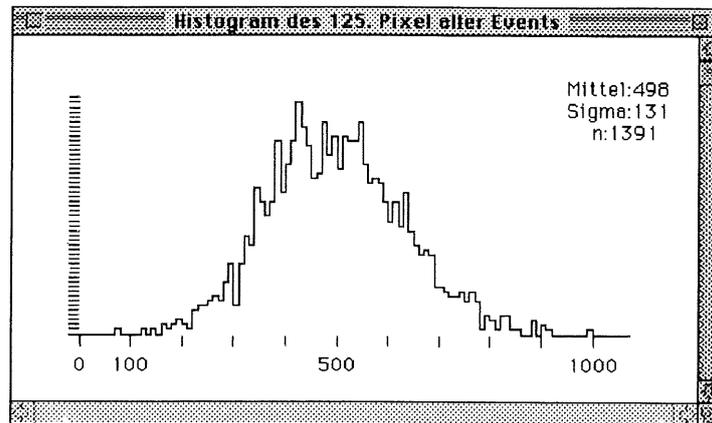


Abb. 5.13 Typische LED-Verteilung (1391 Werte)

Bei dem Versuchsaufbau mit einer gepulsten Leuchtdiode vor einem Photomultiplizierkanal (Abbildung 5.8) wird davon ausgegangen, daß die Fluktuation der jeweiligen Lichtmenge klein ist im Vergleich zu derjenigen durch Photoelektronenstatistik an der Photokathode.

Aus der Verteilung identischer LED-Blitze auf einem Pixel (in ADC-Einheiten) ist es möglich, auf die Anzahl der an der Photokathode ausgelösten Photoelektronen k zu schließen.

Unter der Annahme¹⁰, daß der Mittelwert m der Verteilung proportional zu k ist und die Breite σ der Verteilung proportional zu \sqrt{k} , berechnet man die Photoelektronenzahl zu:

$$k = (m/\sigma)^2$$

Für das Beispiel in Abbildung 5.13 erhält man dann im Mittel 14,5 Photoelektronen.

An Pixel L8 wurde exemplarisch die Eichung der ADC-Einheiten auf Photoelektronen durchgeführt, indem acht Meßreihen mit verschiedenen Lichtdiodenspannungen ausgewertet wurden: Aus den Mittelwerten und Standardabweichungen der Verteilungen wurden die Photoelektronenzahlen bestimmt und in Abbildung 5.14 gegen die Mittelwerte aufgetragen.

Im Rahmen der Meßgenauigkeit führt die Ausgleichsgerade durch den Ursprung (9 ± 18 ADC-Einheiten). Damit ist es möglich, einen Umrechnungsfaktor für ADC-Einheiten in Photoelektronen von $51,0 \pm 1,5$ ADC-Einheiten/Photoelektron (ADC/pe) zu ermitteln.

¹⁰ Diese Annahmen wurden in [Witt94] mit ausreichender Meßgenauigkeit überprüft.

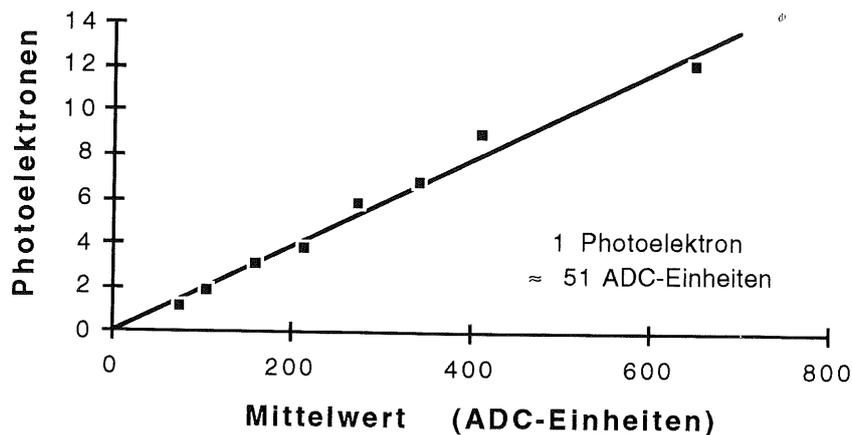


Abb. 5.14: Eichung der ADC-Skala in Photoelektronen

Diese Eichung wurde anhand mehrerer weiterer Photomultiplierekanäle überprüft. In Abbildung 5.15 sind diese Ergebnisse gemeinsam mit der Eichgeraden dargestellt. Man erkennt, daß unterschiedliche Pixel im Photomultiplier unterschiedliche Umrechnungsfaktoren besitzen, da die Meßwerte weit um die Gerade streuen. Im Mittel aller überprüften Photomultiplierekanäle ergäbe sich ein Skalierungsfaktor von 48 ADC/pe. Mit einer Standardabweichung von 13 ADC/pe kann man jedoch die Eichung von oben bestätigen.

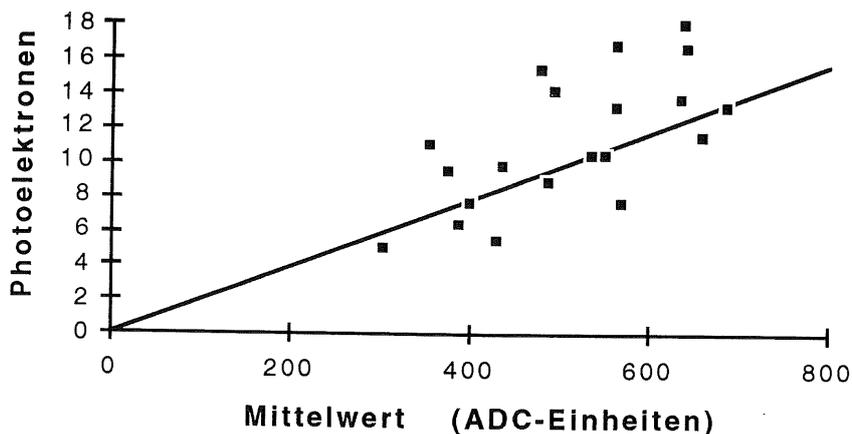


Abb. 5.15: Vergleich der Eichung mit anderen Pixeln

Aus der integralen Beleuchtung des Photomultipliers mit der Lichtdiode (s. Kap. 5.2.1) ließe sich die Eichung für jeden der 256 Kanäle angeben. Hierbei ist jedoch Vorsicht geboten, da die einzelnen Kanäle sich aufgrund des Crosstalks gegenseitig beeinflussen und so eine unabhängige Eichung nicht gewährleistet werden kann.

Abbildung 5.16 zeigt die 256 Kanäle in der Auftragung berechneter Photoelektronenzahl gegen gemittelte Meßwerte (Darstellung ohne Korrektur auf Photomultiplierempfindlichkeit, da diese Messung die Grundlage für die Korrektur bildet).

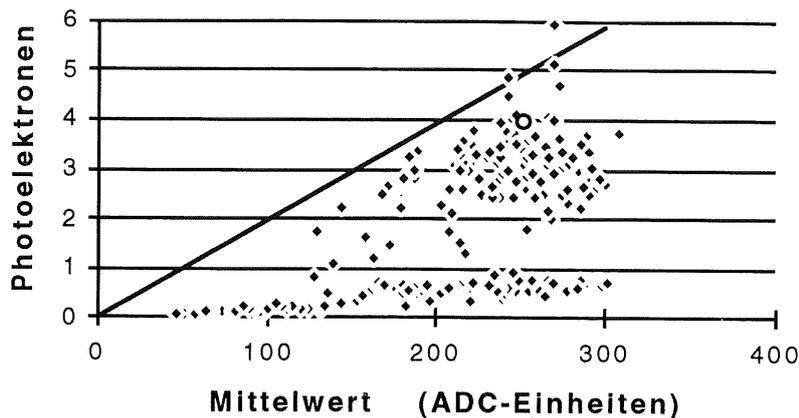


Abb. 5.16: Photoelektronen und Meßwerte aus integraler Beleuchtung

Man erkennt, daß fast alle Meßpunkte unterhalb der Eichgeraden mit der Steigung von 51 ADC/pe liegen. Dieser Effekt ist auf Kanalübersprechen zurückzuführen:

Zusätzlich zur Photoelektronenstatistik eines Pixels verursacht Crosstalk eine Verbreiterung der Breite σ der Verteilung und somit eine Verringerung der berechneten Photoelektronenzahl k . Besonders deutlich wird dies am Eich-Pixel L8 (Kreis in Abbildung 5.16), das nur 4 statt der erwarteten 5 Photoelektronen aufweist.

Deshalb ist mit integraler Beleuchtung keine Eichung der ADC-Kanäle in Photoelektronen möglich. Die Messung von 51 ADC/pe an einem Einzel-Pixel (L8) wird weiter unten als Abschätzung angewendet werden.

In Abbildung 5.16 ist außer des offensichtlichen Crosstalk-Effekts noch eine weitere Tatsache bemerkenswert:

Man erkennt zwei ausgeprägte Bereiche, einmal eine Streuung bei $3,0 \pm 0,7$ Photoelektronen, die andere bei $0,5 \pm 0,3$ Photoelektronen (Schnitt bei 1,5 Photoelektronen). Die Projektion auf die Photoelektronenachse ist als Häufigkeitsverteilung in der folgenden Abbildung 5.17 zu sehen. Beide Bereiche sind klar zu unterscheiden.

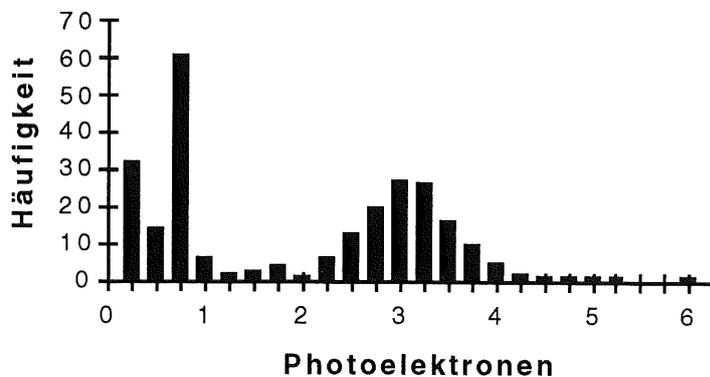


Abb. 5.17: Verteilung der Anzahl der Photoelektronen bei integraler Beleuchtung

Mögliche Ursachen für das zweigeteilte Verhalten liegen einerseits im Photomultiplier selbst - eine ungleichmäßige Beschichtung der Photokathode könnte unterschiedliche Anzahl von Photoelektronen erlauben -, andererseits aber auch am verwendeten Versuchsaufbau selbst.

Zum Beispiel könnte die Ausleuchtung des Eintrittsfensters optimiert werden, weiterhin gibt es bei den Flachbandkabeln, die die schwachen Signale zu den Vorverstärkern leiten, Kanäle, die besser abgeschirmt sind als andere. Die Entstehung der beiden Bereiche von hoher bzw. niedriger Photoelektronenzahl sollte zurückverfolgt werden.

Eine Untersuchung der genauen Ursachen konnte im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht mehr vorgenommen werden.

5.3 Messungen mit Myonen

In den folgenden Abschnitten werden Meßergebnisse diskutiert, die mit dem Gesamtaufbau (siehe Kap. 4.1) genommen wurden.

5.3.1 Triggereinstellungen für Myonmessungen

Bei der Datennahme von Myonspuren, die der Zweifach-Koinzidenz in den Triggerpaaren A und B genügen, wird ein erheblicher Anteil an "leeren" Ereignissen festgestellt: In 40% aller Daten kann man nur wenige Treffer am Rand oder gar keine Treffer finden. Dies ist theoretisch auch möglich, denn die Triggerzähler oberhalb und unterhalb des Detektors sind von der Fläche her größer als die Detektorfläche, so daß die Myonen häufig neben den Fasern vorbeifliegen können.

Abbildung 5.18 zeigt die Verteilung der Summe aller 256 Pulshöhen (in ADC-Einheiten) von 16400 Ereignissen.

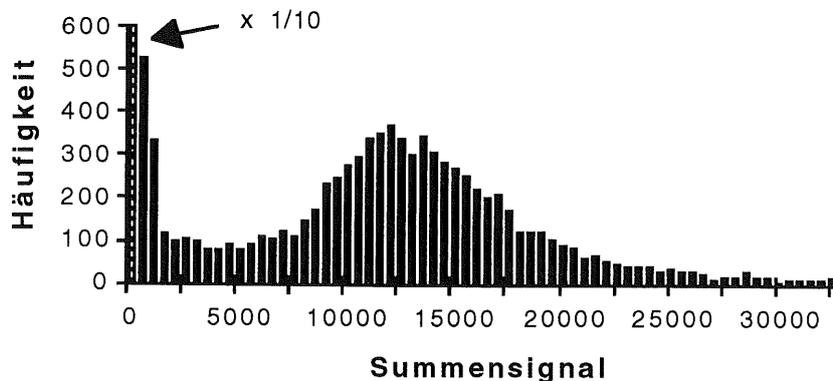


Abb. 5.18: Verteilung des Summe aller 256 Kanäle bei zweifach Koinzidenz (erste Säule im Maßstab 1:10 dargestellt)

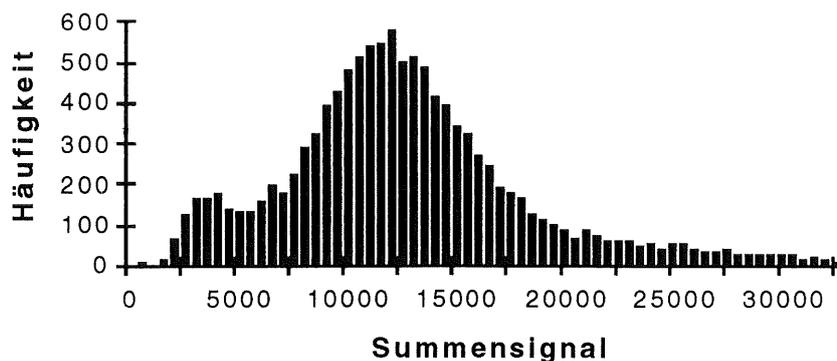


Abb. 5.19a: Verteilung der Summe aller 256 Kanäle bei zusätzlichem Trigger auf das Summensignal (Schwelle: 14 mV)

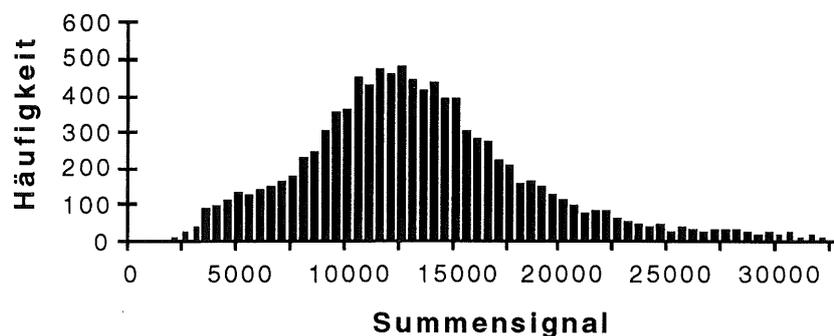


Abb. 5.19b: Verteilung der Summe aller 256 Kanäle bei zusätzlichem Trigger auf das Summensignal (Schwelle: 20 mV)

Zur Vermeidung leerer Ereignisse wurde das Summensignal des 256-Kanal-Photomultipliers mit einer Schwelle von 14 mV als dritte Bedingung dem Trigger hinzugefügt. Die Verteilungen in den Abbildungen 5.19a und 5.19b zeigen deutlich, daß mit dieser Schwelle nicht in den physikalisch sinnvollen Bereich hineingeschnitten wurde.

Die Zählrate der Zweifach-Koinzidenz ($A1+A2$ oder $B1+B2$) beträgt 0,52 Hz. Umgerechnet auf den m^2 entspricht das 52,1 Myonen/ m^2 /sec (statistischer Fehler 0,5%).

Die Zählrate der Dreifach-Koinzidenz ($A1+A2+Sum$ oder $B1+B2+Sum$) beträgt nur 0,43 Hz. Das entspricht wegen der kleineren gemeinsamen Fläche trotzdem 53,2 Myonen/ m^2 /sec.

Demnach gehen durch diese zusätzliche Bedingung im Trigger keine relevanten Ereignisse verloren. Im Gegenteil: es werden lediglich weniger Daten auf Festplatte geschrieben.

N.B.: Das Macintosh Computerprogramm hat eine maximal mögliche Aufnahme-rate von 5,25 Hz (*data acquisition rate*).

5.3.2 Beispiele von Ereignissen

Im folgenden sind einige Beispiele der 40.000 aufgezeichneten Ereignisse in der Detektoranordnung dargestellt. Hier erscheinen Pulshöhen mit unter 30 ADC-Einheiten weiß, zwischen 30 und 200 ADC-Einheiten in unterschiedlichen Graustufen und Werte größer als 200 ADC-Einheiten (ca. vier Photoelektronen) schwarz.

Typische Spuren

In Abbildung 5.20 ist links eine senkrechte Spur zu erkennen, rechts eine schräge Spur von 18° , dem durch die Triggeranordnung festgelegten, größtmöglichen Winkel.

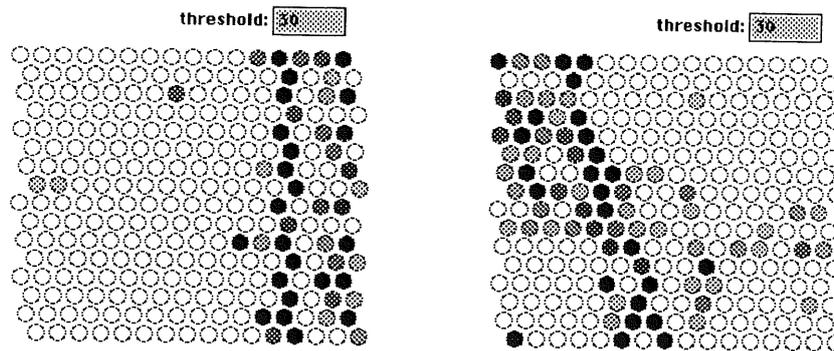


Abb. 5.20: Beispiele gemessener Spuren

Crosstalleffekte

Eine weitere senkrechte Myonspur ist in Abbildung 5.21 rechts zu erkennen. Dabei erscheinen neben der Spur S noch zwei weitere Spuren S_1 und S_2 , die im Abstand von ein bis zwei Fasern parallel zu S verlaufen. Betrachtet man denselben Datensatz in der Photomultiplieranordnung (in der Abbildung links), so bilden dieselben Kanäle der drei Spuren zusammen ein breites Band, da zwischen dem Detektor und dem Photomultiplier die Fasern spaltenweise (und zeilenweise) umsortiert werden. Offensichtlich hat das Signal der Spur S im Photomultiplier die Spuren S_1 und S_2 induziert. Festzuhalten ist, daß sich lediglich in der Original-Spur S Szintillationslicht befand.

Durch das in Kapitel 4.1 beschriebene Vertauschen der Fasern ist trotz des Crosstalks im Photomultiplier die eigentliche Myonspur im rechten Bild deutlich zu erkennen.

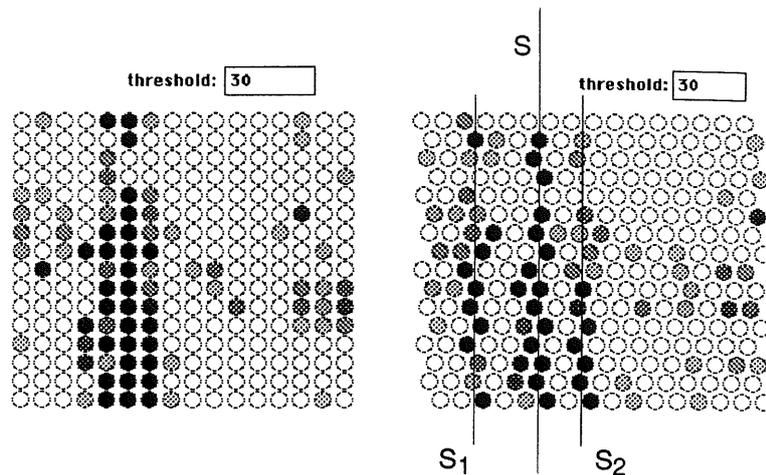


Abb. 5.21: Verdeutlichung des Fasertwist
(rechts Anordnung innerhalb des PSPM, links Anordnung als Faserdetektor)

Somit wird verhindert, daß die Nachbarn tatsächlich getroffener Fasern fälschlich Crosstalk enthalten; ein auftretendes Signal in Nachbarfasern könnte auf optisches Übersprechen von Faser zu Faser hindeuten, oder auf δ -Elektronen, die, vom Myon gestoßen, soviel Energie erhalten haben, daß sie die nächste Faser erreichen.

Mit einer Wahrscheinlichkeit von unter 1% ist es auch möglich, daß Crosstalkkanäle wiederum Crosstalk erzeugen. Die davon betroffene Faser im Detektor ist dann der ursprünglichen Spur direkt benachbart.

Der elektronische Crosstalk im Photomultiplier ist nach Auswertung aller Spurdaten um das sechsfache höher als alle Effekte im Faserdetektor.

Das zeigt ein Vergleich der Spuren S_1 oder S_2 mit den Spuren, die zwischen S und S_1 bzw. S und S_2 liegen.

Erst durch das Vertauschen der Fasern wie in dieser Anordnung ist es möglich, die verschiedenen Effekte zu trennen und zu vergleichen.

Luftschauerereignis

Der Schauererkenntnis in Abbildung 5.22 läßt keine einzelne Myonspur erkennen. Hier kann es zu einer Aufschauierung in der Luft oder am Aluminiumgehäuse des Detektors gekommen sein.

Leicht zu erkennen ist noch die Crosstalkspur ungefähr in der Mitte.

Bemerkenswert ist auch die Tatsache, daß viele Signale in der rechten Hälfte den Untergrund in der linken Hälfte deutlich anheben. Die Schwelle zum Darstellen von Graustufen beträgt 30 ADC-Einheiten, wie bei den anderen Darstellungen oben.

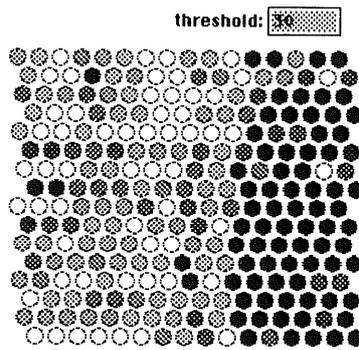


Abb. 5.22: zuviele Treffer (Schauer)

5.3.3 Spurensuchalgorithmus

Mit dem Ziel, die Effizienz einzelner Lagen des Faserdetektors zu bestimmen, werden von einem Computerprogramm alle 40.000 Ereignisse untersucht. Die auf Pedestal, Elektronik-, Photomultiplier- und Faserempfindlichkeit korrigierten Daten durchlaufen einen Algorithmus, der schrittweise die Spuren kosmischer Myonen rekonstruiert.

Um bei der Effizienzbestimmung in Kapitel 5.3.4 unabhängig von der Spursuche zu sein, wird hier der mittlere Teil des Faserdetektors aus der Betrachtung herausgenommen, das heißt, die Spuren werden nur mit der Information aus den oberen und unteren vier Ebenen gewonnen (siehe Abbildung 5.23).

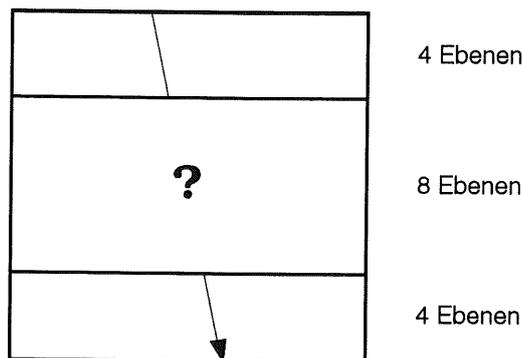


Abb. 5.23: Prinzip der unabhängigen Suche nach Spuren im Faserdetektor

Um die bestmögliche, die Myonspur darstellende Gerade zu finden, werden durch das Bild der Faseranordnung 400 Geraden gelegt.

Diese sind über den ganzen Detektor verteilt, haben aber eine Vorzugsrichtung: Sie verlaufen von oben nach unten nicht schräger als durch die Triggeranordnung erlaubt ($\pm 18^\circ$ zur Senkrechten).

Von einer Geraden werden jeweils bis zu vier Fasern im oberen und unteren Teil geschnitten. Die Signale dieser Fasern werden aufaddiert und diejenige Gerade mit der größten so gebildeten Spursumme ausgewählt.

Um die genaue Lage der Spur zu ermitteln, wird eine neue Ausgleichsgerade bezüglich des gewonnenen Spurkandidaten erzeugt: In jeder Ebene werden die drei Fasern benutzt, die der bisher ausgewählten Geraden am nächsten gelegen sind, um nach der Methode der kleinsten Quadrate durch alle acht Ebenen eine gewichtete Ausgleichsgerade zu legen.

Schließlich wird anhand mehrerer Kriterien überprüft, ob die so gefundene Gerade tatsächlich eine Myonspur darstellt.

Zum einen muß die Summe der acht Signale, die unter der Spur liegen, zwischen 2000 und 6000 ADC-Einheiten haben, wobei wenigstens sechs der acht Fasern eine Pulshöhe von mindestens 150 ADC-Einheiten aufweisen müssen.

Zum anderen darf die Spursumme der Nebengeraden, die genau eine Faser rechts und links neben der gefundenen Gerade liegen, nur 20% der Spursumme der eigentlichen Spur betragen. Dies verhindert die Selektion von Ereignissen aufgeschauerter Myonen.

Ziel der Suche ist es, eine Aussage für den zukünftigen Einsatz der Detektoren in den *roman pots* zu liefern. Aus diesem Grund werden in der folgenden Effizienzberechnung für Einzel- und Doppellagen nur möglichst senkrechte Geraden verwendet. Der Spurensuchalgorithmus sondert deshalb alle Spuren aus, die einen Winkel von mehr als 7° zum Lot einschliessen.

Eine große Anzahl von Spuren wurde mit dem Auge überprüft, um zu verhindern, daß mit den so definierten Spurkriterien falsche Spuren selektiert werden.

Ergebnis der Spursuche

Die Pulshöhenverteilung der von diesem Spursuchalgorithmus rekonstruierten Spuren ist in Abbildung 5.24 für die acht mittleren Ebenen dargestellt.

Diese Verteilung ist unabhängig von den oben genannten Spursuchkriterien, da der Algorithmus die Spuren nur mit Hilfe der jeweils vier äußeren Lagen rekonstruiert.

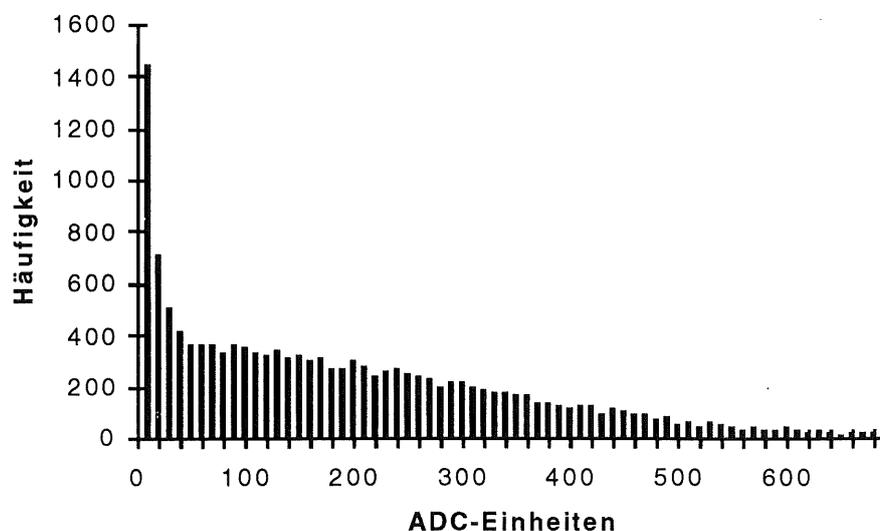


Abb. 5.24: Pulshöhenverteilung auf der Spur

Zu erkennen ist, daß kein klarer Schnitt in der Verteilung in Abbildung 5.24 möglich ist. Treffer in Fasern kann man somit nur schwer vom Rauschen im Photomultiplier unterscheiden. Wie es Abbildung 5.25 zeigt, können auch Treffer Signale mit beliebig kleinen ADC-Werten erzeugen, wenn sie die Randzone der Fasern durchqueren.

Somit kann man keine klare Grenze, kein Minimum für ein Treffersignal angeben. Um aber möglichst viele Treffer zu berücksichtigen, ist man an einer kleinen Schwelle interessiert (ca. 50 ADC-Einheiten; d.h. ein Photoelektron).

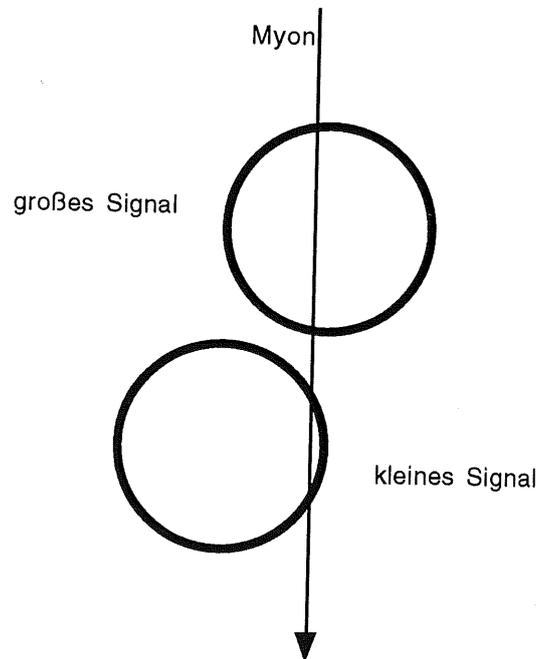


Abb. 5.25: Unterschiedlich getroffene Fasern bei versetzten Lagen

Obwohl der gesamte Meßbereich von 1024 ADC-Einheiten nur bis etwa 700 ADC-Einheiten ausgenutzt wird, kann eine höhere Verstärkung in den Vorverstärkern kein besseres Signal/Rausch-Verhältnis herstellen, da Signal- und Rauschteil gemeinsam verstärkt werden.

5.3.4 Effizienz von Einzel- und Doppellagen

Die Effizienz ε_i für Einzellagen wird definiert als

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{\text{Ereignisse}} \text{Treffer in Ebene } i \text{ am Ort der Spur}}{\sum_{\text{Ereignisse}} \text{Spuren}}$$

Sie gibt die Wahrscheinlichkeit des Registrierens eines Teilchens in Ebene i an.

Da im Computer Information in Form von ADC-Einheiten vorliegt, wird eine Faser als getroffen angesehen, falls der Eintrag im ADC oberhalb einer bestimmten Schwelle (z.B. 100 ADC-Einheiten) liegt.

Die Effizienz wird deshalb als Funktion von dieser Trefferschwelle untersucht.

Abbildung 5.26a zeigt die Effizienz der mittleren acht Einzelebenen in Abhängigkeit der Schwelle. Dieser Graph zeigt deutlich, wie die Effizienz einer Einzellege abnimmt, wenn die Anforderungen steigen, die an einen Treffer in dieser Ebene gestellt werden.

Die Wahrscheinlichkeit für einen Treffer mit einer Pulshöhe von mindestens 100 ADC-Einheiten liegt bei ca. 60%.

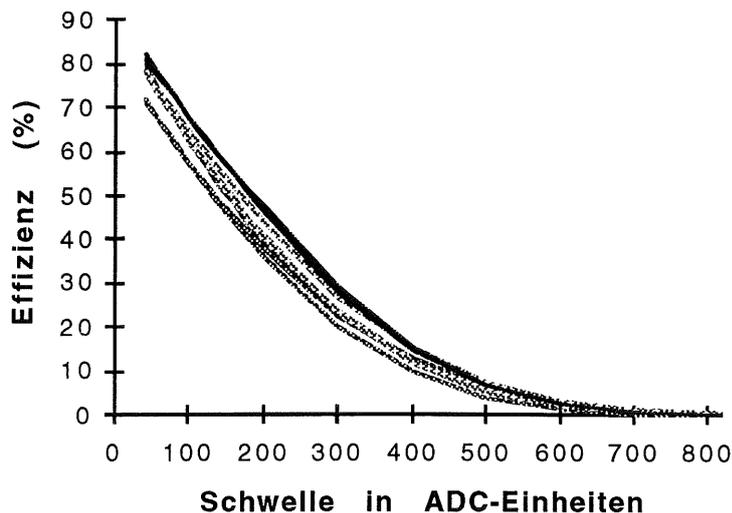


Abb. 5.26a: Messung der Einzellageneffizienz (8 Lagen)

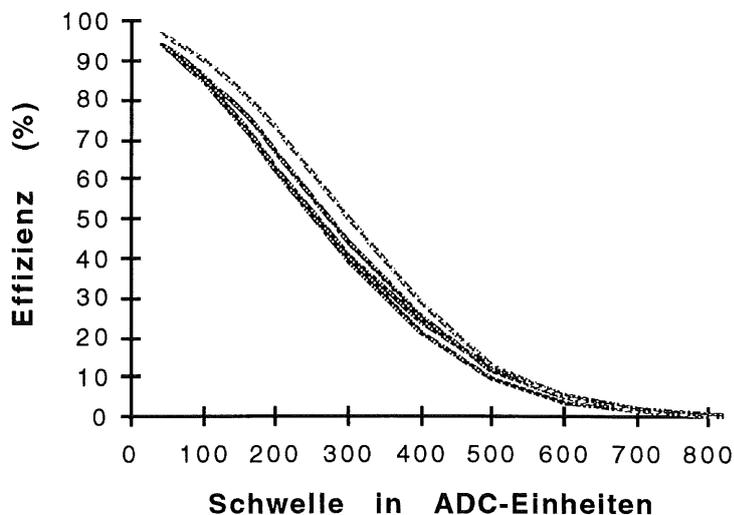


Abb. 5.26b: Doppellageneffizienz (4 Lagen)

Bei Doppellagen muß für die Effizienzberechnung mindestens ein Treffer in einer der beiden Lagen registriert werden. Im verwendeten Detektor findet man im Mittelteil vier gleiche Doppellagen, bestehend aus je zwei um $d/2$ versetzten Lagen.

Erwartungsgemäß ordnet die Abbildung 5.26b den Doppellagen eine bessere Effizienz als den Einzellagen zu. Hier erreicht man bereits in 85% aller Fälle Treffer von mehr als 100 ADC-Einheiten.

Theoretisch können bei dem flächendeckenden Doppellagendetektor 100% Effizienz erreicht werden, wenn man die Schwelle genügend klein wählt.

Monte-Carlo Simulation

Um die gemessenen Effizienzen mit berechneten Werten vergleichen zu können, wurde ein Monte-Carlo Simulationsprogramm geschrieben, das auf einfache Weise Treffer von Teilchen in Fasern simuliert.

Das Programm generiert eine hohe Anzahl von Teilchen, die Faserlagen senkrecht durchqueren (siehe Abbildung 5.27). Die in der Faser zurückgelegten Wegstrecken sind ein Maß für die Signalhöhe im Photomultiplier. Liegt das Signal oberhalb einer bestimmten Schwelle, registriert der Rechner einen Treffer. Nach 100.000 Teilchen wird die Effizienz der Anordnung für verschiedene Schwellen bestimmt.

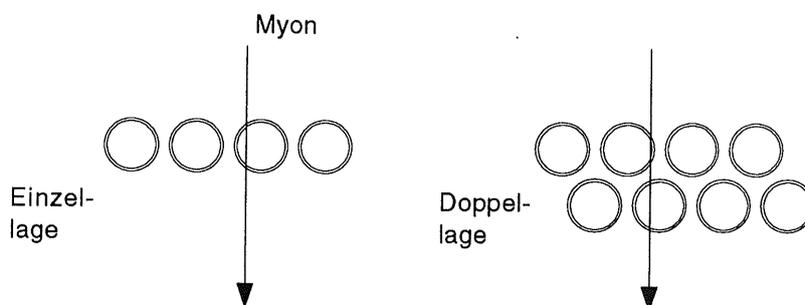


Abb. 5.27: Erzeugte Myonen in zwei Detektorgeometrien

Die Simulation ist in [Monte94] ausführlich erklärt; hier sollen nur die Annahmen und das Ergebnis zweier Detektorgeometrien vorgestellt werden. Um einen Umrechnungsfaktor von Wegstrecke (im Szintillator) in Photoelektronen (im Photomultiplier) zu erhalten, werden folgende Annahmen gemacht:

- Ein minimalionisierendes Teilchen verliert 2 MeV / cm Szintillatormaterial (Bethe-Bloch-Formel für Energieverlust dE/dx).
- Im Szintillator entstehen aus jedem keV zehn Photonen.
- Nur 3% der Photonen fliegen in den richtigen Raumwinkel.
- Durch ca. 160 Reflexionen am Fasermantel gehen jedesmal 0,05 % der Photonen verloren.
- Die Abschwächung des Signals auf dem Lichtweg zum Photomultiplier ist proportional zu $\exp(-x/\lambda)$, mit $\lambda = 100$ cm (Abschwächungslänge) und $x = 50$ cm (Länge der Faser).
- Nur jedes fünfte Photon erzeugt im Photomultiplier ein Photoelektron. (*quantum efficiency* $\varepsilon = 20\%$)

Mit Hilfe dieser Angaben ergibt sich ein Mittelwert von 6,6 Photoelektronen pro mm Wegstrecke im Szintillator (pe/mm).

Messungen an 1-mm-Fasern ergaben einen Umrechnungsfaktor von 7,4 pe/mm [Bähr94]. Dieser von der obigen Abschätzung bestätigte Wert wird als Berechnungsgrundlage in die Monte-Carlo Simulation aufgenommen.

Da das Auslösen von Photoelektronen ein statistischer Prozeß ist, wird die berechnete, mittlere Anzahl von Photoelektronen jedesmal nach den Gesetzen der Poissonstatistik variiert.

Es werden zwei verschiedene Faserdetektoren mit dem Monte-Carlo Programm betrachtet (siehe Abbildung 5.27): Eine Einzel- und eine Doppellage aus runden 2-mm-Fasern (1,88 mm Szintillator), die wie Untereinheiten des Detektors von Kapitel 4 angeordnet sind.

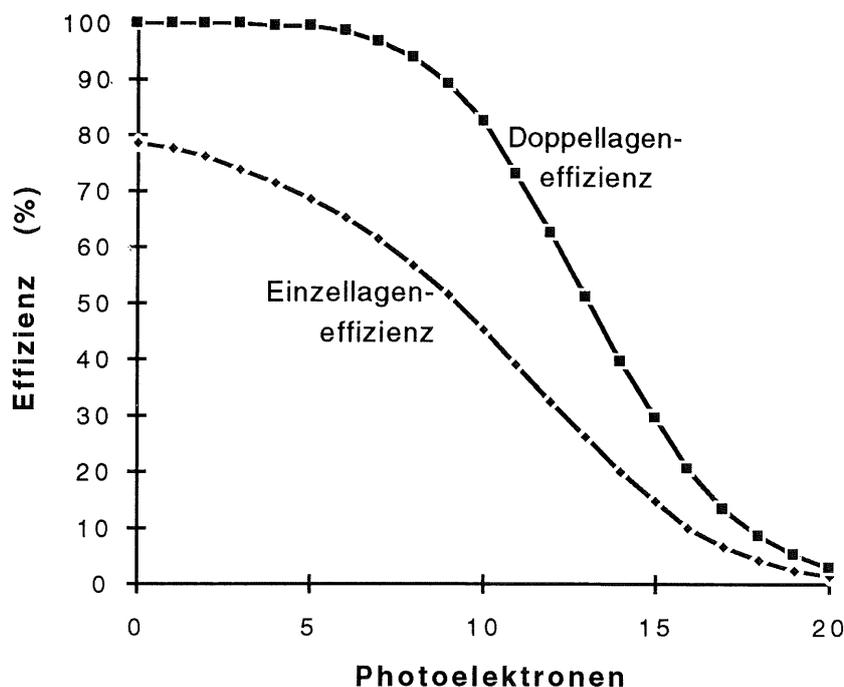


Abb. 5.28: Monte-Carlo-Effizienzen für Einzel- und Doppellagen

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in Abbildung 5.28 aufgetragen. Mit zunehmender Photoelektronenschwelle nimmt die Wahrscheinlichkeit für das Erkennen eines Lichtblitzes in der Faser ab.

Bei sehr kleine Schwellen (ein Photoelektron) liegt die Effizienz der Doppellage bei 100%. Wegen der Lücken zwischen den Fasern erreicht die Effizienz einer Einzellage selbst bei der theoretischen Schwelle von 0 Photoelektronen nur 78,3% (= 1,88mm/2,4mm). Diese Schwelle bedeutet nicht, daß keine Photoelektronen entstanden sind, sondern daß mehr als 0 Photoelektronen berechnet wurden. Dabei tragen z.B. 0,4 Photoelektronen zur Effizienz mit der Schwelle 0 bei. Für sehr hohen Schwellen geht die Effizienz asymptotisch gegen Null, wobei

die Effizienz der aus zwei Einzellagen bestehenden Doppellage zweimal so groß ist wie die der Einzellage.

Vergleich von Messung und Simulation

Wendet man die in Kapitel 5.2.4 durchgeführte Eichung von 51 ADC-Einheiten/Photoelektron bei den gemessenen Kurven an, so kann man die Effizienzen in einem gemeinsamen Graphen vergleichen.

In den Abbildungen 5.29a und 5.29b sind die berechneten und gemessenen Einzel- und Doppellageneffizienzen gegen die Photoelektronenschwelle aufgetragen.

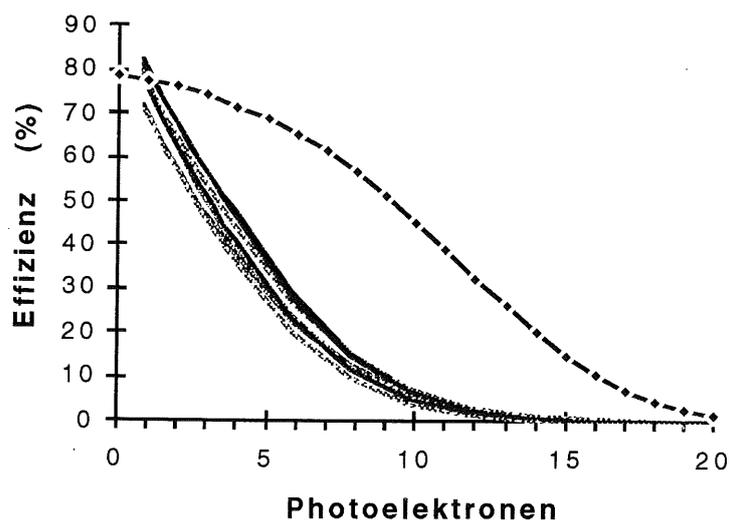


Abb. 5.29a: Vergleich der Einzellageneffizienzen aus Messung und Berechnung

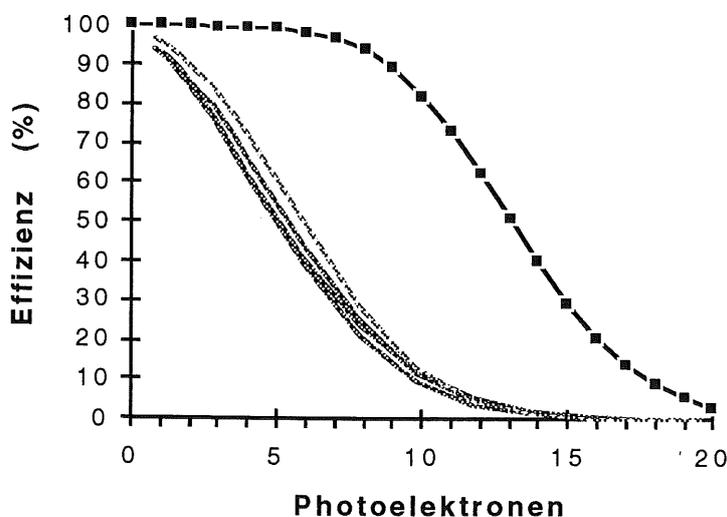


Abb. 5.29b: Vergleich der Doppellageneffizienzen aus Messung und Berechnung

Die gemessenen Kurven bleiben in beiden Fällen unterhalb der theoretischen; der Detektor sieht also weniger Licht als angenommen. Das Überschreiten der geometrischen Grenze von 78,3% Einzellageneffizienz bei kleinen Schwellen (Abbildung 5.29a) muß durch Rauschen verursacht worden sein: Die Pulshöhenverteilung in Abbildung 5.24 zeigte, daß sich unterhalb von 100 ADC-Einheiten (≈ 2 Photoelektronen) Signal- und Rauschanteile vermischen. Das Rauschen ohne Myonspuren liegt bei diesem Aufbau unter 10 ADC-Einheiten; störende Nebeneffekte - z.B. durch δ -Elektronen - erzeugen Signale, die bei kleinen Schwellen als Treffer gewertet werden.

Die grobe Übereinstimmung und der ähnliche Verlauf von Theorie und Messung sind jedoch ein großer Erfolg für die einfachen Modelle, die zur Berechnung herangezogen wurden. Bei der Simulation wurden zum Beispiel nur senkrechte Myonen zugelassen und einfach Millimeter in Photoelektronen umgerechnet; die Meßwerte selbst wurden auch nur anhand eines einzelnen Eichpixels von ADC-Einheiten in Photoelektronen umgerechnet.

Die fast identischen Steigungen, vor allem bei der Doppellageneffizienz, legen die Vermutung nahe, daß beide Graphen einen verschiedenen Ursprung haben. Denkt man sich bei den Messungen eine zusätzliche Schwelle von 7 Photoelektronen, so schieben sich die Kurven fast vollständig übereinander (vgl. Abbildung 5.30).

Zusammen mit der Erklärung für diese Zusatzschwelle hätte man eine optimale Beschreibung der Messung durch die Monte-Carlo Simulation erreicht.

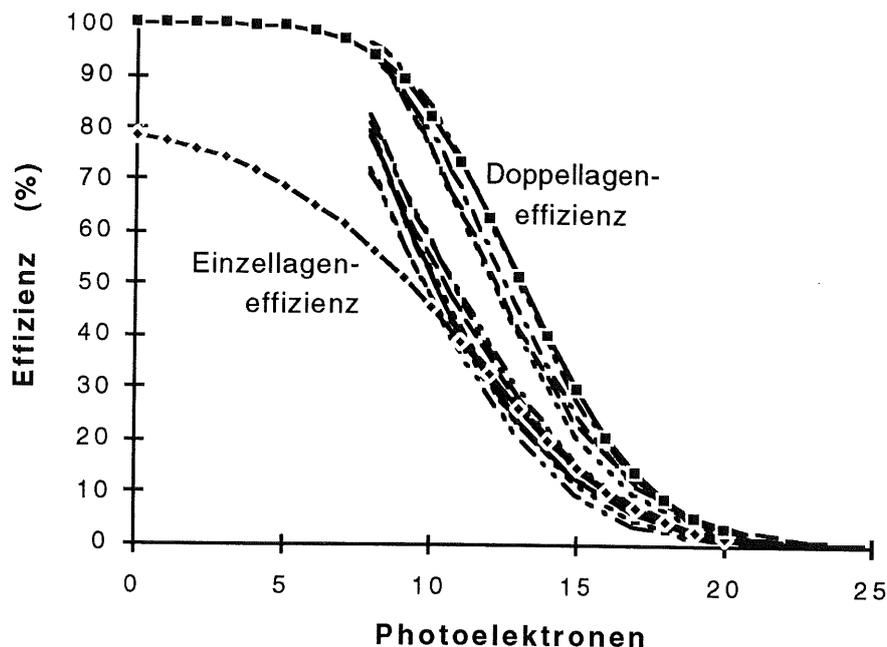


Abb. 5.30: Einzel- und Doppellageneffizienzen
(Nullpunkte um 7 Photoelektronen verschoben)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der positionsempfindliche 256-Kanal-Photomultiplier H4140-20 gut zur Auslese eines Spurdetektors aus szintillierenden Fasern geeignet ist. Es sind jedoch noch einige Tests nötig, um das Gerät im Vorwärts-Proton-Spektrometer bei H1 sicher einzusetzen.

Die bisher erarbeiteten Ergebnisse werden hier noch einmal zusammengefaßt. Desweiteren werden einige Verbesserungsvorschläge für den Detektoraufbau vorgestellt:

Die Empfindlichkeiten der 256 Photomultiplierkanäle variieren um den Faktor 6,7; verzichtet man auf lediglich 20 schwache Kanäle, so erhält man ein Verhältnis von 1:4, wie es Hamamatsu in seinem Datenblatt angibt.

Die einzelnen Kanäle arbeiten fast unabhängig voneinander: das Übersprechen von Kanal zu Kanal liegt laut Hamamatsu bei 2%, im Testaufbau wurden 5,5% des Gesamtsignals im Nachbarkanal gefunden. Eine Reduzierung des Crosstalks könnte, wie von Hamamatsu angegeben, durch Versuche mit leichten Magnetfeldern (ca. 0,1 Tesla) erreicht werden.

Mehrere Pixeloberflächen wurden auf Homogenität des Kathodenmaterials untersucht. Im Rahmen der Meßgenauigkeit variierte die Empfindlichkeit der von einer beleuchteten Faser abgetasteten Pixel nur um 5%.

Die Signale des Photomultipliers, die verstärkt und digitalisiert wurden, konnten in Photoelektronen geeicht werden. Dies geschah exemplarisch an einem Pixel, das Leuchtdiodenblitzen ausgesetzt war. Die Vermutung, daß die Streuung der Meßwerte nur auf Photoelektronenstatistik beruht, konnte bestätigt werden. Beim Versuch der Eichung aller Pixel (integrale Beleuchtung) stellte man allerdings fest, daß der Photomultiplier scheinbar zwei Sorten Kanäle (siehe Abbildung 5.16) besitzt, die verschieden auf Photoelektronen reagieren. Es konnte nicht geklärt werden, ob die Ursache dafür im Photomultiplier selbst liegt. Durch die Eichung konnte ermittelt werden, daß szintillierende Fasern von 2 mm Durchmesser bis zu 14 Photoelektronen im Photomultiplier auslösen, wenn sie von kosmischen Myonen getroffen werden.

Die neue Zuordnungsmethode der Fasern auf den Photomultiplier hat sich bewährt. Das Vertauschen und Verdrillen aller Fasern ließ im Faserdetektor keine physikalische Interpretation der Crosstalkkanäle des Photomultipliers zu. Dadurch sind jetzt wahre Treffer von induzierten gut zu unterscheiden, und die Spur ist deutlich und genau zu erkennen. Durch eine weiter verbesserte Zuordnungstabelle ließe sich noch das Entstehen der beiden Phantomspuren verhindern (Abbildung 5.21).

Es konnte mit Hilfe der unterschiedlichen Anordnung der Kanäle und Fasern gemessen werden, daß das Signalübersprechen von Faser zu Faser im Spurdetektor sechsmal kleiner ist als Crosstalk beim Photomultiplier.

Unabhängig von der Empfindlichkeitsverteilung der Photomultiplierkanäle, besitzen die Fasern Unterschiede von einer Größenordnung in der Lichtausbeute. Die Ursache dafür kann in den Fasern selbst, in ihrer Handhabung während des Zusammensetzens des Detektors oder in unterschiedlich guter Ankopplung der Fasern an den Photomultiplier liegen.

Eine Verbesserung der Ankopplung könnte durch Silikongel oder gesinterte

Glasfibern erreicht werden; bisher wurden die polierten Faserstirnseiten ohne weitere Hilfsmittel direkt vor das Photomultipliereintrittsfenster positioniert. Mit dem modular aufgebauten Faserdetektor läßt sich ein Umbau dafür schnell und einfach realisieren. Damit könnte man den optischen Crosstalk, bei dem Photonen beim Übergang von den Fasern zum Photomultiplier in einen Nachbarkanal gelangen, einschränken.

Das Ziel, mit dem Faserdetektor Spuren kosmischer Myonen zu erkennen, konnte erreicht werden, wobei man beim Triggern das vom Photomultiplier gelieferte Summensignal ohne Probleme nutzen konnte.

Die Effizienz von einzelnen Lagen aus 2-mm-Fasern konnte - bei einer vernünftigen Schwelle von 150 ADC-Einheiten (umgerechnet 3 Photoelektronen) - zu 50%, die Doppellageneffizienz zu 75% ermittelt werden.

Beim Vergleich der Meßwerte mit den Ergebnissen einer Monte-Carlo Simulation konnte lediglich eine grobe Übereinstimmung festgestellt werden. Der Grund dafür kann in der Eichung der ADC-Skala in Photoelektronen liegen, wobei beste Übereinstimmung zwischen erwarteten und gemessenen Effizienzen bei einer zusätzlichen Schwelle von 7 Photoelektronen erzielt wurde.

Der Grund für diese "von Hand eingesetzte" Schwelle blieb offen.

Eine vollständige Untersuchung des positionsempfindlichen Photomultipliers war im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich, einige Probleme sollten aber in Zukunft noch weiterverfolgt werden.

Anhang

Empfindlichkeitsverteilung

Die folgenden Tabellen geben die relativen Empfindlichkeiten für die 256 Pixel des Hamamatsu H4140-20 (CA0035) Photomultipliers an (s. Kap. 5.2.1).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	17	15	19	23	26	24	26	24	26	31	22	20	21	29	26	33
2	21	21	32	30	36	43	43	46	41	44	39	37	30	35	28	34
3	32	42	59	53	44	70	78	69	71	67	64	56	51	51	44	42
4	50	68	78	87	52	87	94	97	94	84	79	75	69	58	59	46
5	68	82	84	93	84	83	94	97	94	94	89	87	82	75	69	55
6	75	82	82	90	94	85	94	93	100	93	94	88	87	81	72	59
7	77	81	82	45	85	82	89	89	91	86	87	89	88	78	73	61
8	69	77	80	85	83	82	92	92	90	86	81	80	82	77	70	59
9	57	69	66	73	76	81	87	71	88	86	93	87	83	77	72	57
10	55	66	69	71	76	84	86	90	86	93	95	86	82	81	69	53
11	58	66	70	75	82	85	96	97	96	93	83	88	84	80	69	54
12	60	76	77	78	85	94	94	98	94	92	81	83	78	72	69	59
13	58	70	80	80	83	89	89	91	90	86	83	77	73	69	67	55
14	74	73	79	74	80	77	79	90	91	85	79	77	72	68	61	59
15	78	77	70	73	78	77	77	83	82	78	77	75	73	63	61	67
16	86	88	77	75	71	63	68	61	62	60	61	57	57	57	59	63

Lichtdiodenmessung (Diplomarbeit)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	30	27	26	28	30	32	32	31	28	29	28	27	28	32	33	32
2	32	34	37	38	38	45	47	48	42	41	42	40	37	36	37	35
3	38	45	52	45	45	61	63	61	59	53	52	52	46	44	41	38
4	48	59	64	72	51	80	81	81	72	68	64	58	57	52	49	43
5	58	70	75	84	77	92	95	98	88	82	77	71	68	62	57	49
6	60	78	85	90	91	94	100	96	94	85	83	78	75	70	63	55
7	65	81	85	89	91	89	96	92	90	85	83	81	74	71	66	59
8	65	78	79	85	87	88	92	93	90	87	81	75	76	73	69	56
9	65	79	80	80	81	85	87	69	87	87	85	81	75	71	69	53
10	66	80	83	78	79	86	85	85	85	86	85	81	75	71	66	51
11	69	81	79	81	82	86	86	86	88	86	84	80	76	68	64	47
12	70	79	77	75	79	82	85	87	85	94	84	83	75	66	62	49
13	69	77	80	80	76	80	83	83	84	86	85	78	72	64	59	51
14	74	74	80	79	78	75	79	80	81	83	79	81	73	64	58	56
15	77	81	74	74	74	73	75	75	75	75	79	76	69	61	63	67
16	78	81	76	62	56	58	61	61	61	62	64	66	66	69	77	94

Herstellerangaben [Hama94]

Literaturverzeichnis

- [Bähr92] J. Bähr, Test of a Position-Sensitive Photomultiplier for Fast Scintillating Fiber Detector Readout, DESY Report DESY-92-176
- [Bähr94] J. Bähr et al., DESY preprint DESY-94-130
- [Chen95] B. Chen, Aufbau und Test eines Detektors aus szintillierenden Fasern, Diplomarbeit, 1995
- [H1C94.1] I. Abt et al., H1 Collaboration, The H1 Detector at HERA, Abbreviated and updated form of report DESY-93-103 (1994)
- [H1C94.2] T. Ahmed et al., H1 Collaboration, Deep Inelastic Scattering Events with a Large Rapidity Gap at HERA, Nucl. Phys. B429 (1994)
- [Hama94] Tentative Data on Multianode Photomultiplier Tube Assembly H4140-20, Hamamatsu Photonics K.K., Oktober 1992, May 1994. Beilage zum Photomultiplier mit Seriennummer CA0035.
- [Monte94] B. Chen, A.B. Fahr, F. Niebergall, T. Bodentien; Monte-Carlo Studies of Efficiency and Resolution of Scintillating Fibre Detectors for the H1 Forward Proton Spectrometer, H1 Note, H1-10/94-387
- [Perk87] D.H. Perkins, Introduction to high energy physics, Third Edition, Addison-Wesley, 1987
- [Reich94] C. Reich, Untersuchung eines positionsempfindlichen Photomultipliers mit Schwerpunkt mechanischer Versuchsaufbau, Diplomarbeit, Januar 1994
- [Suz88] S. Suzuki, T. Matsushita, T. Suzuki, S. Kimura, H. Kume; New position sensitive photomultiplier tubes for high energy physics and nuclear medical applications, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-35(1), (1988) 382
- [Tak87] F. Takasaki, H. Saito, T. Fukui, T. Matsushita, T. Suzuki; Development of multianode photomultiplier tube, Nucl. Instr. Meth., A260, (1987) 447
- [Witt94] C. Wittek, Untersuchungen eines positionsempfindlichen Photomultipliers mit dem Schwerpunkt Programmentwicklung für Datenauslese, Diplomarbeit, Januar 1994, H1-04/94-353

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die an dem Gelingen und Zustandekommen dieser Arbeit beteiligt waren:

Herrn Prof. Dr. F.W. Büßer danke ich für die Aufgabenstellung, für sein stetes Interesse und die tatkräftige Hilfsbereitschaft nicht zuletzt bei der Anfertigung dieses Textes.

Die umfangreiche, fachliche Unterstützung verdanke ich Herrn Dr. F. Niebergall.

Ganz besonderer Dank geht an das Arbeitsklima der Neutrinogruppe, das maßgeblich durch C. Wittek, M. Teske, J. Lipinski, L. Büngener erzeugt wird.

Meinen stets hilfsbereiten Mitdiplomanden B. Chen und T. Bodentien möchte ich für ihre Kollegialität danken.

Einen großen Dank auch an die TEB-Gruppe, die Elektronikwerkstatt und die mechanische Werkstatt, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für das leibliche Wohl und die ständige Unterstützung während des Verfassens dieser Diplomarbeit bedanke ich mich herzlich bei meiner Korrekturassistentin Heike.

Erklärung

Ich versichere, daß ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Hamburg, den 12. Juli 1995

(Arndt Boris Fahr)