

**Untersuchung eines  
positionsempfindlichen  
96-Kanal-Photomultipliers**

Experimentelle physikalische Diplomarbeit

vorgelegt von

**Carsten Reich**

**II. Institut für Experimentalphysik  
Universität Hamburg**



**Untersuchung eines  
positionsempfindlichen  
96-Kanal-Photomultipliers**

Experimentelle physikalische Diplomarbeit

vorgelegt von

**Carsten Reich**

II. Institut für Experimentalphysik  
Fachbereich Physik  
Universität Hamburg

Hamburg  
1994

|   |    |
|---|----|
| 1. Einführung .....   | 1  |
| 1.1 Der Speicherring Hera .....                                   | 1  |
| 1.2 Der Detektor H1 .....   | 2  |
| 2. Vorwärtsspektrometer .....                                     | 5  |
| 2.1 Die Physik .....  | 5  |
| 2.2 Das Protonen-Vorwärtsspektrometer bei H1 .....                | 8  |
| 2.3 Funktionsweise von Szintillatoren .....                       | 13 |
| 2.3.1 Organische Szintillatoren .....                             | 13 |
| 2.4 Photomultiplier .....   | 15 |
| 2.4.1 Der positionsempfindliche Photomultiplier von Philips. .... | 16 |
| 2.4.1.1 Aufbau .....  | 16 |
| 2.4.1.2 Maße und Daten .....                                      | 19 |
| 3. Die Aufgabenstellung.. .....                                   | 22 |
| 3.1 Fragestellungen .....   | 23 |
| 3.1.1 Crosstalk .....   | 23 |
| 3.1.2 Signalverstärkung / Uniformität .....                       | 24 |
| 3.2 Organisation und Ablauf der Arbeit .....                      | 25 |
| 4. Der Laboraufbau. ....  | 26 |
| 4.1 Das Gehäuse .....   | 26 |
| 4.2 LED-Halter .....  | 27 |
| 4.3 Faserhalter .....   | 29 |
| 4.4 Der Kreuztisch .....  | 31 |
| 4.5 Lichtleitende Kunststofffasern .....                          | 33 |
| 4.5.1 Handhabung/Bearbeitung .....                                | 34 |
| 4.6 Der Signalweg .....   | 35 |
| 4.7 Die Analog-Digital-Converter .....                            | 37 |
| 4.7.1 Der Flash-ADC .....   | 38 |
| 4.8 Die Ausleseprogramme .....                                    | 40 |

|  |    |
|--|----|
| 5. Die Messungen .....                                 | 41 |
| 5.1 Vergleich der Vorverstärker .....                  | 41 |
| 5.2 Hochspannungskurven.....                           | 45 |
| 5.3 Reproduzierbarkeit des LED-Faser-Kontaktes.....    | 47 |
| 5.4 Faserabnutzung .....                               | 49 |
| 5.5 Ausrichten des Faserhalters .....                  | 50 |
| 5.5.1 das Verfahren.....                               | 52 |
| 5.6 Homogenität der Empfindlichkeit eines Pixels ..... | 58 |
| 5.6.1 Ergebnisse.....                                  | 68 |
| 5.7 Uniformität aller Pixel .....                      | 70 |
| 5.8 Langzeitstabilität.....                            | 76 |
| 6. Zusammenfassung .....                               | 78 |

# 1. Einführung

## 1.1 Der Speicherring HERA

Am Deutschen Elektronensynchrotron DESY ist 1990 der 6,3 km lange Speicherring HERA ( Hadron-Elektron-Ring-Anlage ) in Betrieb genommen worden, in dem erstmalig beschleunigte Elektronen der Energie 30 GeV mit beschleunigten Protonen der Energie 820 GeV zur Kollision gebracht werden.

Die Elektronen und Protonen werden jeweils als Pakete von ca.  $10^{13}$  Teilchen in zwei getrennten Ringen innerhalb HERAs beschleunigt, wobei man für beide Anlagen eine Füllung mit 210 Paketen anstrebt. Die Daten des Speicherrings zeigt Tabelle 1.1.

Um die Protonen auf der Sollbahn zu halten, sind erhebliche radiale Kräfte erforderlich, die mit Hilfe magnetischer Felder erzeugt werden. Die maximale magnetische Feldstärke konventioneller, normalleitender Magnete reicht zur Erzeugung dieser Kräfte nicht aus. Man verwendet deshalb zur Ablenkung der Protonen supraleitende Magnete, deren Feldstärke von 4,65 Tesla etwa um den Faktor zwei über der maximalen Feldstärke konventioneller Magnete liegt.

|                          | Protonen                                       | Elektronen          |
|--------------------------|--|---------------------|
| Energiebereich           | 300 - 820 GeV                                  | 10 - 30 GeV         |
| Schwerpunktenergie       | 314 GeV  |                     |
| Luminosität              | $2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ |                     |
| Teilchenzahl             | $2.1 \cdot 10^{13}$                            | $0.8 \cdot 10^{13}$ |
| Führungsfeld             | 4.65 T   | 0.165 T             |
| Umfang                   | 6336 m   |                     |
| Zeit zwischen Kreuzungen | 96 ns  |                     |
| Energieverlust/Umlauf    | $1.4 \cdot 10^{-10} \text{ MeV}$               | 127 MeV             |
| Hochfrequenzleistung     | 1 MW   | 13.2 MW             |

Tab. 1.1: Daten des Speicherrings HERA [ 1]

Der Elektronenring, in dem Teilchen mit einer Energie von 30 GeV kreisen, konnte mit konventionellen Magneten errichtet werden.

Die beiden Ringanlagen haben vier Zonen möglicher Wechselwirkungen, in zwei davon sind die Detektoren H1 und Zeus aufgebaut, um bei Kollisionen, deren Schwerpunktsenergie 314 GeV erreicht, die Viererimpulse der entstehenden Teilchen zu bestimmen. Die Elektronen und Quarks können dadurch mit einer Auflösung von einigen  $10^{-16}$  cm untersucht werden.

## 1.2 Der Detektor H1

Der Detektor H1 ist um einen der Wechselwirkungspunkte so aufgebaut, wie es die Abbildung 1.1 zeigt.

Da die Protonen einen wesentlich größeren Impuls mit sich führen, als die ihnen entgegengerichteten Elektronen, erwartet man nach einer Kollision die Kollisionsteilchen stark in Proton-Vorwärtsrichtung gebündelt; aus diesem Grund ist der Detektor nicht symmetrisch aufgebaut.

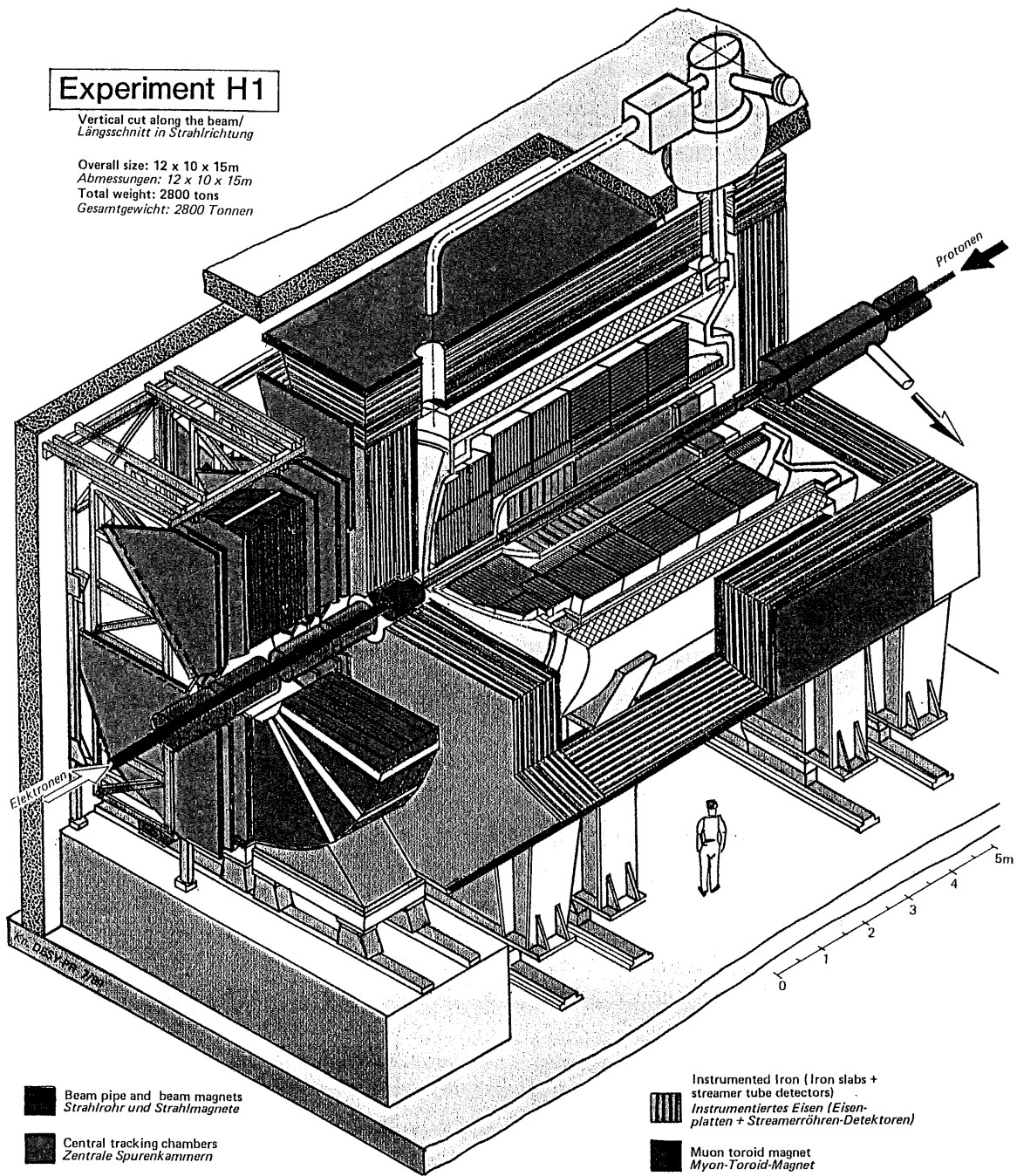
Die Teilchen des Endzustandes werden als erstes von den Spurdetektoren nachgewiesen: Der zentrale Spurdetektor, der den Wechselwirkungspunkt umgibt, besteht aus Vieldraht-Proportionalkammern, Jetkammern und zylindrischen Driftkammern; in Proton-Vorwärtsrichtung wird der zentrale Spurdetektor durch den vorderen Spurdetektor ergänzt, der aus planaren und radialen Driftkammern und jeweils dazwischen angeordneten Folien besteht. Das Ganze bildet einen Übergangsstrahlungs-Detektor zur Unterscheidung zwischen Elektronen und Pionen.

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter, das die Spurdetektoren umschließt, besteht aus einem elektromagnetischen Teil aus Bleiplatten mit einer Energieauflösung von etwa  $12\% / \sqrt{E}$  für die Elektronen und einem hadronischen Teil aus Edelstahlplatten mit einer Energieauflösung von ca.  $50\% / \sqrt{E}$  für die Protonen.

# Experiment H1




Vertical cut along the beam/  
Längsschnitt in Strahlrichtung

Overall size: 12 x 10 x 15m  
Abmessungen: 12 x 10 x 15m  
Total weight: 2800 tons  
Gesamtgewicht: 2800 Tonnen



-  Beam pipe and beam magnets  
Strahlrohr und Strahlmagnete
-  Central tracking chambers  
Zentrale Spurenkammern
-  Forward tracking chambers  
and transition radiators  
Vorwärtsspurenkammern und  
Übergangsstrahlungsmodul
-  Electromagnetic Calorimeter (lead)  
Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)
-  Hadronic Calorimeter (stainless steel)  
Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)
-  Superconducting coil (1,2 Tesla)  
Supraleitende Spule (1,2 Tesla)

Liquid Argon  
Flüssiges Argon

-  Compensating magnet  
Kompensationsmagnet
-  Helium cryogenics  
Helium Kälteanlage
-  Muon chambers  
Myon-Kammern







-  Instrumented Iron (Iron slabs +  
streamer tube detectors)  
Instrumentiertes Eisen (Eisen-  
platten + Streamerröhren-Detektoren)
-  Muon toroid magnet  
Myon-Toroid-Magnet
-  Warm electromagnetic calorimeter  
Warmes elektromagnetisches  
Kalorimeter
-  Plug calorimeter (Cu,Si)  
Vorwärts-Kalorimeter
-  Concrete shielding  
Betonabschirmung
-  Liquid Argon cryostat  
Flüssig Argon Kryostat

Abb. 1.1: Der Detektor H1 [ 2 ]

Der Impuls geladener Teilchen, die bei der Reaktion entstanden, soll durch deren Ablenkung in einem Magnetfeld der Feldstärke 1,2 T bestimmt werden, dessen Feldlinien parallel zum Strahlrohr verlaufen. Das in seinem Inneren homogene Magnetfeld wird von einer das Kalorimeter umschließenden, supraleitenden Spule erzeugt, die sich innerhalb eines Kryostaten befindet.

Die den Detektor nach außen abschließende Einheit, das instrumentierte Eisenjoch, besteht aus mehreren Lagen Streamerrohrkammern, die sich jeweils mit Eisenplatten der Dicke 75 mm abwechseln. Die Aufgabe dieses Eisenjoches ist die Rückführung des magnetischen Flusses bzw. der Abschirmung des magnetischen Feldes der supraleitenden Spule nach außen. Die Streamerrohrkammern registrieren den Durchtritt bei der Kollision freigesetzter Myonen und anderer Teilchen, die im Flüssig-Argon-Kalorimeter nicht vollständig abgebremst werden konnten. Aus diesem Grund wird das instrumentierte Eisenjoch auch als Tailcatcher bezeichnet [ 1], [ 3].



## 2. Vorwärtsspektrometer

### 2.1 Physikalische Prozesse

Bei HERA besitzen die Protonen einen wesentlich größeren Impuls als die mit ihnen kollidierenden Elektronen. Deshalb wird bei fast allen physikalischen Teilchenreaktionen ein Teil der Endprodukte unter einem Winkel von weniger als 10 mrad in Protonen-Vorwärtsrichtung gestreut. Dieser Teil der Endprodukte bewegt sich längs einer Strecke von über 100 m im Inneren des Strahlrohres und kann deshalb nicht mit dem Detektor H1 nachgewiesen werden.

Bei einigen dieser Prozesse wäre es möglich, die Genauigkeit der Messungen und die Identifikationsrate zu verbessern, wenn man Teile der vorwärts-gestreuten Reaktionsprodukte mit ausreichender räumlicher Auflösung nachweisen und ihren Impuls durch Ablenkung in einem Magnetfeld bestimmen könnte. Zu diesem Zweck ist bei H1 der Einbau eines Vorwärtsspektrometers geplant.

Einige der physikalischen Prozesse, die durch das Vorwärtsspektrometer besser untersucht werden können, sollen in diesem Abschnitt angedeutet werden:

Eine Gruppe von wichtigen physikalischen Reaktionen sind diffraktive Prozesse. Bei Reaktionen dieses Typs findet ein Austausch von Vakuum-Quantenzahlen statt; man spricht dabei auch von *Pomeron*-Austausch. Postuliert wurden Reaktionen mit Pomeron-Austausch erstmals durch die Regge-Pol-Theorie. Ohne diese Theorie hier weiter vorzustellen, soll erwähnt sein, daß das Pomeron kein elementares Teilchen ist [ 4], [ 5], [ 6].

Die physikalischen Größen *Rapidity* ( $\eta$ ) und *Pseudorapidity* ( $y$ ) werden häufig zur Darstellung der longitudinalen Verteilung der produzierten Teilchen verwendet. Sie sind folgendermaßen definiert:

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

$$y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + p_l}{E - p_l} \right) = \ln \left( \frac{E + p_l}{m^2 + p_t^2} \right)$$

Dabei sind  $m$  die Masse und die Größen  $E$ ,  $\vec{p}$ ,  $\vartheta$ ,  $p_l$  und  $p_t$  Energie, Impuls, Produktionswinkel, longitudinaler und transversaler Impuls jeweils eines Teilchens im Schwerpunktsystem.

Diffraktive Prozesse haben eine für sie charakteristische Rapidityverteilung. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 2.1 dargestellt.

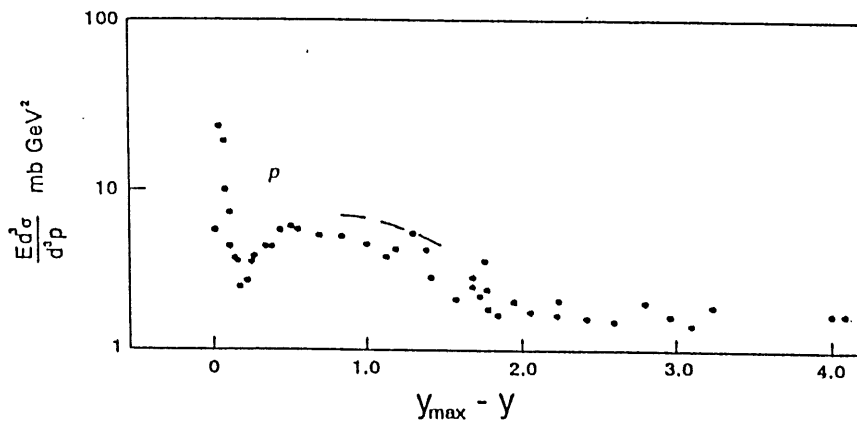


Abb. 2.1: Rapidityverteilung eines diffraktiven Prozesses [ 6]

Das *Rapidity-Gap* genannte lokale Minimum bei  $y_{\max} - y \approx 0.1$  ist ein Merkmal eines diffraktiven Prozesses. Links davon zeigt sich unter Beachtung der logarithmischen Skalenteilung ein deutlicher Anstieg der Verteilung um einen Faktor von  $\geq 10$ . Die Rapidity ist über den Longitudinalimpuls  $p_l$  mit dem Streuwinkel verknüpft, daher ist der Anstieg ein Maß für die Anzahl vorwärtsgestreuter Teilchen.

Als Beispiel eines diffraktiven Prozesses sei hier die Photoproduktion von  $J/\psi$  - Mesonen genannt. Diese Reaktionen erfolgen elastisch [Abb. 2.2] und inelastisch [Abb. 2.3], wobei beim inelastischen Prozeß am unteren Vertex aus einer Nukleonenresonanz ein Pion und ein Proton entstehen können. Dieses Proton, für das nach Monte-Carlo-Berechnungen eine Energie von 500-800 GeV und ein Streuwinkel  $\vartheta \approx 2$  mrad erwartet werden, könnte man im Vorwärtsspektrometer nachweisen.

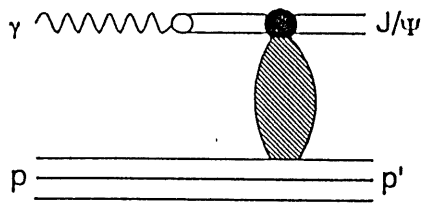


Abb. 2.2: Elastische Photoproduktion von  $J/\psi$  - Mesonen [ 6]

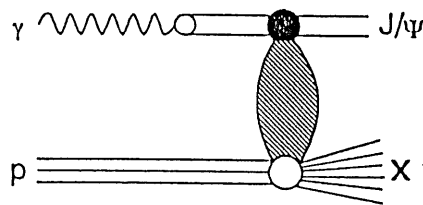


Abb. 2.3: Inelastische Photoproduktion von  $J/\psi$  - Mesonen [ 6]

Da der Prozeß auch ablaufen kann, wie es in Abb. 2.4 dargestellt ist, soll das Vorwärtsspektrometer durch Nachweis des vorwärtsgestreuten Protons  $p'$  dazu beitragen, zwischen den unterschiedlichen Varianten zu unterscheiden.

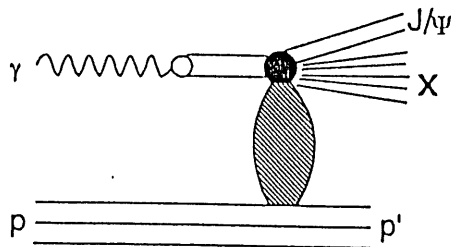


Abb. 2.4: Photoproduktion von  $J/\psi$  - Mesonen [ 6]

Eine weitere Klasse diffraktiver Prozesse sind die diffraktiv tief inelastischen Reaktionen (*Diffraktive DIS*). Ein Beispiel für eine solche Reaktion ist in der Abb. 2.5 dargestellt.

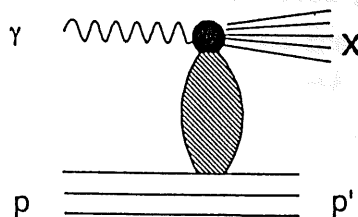


Abb. 2.5: Diffraktive DIS Reaktion [ 6]

## 2.2 Das Protonen-Vorwärtsspektrometer bei H1

Detektoren zum Nachweis von unter minimalen Winkeln vorwärtsgestreuten Protonen und zur Bestimmung ihrer Impulse wurden erstmalig am CERN an dem Proton-Proton-Speicherring ISR und darauffolgend auch am SPS eingesetzt. Die erste Einrichtung dieser Art entstand am Sanita-Institut in Rom, daher hat sich für diese Technik die Bezeichnung "Roman Pots" durchgesetzt.

Das bei H1 geplante Vorwärtsspektrometer wird sich zusammensetzen aus den Ablenkmagneten des Protonenringes längs des Strahlrohres und Faserdetektoren zur Messung der Ablenkung der Teilchen, wie es in Abb. 2.6 schematisch dargestellt ist. Da das Magnetfeld bekannt ist, kann dann der Impuls der Teilchen berechnet werden.

Zur Aufnahme und Positionierung der Faserdetektoren werden verfahrbare Gefäße an das Strahlrohr gebaut und mit geeigneten Detektoren bestückt. Diese Einrichtungen werden in Protonenflugrichtung im Abstand von 81m und 90m zum Wechselwirkungspunkt des Detektors H1 installiert.

Zu diesem Zweck wird in das Strahlrohr an den entsprechenden Stellen jeweils ein kreuzförmiges Rohrstück, wie es die Abbildung 2.7 zeigt, eingesetzt. An den oberen und unteren Flansch des Rohrstücks kann je eine Aufnahmeeinrichtung für Faserdetektoren montiert werden.

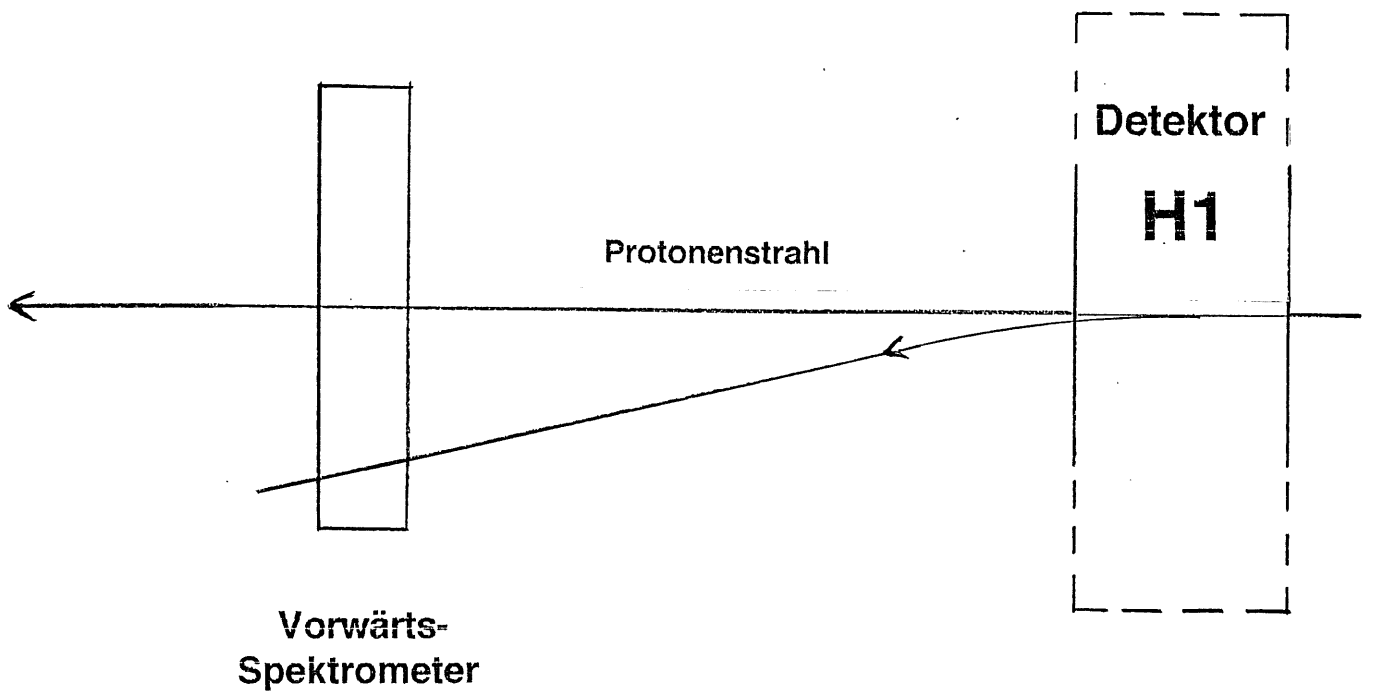


Abb. 2.6: Anordnung des Vorwärtsspektrometers

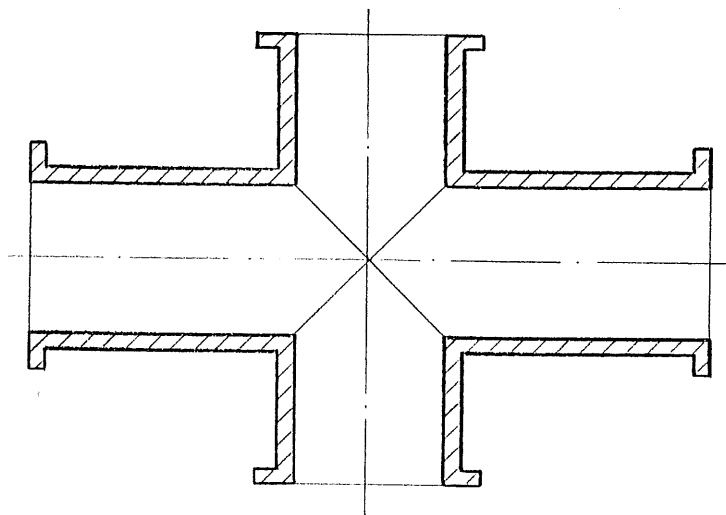


Abb. 2.7: Protonen-Strahlrohr beim Vorwärtsspektrometer

Es handelt sich dabei jeweils um zwei ineinanderliegende, druckdichte Gefäße, von denen das innere unter Atmosphärendruck steht und der Aufnahme von Detektorelementen dient. Das innere Gefäß ist gegenüber dem fest montierten äußeren Gefäß beweglich ausgeführt und kann mit Hilfe eines Linearantriebs orthogonal zum Protonen-Hauptstrahl verfahren werden.

Wenn sich der Protonenstrahl nach seiner Einspeisung und Beschleunigung stabilisiert hat, wird das die Fasern enthaltende Gefäß entsprechend Abb. 2.8 so dicht wie möglich an den Protonenstrahl herangefahren, ohne ihn zu beeinträchtigen oder seine Lebensdauer zu verkürzen.

Die gestreuten Protonen, in deren Flugbahn sich der in Abb. 2.9 dargestellte Einschub befindet, durchlaufen die an den entsprechenden Stellen zu nur 0,3 mm dicken "Fenstern" abgefrästen Wände des Gefäßes und werden von den darin enthaltenen Detektorelementen erfasst.

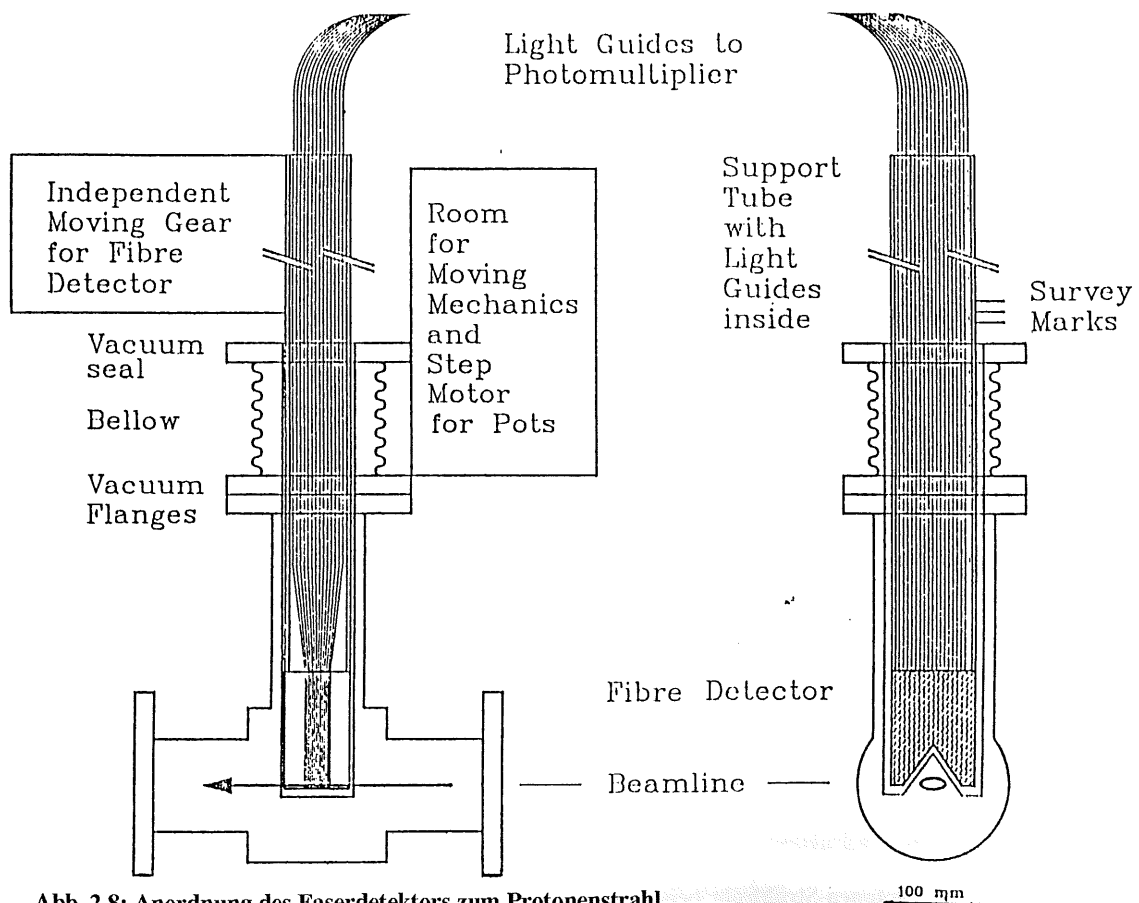
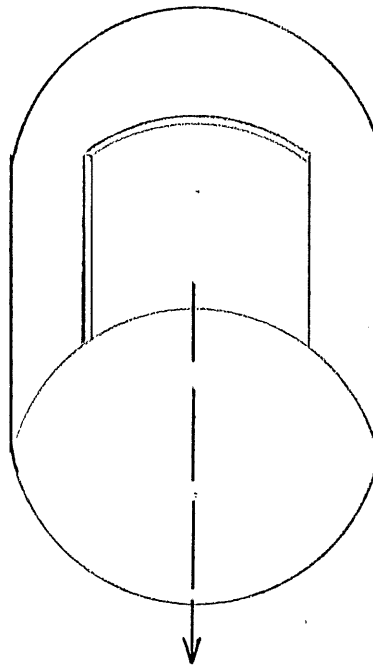


Abb. 2.8: Anordnung des Faserdetektors zum Protonenstrahl



Strahlrichtung

Abb. 2.9: Die Fenster des Einschubs

Der Querschnitt des Protonstrahles ist nicht scharf begrenzt, daher wird der Detektor nur so weit an den Strahl herangefahren, daß das Untergrundsignal durch die in der Randzone fliegenden Teilchen in vertretbaren Grenzen bleibt.

Der kurze zeitliche Abstand der Teilchenbündel von nur 96 ns bei HERA schließt hierfür die bei ISR und SPS verwendeten Driftkammern aus. Bei Silicon-strip-Detektoren befindet sich die erste Stufe der Elektronik nahe den Detektorelementen; beim Einsatz in den Vorwärtsspektrometern müßte eine strahlungsunempfindliche, besonders teure Elektronik verwendet werden.

Bei H1 werden die verfahrbaren Gefäße daher mit Detektoren aus szintillierenden Fasern bestückt, die durch positionsempfindliche Photomultiplier ausgelesen werden.

Da die mit den Spektrometern zu untersuchenden Teilchen in zwei Ebenen abgelenkt werden können, ist die gewünschte Impuls- und Ortsauflösung nur möglich, wenn die Faserdetektoren innerhalb eines Vakuumeinschubs in mehreren, geeigneten Orientierungen angeordnet werden.

Sollte der Protonenstrahl von seiner Sollbahn abweichen und direkt durch den Faserdetektor gehen, so wären nicht nur die szintillierenden Fasern, sondern auch der angeschlossene Photomultiplier von Zerstörung bedroht. Um die im Falle eines solchen instabilen Strahles schnell zurückzufahrende Masse zu reduzieren, kann auch der Faserdetektor selbst mit Hilfe eines zweiten Linearantriebs gegenüber dem verfahrbaren Einschub bewegt werden. Dadurch wird außerdem das genaue Ausrichten der Detektorelemente relativ zum Protonenstrahl erleichtert.

Faserdetektoren werden durch das parallele Verkleben szintillierender Fasern in mehreren Lagen hergestellt. Im Falle runder Fasern vermeidet man Informationsverlust bei Teilchen, die nicht durch die Fasermitteln laufen, indem die Faserlagen versetzt zueinander angeordnet werden, wie Abbildung 2.10 zeigt. Eine zur Impulsbestimmung notwendige örtliche Auflösung von  $50 \mu\text{m}$  ist möglich.

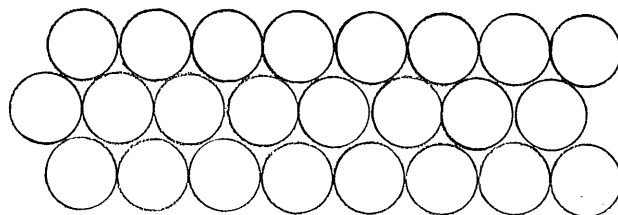


Abb. 2.10: Dreilagiger Faserdetektor

Damit sich mechanische Vibrationen im Bereich einiger Hertz nicht auf die Detektorelemente übertragen, ist es günstig, schwingungsdämpfende Einrichtungen zwischen dem Strahlrohr und der Detektoreinrichtung einzusetzen [ 7], [ 8].



## 2.3 Funktionsweise von Szintillatoren

In einem szintillierenden Lichtleiter wird beim Durchtritt eines Teilchens ein kleiner Lichtpuls erzeugt und weitergeleitet.

Dieser Lichtpuls entsteht, indem das Szintillatormaterial durch Kollisionen einen Teil der kinetischen Energie des Teilchens aufnimmt und dabei kurzzeitig energetisch angeregt wird. Diese übertragene Energie, also der Energieverlust des Teilchens, wird anschließend unter anderem als sichtbares Licht emittiert. Man bezeichnet diesen Vorgang als Szintillation.

Es wird zwischen anorganischen und organischen Szintillatoren unterschieden. Bei den anorganischen Szintillatoren handelt sich um Ionenkristalle, vorwiegend wird NaJ verwendet. In der Hochenergiephysik werden überwiegend organische und hiervon wiederum am häufigsten die im Folgenden erläuterten Plastik-Szintillatoren benutzt [ 9].

### 2.3.1 Organische Szintillatoren

Bei diesen Materialien, die als Flüssigkeiten und polymerisierte Festkörper Verwendung finden, bilden aromatische Kohlenwasserstoff-Verbindungen die Grundlage des Szintillationsprozesses. Der Vorgang der Szintillation beruht hierbei auf der Anregung von Molekülzuständen in einem primären Fluoreszenzstoff. Beim Durchgang ionisierender Strahlung werden dessen Elektronen einen Teil der kinetischen Energie der Teilchen aufnehmen.

Das von diesem primär angeregten Stoff emittierte Licht liegt im UV-Bereich und ist nicht optimal an die Empfindlichkeit der Photokathode des Photomultipliers angepaßt. Man ist bestrebt, Photonen im längerwelligen, sichtbaren Bereich zu erhalten, in dem die Photokathode wesentlich empfindlicher ist. Deshalb wird dem Szintillator ein zweites, fluoreszierendes Material beigemischt, das die Bezeichnung "Wellenlängen-Schieber" trägt.

Die Moleküle des Wellenlängen-Schiebers werden durch das emittierte UV-Licht angeregt. Deren Elektronensystem besitzt, verglichen mit dem primär angeregten Material, zusätzliche Energieniveaus geringer Abstände. Daher ist der Wellenlängen-Schieber in der Lage, auch im längerwelligen, sichtbaren Bereich zu emittieren. Das Schema der Energieniveaus zeigt Abbildung 2.11.

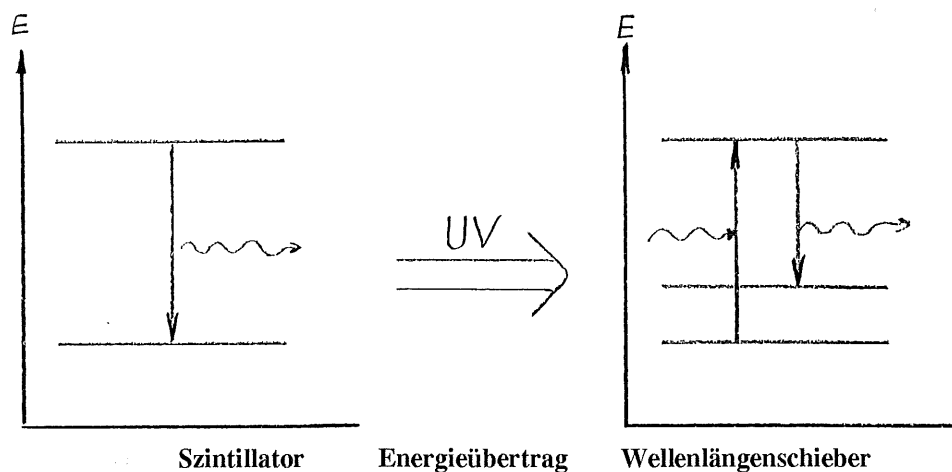


Abb. 2.11: Energieniveaus von Szintillator und Wellenlängenschieber

Diese beiden aktiven Komponenten des Szintillators werden in einer organischen Flüssigkeit gelöst oder mit dem Monomer einer zu polymerisierenden organischen Substanz vermischt; die Polymerisierung kann dann in jeder gewünschten Form erfolgen.

Szintillierende Plastikfasern aus Polystyrol ( Brechungsindex 1,618 ) besitzen einen Mantel aus Polymethylmethacrylat ( Brechungsindex 1,504 ) entsprechend Abbildung 2.12, so daß die Fortpflanzung des durch Szintillation entstandenen Lichtes in der Faser durch Totalreflexion an der Ummantelung unterstützt wird [ 10].

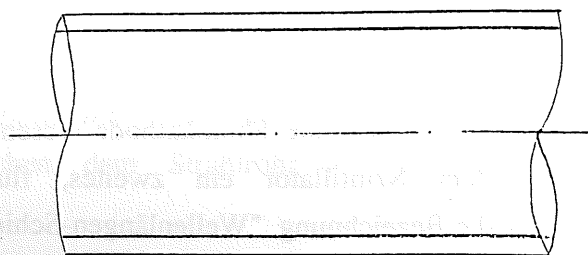


Abb. 2.12: Kern und Mantel einer runden szintillierenden Faser

## 2.4 Photomultiplier

Ein Photomultiplier (*Sekundärelektronenvervielfacher*) besteht aus einer Hochvakuumröhre, in der zu messende Lichtquanten in elektrische Signale umgewandelt und auf meßbare Größe verstärkt werden. Abbildung 2.13 stellt den prinzipiellen Aufbau eines Photomultipliers dar.

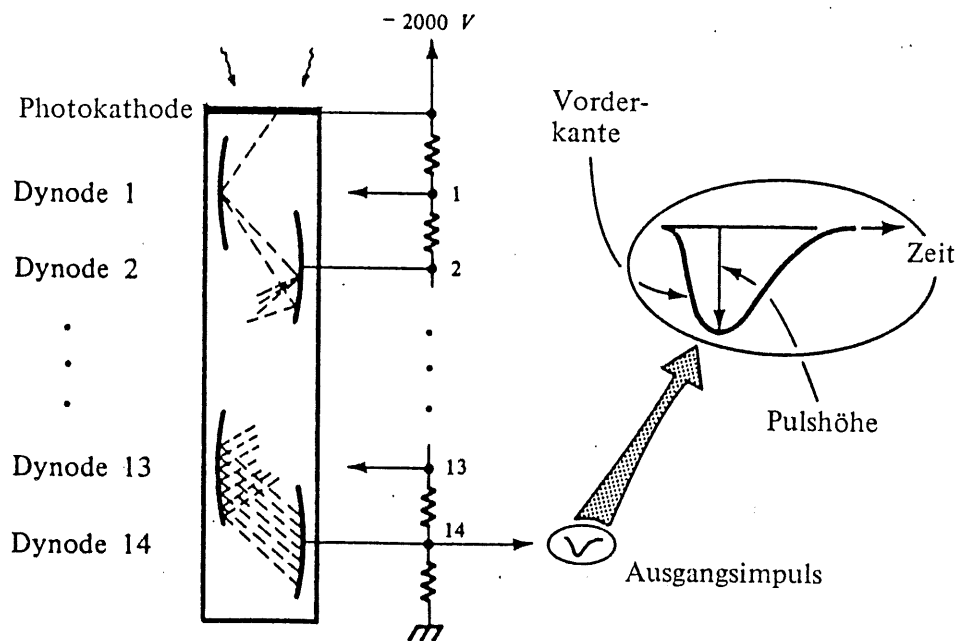


Abb. 2.13: Aufbau eines Photomultipliers [ 11]

Das Eintrittsfenster eines Photomultipliers ist auf seiner Rückseite mit einer Bialkali-Photokathode beschichtet, aus der durch die Energie der eintretenden Photonen Elektronen ausgelöst werden (*optischer Photoeffekt*). Die ungerichtet austretenden Elektronen werden durch Gitter, an die eine Hochspannung angelegt ist, in Richtung der Photomultiplier-Rückseite fokussiert. In der Vakuumröhre sind hintereinander mehrere Elektroden aus einem Material mit hohem Sekundäremissionsfaktor angeordnet, die in Abstufungen von jeweils 100-200 V gegenüber der Photokathode unter Hochspannung stehen.

Ein Elektron, das durch das elektrische Feld in Richtung der nächstgelegenen Elektrode beschleunigt wurde, kann dort beim Aufprall durch Abgabe der zugeführten kinetischen Energie mehrere Sekundärelektronen auslösen. Dadurch findet eine Verstärkung des Signals statt. An der Anode als letzter Elektrode kann man das um mehrere Zehnerpotenzen verstärkte Signal abgreifen.

Die Form des Ausgangssignals entspricht nicht vollständig derjenigen des eingegangenen Lichtpulses, da die Laufzeiten der an der Photokathode ausgelösten Elektronen zur ersten Dynode variieren (*jitter*). Bedingt ist dies zum Einen durch unterschiedliche Austrittsgeschwindigkeiten der Elektronen aus der Photokathode, zum Anderen durch deren unterschiedliche Weglängen vom Emissionspunkt zur ersten Dynode.

## 2.4.1 Der positionsempfindliche Photomultiplier XP 1724 von Philips

### 2.4.1.1 Aufbau

Es handelt sich um einen Photomultiplier, dessen Eintrittsfenster entsprechend Abbildung 2.14 in 96 quadratische Segmente der Größe 2,54 mm x 2,54 mm unterteilt ist, auf denen man ebensoviele szintillierende Fasern anordnen kann, um diese über 96 getrennte elektrische Anschlüsse selektiv auszulesen.

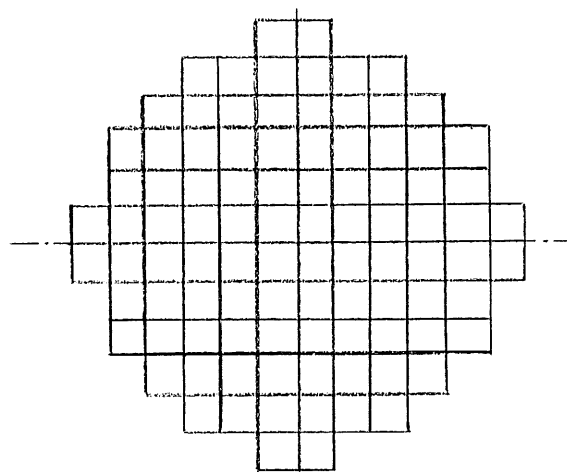


Abb. 2.14: Die Pixelmatrix des Photomultipliers

Abbildung 2.15 zeigt den Aufbau des positionsempfindlichen Photomultipliers XP 1724 von Philips. In einer allen Kanälen gemeinsamen, evakuierten Glasröhre befinden sich zwei fokussierende Gitter, neun nicht unterteilte Metallfolien-Dynoden mit jeweils 96 trichterförmigen Bohrungen zur Beschleunigung und Fokussierung der Photo-Elektronen, eine Metallfolien-Anode mit 96 zylindrischen Bohrungen, sowie auf der dem Eintrittsfenster entgegengesetzten Stirnseite die zehnte Dynode, die in 96 gegeneinander isolierte und mit jeweils einem separaten elektrischen Anschluß versehene Segmente unterteilt ist.

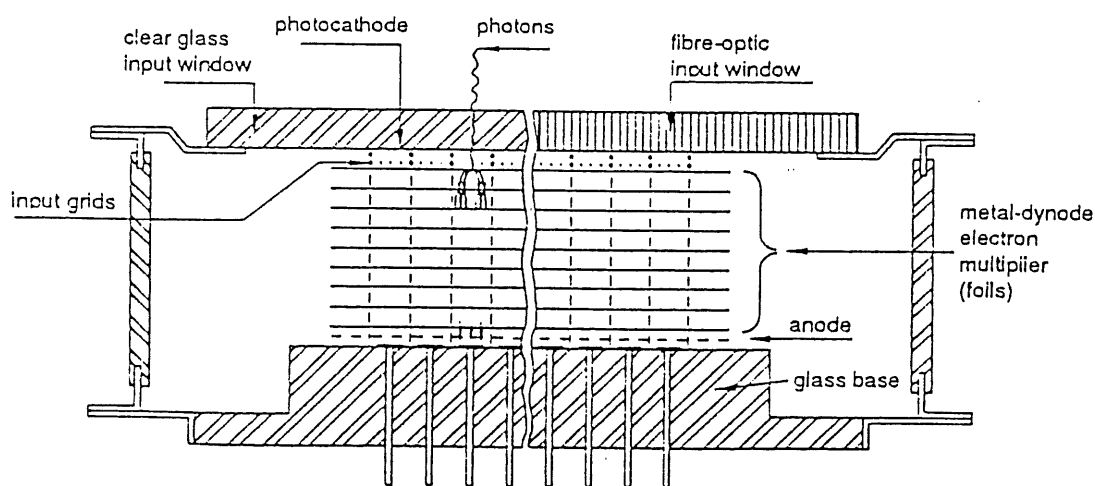


Abb. 2.15: Aufbau eines positionsempfindlichen Photomultipliers [ 12]

Das Licht tritt auf der Vorderseite durch ein Fenster ein, das aus lichtleitenden Faserstücken von 5mm Länge und einigen 100  $\mu\text{m}$  Durchmesser besteht, die mit großem Druck unter Wärmeeinwirkung gesintert wurden und in ihrer Gesamtheit eine Glasplatte von 5mm Dicke bilden. Wegen der lichtleitenden Wirkung der dünnen Fasern, hervorgerufen durch Totalreflexion an der Grenzfläche Faserkern / Fasermantel, wird das einfallende Licht nicht in benachbarte Kanäle gebrochen man nennt dies eine Verhinderung des "optischen crosstalks". Die Auswirkung verschiedener Eintrittsfenster ist in Abbildung 2.16 dargestellt.

Auf der Innenseite des Eintrittsfensters befindet sich eine teildurchlässige Bialkali-Photokathode, von der Elektronen durch das einfallende Licht ausgelöst werden, die sich nach dem Austritt in unterschiedlichen Richtungen bewegen.

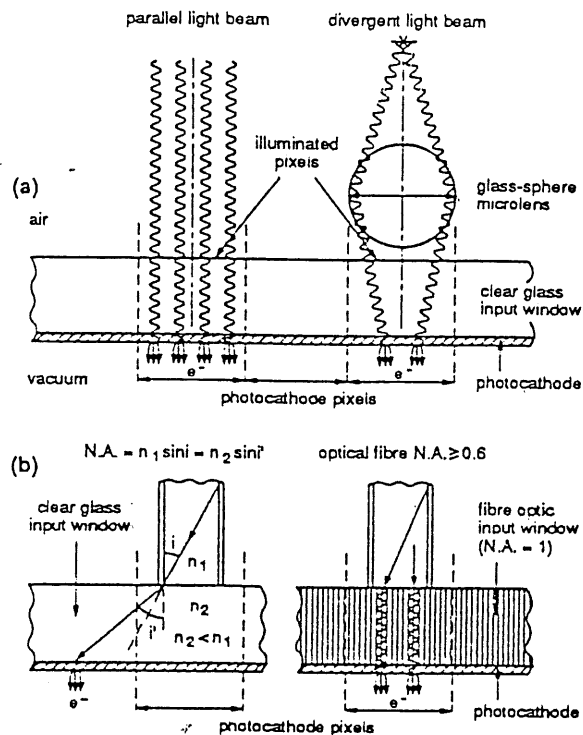


Fig.4 Photocathode illumination:  
 (a) direct, for a parallel and (right) a focused light beam.  
 (b) via an optical fibre onto a glass window and (right) onto a fibre-optic window (contact coupling).

Abb. 2.16: Verschiedene Photomultiplier-Eintrittsfenster [ 12]

Die sich anschließenden Gitter fokussieren diese Elektronen zu diskreten Bündeln, die in Richtung Photomultiplier-Rückseite fliegen. Diese gebündelten Elektronen setzen beim Auftreffen in den trichterförmigen Bohrungen der allen Kanälen gemeinsamen, beschleunigenden Metall-Foliendynoden durch Abgabe ihrer kinetischen Energie weitere Elektronen frei. Indem sich auch diese Elektronen vorrangig in Richtung Photomultiplier-Rückseite bewegen, tritt eine Signalverstärkung auf. Die Anordnung der Gitter und Metallfoliendynoden wird in Abbildung 2.17 deutlich.

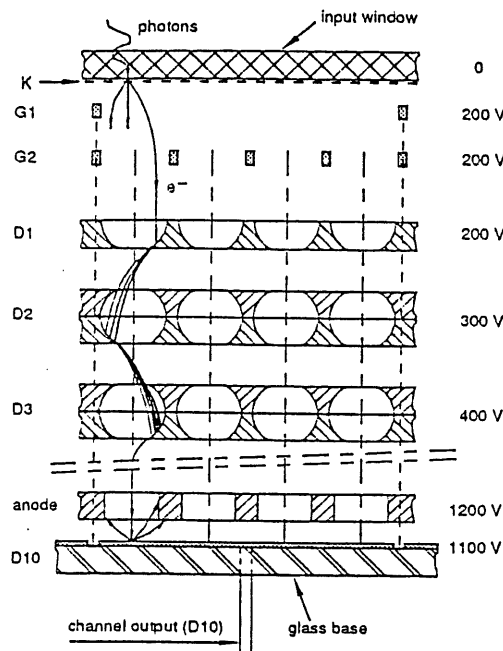


Abb. 2.17: Die Gitter und Metallfoliendynoden [ 12]

Die mehrfach verstärkten Elektronenbündel treffen auf die zehnte, in isolierte Segmente unterteilte Dynode, wo an den Anschlüssen dieser Segmente die diskreten Signale der einzelnen Kanäle abgenommen werden können. Die an der zehnten Dynode freigesetzten Elektronen werden in die Gegenrichtung zu der davorliegenden, ungeteilten Anode beschleunigt und erzeugen dort das aus allen Kanälen summierte Anodensignal.

An der Rückseite des Photomultipliers sind durch die Glaswandung Anschlußdrähte für die Gitter- und Dynodenspannung sowie die Signale der Anode und der 96 Segmente der zehnten Dynode druckdicht durchgeführt [ 12], [ 13].

### 2.4.1.2 Maße und Daten

Der Photomultiplier XP1724 befindet sich in einem Metallgehäuse. Das für diese Arbeit verwendete Exemplar ist gemäß der Abbildung 2.18 mit einem zusätzlichen Kunststoffzylinder umgeben. Dieser Kunststoffzylinder besitzt bei einem Außendurchmesser von 80mm eine Länge von nur  $38 \pm 0.5$ mm. Er ist mit einer zylindrischen Passung des Durchmessers 76mm und einer 3mm-Paßbohrung versehen, so daß der Photomultiplier wohldefiniert und gut reproduzierbar in ein übergeordnetes Gehäuse eingebaut werden kann.

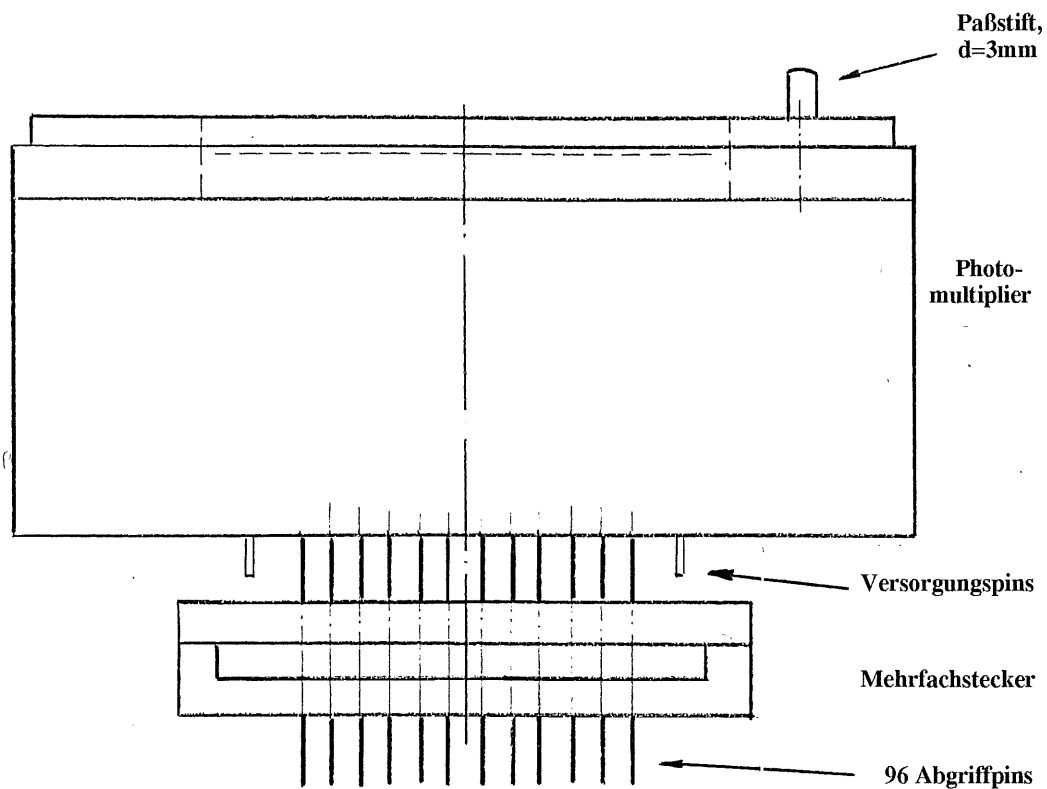


Abb : Seitenansicht von Photomultiplier und Mehrfachstecker

Die Lichtempfindlichkeit der teildurchlässigen Bialkali-Photokathode reicht von 350nm bis 620nm, wobei sich das Lichtempfindlichkeitsmaximum bei  $430\pm 30\text{nm}$  befindet.

Die 96 Anschlußpins dieser unterteilten Dynode, die auf der Rückseite des Gehäuses ebenfalls in der für diesen Photomultiplier charakteristischen Matrix angeordnet sind, werden mit Hilfe eines mitgelieferten Mehrfachsteckers mit der Ausleseelektronik verbunden.

Die 20 Anschlußpins zur Hochspannungsversorgung der fokussierenden Gitter und der beschleunigenden Dynoden sowie zum Abgriff des allen Kanälen gemeinsamen Anodensignals sind auf der Gehäuserückseite auf einem Teilkreis des Durchmessers 38mm um die 96 Segment-Pins herum angeordnet.



Die an den Dynodenpins abgegriffenen Ausgangssignale besitzen eine positive Polarität, weil die auf die zehnte Dynode auftreffenden Elektronen dort weitere Sekundärelektronen auslösen, die sich in Gegenrichtung zur Anode bewegen.

Für die fokussierenden Gitter und die beschleunigenden Dynoden existiert eine gemeinsame Hochspannungsversorgung, deren Wert üblicherweise zwischen -1000V und -1300V gewählt und durch eine geeignete Schaltung in die benötigten Teilspannungen zerlegt wird, wie es die Abb. 2.17 im vorhergehenden Abschnitt zeigt. Bei diesem Aufbau wurde nach entsprechenden Vorversuchen mit -1100V gearbeitet, was zur Folge hatte, daß die Verstärkung des Photomultipliers etwa  $10^6$  betrug [ 13].

### 3. Die Aufgabenstellung

Um den für das H1-Vorwärtsspektrometer geeignetsten positionsempfindlichen Photomultiplier zu bestimmen, sind detaillierte Tests notwendig.

Es existiert ein positionsempfindlicher 64-Kanal-Photomultiplier ( H 4139-20 ) von Hamamatsu, der bereits umfangreichen Tests unterzogen wurde. Vor einer Entscheidung sollte ein Exemplar des Typs XP 1724 von Philips auf seine relevanten Eigenschaften untersucht werden.

Der erste Teil der Aufgabe bestand darin, einen geeigneten Versuchsaufbau zu erstellen, um den Photomultiplier mit Versorgungsspannungen und Eingangslichtpulsen zu versehen sowie die Ausgangssignale abzugreifen und diese in einer sinnvollen Weise darzustellen. Hierzu mußten Leuchtdioden- und Faserhalter erstellt werden, die einen stabilen und reproduzierbaren Kontakt zwischen einer LED und einer Faser sowie den Fasern und dem Eintrittsfenster des Photomultipliers gewährleisten und ein definiertes Verschieben der Fasern auf der Oberfläche des Eintrittsfensters zur optimalen Faserpositionierung ermöglichen. Die Auswertung der Signale, die über einen Camac-Aufbau bzw. den im Abschnitt "Die Analog-Digital-Wandler" beschriebenen Umwandler der Firma Struck dem Rechner ( Apple Macintosh ) zugeleitet wurden, erfolgte mit Hilfe von Programmen, die in der Programmiersprache LabVIEW erstellt sind.

Der zweite Teil der Aufgabe bestand in den Messungen am Photomultiplier mit Hilfe des oben erwähnten Aufbaus. Hierzu wurden zuerst vorbereitende Messungen zum Kennenlernen und Abstimmen des Versuchsaufbaus durchgeführt, um im Folgenden die Eigenschaften des Photomultipliers bezüglich Signal-Übersprechen zwischen den Kanälen, Verstärkung der Kanäle und Homogenität der Empfindlichkeit einzelner Pixel zu untersuchen.

## 3.1 Fragestellungen

### 3.1.1 Crosstalk

Nicht alle an der Bialkali-Photokathode oder den Dynoden freigesetzten Elektronen werden oder bleiben so fokussiert, daß sie dasjenige Segment der unterteilten zehnten Dynode erreichen, dem sie durch das einfallende Licht zuzuordnen waren.

Indem ein oder mehrere Elektronen in den Nachbarkanal wechseln, wie es in Abbildung 3.1 dargestellt ist, wird das Signal an dessen Ausgang vergrößert, während das Signal am Ursprungskanal kleiner ausfällt. Dieser Vorgang trägt die Bezeichnung "elektronischer Crosstalk", wobei das Überwechseln der Elektronen an jeder Stelle zwischen Photokathode und zehnter Dynode stattfinden kann.

Man mißt den elektronischen Crosstalk, indem man jeweils nur auf einen Kanal mit Hilfe einer Glasfaser ein optisches Eingangssignal gibt und das elektrische Ausgangssignal sowohl dieses Kanals als auch der umliegenden Kanäle ermittelt, wobei nicht nur die direkten Nachbarkanäle betrachtet werden.

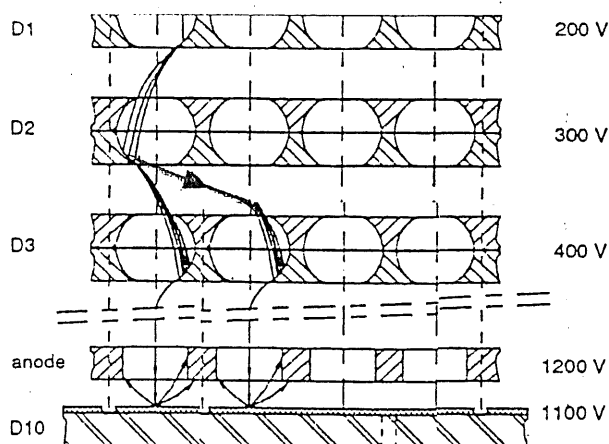


Abb. 3.1: elektronischer Crosstalk

### 3.1.2 Signalverstärkung / Uniformität

Beleuchtet man alle Kanäle des PSPM mit der gleichen Lichtquelle, so liefert nicht jeder Kanal ein gleichgroßes elektrisches Ausgangssignal; das heißt, die 96 Kanäle des PSPM besitzen eine unterschiedliche Verstärkung. Gibt man nacheinander auf jeweils einen der Kanäle das gleiche optische Eingangssignal, beispielsweise durch das Umstecken einer mit einer LED versehenen Faser, so mißt man die Verstärkung der einzelnen Kanäle isoliert voneinander. Man nennt dies eine differentielle Messung. Die Lieferfirma Philips hat das Datenblatt bezüglich der Verstärkung der verschiedenen Kanäle mit Hilfe einer integralen Messung erstellt. Dabei beleuchtet man das Eintrittsfenster des Photomultipliers insgesamt mit einer Lichtquelle und liest alle Kanäle gleichzeitig aus.

Das integrale Verfahren, bei dem benachbarte Kanäle gleichzeitig Licht erhalten, entspricht nicht der in Aussicht stehenden Anwendung, bei der nur wenige Kanäle, die nicht notwendigerweise benachbart sind, gleichzeitig beleuchtet werden. Schwächung eines Kanals durch elektronischen Crosstalk führt bei diesem Verfahren insgesamt nicht zu einem Verlust an Signalintensität, da gleichzeitig in den Nachbarkanälen eine Signalvergrößerung auftritt. Es ergibt sich daraus, daß das mit Hilfe des integrale Messverfahrens erstellte Philips-Datenblatt zu hohe Werte der Verstärkung liefert.

Um der zukünftigen Anwendung des PSPM gerecht zu werden, war ein neues Datenblatt der Verstärkung mit Hilfe des differentiellen Messverfahrens zu erstellen.

## 3.2 Organisation und Ablauf der Arbeit

Der positionsempfindliche Photomultiplier XP 1724 von Philips wurde von zwei Diplomanden in gemeinsamer Arbeit untersucht. Die dazu notwendigen Vorbereitungen und Messungen,

- mechanischer Aufbau
- elektronischer Aufbau
- Ausleseprogramme
- vorbereitende Messungen
- Messungen am Photomultiplier,

ließen sich in Arbeitsteilung durchführen: Der elektronische Aufbau wurde vorwiegend von der Gruppe "Technische Entwicklung und Betrieb" geplant und angefertigt, Carsten Wittek entwickelte die Ausleseprogramme in der Programmiersprache LabVIEW und der Autor erstellte gleichzeitig den mechanischen Aufbau.

Die sich daran anschließenden Messungen, welche sich in vorbereitende Messungen zum Verständnis des Aufbaus und Messungen bezüglich des Photomultipliers unterteilen lassen, und die dann folgenden Auswertungen haben beide Diplomanden gemeinsam durchgeführt.

## 4. Der Laboraufbau

Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Versuchsaufbau in seinem lichtdichten Kasten.

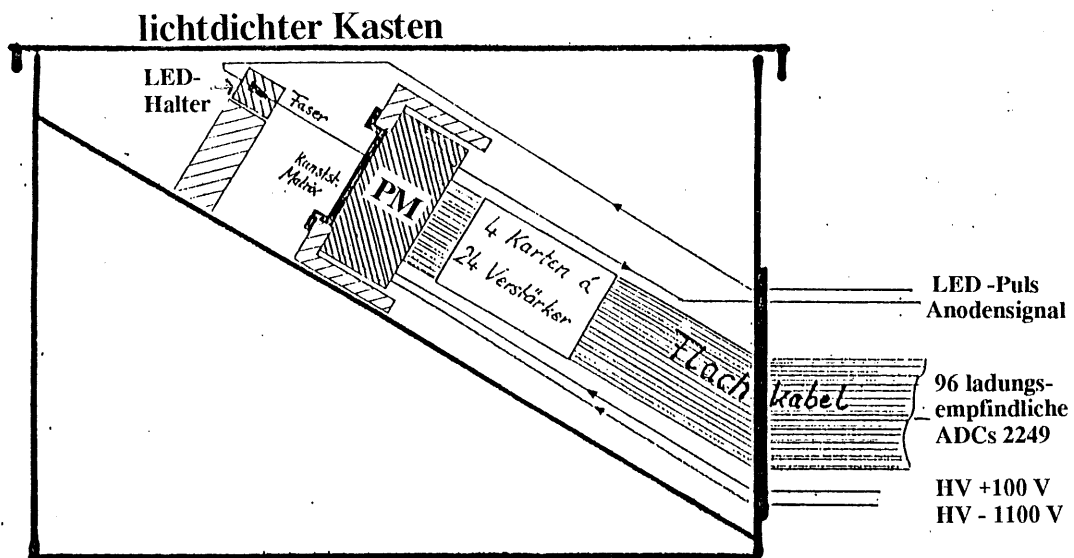


Abb. 4.1: Der Versuchsaufbau

### 4.1 Das Gehäuse

Das Gehäuse dient zur exakten, leicht reproduzierbaren Halterung des Photomultipliers, indem die Frontplatte mit einer zylindrischen Passung zur Aufnahme des Photomultipliers und einem Paßstift zur Absicherung gegen dessen Verdrehen versehen wurde; außerdem bietet es einen gewissen Schutz gegen mechanische Einwirkung. Um ein elektrisches Rauschen des Photomultipliers zu vermeiden, sollte sich vor dessen Vorderseite kein Metall befinden; deshalb wurde die Gehäusefrontplatte ( und auch der Faserhalter ) in Kunststoff angefertigt.

Am Gehäuse montiert sind die Platine zur Spannungsversorgung des Photomultipliers und die Kreuz-Verstell- und Haltevorrichtung für den Faserhalter.

## 4.2 LED-Halter

Um einen zuverlässigen und reproduzierbaren Übergang des Lichtes von der LED zur Faser zu gewährleisten, mußte eine geeignete Vorrichtung gefunden werden, um beide ausreichend straff zu halten und in der gewünschten Weise aufeinander zu positionieren. Sowohl auf ein Verkleben von LED und Faser als auch auf die Verwendung von Silikonöl zur Verbesserung des optischen Überganges wurde nach entsprechenden Vorversuchen verzichtet. Die Abbildung 4.2 zeigt die verwendeten LED-Halter.

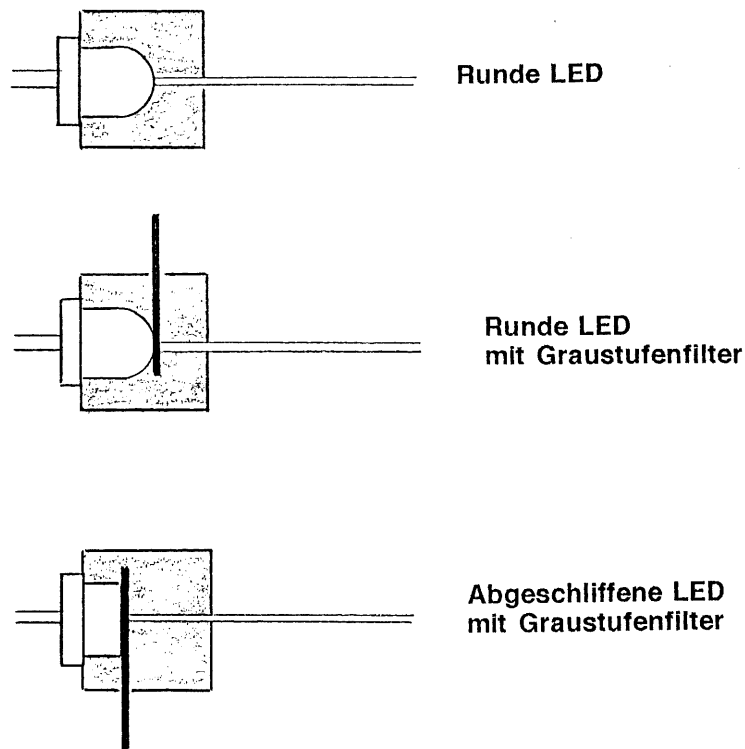


Abb. 4.2: Die LED-Halter

Messungen der Abhängigkeit des Photomultiplier-Ausgangssignals von der eingestellten LED-Puls-Helligkeit ergaben die in der nachstehenden Abbildung 4.3 dargestellte Kurve:

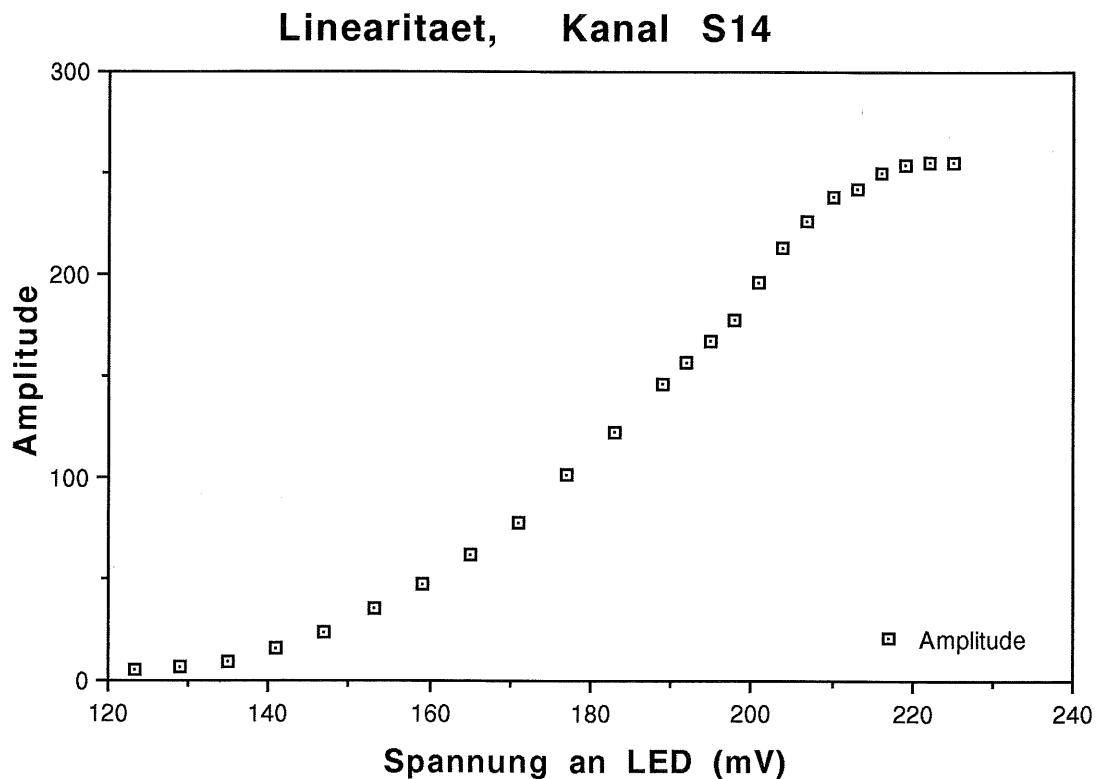


Abb. 4.3: Abhängigkeit des Photomultiplier-Ausgangssignals von der LED-Helligkeit

Die Krümmung im unteren Bereich entspricht dabei der Diodenkennlinie der LED, diejenige im oberen Bereich zeigt eine Sättigungserscheinung des PSPM.

Einerseits ist es erstrebenswert, den Arbeitspunkt der LED so einzustellen, daß er im mittleren, linearen Bereich der Kurve liegt; andererseits entspricht es der angestrebten späteren Anwendung des Photomultipliers im Vorwärts-Spektrometer, ihn mit möglichst kleinen Lichtpulsen zu untersuchen.



Beide Forderungen werden hier erfüllt, indem bei einer Einsellung der LED im mittleren Helligkeitsbereich zwischen dieser und der Faser ein in der Abbildung 4.4 dargestellter Graustufenfilter angeordnet ist, der das Licht vor dem Eintritt in die Faser in der gewünschten Weise abschwächt.

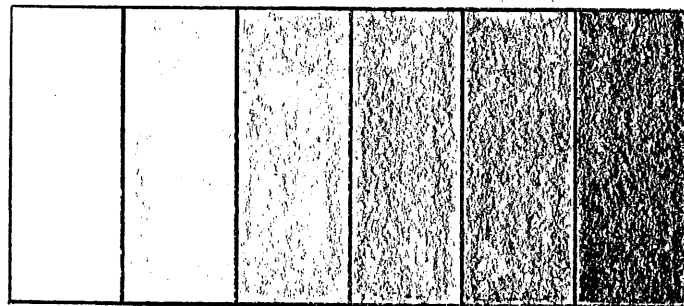


Abb. 4.4: Der Graustufenfilter

Sowohl die LED, die zum Zweck des besseren Lichtübergangs an ihrer Oberseite flachgeschliffen und poliert wurde ( siehe auch Abschnitt "Fasern" ), als auch die Faser sind nicht mit dem zweiteiligen Halter verklebt, sondern nur durch genau angepaßte Bohrungen ausreichend stramm hineingesteckt.

### 4.3 Der Faserhalter

Der Faserhalter, dessen Seitenansicht die Abbildung 4.5 zeigt, hat die Aufgabe, eine oder mehrere Fasern in Bohrungen passenden Durchmessers aufzunehmen und deren durch Koordinaten definierte Positionierung auf der gewünschten Stelle eines der 96 Photomultiplier-Pixel reproduzierbar zu ermöglichen.

Aus drei Gründen wurde Kunststoff als Material des Faserhalters gewählt:

- Die Fasern lassen sich bei Bedarf mit dem Halter verkleben; anschließend kann man Klebstoff, Halter und Fasern soweit gemeinsam abschleifen, bis die Fasern und der Halter eine einheitliche, glatte und ebene Oberfläche bilden.

- Diese Oberfläche darf anschließend unter direkter Berührung auf dem Eintrittsfenster positioniert werden, da Kunststoff weicher als Glas ist und auf diesem keine Kratzer verursacht.
- Metall vor dem Photomultiplier verursacht ein unerwünschtes Rauschen, welches mit dieser Lösung vermieden wird.

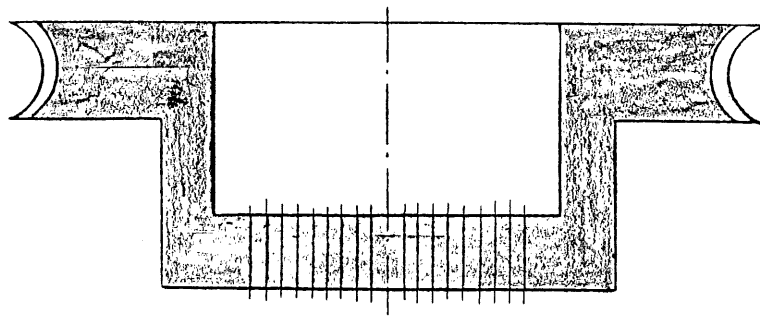


Abb. 4.5: Der Faserhalter

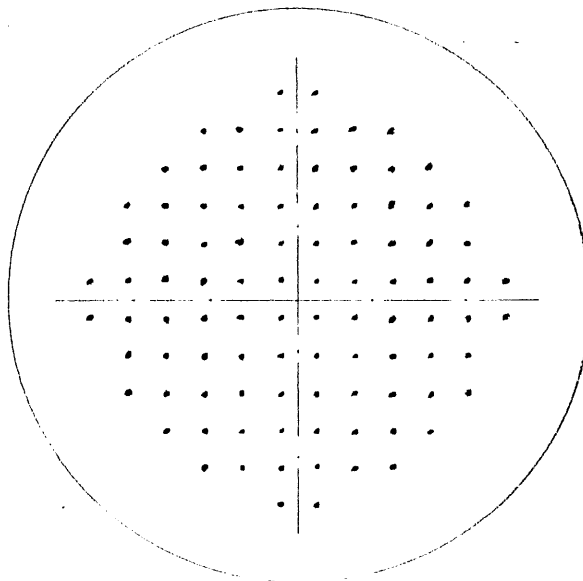


Abb. 4.6: Die Faserhalter-Bohrungsmatrix

Der Faserhalter enthält 96 Bohrungen vom Durchmesser 1,1 mm, die zueinander eine Lagetoleranz von weniger als 0,01 mm haben und gemäß der Pixel-Matrix des Photomultiplier mit einem Mittenabstand von 2,54 mm längs der Achsen angeordnet sind, wie es Abbildung 4.6 zeigt. An der Außenfläche des Halters ist eine Verzahnung angebracht; im eingebauten Zustand ermöglicht ein in Abbildung 4.7 dargestellter Schneckentrieb die Rotation des Halters relativ zum Kreuztisch um den Mittelpunkt der Bohrungs-Matrix, damit mehrere Fasern gleichzeitig auf die Zentren der jeweils dazugehörigen quadratischen Pixel justiert werden können.

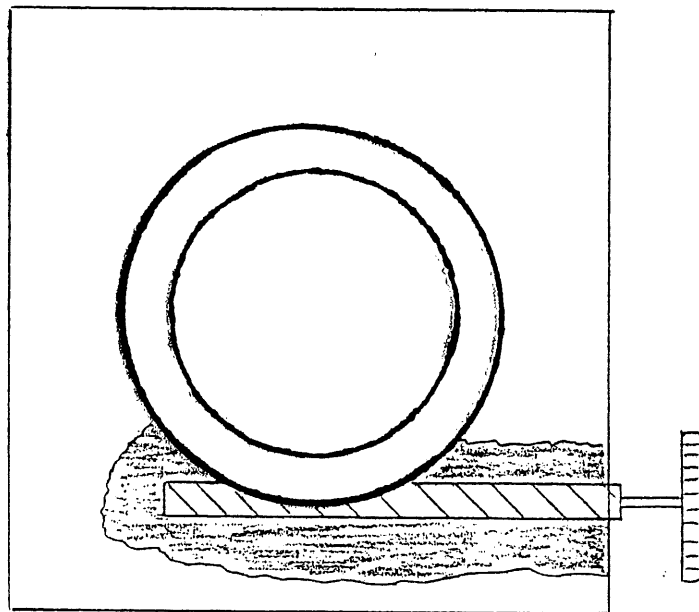


Abb. 4.7: Der Faserhalter-Schneckentrieb

#### 4.4 Der Kreuztisch

Der Faserhalter ist am Gehäuse des PSPM mit Hilfe einer Verstellvorrichtung befestigt, die Abbildung 4.8 schematisch zeigt. Diese Vorrichtung sorgt einerseits dafür, daß die Vorderseite des Faserhalters auf dem Eintrittsfenster des Photomultipliers aufliegt, andererseits erlaubt sie das Verschieben des Halters auf dem Eintrittsfenster längs zweier orthogonaler Achsen.

Beide Achsen sind jeweils mit einer Skala versehen, die ein Einstellen auf 0,05mm ermöglichen, so daß man die Faser auf einer gewünschten Stelle des Pixels plazieren oder die Empfindlichkeits-Variation innerhalb eines Pixels von 2,54 mm x 2,54 mm durch Scannen der Faserposition ermitteln kann. Indem man den Faserhalter außerdem mit Hilfe des Schneckentriebes verdreht, ist es möglich, mehrere Fasern gleichzeitig auf die lichtempfindlichste Stelle ihres zugehörigen PSPM-Pixels zu justieren.

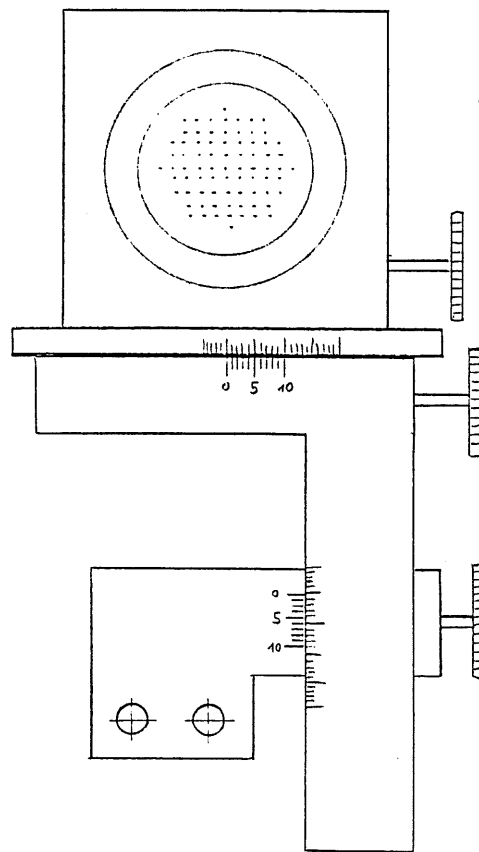


Abb. 4.8: Der Kreuztisch

## 4.5 Lichtleitende Kunststoffasern

Lichtleitende Fasern, die man in runder und quadratischer Ausführung erhalten kann, besitzen üblicherweise Durchmesser / Kantenlängen zwischen 100 und 2000  $\mu\text{m}$ .

Unabhängig von ihrem Querschnitt setzen sich die Fasern zusammen aus einem Faserkern ( core ) aus Polystyrol mit dem Brechungsindex 1,618 und einem Mantel aus Polymethylmethacrylat ( PMMA ) mit dem Brechungsindex 1,504. Die durch die unterschiedlichen Brechungsindizes von Kern und Mantel auftretende Totalreflexion begünstigt die lichtleitende Wirkung. Bei runden Fasern beträgt die Dicke des Mantels 3% des Kerndurchmessers, bei quadratischen Fasern 4% der Kantenlänge des Kerns. Nicht szintillierende Fasern besitzen um den Mantel eine zusätzliche Absorberschicht ( Extra Mural Absorber ), wie es Abbildung 4.9 zeigt, um seitlich auf die Faser fallendes Licht nicht zum lichtleitenden Faserkern durchdringen zu lassen; szintillierende Fasern enthalten im Kernmaterial gelöste Szintillatoren- und Wellenlängenschieber-Moleküle, letztere, um das beim Szintillationsprozeß freigesetzte UV-Licht in das durch Photomultiplier besser auszuwertende sichtbare Licht umzuwandeln. Der für die Fasern zuträgliche Temperaturbereich liegt wegen der beteiligten Materialien zwischen -20 C und +50 C.

Der Grenzwinkel  $\alpha$  der Totalreflexion des Lichtes am Fasermantel berechnet sich zu

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{n_{\text{PMMA}}}{n_{\text{PST}}} \right) = 68,63^\circ$$

Das heißt, daß solches Licht totalreflektiert und von der Faser weitergeleitet wird, das mit der Normalen der Grenzfläche einen Winkel  $\alpha$  größer als  $68,63^\circ$  einschließt.

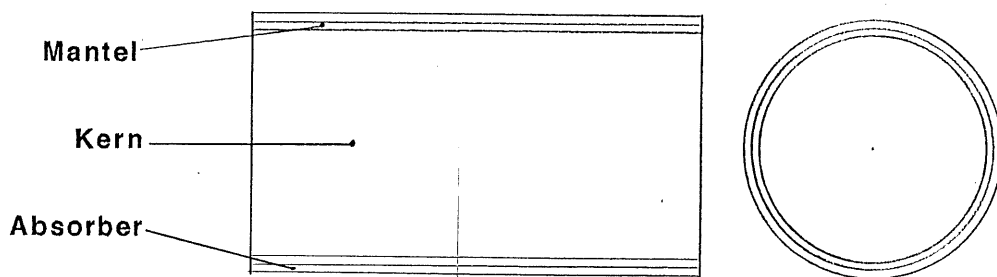


Abb. 4.9: Schnitte durch eine lichtleitende Faser

#### 4.5.1 Handhabung / Bearbeitung

Zur Weiterleitung von Lichtpulsen aus einer gepulsten grünen LED zum Photomultiplier wurden szintillierende und nicht-szintillierende lichtleitende Faserstücke von 1 mm Durchmesser und ca. 8 cm Länge verwendet. Beide Faserarten lieferte die Herstellerfirma Bicon; bei der hier beschriebenen Anwendungsform ergaben sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der jeweils eingesetzten Faserart.

Während der Bearbeitung und der Benutzung der Fasern ist darauf zu achten, die dünne Ummantelung nicht zu beschädigen, da ansonsten die von der Faser übertragene Lichtintensität deutlich abnimmt, wie der Abschnitt "Faserabnutzung" dieser Arbeit zeigt. Unter anderem dürfen die Bohrungen zur Aufnahme der Fasern nicht zu eng bemessen sein; der Faserdurchmesser beträgt stets einige Hundertstel mm mehr als das Nennmaß, so daß man die Fasern in exakte Nennmaß-Bohrungen nur unter erheblichen Kräften einführen kann. Ein Bohrungsübermaß bis zu 0,1 mm kann bei Bedarf nach dem Einstecken der Fasern mit einem geeigneten Klebstoff aufgefüllt werden.

Zur Bearbeitung der Stirnseiten der Faserstücke wurde eine in Abbildung 4.10 dargestellte, dreiteilige Spannzange mit dreifach geschlitztem, passend gebohrtem Aufnehmer verwendet, welcher die Faser auf ihrer empfindlichen Mantelfläche so gleichmäßig und großflächig berührt, daß die Oberfläche keine Beschädigung erfährt.

Die abgeschnittene und von der Spannzange aufgenommene Faser wird mit Naßschleifpapier bis zur Stirnseite der Spannzange abgeschliffen, wobei die Faser eine ebene und zu ihrer Mantelfläche rechtwinklige Stirnfläche erhält.

Anschließend wird mit Autopolitur solange poliert, bis die beim Schleifen entstandenen Riefen selbst unter einer Lupe nicht mehr zu erkennen sind. Eventuelle Reste der Politur werden danach gründlich entfernt.

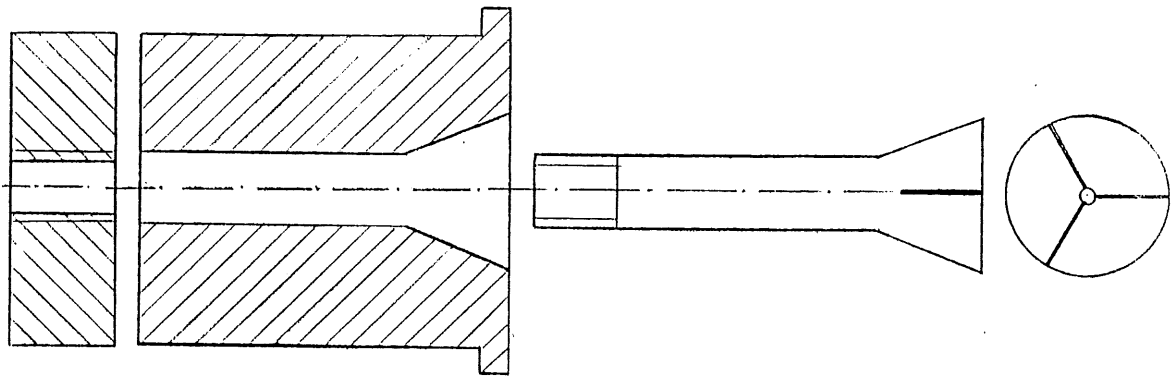


Abb. 4.10: Spannzange mit Stirnansicht

Da sowohl beim Schleifen als auch beim Polieren der Faserstirnfläche die Oberfläche der Spannzange etwas abgetragen wird, wurde die Spannzange aus durchsichtigem Plexiglas hergestellt; ein anderer Kunststoff könnte bei der Bearbeitung störende Verunreinigungen auf der Faserfläche verursachen, PVC beispielsweise könnte anschmelzen und dabei Schlieren erzeugen,

## 4.6 Der Signalweg

Abbildung 4.11 zeigt den Signalweg. Als Eingangssignal in den Photomultiplier dient ein Lichtpuls aus einer LED, der dem Eintrittsfenster des Photomultipliers mit Hilfe eines kurzen Faserstückes zugeführt wird. Dieser Puls wird durch einen Pulsgenerator erzeugt und in einem LED-Pulser der Verwendung angepaßt; die Höhe des Pulses wird dem Eingangsspannungsbereich des ADCs angepaßt.

Die Intensität des Pulses schwankte teilweise sehr stark, und dies ist möglicherweise auf unterschiedlich lange Lichtwege vom kleinen lichterzeugenden Kristall im Mittelpunkt der LED bis zur Außenfläche des Kunststoffgehäuses der LED zurückzuführen.

Deshalb wurde das Kunststoffgehäuse der LED entsprechend dem Abschnitt "Faserbearbeitung" durch Abschleifen so weit verkürzt, bis der Kristall annähernd an der Außenfläche liegt.

Die LED erzeugt erst dann einen Lichtpuls, wenn der Rechner das Auslesen der Daten, die der vorausgehende Puls lieferte, abgeschlossen hat; der an die LED gegebene Spannungspuls ist auch das Startsignal für die ADCs.

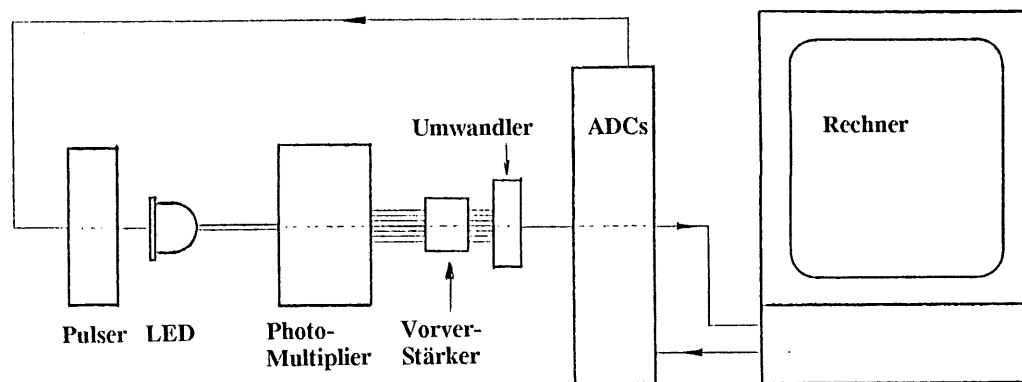


Abb. 4.11: Der Signalweg

Nachdem der Lichtpuls vom Photomultiplier in ein elektrisches Signal umgewandelt und dabei etwa um den Faktor  $10^6$  verstärkt wurde, greift man dieses Signal mit Hilfe eines Vielfachsstecker an den Segmentpins ab und führt es über sehr kurze Flachkabelstücke vier Verstärkerkarten zu. Jede dieser Karten enthält vierundzwanzig baugleiche Verstärker-Schaltungen; um unvermeidliche Fertigungstoleranzen rechnerisch korrigieren zu können, wurden alle 96 Schaltungen einer Eichmessung unterzogen.



Die Verstärkerkarten sind über vier lange Flachkabel mit vier Umwandlern, ausgeführt als Einsteckkarte für jeweils 24 Kanäle, verbunden. Für diese Umwandler, die die Aufgabe haben, die Signale dem Koaxial-System anzupassen, wurde ebenfalls eine Eichmessung durchgeführt.

Zur Messung der Uniformität der Photomultiplier-Kanäle folgt ein spezieller, im nächsten Abschnitt beschriebener Analog-Digital-Umwandler (Flash-ADC) in Form einer VME-Einsteckkarte, der jeweils nur einen Kanal gleichzeitig umwandelt.

Die Zuordnung des gewünschten Kanals zum Flash-ADC nimmt man durch Auswahl des entsprechenden Umwandler-Ausgangs vor. Das Auslesen des Flash-ADC durch den Rechner erfolgt unter Benutzung eines MacVEE-Interfaces über den VME-Bus.

Zur Messung des Signal-Übersprechens des Photomultipliers ( Crosstalk ) müssen mehrere bzw. alle Kanäle des Photomultipliers gleichzeitig ausgewertet werden, wozu der Flash-ADC nicht in der Lage ist. Man verwendet deshalb bei dieser Aufgabe eine Anordnung von 96 ladungsabhängigen Camac-ADCs; hierbei ist jeder der 96 Kanäle der Umwandler mit jeweils einem der ADCs verbunden.

## **4.7 Die Analog-Digital-Wandler ( ADCs )**

Die vom Photomultiplier gelieferten, auszuwertenden Signale liegen in Form analoger Pulse vor, die zum Zweck ihrer Auswertung durch einen Rechner zuvor mit Hilfe von Analog-Digital-Wandlern in digitale Signale umgewandelt werden müssen. Zur Bestimmung der Uniformität der Photomultiplier-Kanäle findet hierbei ein anderer ADC Anwendung, als zur Untersuchung des Crosstalks.

Untersucht man das Signal-Übersprechen des Photomultipliers ( Crosstalk ), so müssen hierzu mehrere bzw. alle Kanäle des Photomultiplier gleichzeitig ausgewertet werden, obwohl nur ein Kanal durch eine LED-Faser-Einheit Licht erhält. Unter Berücksichtigung der verfügbaren technischen Ausstattung wurden zu diesem Zweck 96 ladungsabhängige Camac-ADCs, verteilt auf 8 Steckkarten, eingesetzt. Die Zuordnung der Umwandler-Anschlüsse zu diesen ADCs erfolgte durch 96 gleichlange Koaxial-Kabel. Zur gleichzeitigen Auslese aller ADCs und anschließenden Darstellung aller Kanäle fand ein in der Programmiersprache LabVIEW geschriebenes Programm Verwendung.

Für die Untersuchung der relativen Verstärkungen ( *Unifomität* ) aller Photomultiplier-Kanäle gibt man auf jeweils einen Kanal ein optisches Signal und liest auch nur diesen Kanal aus.

Dazu wurde ein *Flash-ADC* benutzt, mit dem man bei der nachstehend beschriebenen Anwendungsform jeweils nur einen Kanal gleichzeitig ausliest. Dieser Flash-ADC ermittelt die Ladung und die Pulshöhe der eingehenden analogen Signale, so daß Vielkanalspektren dieser beiden Größen mit Hilfe eines LabVIEW-Programmes, das nicht mit dem bei den Camac-ADCs verwendeten identisch ist, erstellt werden konnten.

#### 4.7.1 Der Flash-ADC

Bei dem verwendeten Flash-ADC handelt es sich um das Modell DL 515 der Firma Struck, eine VME-Einsteckkarte mit vier unabhängigen ADCs, die mit einer Frequenz von jeweils 250MHz eingehende Signale aufnehmen und umwandeln. Um die Frequenz der Signalaufnahme auf 1GHz zu erhöhen, wurden diese vier ADCs *interleaved* eingesetzt. Dies bedeutet, daß das analoge Signal zuerst den ADC 0 erreicht, von dort aus den ADC 1, daraufhin den ADC 2 und abschließend den ADC 3. Die Verzögerung zwischen den ADCs beträgt dabei jeweils 1ns; der ADC 3 wird mit 50 Ohm abgeschlossen. Indem nun die von den vier ADCs erfaßten Daten gemäß ihrer zeitlichen Abfolge zugeordnet und verknüpft werden, erhält man eine um der Faktor vier vergrößerte nutzbare Signalverarbeitungs-Frequenz.

Die ADCs, deren Speichertiefe 2kByte pro Kanal ( mit 1 Byte = 8 bit pro Sample ) beträgt, haben eine Eingangsimpedanz von 10 kOhm, die eingehenden Signale dürfen eine Spannung im Bereich zwischen 0V und -2V besitzen.

Der Flash-ADC besitzt die Steuer-Eingänge *Start* und *Stop*, wodurch die andernfalls vollständig durch Programme automatisierte Steuerung des ADCs beeinflussbar wird. Nachdem der Flash-ADC durch eine Aufhebung des Status "Ende der Umwandlung" zurückgesetzt wurde, kann eine nun folgende Umwandlung eingehender analoger Signale durch ein Start-Signal eingeleitet werden, das je nach Anwendungsform von der Steuerungs-Software erzeugt oder extern auf den Start-Eingang gegeben wird. Jeder der vier ADCs des Flash-ADC hat einen 2kByte großen RAM, der nun beschrieben wird, wobei ein eingehendes Sample ein Byte belegt.

Wird der Flash-ADC im *Auto-Stop-Modus* betrieben, so wird die Umwandlung beendet und der Status "Ende der Umwandlung" gesetzt, sobald die Speicher gefüllt sind. Diese Betriebsart wurde auch für die vorliegende Arbeit verwendet, das Start-Signal dabei extern geliefert; nur der Status "Ende der Umwandlung" wurde als Information über den aktuellen Zustand des Flash-ADC genutzt.

Außerhalb des Auto-Stop-Modus muß die Umwandlung durch ein Stop-Signal beendet werden, das an den *Stop-Eingang* gelegt oder von der Steuer-Software erzeugt wird. Ohne dieses Signal wird der Flash-ADC beim Erreichen der Kapazität seiner Speicher dazu übergehen, diese bei Byte 0 beginnend zu überschreiben. Die zuvor darin gespeicherten Daten gehen ungelesen verloren, da ein Auslesen der Speicher nur nach abgeschlossener Umwandlung und bei gesetztem Status "Ende der Umwandlung" möglich ist.

Der Einsatz der schon beschriebenen gepulsten LED zur Untersuchung des Photomultipliers lieferte das Steuersignal *Start* des Flash-ADC, indem der LED-Puls auch dem Start-Eingang des Flash-ADC zugeführt wurde.

Da das Lichtsignal der LED im Photomultiplier zwangsläufig eine Verzögerung erfährt, mußte das analoge Photomultiplier-Ausgangssignal anschließend nur noch um 132ns verzögert werden, wodurch es fast unverfälscht am Flash-ADC ankam. Ein Abschwächer direkt vor dem Flash-ADC hatte den Zweck, die Signalspannung dem Eingangsspannungs-Bereich des Flash-ADC anzupassen [ 14].

## 4.8 Die Ausleseprogramme

Die Programme zum Auslesen des Flash-ADCs und der ladungsabhängigen Camac-ADCs sowie zur graphischen und numerischen Darstellung der Daten sind in der Programmiersprache LabVIEW erstellt worden. Diese graphische Programmiersprache wurde entwickelt, um die Erfassung und Analyse von ADC-Daten mit Hilfe von Rechnern zu ermöglichen, indem ein gewünschtes Meßgerät durch das Programm nachgebildet und auf dem Bildschirm dargestellt wird.

Ein Programm in LabVIEW, das dort Virtual Instrument genannt wird, besteht aus graphischen Symbolen aus der erwähnten Sammlung, die auf einem den Programmablauf visualisierenden *Diagramm* angeordnet und mit Linien verbunden werden, die den Datenfluß darstellen; es benötigt keine schriftlichen Befehle. Zu jedem solchen Diagramm gehört ein *Front Panel*, das das nachgebildete Meßinstrument graphisch darstellt und mit dessen Hilfe man das fertige Programm benutzt, indem beispielsweise Schalter betätigt oder Anzeigen abgelesen werden.

# 5. Die Messungen

## 5.1 Vergleich der Vorverstärker

Die 96 Kanäle des Photomultipliers sind zur Auslese der Ausgangssignale über sehr kurze Flachkabel mit 96 identisch aufgebauten Vorverstärkern verbunden. Diese Schaltungen sind auf vier Platinen mit den Bezeichnungen *Nord*, *Ost*, *Süd* und *West* verteilt.

Die Schaltungen verstärken wegen ihrer Fertigungstoleranzen nicht alle um den gleichen Faktor. Um in den nachfolgenden Messungen die Kanäle des Photomultipliers vergleichen zu können, muß man die relative Verstärkung aller Verstärker kennen. Verstärker mit einer nicht tolerierbar großen Abweichung sind dann zu korrigieren.

In den folgenden Abbildungen 5.1 - 5.4 ist die relative Verstärkung der Verstärker, sortiert nach Platinen, dargestellt.

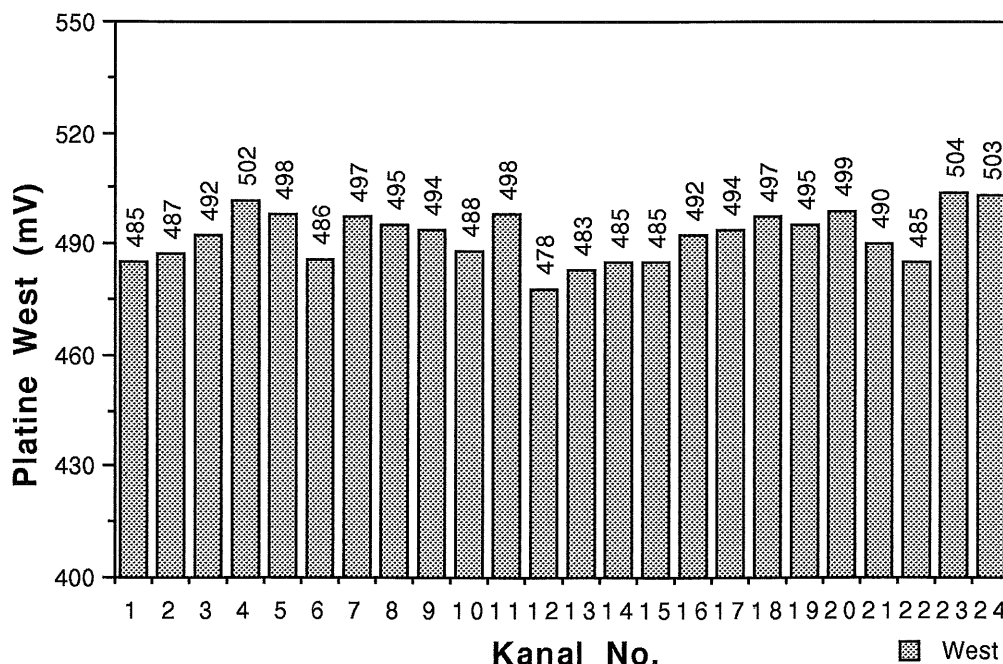


Abb. 5.1: relative Verstärkung der Vorverstärker (Platine West)

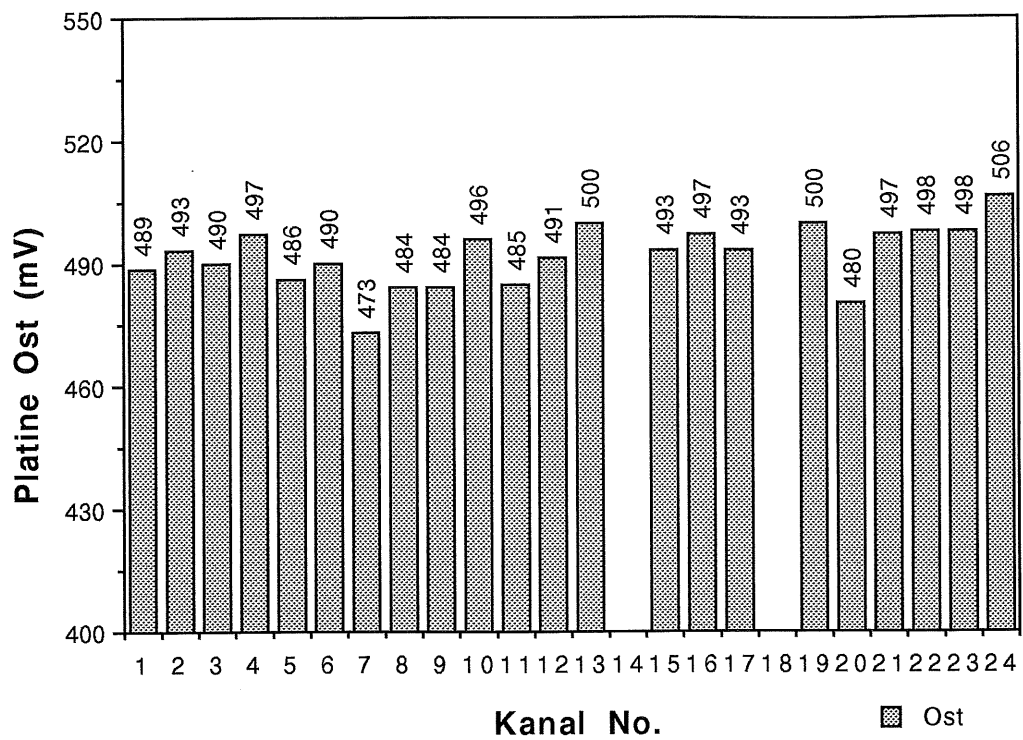


Abb. 5.2: relative Verstärkung der Vorverstärker ( Platine Ost )

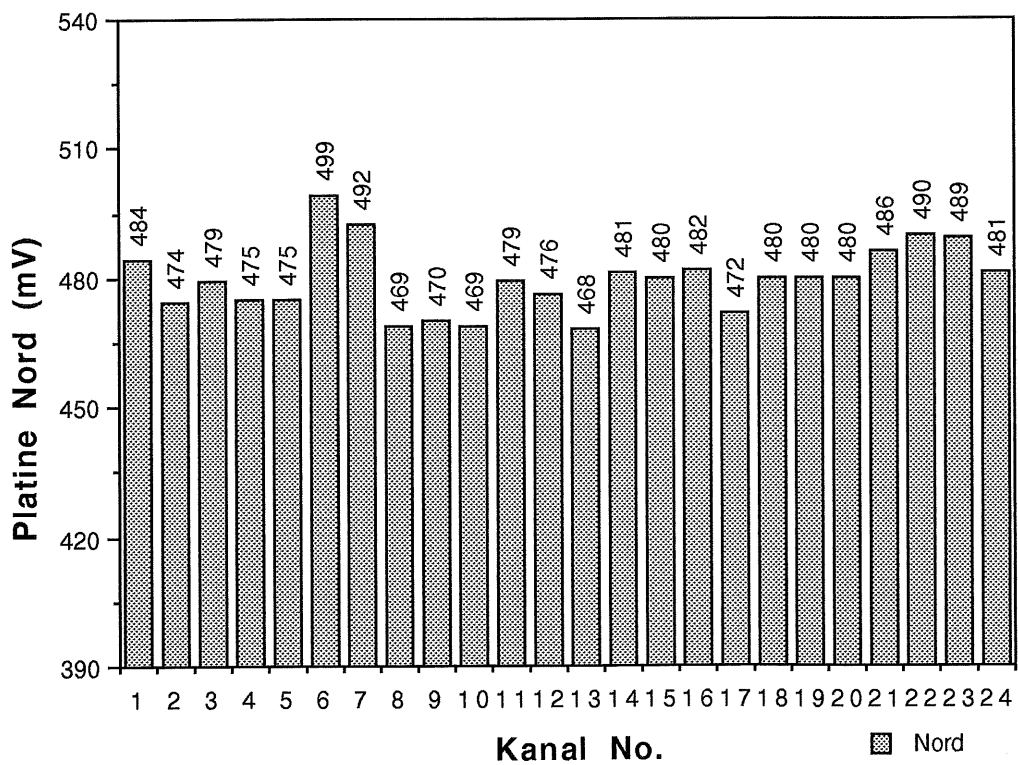


Abb. 5.3: relative Verstärkung der Vorverstärker ( Platine Nord )

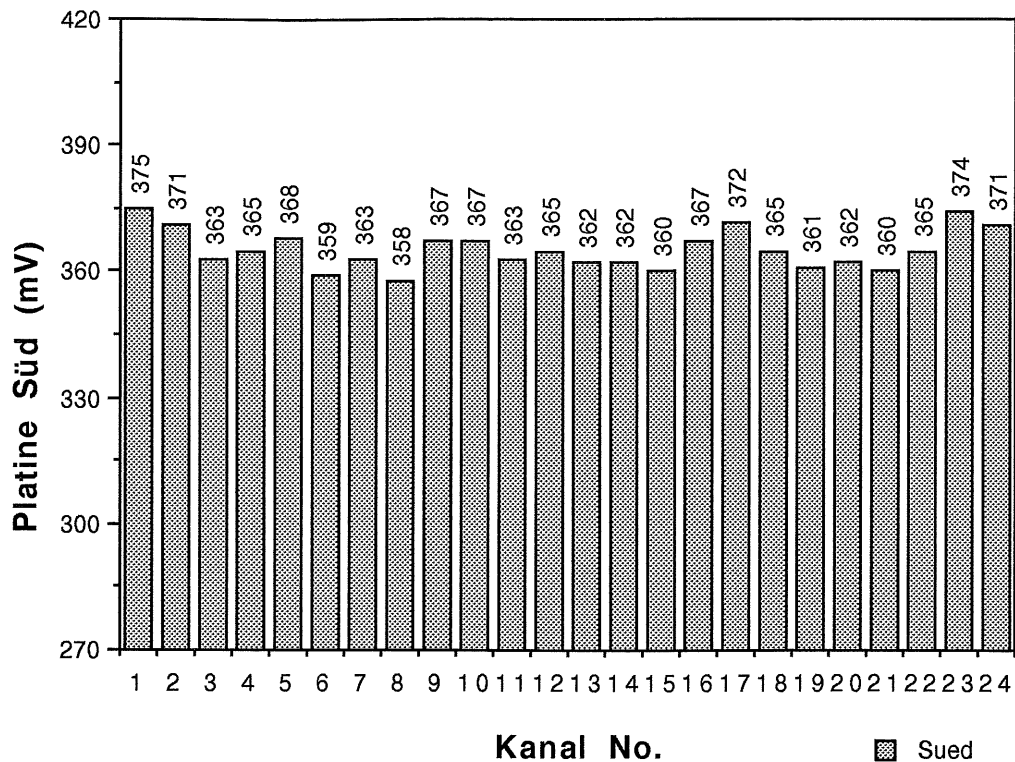


Abb. 5.4: relative Verstärkung der Vorverstärker ( Platine Süd )

Für die Platinen *Nord* und *West* ergab sich durch diese Messungen eine maximale Abweichung der Verstärkung von 4%, bei der Platine *Ost* betrug die Abweichung 6% und bei der Platine *Süd* 2%. Während dieser Messungen wurde ein Ausfall der Kanäle *Ost14* und *Ost18* festgestellt; die Verstärker wurden daraufhin repariert.

Den Verstärker wurden für die Messungen direkt Pulse der Frequenz 1MHz zugeführt. Da es nicht möglich war, die Amplitude der Pulse zwischen den Messungen völlig konstant zu halten, mußte zu jeder Messung die dazugehörige Eingangsspannung in mV notiert werden. Tabelle 5.5 enthält diese Eingangsspannungen.

| Nord   | Ost    | Sued  | West   |
|--------|--------|-------|--------|
| 9,870  | 9,950  | 7,510 | 9,890  |
| 9,620  | 9,880  | 7,470 | 9,870  |
| 9,710  | 9,840  | 7,300 | 9,970  |
| 9,630  | 10,250 | 7,350 | 10,290 |
| 9,630  | 9,930  | 7,420 | 10,270 |
| 10,170 | 9,920  | 7,260 | 9,900  |
| 10,030 | 9,470  | 7,310 | 10,030 |
| 9,500  | 9,760  | 7,200 | 9,980  |
| 9,520  | 9,710  | 7,390 | 9,960  |
| 9,490  | 10,030 | 7,410 | 9,820  |
| 9,720  | 9,740  | 7,300 | 10,050 |
| 9,640  | 9,890  | 7,350 | 9,610  |
| 9,470  | 9,850  | 7,280 | 9,690  |
| 9,770  | 10,280 | 7,300 | 9,730  |
| 9,750  | 9,780  | 7,250 | 9,860  |
| 9,780  | 10,020 | 7,400 | 10,010 |
| 9,550  | 9,850  | 7,510 | 10,020 |
| 9,760  | 9,780  | 7,340 | 10,100 |
| 9,720  | 9,940  | 7,270 | 10,010 |
| 9,730  | 9,610  | 7,290 | 10,080 |
| 9,890  | 10,050 | 7,240 | 9,880  |
| 10,040 | 10,180 | 7,330 | 9,870  |
| 10,040 | 10,340 | 7,510 | 10,440 |
| 9,860  | 10,530 | 7,430 | 10,460 |

Tab. 5.5: Eingangsspannungen in mV



## 5.2 Hochspannungskurven

Die negative Hochspannung zur Versorgung der fokussierenden Gitter und der beschleunigenden Dynoden des Photomultipliers soll laut Herstellerangaben zwischen -1000V und -1300V eingestellt werden; der konkrete Wert innerhalb dieses Intervalls ist entsprechend der Anwendung zu wählen.

Um den für diese Arbeit günstigsten Wert zu bestimmen, wurden die folgenden Kurven ( Abbildung 5.6 bis 5.8 ) mit Hilfe eines LED-Testpulses erstellt. Dargestellt wird darin die Amplitude des Photomultiplier-Ausgangssignals in relativen Einheiten gegen die zu seiner Versorgung angelegte Hochspannung.

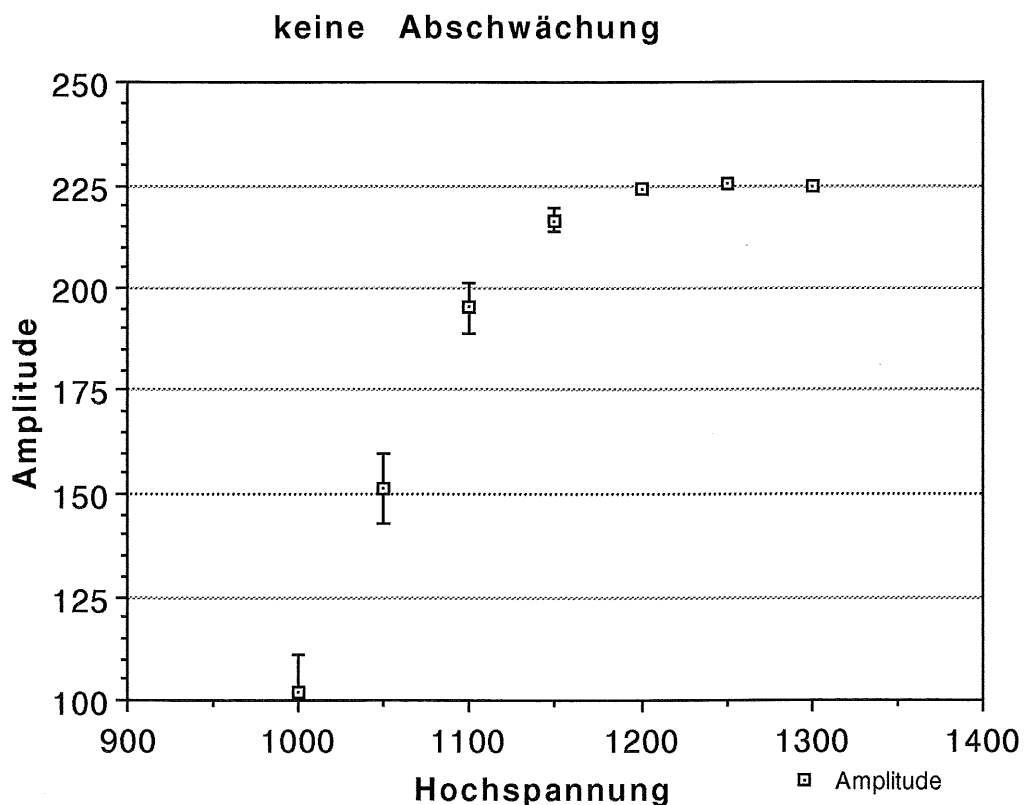


Abb. 5.6: Hochspannungskurve ohne Abschwächung

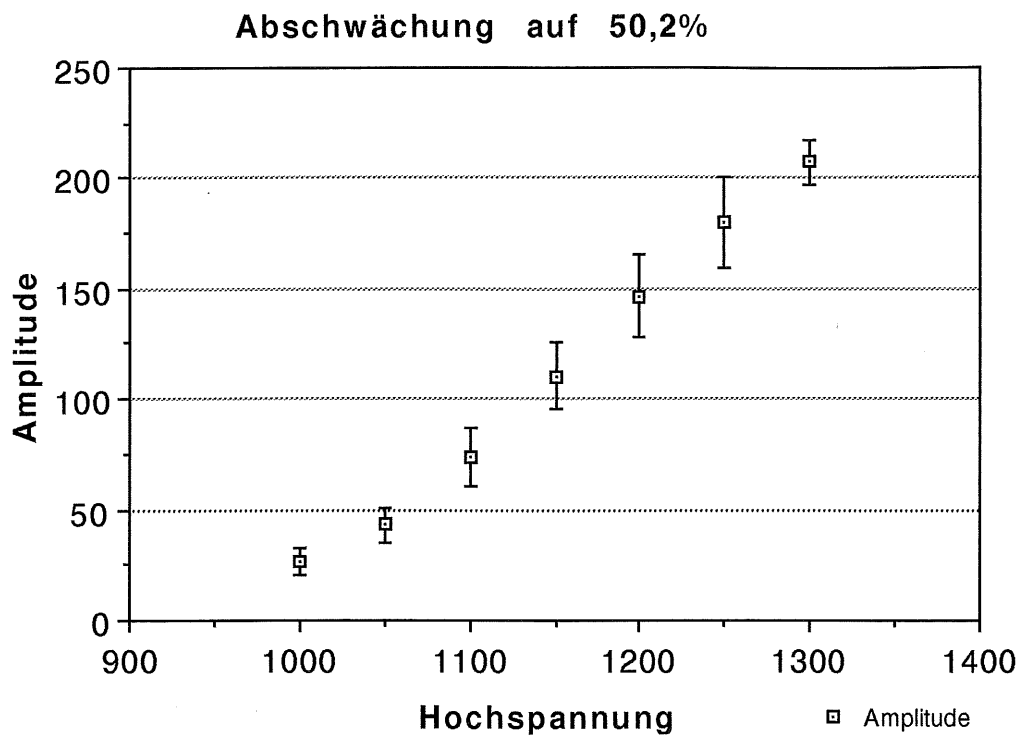


Abb. 5.7: Hochspannungskurve bei Abschwächung auf 50,2%

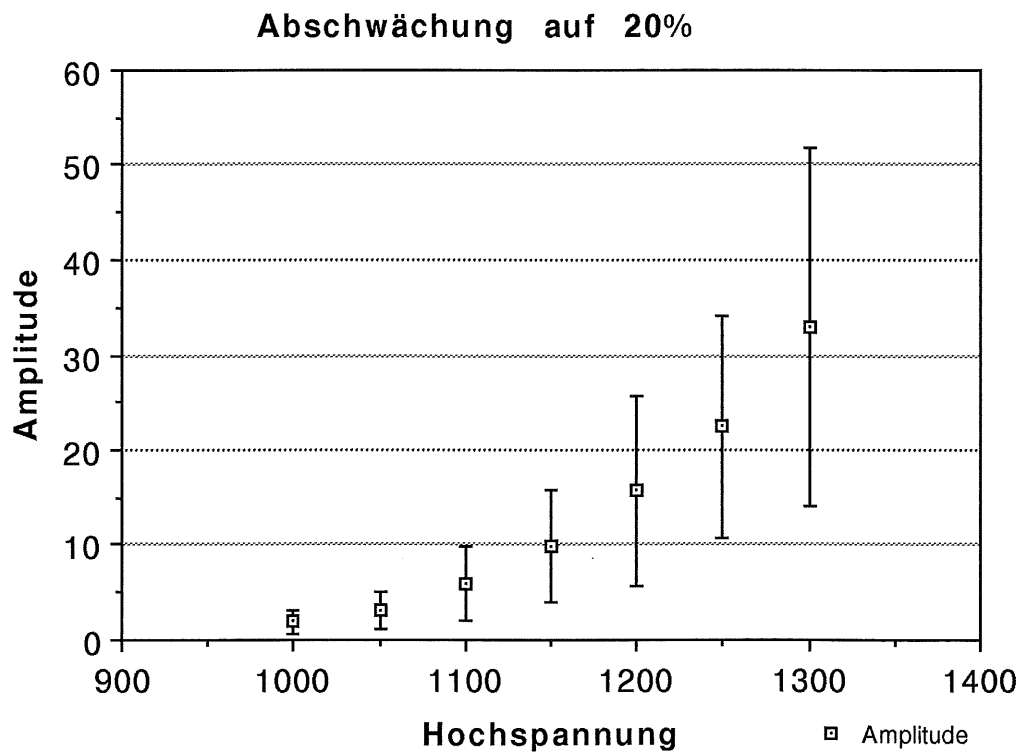


Abb. 5.8: Hochspannungskurve bei Abschwächung auf 20 %

Die Qualität des Ausgangssignals hängt von der Intensität des in den Photomultiplier einfallenden optischen Signals ab: Ein sehr kleines einfallendes Signal liefert ein Ausgangssignal, das vom Rauschen des Photomultipliers schlecht zu unterscheiden ist. Deshalb wurden Kurven bei verschiedener Helligkeit der LED erstellt.

Man erkennt in der Kurve "Abschwächung auf 20%" einen exponentiellen Anstieg im linken Bereich, in der Kurve "keine Abschwächung" eine Sättigungserscheinung im Bereich höherer Spannungen. Um im Bereich des linearen Kurvenanstiegs und einer zufriedenstellenden Verstärkung des Photomultipliers zu arbeiten, wurde für alle folgenden Messungen die Spannung -1100V gewählt.

### 5.3 Reproduzierbarkeit des LED-Faser-Kontaktes

Die verwendeten Faserstücke und LEDs wurden nicht miteinander verklebt, sondern in die paßgenauen Bohrungen des LED-Halters ausreichend stramm eingesteckt, so daß sich die polierte Faser-Stirnseite direkt auf der geringfügig flachgeschliffenen Kuppe des LED-Kunststoffgehäuses befand. Abbildung 5.9 zeigt diesen LED-Faser-Kontakt. Mit der hier beschriebenen Messung sollte ermittelt werden, wie genau sich dieser LED-Faser-Kontakt wiederherstellen läßt. Vor dem Eintrittsfenster des Photomultipliers war der Faserhalter montiert und justiert, um das kurze Faserstück, das während der Messungen von einer gepulsten, grünen LED Licht erhielt, auf dem zur Messung verwendeten Pixel zu fixieren.

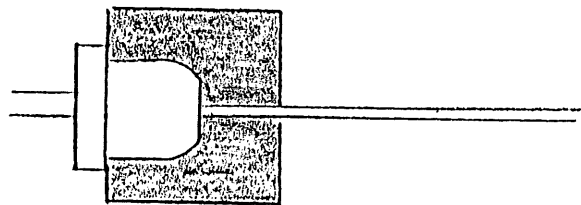


Abb. 5.9: LED-Faser-Kontakt

In der folgenden Kurve ( Abbildung 5.10 ) ist die Amplitude des Photomultiplier-Ausgangssignals in relativen Einheiten gegen die Anzahl der Faser-LED-Steckvorgänge dargestellt, wobei nach jedem Wiedereinstecken der Faser in den LED-Halter eine Messung mit 50 LED-Pulsen erfolgte.

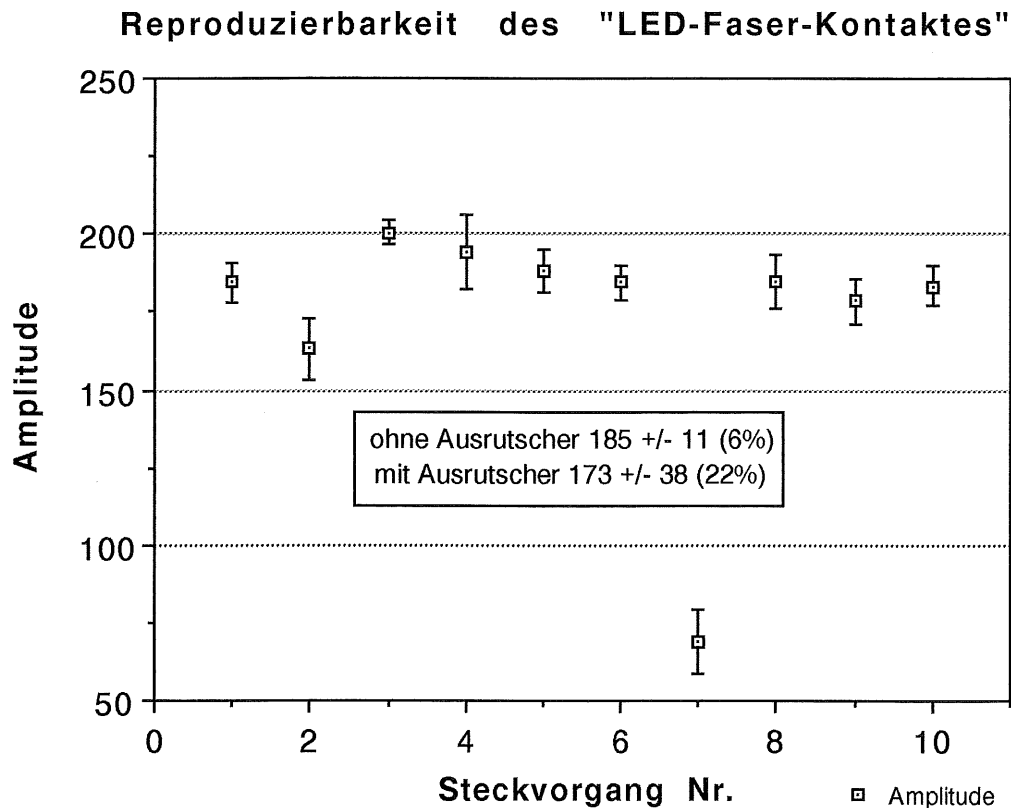


Abb. 5.10: Ausgangssignale nach dem Wiedereinstecken der Faser  
( vertikale Achse beginnend mit dem Wert "50" )

Hierbei handelt es sich um eine geometrische Fragestellung, das Phänomen der Abnutzung des Fasermantels soll diese Untersuchung nicht verfälschen. Anders als im nachfolgenden Abschnitt "Faserabnutzung" war eine Beschädigung des Mantels während dieser Messung unbedingt zu vermeiden, daher wurden nur zehn einfache Steckvorgänge mit jeweils nachfolgender Beleuchtung des Photomultipliers durchgeführt.

Man erkennt, daß durch sorgfältiges Einstecken der Faser in den LED-Halter eine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit erreicht werden kann.

## 5.4 Faserabnutzung

Die dünne Polymethylmethacrylat-Ummantelung lichtleitender und szintillierender Fasern besitzt einen geringeren Brechungsindex als der Polystyrol-Faserkern, um durch die an der Grenzfläche von Faser und Mantel auftretende Totalreflexion die Lichtleitung zu verbessern. Durch eine Beschädigung der Ummantelung wird das von der Faser zu übertragende Licht schon auf kurzen Weglängen sehr stark abgeschwächt; handelt es sich nur um eine kleine Anfangs-Lichtmenge, so reicht das am Faserende ankommende Licht nicht mehr zur Signalübergabe aus.

Die folgende Meßreihe entstand, um herauszufinden, wie schnell eine Faser durch Abnutzung der Ummantelung unbrauchbar wird. Die Reproduzierbarkeit des Kontaktes zwischen der Faser und dem Eintrittsfenster des Photomultipliers ist gewährleistet.

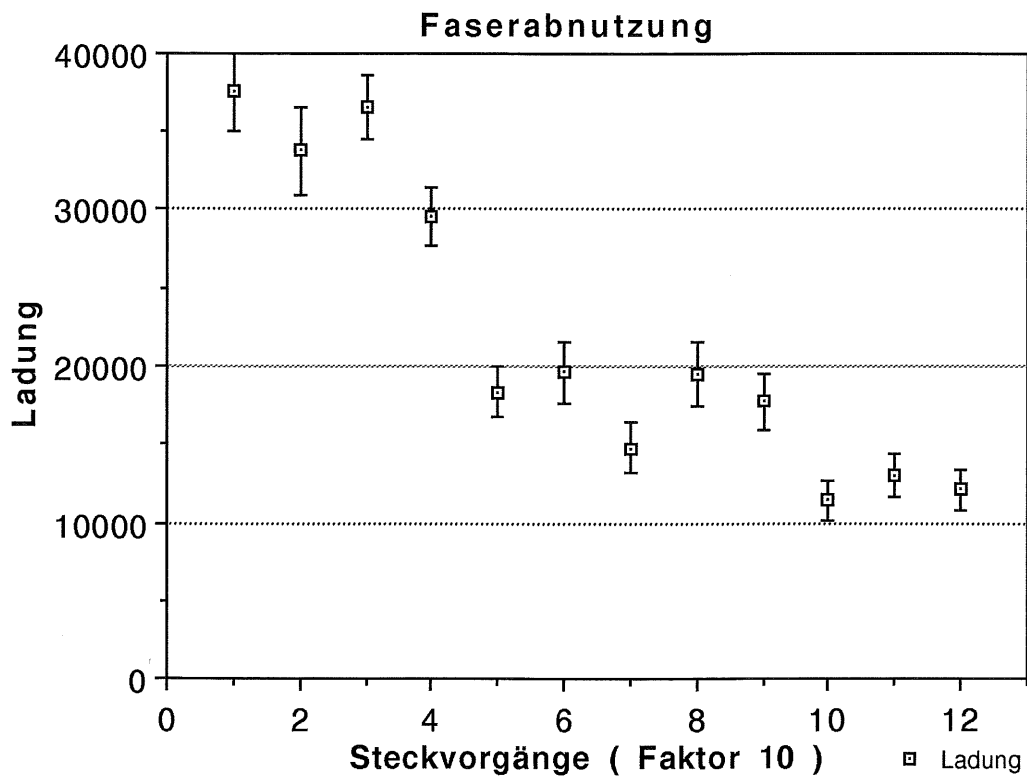


Abb. 5.11: Ausgangssignal nach jeweils 10 Steckvorgängen

In die Bohrungen des vor dem Eintrittsfenster des Photomultipliers montierten und justierten Faserhalters wurde wiederholt ein kurzes Faserstück gesteckt, das während der Messungen von einer gepulsten, grünen LED Licht erhielt.

In der vorstehenden Abbildung 5.11 ist die Gesamtladung des Photomultiplier-Ausgangspulses in relativen Einheiten gegen die Anzahl der Fasersteckvorgänge dargestellt, wobei jeweils nach zehnmalem Wiedereinstecken der Faser eine Messung mit 50 LED-Pulsen erfolgte.

Man erkennt eine deutliche Abnahme des übertragenen Signals durch die Beschädigung des Fasermantels; nach 120 Steckvorgängen ist die anfängliche Signalintensität auf 33% ihres Ausgangswertes abgefallen. Um in den nachfolgenden Messungen vergleich- und reproduzierbare Werte zu erhalten, ist daher regelmäßig die Unversehrtheit der Faser zu kontrollieren und diese rechtzeitig zu erneuern.

## 5.5 Ausrichten des Faserhalters

Wie im Abschnitt "Pixel-Untersuchung" dokumentiert werden wird, ist die Lichtempfindlichkeit der Pixel nicht über deren Gesamtfläche von 2,54 mm x 2,54 mm konstant; vielmehr nimmt diese von einem Ort größter Empfindlichkeit zu allen Seiten hin ab. Hierbei ist nicht notwendigerweise die Pixelmitte der Ort größter Lichtempfindlichkeit. Abbildung 5.12 zeigt einen Schnitt durch das Empfindlichkeitsprofil eines Pixels.

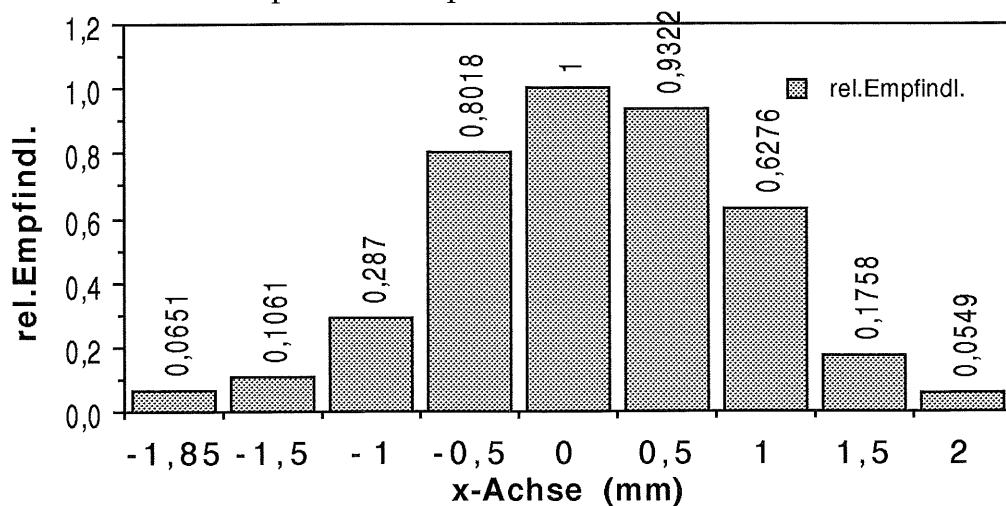


Abb. 5.12: Schnitt durch das Empfindlichkeitsprofil eines Pixels

Für eine hohe Signalausbeute ist der Faserhalter so zu positionieren, daß sich möglichst viele Fasern gleichzeitig nahe dem Empfindlichkeitsmaximum ihres Pixels befinden. Wegen der Fertigungstoleranzen von Photomultiplier und Faserhalter und der außermittigen Lage einiger Pixel-Maxima wird dies allerdings niemals für alle Fasern gleichzeitig gelingen.

Bevor durch lineares Scannen über die Fläche einiger Pixel deren Maximal-Einstellung explizit bestimmt werden konnte, mußte durch ein geeignetes Verfahren der Faserhalter gerade soweit relativ zum Photomultiplier justiert werden, daß die Symmetrieachse "A" der Haltermatrix mit der Symmetrieachse "B" der Photomultiplier-Pixelmatrix parallel verläuft, wie es die Abbildung 5.13 darstellt. Nach dem Erreichen dieser Einstellung wurde der Schnecken-trieb zum Verdrehen des Faserhalters nicht mehr betätigt.

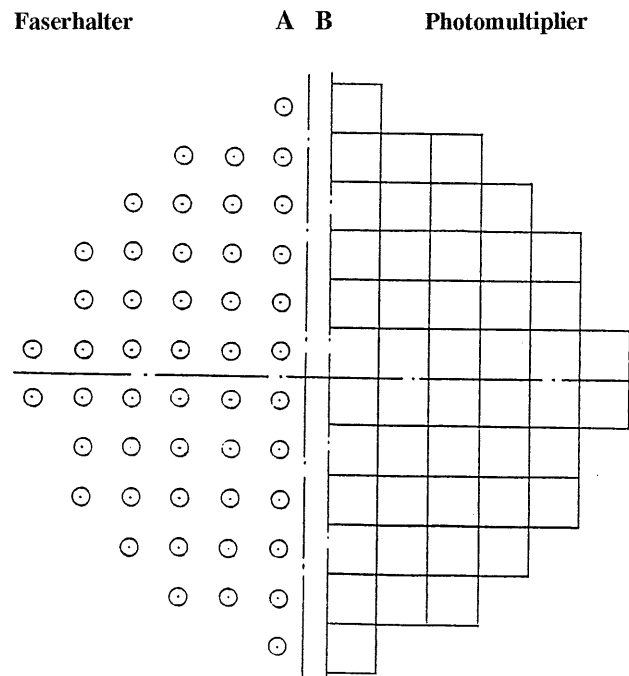


Abb. 5.13: Parallelität von Pixelmatrix und Faserhaltermatrix

### 5.5.1 Das Verfahren

Eine mit einer LED kombinierte Faser, die sich in einer Bohrung des Faserhalters befindet, wird entsprechend Abbildung 5.14 durch Betätigen des Schneckentriebes in kleinen, definierten Schritten längs einer gekrümmten Bahn auf der Fläche eines zu untersuchenden Pixels verschoben.

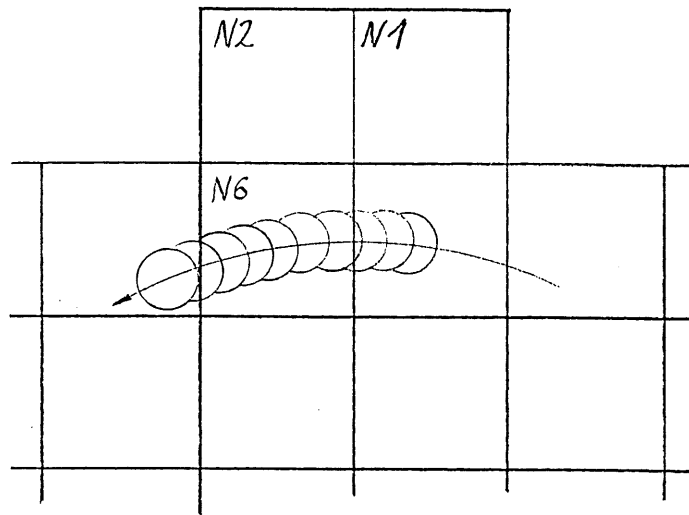


Abb. 5.14: Weg der Faserstirnfläche beim Verdrehen des Faserhalters

Beleuchtet man den Photomultiplier zwischen diesen Schritten mit Lichtpulsen konstanter Größe, so erhält man bezüglich des Ausgangssignals eine Kurve, wie sie die Abbildung 5.15 vierfach darstellt.

Um eine zufriedenstellend feine Auflösung des Drehwinkels aus dem obigen Graphen des Ausgangssignals zu erhalten, wird mit der Faser ein weit vom Drehpunkt entfernter Pixel beleuchtet. Die Abbildung 5.16 zeigt die Benennung der 96 Pixel des Photomultipliers:



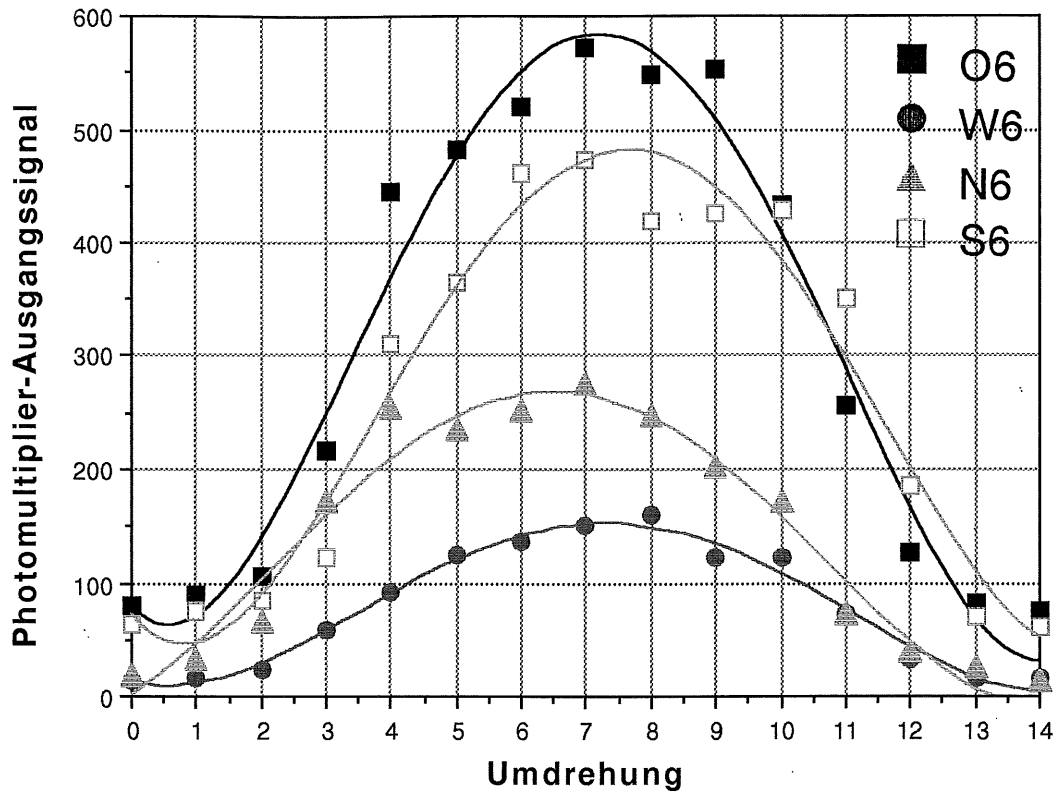


Abb. 5.15: Ausgangssignale beim Verdrehen des Faserhalters

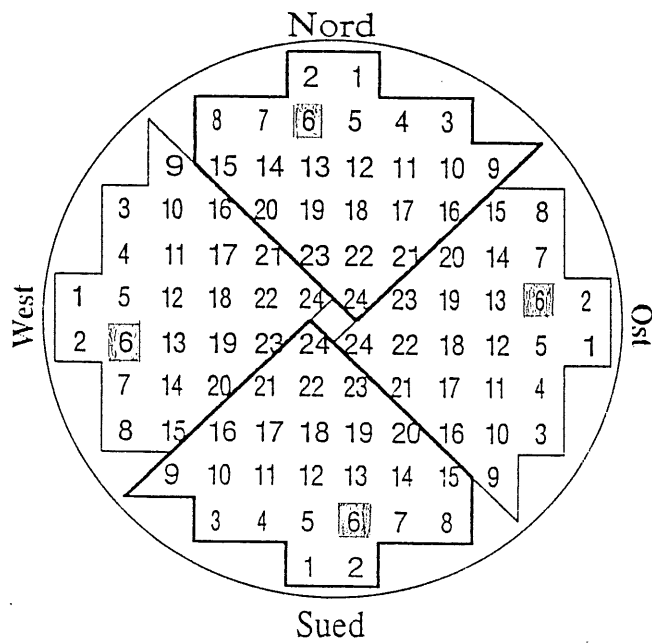


Abb. 5.16: Benennung der Pixel

In der Praxis wurden bei jeder Einstellung des Faserhalters jeweils vier Pixel von verschiedenen LED-Faser-Einheiten beleuchtet, so daß vier Kurven der abgebildeten Art gleichzeitig entstanden. Es handelte sich dabei um die Pixel mit den Bezeichnungen *Nord 6*, *West 6*, *Süd 6* und *Ost 6*. Deren kreuzförmig symmetrische Anordnung ist für das hier beschriebene Verfahren von großem Vorteil. Die Position dieser vier Pixel ist in der Abb. 5.16 markiert.

Die jeweils vier Pixel mit den Nummern 1 und 2 eignen sich wegen ihrer sehr geringen Verstärkung allerdings nicht für das in diesem Abschnitt beschriebene Verfahren.

Ein Kennzeichen dafür, daß der Faserhalter die gewünschte Orientierung erreicht hat, ist die Lage aller vier Kurven-Maxima bei der gleichen, mit diesem Verfahren zu bestimmenden Winkeleinstellung, also auf einer gemeinsamen Vertikalen. Abbildung 5.17 stellt die Lage der Kurven bei dieser Einstellung dar.

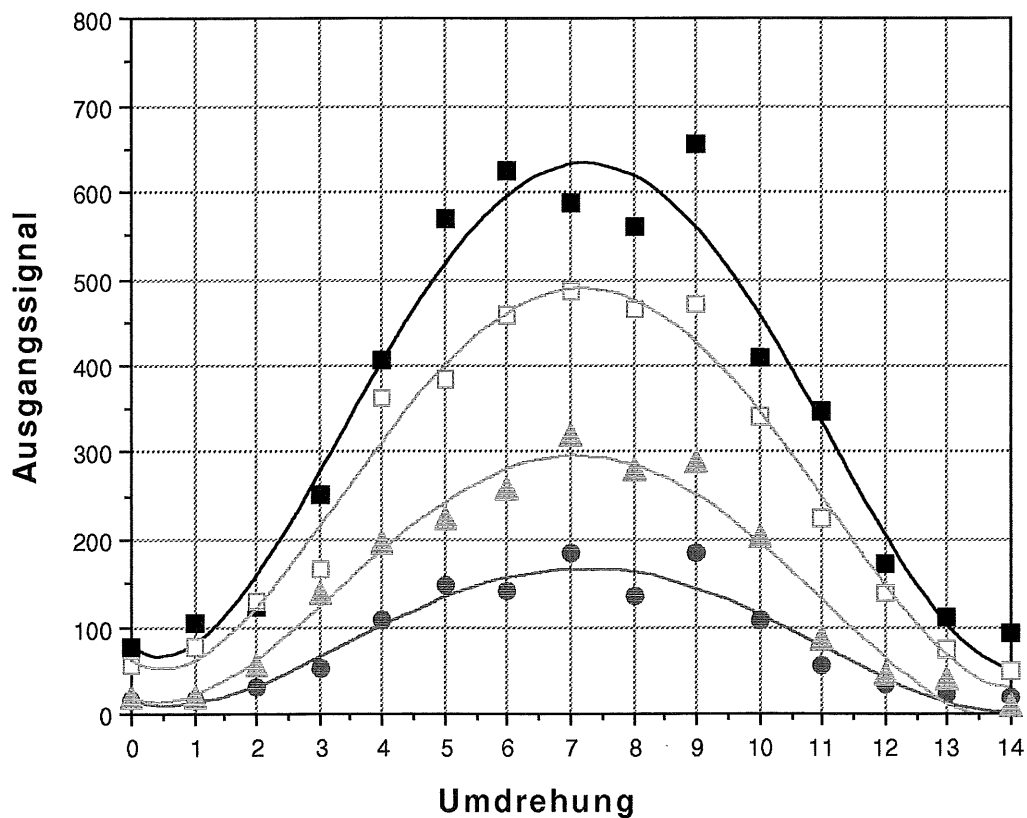


Abb. 5.17: angestrebte Lage der vier Maxima

Das folgende Bild ( Abbildung 5.18 ) zeigt vier gleichzeitig erstellten Kurven, deren Maxima nicht auf einer gemeinsamen Vertikalen liegen. Es wird nun beschrieben, wie die am Kreuztisch vorzunehmenden Einstellungs-Korrekturen dem Bild qualitativ entnommen werden.

Man erkennt, daß zuerst die lichtempfindlichste Position des Pixels S6 von der diesem Pixel zugeordneten Faser erreicht wird; bei weiterem Verdrehen des Faserhalters erfolgt dies auch bei den Pixeln O6 und nachfolgend W6. Erst danach wird auch der Pixel N6 optimal von der entsprechenden Faser beleuchtet.

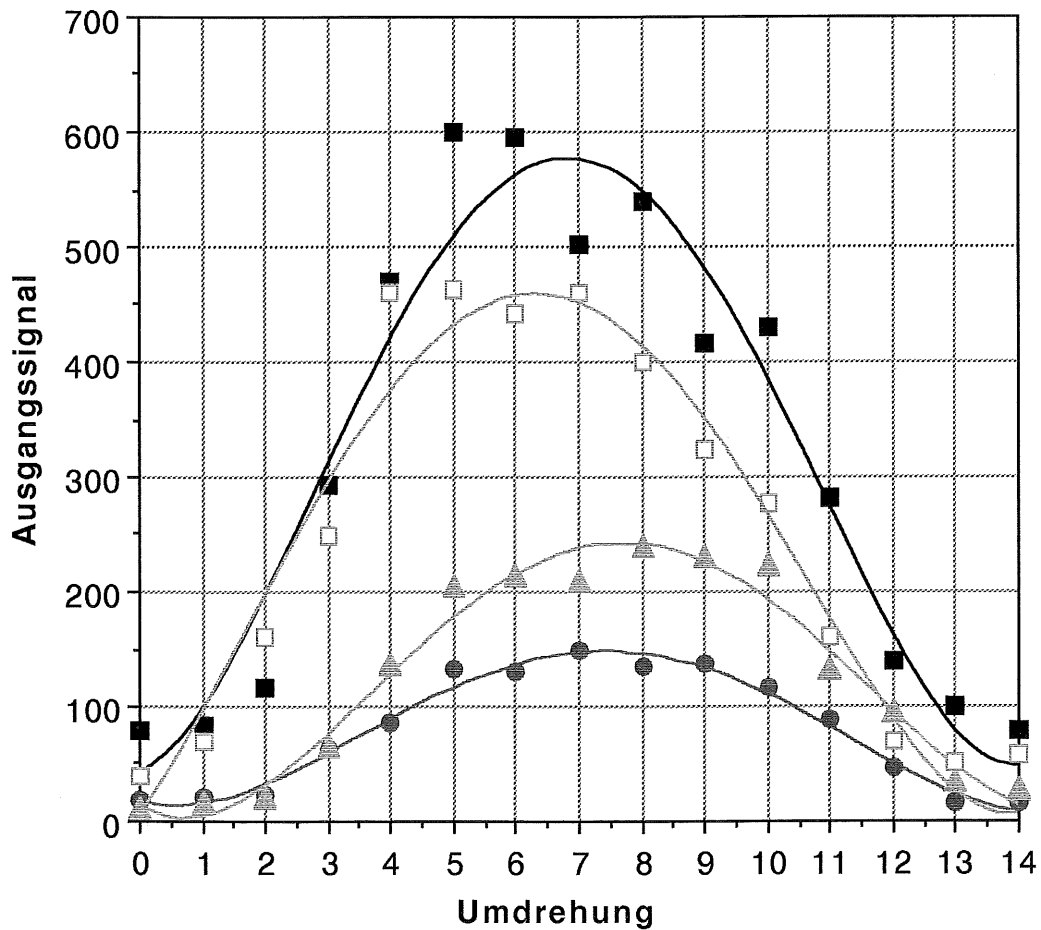


Abb. 5.18: Lage der Maxima vor Anwendung des Justage-Verfahrens

Die nachfolgende Abbildung 5.19 zeigt schematisch vier kreuzförmig angeordnete Fasern oder Pixel. Zwei Kunststofffolien, die jeweils mit diesem Schema bedruckt sind, dienen als Modell der zu beleuchtenden Pixel bzw. der verwendeten Fasern.

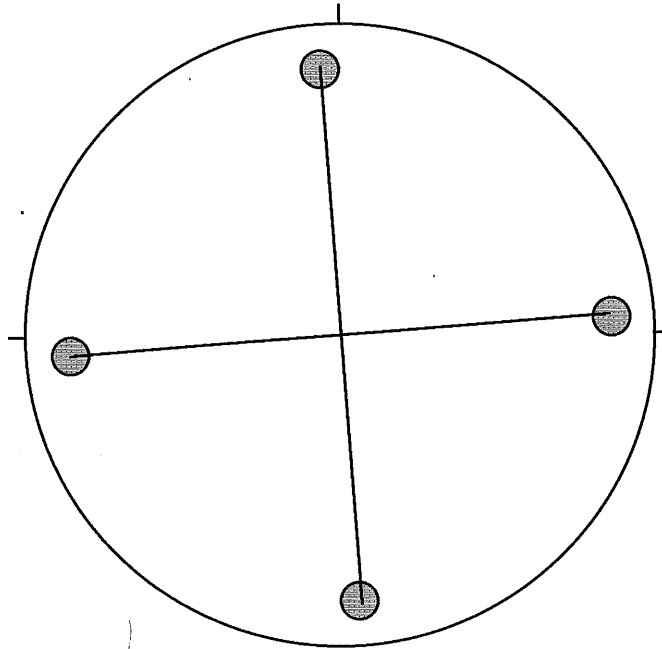


Abb. 5.19: Folie mit Schema der vier Pixel

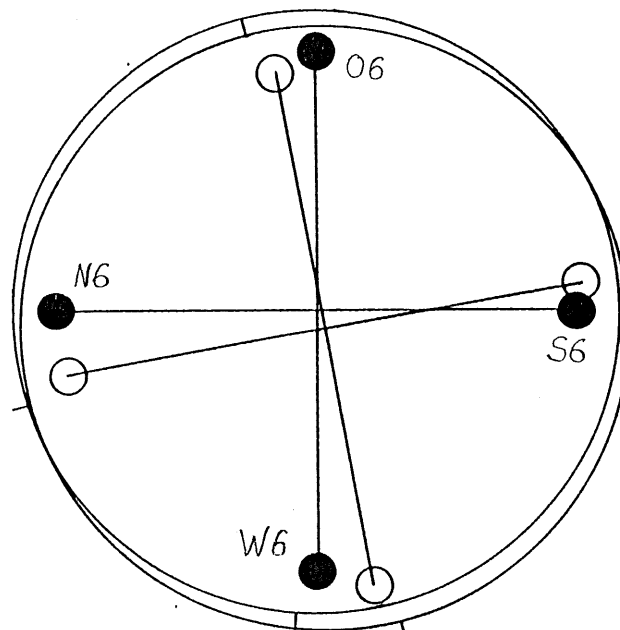


Abb. 5.20: Anordnung beider Folien entsprechend obiger Kurven

Sie werden als Hilfsmittel verwendet, um sich aus den vier Kurven eine bildliche Vorstellung der relativen Lage von Faserhalter und Photomultiplier zu verschaffen. Die beiden Folien werden aufeinandergelegt und solange gegeneinander verdreht und verschoben, bis entsprechend Abbildung 5.20 das im vorherigen Absatz über das sequentielle Erreichen der Pixel gesagte sichtbar wird:

Bewegt man die durch weiße Kreise dargestellten Fasern im Uhrzeigersinn weiter, so erreichen diese die dazugehörigen Pixelzentren in der erwarteten Reihenfolge S6, O6, W6, N6. Die Kreuzungspunkte der jeweils die Kreise verbindenden Linien repräsentieren die Mittelpunkte des Photomultipliers und des Faserhalters; dementsprechend muß nun die Position des Faserhalters durch lineares Verstellen des Kreuztisches verbessert werden.

Bei diesem Beispiel ist der Halter um 0,1mm nach Osten und um 0,05mm nach Norden zu verschieben.

Im Wechsel werden solange Meßkurven erstellt und der Kreuztisch verstellt, bis eine Graphik der vier Kurven gemäß der Abbildung 5.17 vorliegt. Die dann von den linearen Skalen des Kreuztisches abzulesenden und zu notierenden Werte sind die Koordinaten des "Mittelpunktes" für die folgenden Messungen.

Abschließend ermittelt man aus der Abbildung, wieviele Umdrehungen der Spindel des Schneckentriebes zum Erreichen der vier Kurven-Maxima erforderlich ist und stellt den Schneckentrieb auf diesen Wert ein. Da die geforderte Parallelität von Photomultiplier und Faserhalter damit erreicht ist, wird das Spindel-Handrad nicht mehr verstellt.

## 5.6 Homogenität der Empfindlichkeit eines Pixels

Schon im Abschnitt "Ausrichten des Faserhalters" wurde damit gearbeitet, daß die Lichtempfindlichkeit eines Pixels ist nicht über dessen gesamte Oberfläche von 2,54 mm x 2,54 mm konstant ist, sondern von einem Ort größter Empfindlichkeit, der nicht notwendigerweise in der Pixelmitte liegt, zu allen Seiten hin abnimmt. Die Verteilung der Lichtempfindlichkeit ist für jeden einzelnen Pixel charakteristisch.

Zu klären war die Frage nach der zulässigen Toleranz der Faserposition, wenn die Empfindlichkeit des Pixels eine vorgegebene Schranke nicht unterschreiten soll. Deshalb wurden die fünf Pixel *N6*, *N24*, *O6*, *S6*, und *W6* einem im Folgenden beschriebenen Meßverfahren zur Ermittlung ihrer Empfindlichkeits- Verteilung unterzogen.

Die folgende Abbildung 5.21 zeigt das 0,5mm x 0,5mm -Raster der Messungen an jeweils einem Pixel:

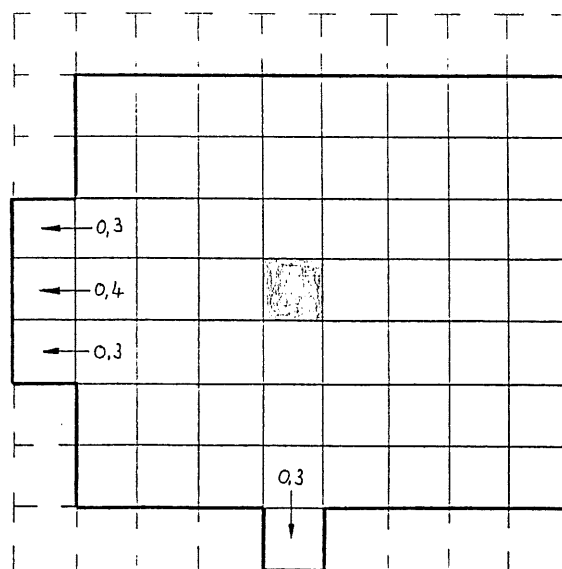


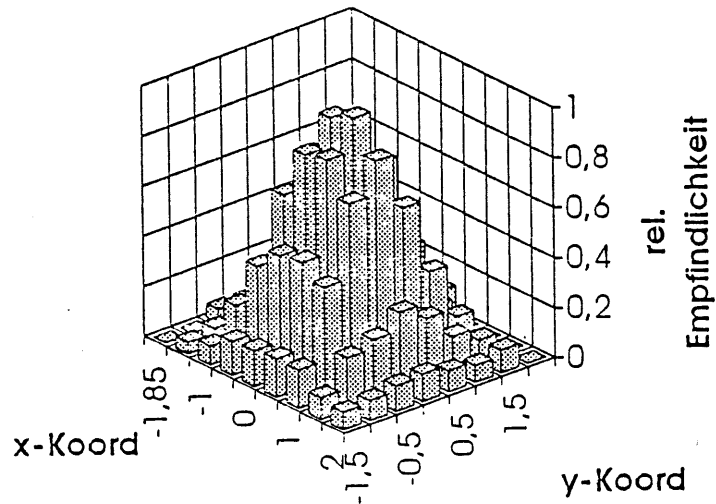
Abb. 5.21: Raster der Meßpunkte

Da die Untersuchung in Schritten von 0,5mm erfolgte, kann sowohl die Toleranz von 0,01mm des gebohrten Faserhalters als auch die in der gleichen Größenordnung liegende, fertigungsbedingte Lageabweichung der Pixel hier vernachlässigt werden.

Das markierte Feld im Zentrum ist die Position der Faser nach Abschluß des im Abschnitt "Justage durch Rotation" beschriebenen Verfahrens; die Mittelpunkte des Faserhalters und des Photomultipliers stimmen dann überein. Da der zylindrische Faserhalter in der Bohrung des Gehäuse-Frontflansches einen begrenzten Spielraum besitzt und die x- und y-Achsen des Kreuztisches deshalb nur mit Einschränkung verfahren werden können, waren nur die 60 Meßpunkte im stark umrandeten Bereich der Abbildung erreichbar. Mit Zahlen versehene Pfeile weisen auf in dieser Richtung verringerte Wege hin.

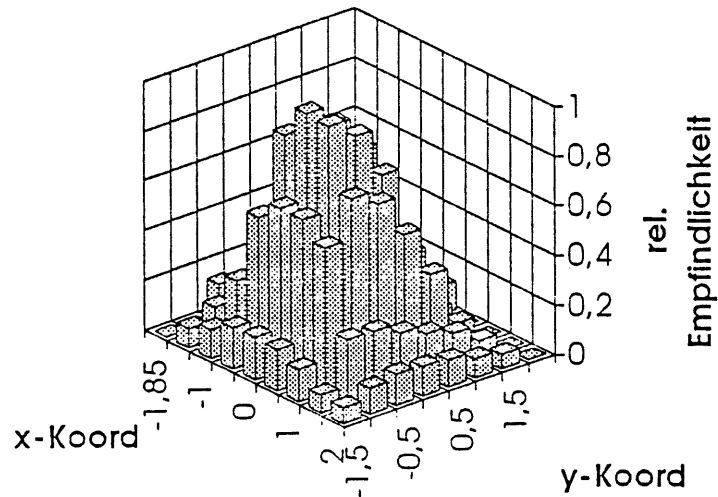
Für jeden der erreichbaren 60 Meßpunkte wurde eine Messung durchgeführt, indem man ihn mit jeweils 100 LED-Pulsen beleuchtete. Die Amplitudenspektren des Photomultiplier-Ausgangssignals weisen nach unseren Erfahrungen Unregelmäßigkeiten und Unwägbarkeiten auf. Deshalb wurde hier die Ladung der Ausgangssignale des Photomultipliers zum Vergleich der Meßpunkte herangezogen.

Die folgenden Abbildungen 5.22 bis 5.26 zeigen die noch nicht korrigierten Meßwerte der Pixel *N6*, *N24*, *O6*, *S6*, und *W6* in relativen Einheiten. Die Tabellen enthalten die relativen Ausgangssignale der einzelnen Meßpunkte, wobei der Wert Null den nicht erreichbaren Positionen auf der Pixel-Oberfläche entspricht.



| y- / x-Koord | -1,85   | -1,5    | -1      | -0,5    | 0      | 0,5    | 1      | 1,5     | 2       |
|--------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|
| -1,5         | 0       | 0,04471 | 0,07399 | 0,1348  | 0,1427 | 0,1535 | 0,1529 | 0,08571 | 0,07112 |
| -1           | 0       | 0,0623  | 0,1966  | 0,3968  | 0,4813 | 0,499  | 0,4443 | 0,2068  | 0,08088 |
| -0,5         | 0,05715 | 0,08217 | 0,316   | 0,6431  | 0,8475 | 0,8693 | 0,739  | 0,2423  | 0,1014  |
| 0            | 0,05618 | 0,09853 | 0,267   | 0,7668  | 0,9575 | 1      | 0,8736 | 0,3126  | 0,1087  |
| 0,5          | 0,05609 | 0,075   | 0,2039  | 0,5571  | 0,5969 | 0,7839 | 0,6467 | 0,2495  | 0,08404 |
| 1            | 0       | 0,05757 | 0,09279 | 0,3366  | 0,2086 | 0,4077 | 0,3548 | 0,1399  | 0,06738 |
| 1,5          | 0       | 0,05724 | 0,05173 | 0,09973 | 0,13   | 0,1365 | 0,1366 | 0,08659 | 0,08984 |
| 1,8          | 0       | 0       | 0       | 0       | 0,1108 | 0      | 0      | 0       | 0       |

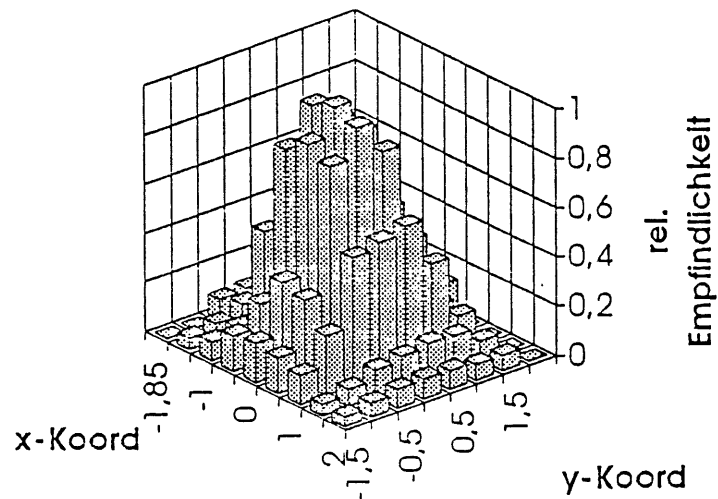
Abb. 5.22 Meßwerte Pixel W6 unkorrigiert



| y- / x-Koord | -1,85  | -1,5    | -1      | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5     | 2       |
|--------------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| -1,5         | 0      | 0,07749 | 0,1179  | 0,1683 | 0,1746 | 0,1696 | 0,1316 | 0,07203 | 0,06427 |
| -1           | 0      | 0,1259  | 0,2747  | 0,5732 | 0,652  | 0,6518 | 0,5834 | 0,2617  | 0,1073  |
| -0,5         | 0,1349 | 0,1538  | 0,3527  | 0,8676 | 1      | 0,9929 | 0,7419 | 0,2574  | 0,1275  |
| 0            | 0,1177 | 0,1457  | 0,3279  | 0,8055 | 0,9181 | 0,9164 | 0,6846 | 0,2129  | 0,1205  |
| 0,5          | 0,117  | 0,1109  | 0,3013  | 0,7074 | 0,7772 | 0,7204 | 0,5239 | 0,1725  | 0,1102  |
| 1            | 0      | 0,08041 | 0,1484  | 0,3614 | 0,3664 | 0,3705 | 0,3282 | 0,1364  | 0,07804 |
| 1,5          | 0      | 0,0688  | 0,07702 | 0,1174 | 0,1397 | 0,107  | 0,0969 | 0,06964 | 0,05918 |
| 1,8          | 0      | 0       | 0       | 0      | 0,1142 | 0      | 0      | 0       | 0       |

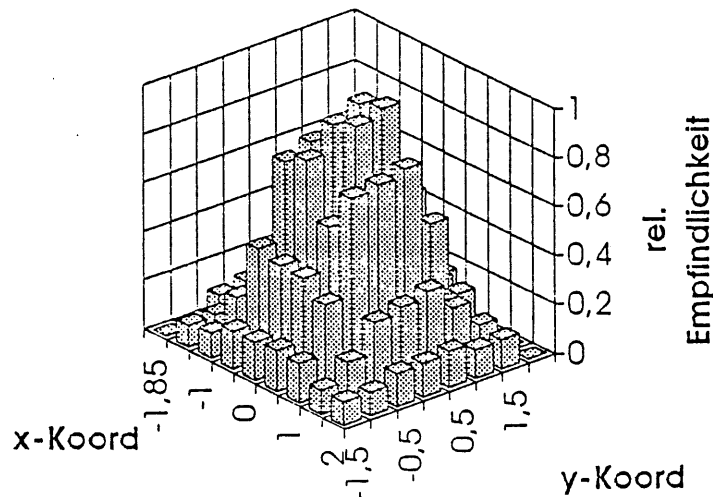
Abb. 5.23: Meßwerte Pixel S6 unkorrigiert





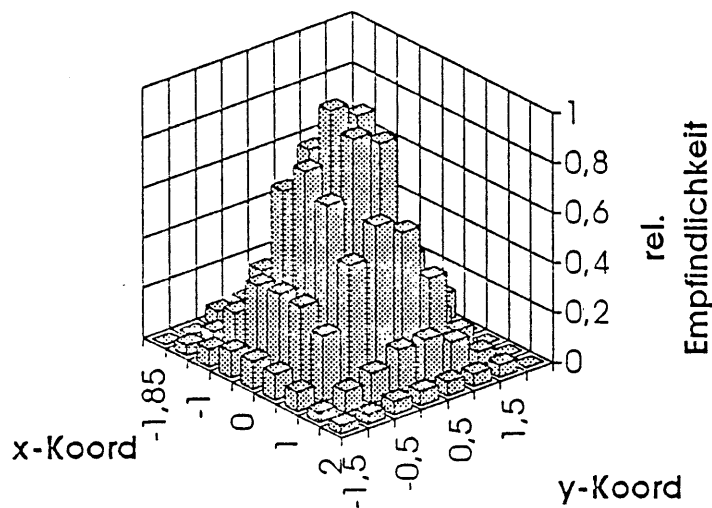
| y- / x-Koord | -1,85   | -1,5    | -1      | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5     | 2       |
|--------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| -1,5         | 0       | 0,04508 | 0,07473 | 0,1423 | 0,1566 | 0,1424 | 0,1178 | 0,04458 | 0,03926 |
| -1           | 0       | 0,06382 | 0,09386 | 0,2309 | 0,3629 | 0,3356 | 0,2376 | 0,06936 | 0,05703 |
| -0,5         | 0,07958 | 0,1051  | 0,4458  | 0,8236 | 0,8881 | 0,8425 | 0,5153 | 0,1075  | 0,07498 |
| 0            | 0,08559 | 0,1311  | 0,4016  | 0,9626 | 1      | 0,9611 | 0,5427 | 0,1251  | 0,0801  |
| 0,5          | 0,085   | 0,1074  | 0,3872  | 0,8682 | 0,8653 | 0,8283 | 0,5706 | 0,1396  | 0,07551 |
| 1            | 0       | 0,08966 | 0,2613  | 0,5342 | 0,5179 | 0,4321 | 0,3776 | 0,1313  | 0,06124 |
| 1,5          | 0       | 0,06661 | 0,0967  | 0,1679 | 0,1516 | 0,126  | 0,1283 | 0,07352 | 0,05979 |
| 1,8          | 0       | 0       | 0       | 0      | 0,1261 | 0      | 0      | 0       | 0       |

Abb. 5.24: Meßwerte Pixel O6 unkorrigiert



| y- / x-Koord | -1,85   | -1,5    | -1     | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2       |
|--------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| -1,5         | 0       | 0,08476 | 0,0989 | 0,149  | 0,151  | 0,1621 | 0,1549 | 0,0939 | 0,09185 |
| -1           | 0       | 0,08965 | 0,2038 | 0,449  | 0,4227 | 0,415  | 0,3516 | 0,1664 | 0,0919  |
| -0,5         | 0,08762 | 0,1239  | 0,2885 | 0,7673 | 0,8157 | 0,5872 | 0,7489 | 0,2865 | 0,13    |
| 0            | 0,1069  | 0,1474  | 0,3096 | 0,8097 | 0,9253 | 0,9637 | 0,7668 | 0,3122 | 0,1321  |
| 0,5          | 0,09688 | 0,1317  | 0,2888 | 0,7154 | 0,9735 | 1      | 0,795  | 0,3381 | 0,1419  |
| 1            | 0       | 0,1104  | 0,2265 | 0,4885 | 0,5842 | 0,609  | 0,5332 | 0,2335 | 0,1116  |
| 1,5          | 0       | 0,07605 | 0,1061 | 0,1927 | 0,1653 | 0,2195 | 0,2088 | 0,1287 | 0,1139  |
| 1,8          | 0       | 0       | 0      | 0      | 0,1627 | 0      | 0      | 0      | 0       |

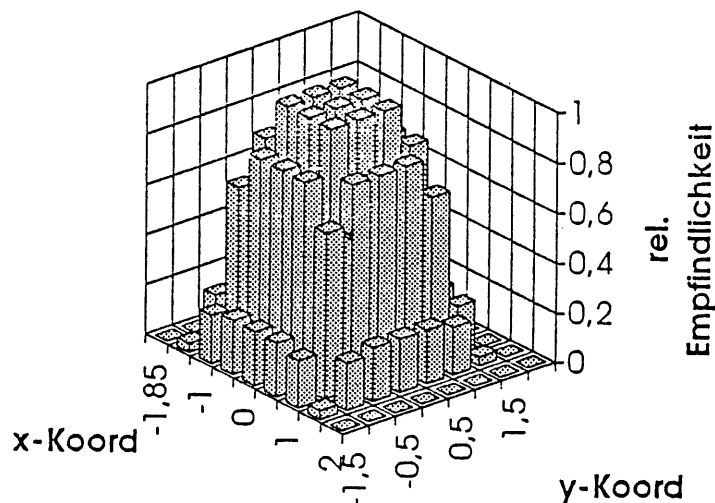
Abb. 5.25: Meßwerte Pixel N6 unkorrigiert



| y- / x-Koord | -1,85   | -1,5    | -1      | -0,5   | 0       | 0,5    | 1       | 1,5      | 2       |
|--------------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|----------|---------|
| -1,5         | 0       | 0,04079 | 0,06958 | 0,1056 | 0,1101  | 0,1038 | 0,0768  | 0,038161 | 0,03272 |
| -1           | 0       | 0,05771 | 0,1775  | 0,3298 | 0,3391  | 0,334  | 0,2627  | 0,08649  | 0,03767 |
| -0,5         | 0,05775 | 0,08892 | 0,308   | 0,6718 | 0,7964  | 0,7028 | 0,5075  | 0,1208   | 0,05239 |
| 0            | 0,06507 | 0,1061  | 0,287   | 0,8018 | 1       | 0,9322 | 0,6276  | 0,1758   | 0,05488 |
| 0,5          | 0,06434 | 0,09017 | 0,2479  | 0,7234 | 0,9413  | 0,877  | 0,5651  | 0,1794   | 0,05534 |
| 1            | 0       | 0,05128 | 0,1533  | 0,1748 | 0,4188  | 0,3866 | 0,343   | 0,1337   | 0,04982 |
| 1,5          | 0       | 0,05764 | 0,09448 | 0,1318 | 0,07113 | 0,125  | 0,09569 | 0,05557  | 0,04788 |
| 1,8          | 0       | 0       | 0       | 0      | 0,1074  | 0      | 0       | 0        | 0       |

Abb. 5.26 Meßwerte Pixel N24unkorrigiert

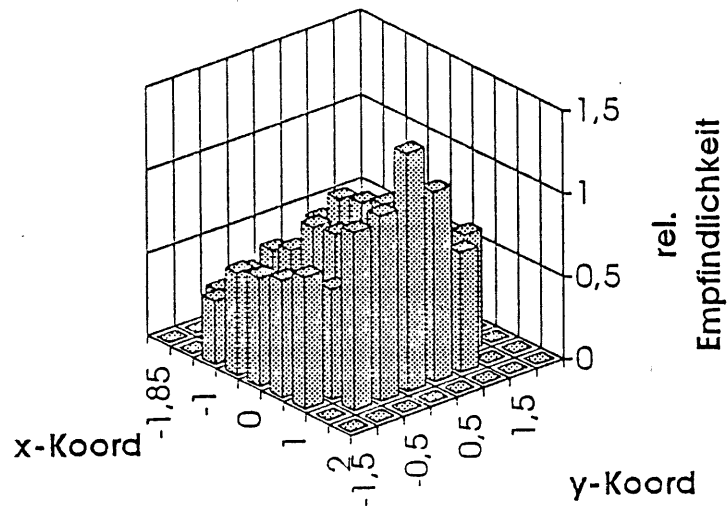
Beim Verschieben einer runden Faser des Durchmessers 1mm hängt die Lichtmenge, die jeweils auf das zu untersuchende Pixel fällt, davon ab, wieviel der Faser-Stirnfläche über den Rand des Pixels hinausragt. Im Falle homogener Pixel-Empfindlichkeit wäre deshalb auch das Ausgangssignal des Photomultipliers demjenigen Anteil der Faserstirnfläche proportional, der die Fläche des zu untersuchenden Pixels beleuchtet. Ein Pixel mit homogener Empfindlichkeit sollte daher bei dem von uns praktizierten Meßverfahren die folgenden Werte liefern:



| y- / x-Koord | -1,85 | -1,5    | -1     | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5     | 2 |
|--------------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---|
| -1,5         | 0     | 0,03542 | 0,1933 | 0,2179 | 0,2179 | 0,2179 | 0,1933 | 0,03542 | 0 |
| -1           | 0     | 0,1931  | 0,6692 | 0,8264 | 0,8264 | 0,8264 | 0,6692 | 0,1931  | 0 |
| -0,5         | 0     | 0,2179  | 0,8264 | 1      | 1      | 1      | 0,8264 | 0,2179  | 0 |
| 0            | 0     | 0,2179  | 0,8264 | 1      | 1      | 1      | 0,8264 | 0,2179  | 0 |
| 0,5          | 0     | 0,2179  | 0,8264 | 1      | 1      | 1      | 0,8264 | 0,2179  | 0 |
| 1            | 0     | 0,1931  | 0,6692 | 0,8264 | 0,8264 | 0,8264 | 0,6692 | 0,1931  | 0 |
| 1,5          | 0     | 0,03542 | 0,1933 | 0,2179 | 0,2179 | 0,2179 | 0,1933 | 0,03542 | 0 |
| 1,8          | 0     | 0       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0 |

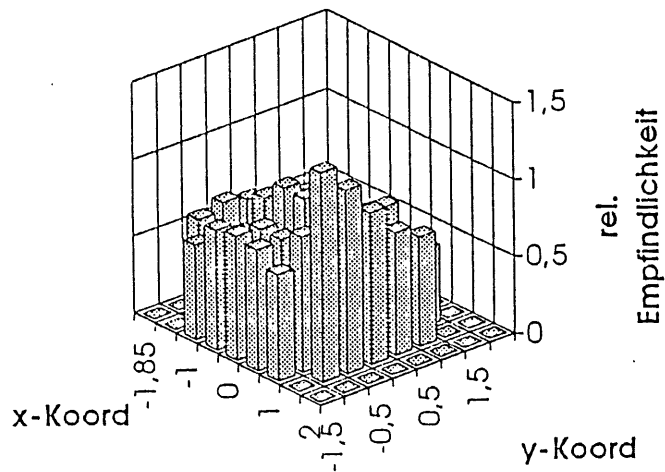
Abb. 5.27: Erwartete Meßwerte für ein Pixel mit homogener Empfindlichkeit und 1mm Faser

Um die Empfindlichkeit eines Pixels unabhängig vom verwendeten Faserdurchmesser bzw. für eine unendlich dünne Faser zu erhalten, müssen die von uns gemessenen Werte korrigiert werden. Die berechneten Werte der vorstehenden Tabelle werden zur Korrektur der Meßwerte verwendet. Die korrigierten Tabellen ( Abbildungen 5.28 bis 5.32 ) befinden sich auf den folgenden Seiten:



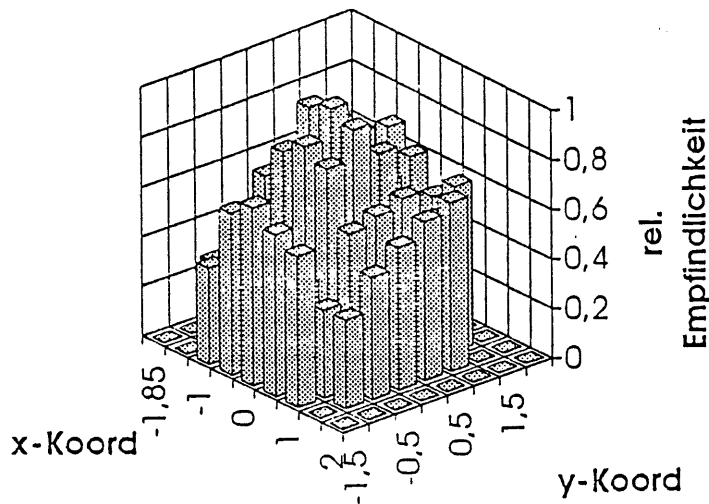
| y- / x-Koord | -1,85 | -1,5   | -1     | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2 |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| -1,5         | 0     | 0      | 0,3827 | 0,6187 | 0,6549 | 0,7046 | 0,791  | 0      | 0 |
| -1           | 0     | 0,3227 | 0,2938 | 0,4801 | 0,5825 | 0,6038 | 0,664  | 1,071  | 0 |
| -0,5         | 0     | 0,377  | 0,3823 | 0,6431 | 0,8475 | 0,8693 | 0,8943 | 1,112  | 0 |
| 0            | 0     | 0,4521 | 0,323  | 0,7668 | 0,9575 | 1      | 1,057  | 1,434  | 0 |
| 0,5          | 0     | 0,3442 | 0,2467 | 0,5571 | 0,5969 | 0,7839 | 0,7825 | 1,145  | 0 |
| 1            | 0     | 0,2982 | 0,1387 | 0,4073 | 0,2524 | 0,4933 | 0,5302 | 0,7247 | 0 |
| 1,5          | 0     | 0      | 0,2676 | 0,4576 | 0,5964 | 0,6265 | 0,7064 | 0      | 0 |
| 1,8          | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 |

Abb. 5.28: Meßwerte Pixel W6 korrigiert



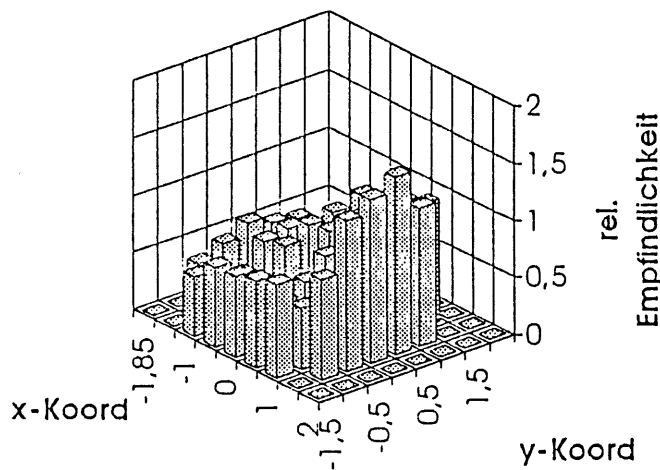
| y- / x-Koord | -1,85 | -1,5   | -1     | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2 |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| -1,5         | 0     | 0      | 0,6096 | 0,7723 | 0,8011 | 0,7783 | 0,6804 | 0      | 0 |
| -1           | 0     | 0,6523 | 0,4104 | 0,6937 | 0,789  | 0,7888 | 0,8717 | 1,355  | 0 |
| -0,5         | 0     | 0,7059 | 0,4268 | 0,8676 | 1      | 0,9929 | 0,8978 | 1,181  | 0 |
| 0            | 0     | 0,6685 | 0,3968 | 0,8055 | 0,9181 | 0,9164 | 0,8284 | 0,977  | 0 |
| 0,5          | 0     | 0,5091 | 0,3646 | 0,7074 | 0,7772 | 0,7204 | 0,6339 | 0,7913 | 0 |
| 1            | 0     | 0,4165 | 0,2217 | 0,4373 | 0,4433 | 0,4483 | 0,4904 | 0,7067 | 0 |
| 1,5          | 0     | 0      | 0,3983 | 0,5389 | 0,6411 | 0,4911 | 0,5012 | 0      | 0 |
| 1,8          | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 |

Abb. 5.29: Meßwerte Pixel S6 korrigiert



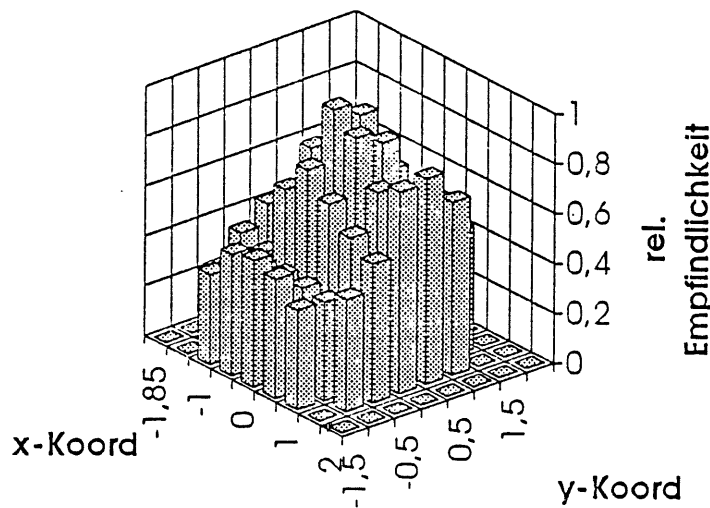
| y- / x-Koord | -1,85 | -1,5   | -1     | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2 |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| -1,5         | 0     | 0      | 0,3865 | 0,6531 | 0,7187 | 0,6534 | 0,6095 | 0      | 0 |
| -1           | 0     | 0,3306 | 0,1403 | 0,2794 | 0,4392 | 0,4061 | 0,355  | 0,3592 | 0 |
| -0,5         | 0     | 0,4824 | 0,5394 | 0,8236 | 0,8881 | 0,8425 | 0,6236 | 0,4934 | 0 |
| 0            | 0     | 0,6017 | 0,486  | 0,9626 | 1      | 0,9611 | 0,6567 | 0,5739 | 0 |
| 0,5          | 0     | 0,4929 | 0,4685 | 0,8682 | 0,8653 | 0,8283 | 0,6905 | 0,6405 | 0 |
| 1            | 0     | 0,4644 | 0,3904 | 0,6464 | 0,6267 | 0,5229 | 0,5642 | 0,68   | 0 |
| 1,5          | 0     | 0      | 0,5001 | 0,7705 | 0,6955 | 0,5784 | 0,6637 | 0      | 0 |
| 1,8          | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 |

Abb. 5.30: Meßwerte Pixel O6 korrigiert



| y- / x-Koord | -1,85 | -1,5   | -1     | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2 |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| -1,5         | 0     | 0      | 0,5115 | 0,6835 | 0,5929 | 0,7439 | 0,801  | 0      | 0 |
| -1           | 0     | 0,4644 | 0,3045 | 0,5444 | 0,5115 | 0,5022 | 0,5254 | 0,3617 | 0 |
| -0,5         | 0     | 0,5686 | 0,3492 | 0,7673 | 0,8157 | 0,5872 | 0,9063 | 1,315  | 0 |
| 0            | 0     | 0,6764 | 0,3746 | 0,8097 | 0,9253 | 0,9637 | 0,9279 | 1,433  | 0 |
| 0,5          | 0     | 0,6045 | 0,3495 | 0,7154 | 0,9735 | 1      | 0,9621 | 1,552  | 0 |
| 1            | 0     | 0,5718 | 0,3385 | 0,5911 | 0,707  | 0,7369 | 0,7968 | 1,209  | 0 |
| 1,5          | 0     | 0      | 0,5486 | 0,8844 | 0,8504 | 1,003  | 1,08   | 0      | 0 |
| 1,8          | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 |

Abb. 5.31: Meßwerte Pixel N6 korrigiert



| y- / x-Koord | -1,85 | -1,5   | -1     | -0,5   | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2 |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| -1,5         | 0     | 0      | 0,3599 | 0,4845 | 0,5054 | 0,4761 | 0,3972 | 0      | 0 |
| -1           | 0     | 0,2989 | 0,2653 | 0,3988 | 0,4102 | 0,4042 | 0,3926 | 0,448  | 0 |
| -0,5         | 0     | 0,408  | 0,3727 | 0,5718 | 0,7964 | 0,7028 | 0,6141 | 0,5543 | 0 |
| 0            | 0     | 0,4867 | 0,3473 | 0,8018 | 1      | 0,9322 | 0,7594 | 0,8067 | 0 |
| 0,5          | 0     | 0,4137 | 0,3    | 0,7234 | 0,9418 | 0,877  | 0,6838 | 0,8233 | 0 |
| 1            | 0     | 0,2656 | 0,229  | 0,2116 | 0,5068 | 0,4679 | 0,5126 | 0,6927 | 0 |
| 1,5          | 0     | 0      | 0,4887 | 0,6048 | 0,3264 | 0,5736 | 0,4949 | 0      | 0 |
| 1,8          | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 |

Abb. 5.32: Meßwerte Pixel N24 korrigiert

Befindet sich die Faser während der Beleuchtung eines der 60 Segmente in einer solchen Position, daß der zu untersuchende Pixel von keinem Teil der Faserstirnfläche bedeckt ist, so müßte das Ausgangssignal des Pixels in diesem Fall Null sein.

Betrachtet man diese Segmente in den unkorrigierten Tabellen, so stellt man fest, daß der gemessene Wert nicht Null ist. Zwei Ursachen sind für diese Beobachtung denkbar:

- Der Mittelpunkt des Pixels befindet sich nicht an der angenommenen Stelle, so daß die Faser tatsächlich den Pixel noch etwas bedeckt
- Durch das Signal-Übersprechen ( Crosstalk ) benachbarter Kanäle liefert der zu untersuchende Kanal ein Ausgangssignal, obwohl sein Nachbarkanal von der Faser beleuchtet wird

Beide Effekte werden nicht durch den zu untersuchenden Pixel verursacht; sie rechtfertigen nicht die Annahme, der Pixel besitze außerhalb seiner Fläche eine von Null verschiedene Empfindlichkeit. Die außerhalb der Pixelfläche gelegenen Segmente haben deshalb in den korrigierten Tabellen den Wert Null erhalten.

Die nachfolgende Abbildung 5.33 zeigt das Bild eines korrigierten Pixels. Man beobachtet daran die typische Erscheinung der Überhöhung der Eckwerte:

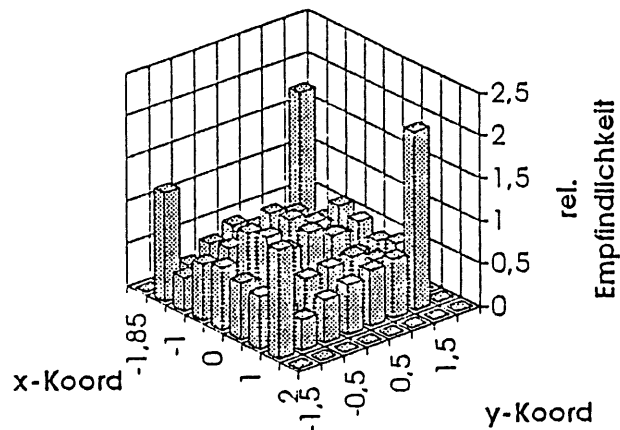


Abb. 5.33: Beispiel eines korrigierten Pixels

Es ist denkbar, daß der zu untersuchende Pixel bei einer Positionierung der Faser auf seiner Ecke besonders viel Übersprech-Signal ( Crosstalk ) erhält, weil gleich drei seiner Nachbar-Pixel durch die Faser mitbeleuchtet werden, wie die folgenden Abbildung 5.34 verdeutlicht:

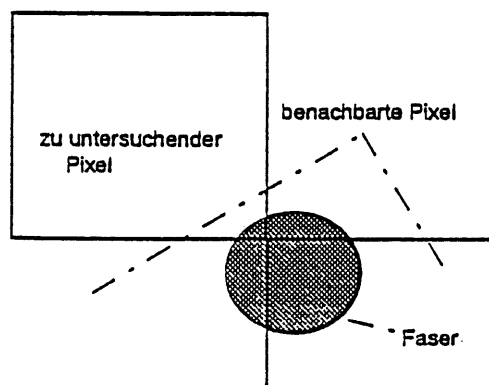


Abb. 5.34: Faserpositionierung auf Pixelecke

Für einige in diesem Abschnitt untersuchten Pixel ist der Crosstalk durch deren umliegende Pixel bekannt, so daß eine rechnerische Korrektur der Überhöhung der Eckwerte mit Hilfe der von uns ermittelten Crosstalk-Werte möglich war. Auch nach dieser Korrektur ist eine sehr deutliche Überhöhung der Eckwerte erkennbar.

Es handelt sich bei der Überhöhung um ein numerisches Problem: Die den Pixelecken zuzuordnenden, fehlerbehafteten Meßwerte sind sehr klein, so daß die bei allen 60 Meßwerten in der gleichen Größenordnung auftretenden Fehler die Eckwerte besonders stark verfälschen. Die dadurch unbrauchbaren Werte der Pixelecken wurden deshalb in den korrigierten Tabellen auf Null gesetzt.

### 5.6.1 Ergebnisse

Wie man sowohl bei den unkorrigierten als auch bei den korrigierten Werten sieht, liegt die lichtempfindlichste Stelle eines Pixels nicht in jedem Fall in dessen Mitte. Die nachstehende Abbildung 5.35 zeigt die Lage des Empfindlichkeitsmaximums bei den von uns überprüften Pixeln:

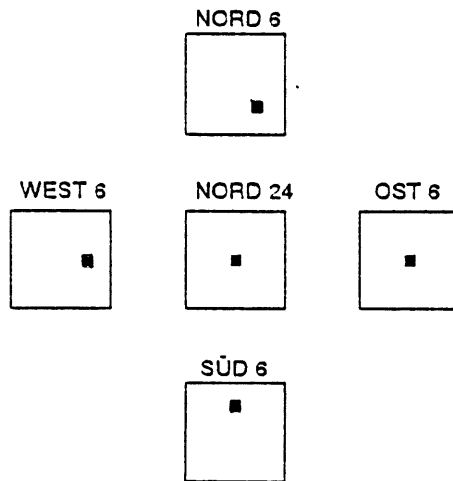


Abb. 5.35: Lage der Maxima der untersuchten Pixel, schematisch



Die Quadrate zeigen, daß bei den Pixeln *Nord24* und *Ost6* die Maxima in deren Mitte liegen, während die Pixel *Nord6*, *West6* und *Süd6* außermittige Maxima besitzen.

In jedem der von uns untersuchten Fälle lag das Maximum, wenn nicht in der Pixelmitte, auf einem direkt benachbarten Meßpunkt: Bei *West6* und *Süd6* bedeutet dies einen Abstand von 0,5mm zum Mittelpunkt und bei *Nord6* handelt es sich wegen der Diagonalverschiebung um 0,71mm. Da die Mittelpunkte von Photomultiplier und Faserhalter mit einer Genauigkeit im Bereich von 0,05mm zueinander justiert wurden und der Faserhalter selbst sowie die Pixelmatrix des Photomultipliers mit Fertigungstoleranzen unter 0,01mm versehen sind, handelt es sich bei der außermittigen Lage der Empfindlichkeitsmaxima nicht um einen Fehler in diesen Bereichen, sondern um eine Eigenschaft des Photomultipliers.

Zur erforderlichen Positioniergenauigkeit läßt sich sagen, daß bei einer Abweichung der Faser um 0,5 mm vom Ort größter Lichtempfindlichkeit Verluste des Ausgangssignals zwischen 5% und 40% auftreten.

## 5.7 Uniformität aller Pixel

Bei einer Anwendung eines Photomultipliers in einem Protonen-Vorwärtsspektrometer soll dieser keine Photonenenergie bestimmen, sondern zur Bahnbestimmung eines Teilchens dessen Durchgang durch eine konkrete Faser feststellen. Hierzu muß der entsprechende Kanal des Photomultipliers zuverlässig und eindeutig auf die von der Faser übertragene Lichtmenge ansprechen.

Die einem Photomultiplier zugeführte Lichtmenge ist proportional zur Energie, die das zu untersuchende Teilchen in der szintillierenden Faser deponiert hat. Da beim Durchgang eines Teilchens durch eine szintillierenden Faser nur eine sehr kleine Lichtmenge erzeugt wird, setzt die Photokathode an der durch diese Faser beleuchteten Stelle nur etwa vier Photoelektronen frei.

Beleuchtet man verschiedene Pixel des Photomultipliers mit dem gleichen Lichtsignal, so erhält man an den Anschlußpins dieser Kanäle deutlich unterschiedliche Ausgangssignale. Dies bedeutet, daß die Kanäle des Photomultipliers ein Signal unterschiedlich verstärken.

Handelt es sich um einen sehr gering verstärkenden Kanal des Photomultipliers, so wird man möglicherweise kein verwertbares Ausgangssignal erhalten, die Information über dieses Teilchen geht also verloren. Um zu beurteilen, ob ein Exemplar eines bestimmten Photomultiplier-Typs verwendet werden soll, muß also auch ermittelt werden, wieviele Kanäle dieses Photomultipliers eine sehr schwache bzw. zu schwache Verstärkung aufweisen.

Die Abbildung 5.36 zeigt das vom Hersteller Philips mitgelieferte Datenblatt der Verstärkung, wobei die Zahlen die relative Verstärkung der einzelnen Kanäle angeben:

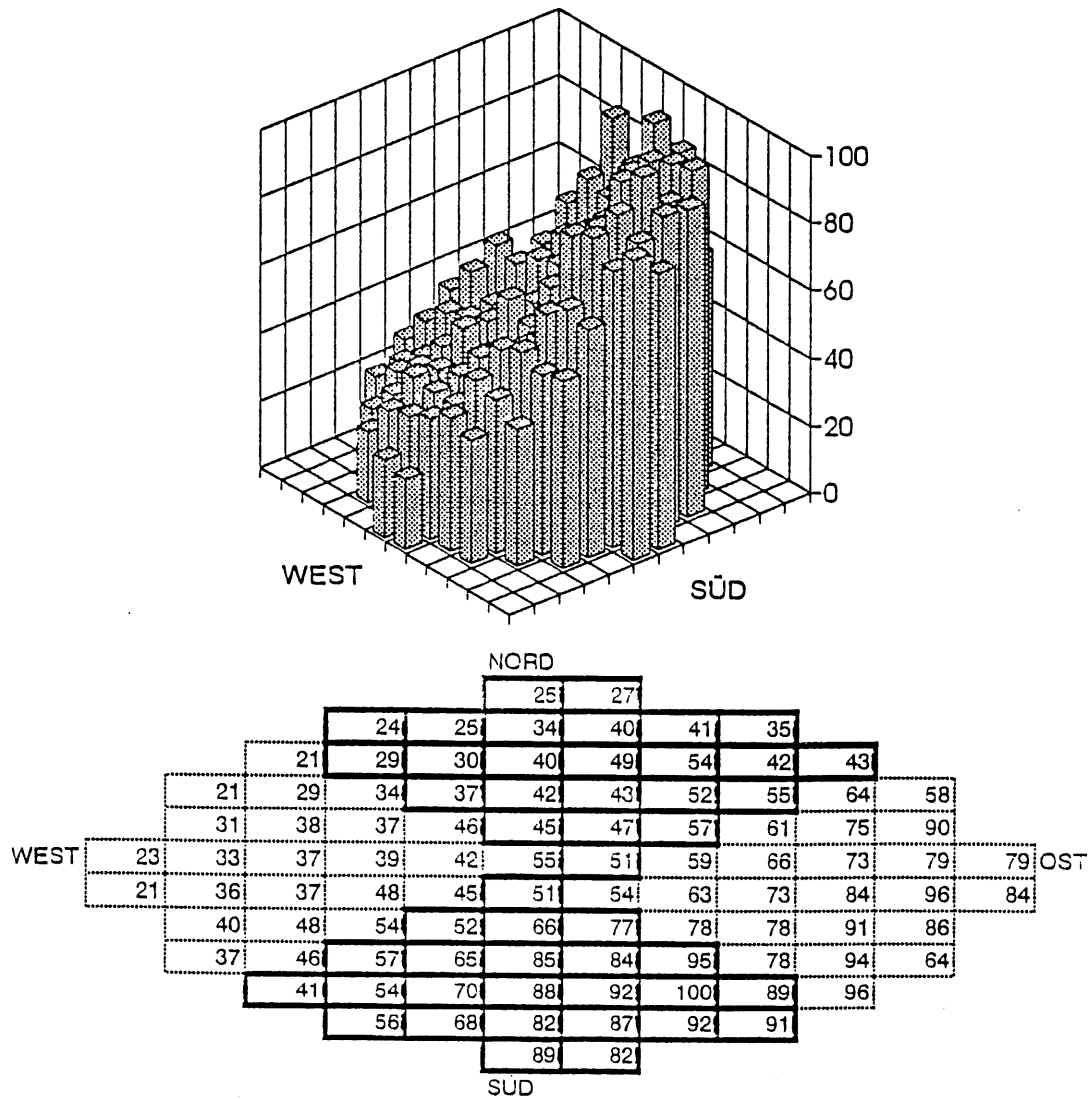


Abb. 5.36: relative Verstärkung der Kanäle, integrale Messung durch Philips

Die Werte dieses Datenblattes wurden durch eine integrale Messung ermittelt, das heißt, alle Pixel des Photomultipliers wurden mit einer gemeinsamen Lichtquelle gleichzeitig beleuchtet und alle Kanäle gleichzeitig ausgelesen.

Bei dieser Messung lieferte der Kanal *Süd14* das größte Ausgangssignal, seine Verstärkung wurde deshalb als 100% bezeichnet. Die weiteren Werte in der Tabelle sind die auf diesen Kanal bezogenen relativen Verstärkungen der anderen Kanäle in Prozent.

Zur Überprüfung des Datenblattes haben auch wir eine solche integrale Messung durchgeführt, wobei die Beleuchtung aller Pixel durch eine in 25 cm Entfernung vor der Vorderseite des Photomultipliers montierte, gepulste LED erfolgte. Alle Kanäle sind dabei durch den Camac-Aufbau ausgelesen worden. Mit Hilfe des optischen Graustufenkeils sollte die Helligkeit der LED dem Photomultiplier angepaßt werden, ansonsten befand sich kein Bauteil zwischen dem Eintrittsfenster des Photomultipliers und der LED. Abbildung 5.37 zeigt das Ergebnis unserer Messung:

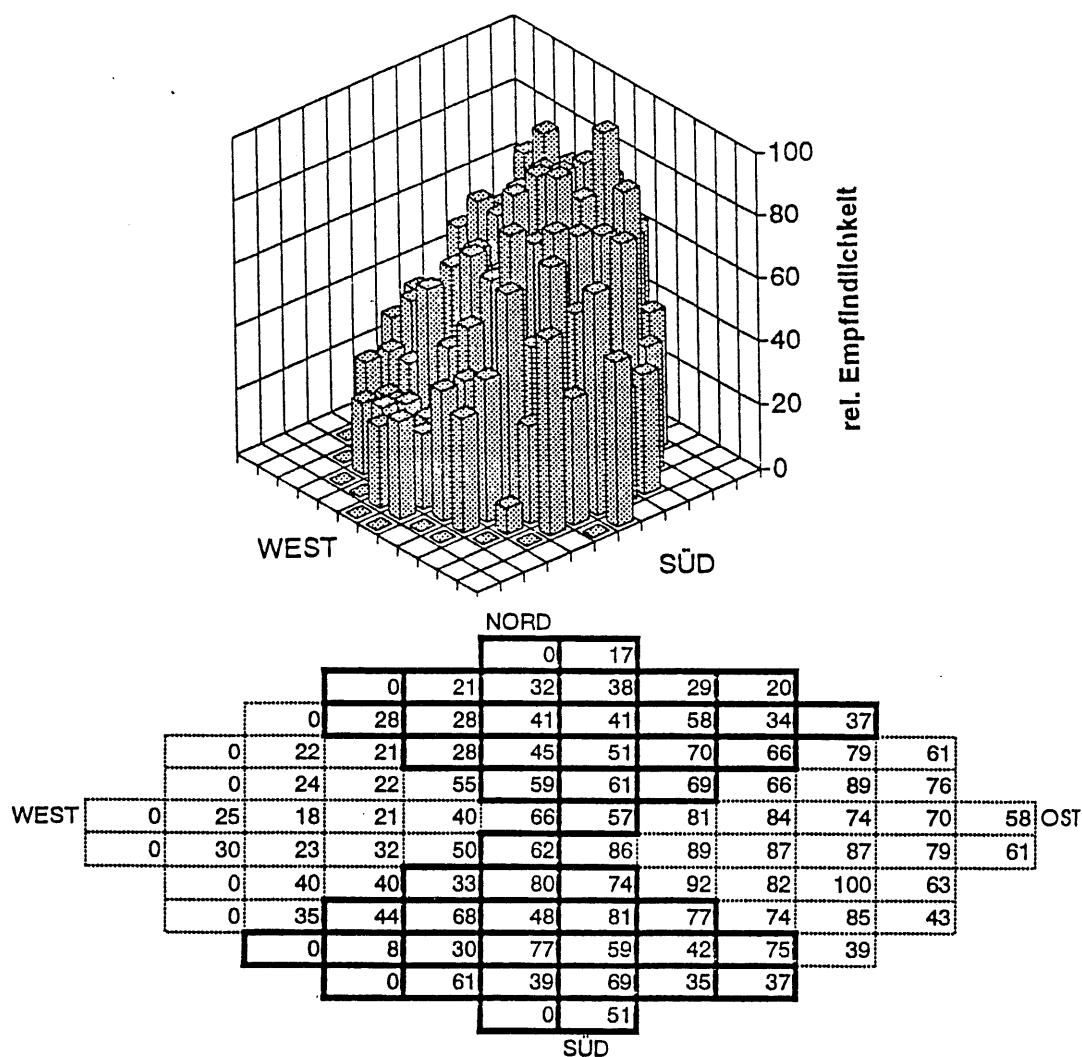


Abb. 5.37: relative Verstärkung der Kanäle, integral, unsere Messung

Man erkennt, daß bei dieser Messung der Kanal *Ost11* das größte Ausgangssignal liefert, die weiteren Zahlen sind die auf diesen Kanal bezogenen relativen Werte.

Bei der in Aussicht stehenden Anwendung des Photomultipliers geht es um die Erfassung von Lichtquanten, die ein durchlaufendes Teilchen in wenigen Fasern eines mehrlagigen Faserdetektors freisetzt. Deshalb werden nur einige Kanäle gleichzeitig Licht erhalten, die auch nicht notwendigerweise benachbart sind.

Das integrale Meßverfahren, bei dem benachbarte Kanäle gleichzeitig Licht erhalten, entspricht nicht dieser Anwendungsform; Schwächung eines Kanals durch das Übertreten von Photoelektronen in benachbarte Kanäle des Photomultipliers ( elektronischer Crosstalk ) führt dabei insgesamt nicht zu einem Verlust an Signalintensität, da gleichzeitig in den Nachbarkanälen eine Signalvergrößerung auftritt.

Da beim integralen Verfahren auch der gerade zu messende Kanal aus seinen Nachbarkanälen eine unbekannt Anzahl von übertretenden Elektronen erhält, ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, die tatsächliche Verstärkung eines Kanals zu ermitteln. Offensichtlich ist, daß das mit Hilfe des integralen Messverfahrens erstellte Philips-Datenblatt zu hohe Werte der Verstärkung liefert. Um realistische Kenntnis über die relative Verstärkung aller Kanäle des Photomultipliers zu erhalten, war ein neues Datenblatt der Verstärkung mit Hilfe des differentiellen Messverfahrens zu erstellen. Das Ergebnis der differentiellen Messungen zeigen die Abbildungen 5.38 und 5.39.

Hierbei erfolgte die Beleuchtung jeweils nur eines zu messenden Kanals, indem dieser das Licht einer gepulsten grünen LED mit Hilfe eines 8 cm langen, nicht-szintillierenden Faserstücks zugeführt bekam. Vor dem Eintrittsfenster des Photomultipliers war zu diesem Zweck der Faserhalter montiert und justiert, in dessen Bohrungen die zu beleuchtende Faser jeweils umgesteckt wurde. Auf diese Weise erhielt man die Verstärkungen der Kanäle in 96 getrennten Messungen.

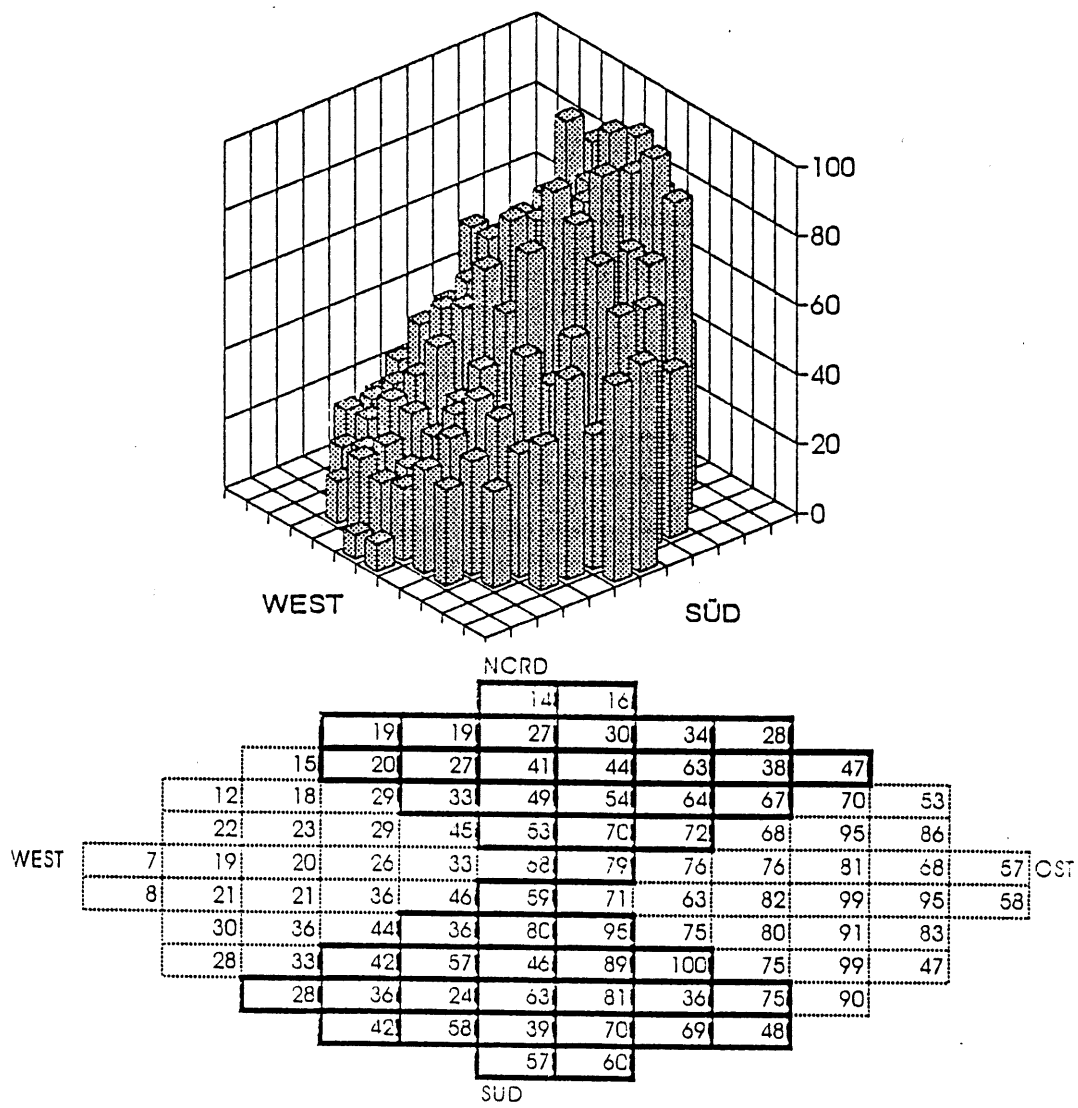


Abb. 5.38: relative Verstärkung der Kanäle, erste differentielle Messung

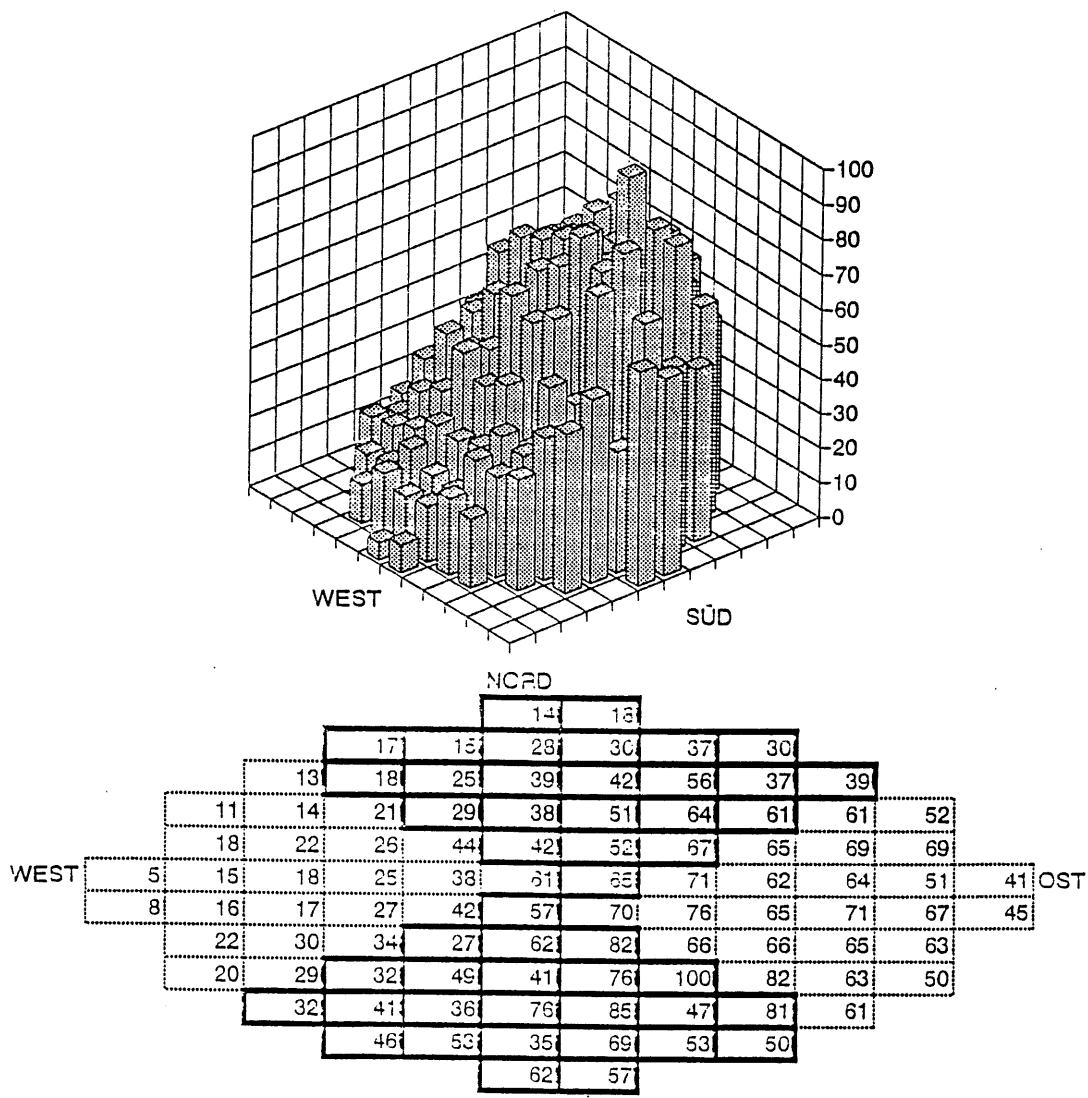


Abb. 5.39: relative Verstärkung der Kanäle, zweite differentielle Messung

Bei diesen beiden Messungen lieferte jeweils der Kanal *Süd20* das stärkste Ausgangssignal, die weiteren Zahlen sind die auf diesen Kanal bezogenen relativen Werte.

Man erkennt in den beiden mit dem differentiellen Verfahren erstellten Tabellen, daß die Verstärkung der Kanäle in der Region Süd-Ost am größten ist und nach Nord-West kontinuierlich abnimmt. Die vier am Rand liegenden Pixel mit den Bezeichnungen *West1*, *West2*, *Nord1* und *West2* liefern, verglichen mit den Werten der umliegenden Pixel, ein sehr schwaches Ausgangssignal. Voraussichtlich können diese Kanäle deshalb in einem Protonen-Vorwärtsspektrometer nicht zur Auslese szintillierender Fasern verwendet werden.

## 5.8 Langzeitstabilität

Der endgültige Versuchsaufbau wurde in der Zeit vom 24. 08. 1993 bis zum 13. 09.1993 einer Messung seiner Langzeitstabilität unterzogen.

Hierzu wurde jeweils der Pixel N24 mit 100 LED-Pulsen beleuchtet und die Ladung der Ausgangspulse des Photomultipliers ermittelt. Um äußere Einflüsse auf den Aufbau so gering wie möglich zu halten, blieb die Ausleseelektronik und die Spannungsversorgung in dieser Zeit ständig eingeschaltet. Auch die LED-Faser-Einheit wurde in dieser Zeit nicht gewechselt; eine nennenswerte Abnutzung der Faser wurde vermieden, indem während des genannten Zeitraumes nur wenige weitere Messungen erfolgten. Die einzige gelegentliche Änderung des Versuchsaufbaus bestand in einem Umstecken der Faser für diese anderen Messungen und anschließendem Zurückstecken auf den Pixel N24.

Die Messung des Pedestal erfolgte, indem der Photomultiplier keine LED-Pulse erhielt. Da die Werte der Pedestal-Messungen kaum schwankten, mußte nicht vor jeder Stabilitätsmessung das Pedestal neu bestimmt werden.

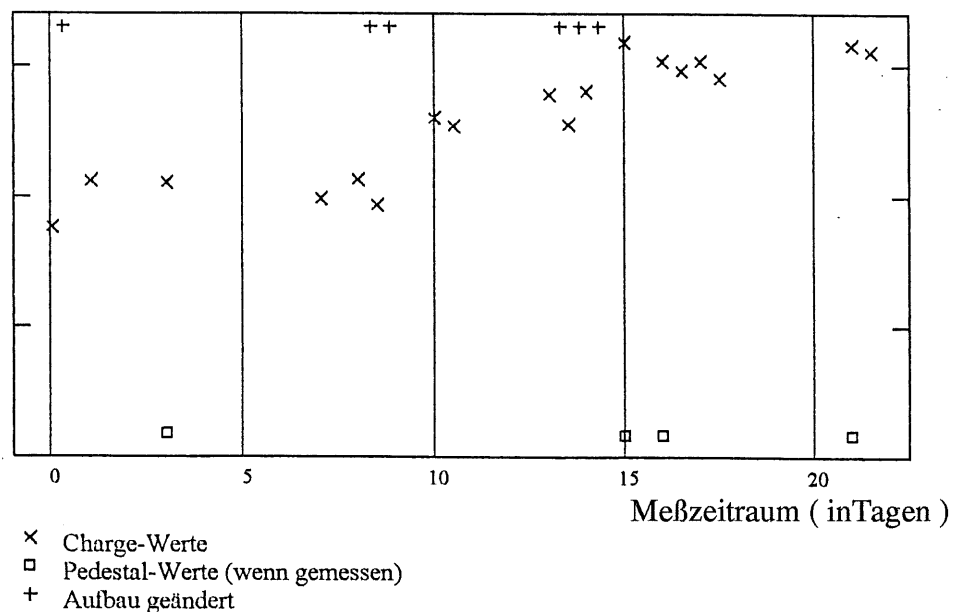


Abb. 5.40: Langzeitstabilität des Aufbaus



Die vorstehende Abbildung 5.40 zeigt die gemessene Ladung der Ausgangspulse in relativen Werten, aufgetragen gegen die Tage des Meß-Zeitraumes. Wie man erkennt, wurden an einigen Tagen zwei Messungen durchgeführt, wobei zwischen beiden auf eine deutliche zeitliche Distanz geachtet wurde.

Durch die Abbildung wird deutlich, daß der Aufbau ausreichend stabil mißt, wenn nichts geändert wird. Nach einem Umstecken der Faser zeigt sich jeweils eine Tendenz zu größeren Werten.

## 6. Zusammenfassung

Im Verlauf dieser Arbeit wurde ein Versuchsaufbau zur Untersuchung eines von der Firma Philips hergestellten positionsempfindlichen Photomultipliers XP 1724 erstellt und der Photomultiplier bezüglich seiner für ein Proton-Vorwärtsspektrometer relevanten Eigenschaften untersucht. Der Versuchsaufbau beinhaltet den mechanischen Aufbau, die Elektronik und die Ausleseprogramme.

Das Signalübersprechen ( Crosstalk ) zwischen benachbarten Kanälen des Photomultipliers liegt, mit Tendenz zu etwas größeren Werten, in der von der Firma Philips angegebenen Größenordnung; die meisten Kanäle verursachen in direkt benachbarte Kanäle ein Crosstalk-Signal unter 8%. Dieses Übersprechen fällt zu weiter entfernten Nachbarn schnell auf weniger als 1% ab, so daß der direkt beleuchtete Kanal 80% des gesamten Ausgangssignals liefert.

Der Versuchsaufbau sollte mit einer Fehlerrate unter 5% arbeiten, was für die einzelnen Komponenten auch eingehalten wurde. Die Fehlerrate der mit dem Gesamtaufbau ermittelten Meßwerte bezüglich der Eigenschaften des Photomultipliers lag allerdings zum Teil deutlich über diesem Wert.

Die Linearität des Photomultipliers bezüglich der eingefallenen Lichtmenge ist bei einer Verwendung in einem Proton-Vorwärtsspektrometer nicht relevant, da damit lediglich der Durchgang eines Teilchens durch eine bestimmte Faser zuverlässig angezeigt werden soll. Trotzdem sei hier erwähnt, daß sich der Photomultiplier im weiten Bereich von 6 bis 259 Photoelektronen bis auf eine Meßungenauigkeit von 1% linear verhält.

Die Untersuchung der Empfindlichkeit aller Kanäle ergab, daß deren Verstärkung um den Faktor 14 variiert. Dies würde sich negativ auf die Verwendung des Photomultipliers in einem Proton-Vorwärtsspektrometer auswirken:

Obwohl das Proton-Vorwärtsspektrometer keine Energiemessung durchführen soll, müßten alle Kanäle eine ähnliche Verstärkung aufweisen, um zwischen einer getroffenen Faser und einem durch Crosstalk aktivierten Kanal unterscheiden zu können. Die Anpassung der Vorverstärker wäre in einer praktischen Anwendung mit mehreren zum Einsatz kommenden Photomultipliern sehr aufwendig.

Außerdem kann nach diesen Messungen nicht ausgeschlossen werden, daß bei jedem Exemplar dieses Photomultiplier-Typs einige Kanäle zu gering verstärken, um überhaupt zum Auslesen einer Faser verwendet zu werden.



# Literaturverzeichnis

- [ 1] Jörg Lipinski: Diplomarbeit *Überwachung des H1- Streamerrohrsystems*, 1992
- [ 2] DESY PR-Abteilung: *Zeichnung H1-Experiment*
- [ 3] DESY PR-Abteilung: DESY Journal, Oktober 1992
- [ 4] DESY: *LOI for a Forward Proton Spectrometer for H1*, 1992
- [ 5] Donald H. Perkins: *Introduction to high energy physics*, 1987
- [ 6] Carsten Wittek: Diplomarbeit *Untersuchungen eines positionsempfindlichen Photomultipliers mit dem Schwerpunkt Programmierung für die Datenauslese*, 1994
- [ 7] DESY: *Roman Pot Meeting*, Februar 1993
- [ 8] DESY: *Minutes of the Roman Pot Meeting*, Mai 1993
- [ 9] Gerthsen, Kneser, Vogel: *Physik*, 1986
- [ 10] Christian Harter: Diplomarbeit *Untersuchungen zum Bau eines schnellen ortsauflösenden Triggerzählers aus szintillierenden Fasern und einem 64-Kanal-Photomultiplier*, Mai 1993
- [ 11] H. Frauenfelder, E. M. Henley: *Teilchen und Kerne*, 1979
- [ 12] Philips: *XP 1700 family of a multi-channel photomultiplier*, 1992
- [ 13] Philips: *Photomultiplier Tubes preliminary specification*, 1991
- [ 14] Struck: *DL 515 Flash ADC-Manual*



# Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Büßer für die Ermöglichung und sein stetes Interesse am Gelingen dieser Arbeit.

Herrn Dr. Niebergall danke ich für die intensive und freundliche Betreuung,

allen Mitarbeitern der Neutrino-Gruppe für die Hilfsbereitschaft und die gute Arbeitsatmosphäre,

der Gruppe TEB, der mechanischen Werkstatt und der elektronischen Werkstatt für die stets erhaltene Hilfe und Beratung

und den Diplomanden Carsten Wittek und Uwe Wolter für die gute Zusammenarbeit.

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