5. Der Multianodenphotomultiplier Hamamatsu R 4760

Die innere Lage des EDDA-Detektors besteht aus 640 szintillierenden Fasern, die einzeln mit Multianodenphotomultipliern ausgelesen werden. Aufgrund ihrer im Vergleich zur entsprechenden Anzahl von Einkanalphotomultipliern kompakten Abmessungen und ihres vergleichsweise niedrigen Preises pro Kanal sind für diese Anwendung Multianodenphotomultiplier besonders interessant. Aufgrund des Übersprechens zwischen den Kanälen und einer z.T. geringen Quanteneffizienz erwiesen sich die zunächst vorgesehenen 64-Kanal-Photomultiplier Philips XP 4702 / XP 4722 für den Einsatz im EDDA-Detektor als ungeeignet [JOO92]. Der ursprünglich für medizintechnische Anwendungen entwickelte Hamamatsu R4760 stellt eine prüfenswerte Alternative dar.

5.1 Aufbau

Der Hamamatsu R 4760 ist ein 16 - Kanal - Multianodenphotomultiplier. Er besteht aus 16 separaten, 10-stufigen Dynodensystemen mit gemeinsamer Spannungsversorgung in einem gemeinsamen Gehäuse. Die 16 Kathodenfenster aus 2 mm dickem Borsilikatglas sind optisch voneinander getrennt in die auf Kathodenpotential gelegte Metallfrontplatte des R 4760 eingelassen. Die Photokathoden haben eine Bialkali-Beschichtung, deren spektrale Empfindlichkeit (vgl. Anhang B, Abb. B4) ihr Maximum im Bereich der Emissionswellenlänge der verwendeten szintillierenden Fasern annimmt. Der nutzbare Kathodendurchmesser beträgt 7 mm. Weitere technische Daten finden sich im Anhang B.

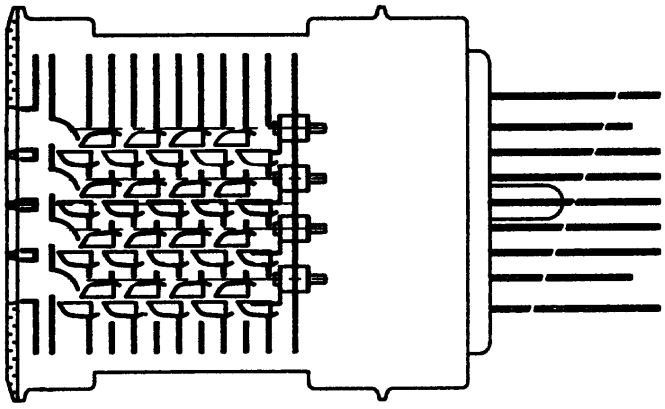


Abb. 5.1.1. Schnittzeichnung der Hamamatsu R 4760 [HAM93]

5.2. Spannungsversorgung des Photomultipliers

Für die Hamamatsu R 4760 wird weder ein konfektionierter Spannungsteiler noch ein Stecksockel angeboten. Da die Anschlüsse der Röhre aus biegsamem Draht (0,5 mm Durchmesser) bestehen, erwies sich die Verwendung von Steckkontakten als problematisch. Deshalb war die Entwicklung eines auflötbaren Spannungsteilers notwendig.

Der Hersteller schlägt folgenden Spannungsteiler vor [HAM92]:

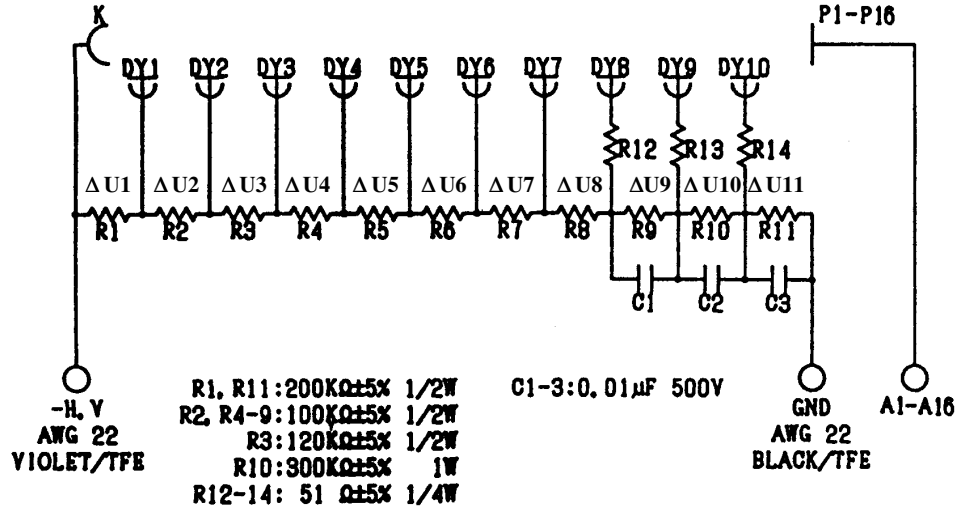


Abb. 5.2.2. Spannungsteiler nach Herstellerempfehlung

Der Stromfluß durch den Spannungsteiler von 820 µA bei U = 1250 V ist für den Einsatz im EDDA - Experiment unzureichend.
Der mittlere Anodenstrom pro Röhre berechnet sich nach

$$I = \frac{\nu \cdot \eta \cdot n_R \cdot V \cdot n_{PE} \cdot e_0}{n_F} \qquad (5.2.3)$$

Mit

- ν = 1 MHz (Gesamtzählrate in allen 4 Detektorlagen)
- η = 0,9 (Effizienz einer einzelnen Detektorlage)
- n_R = 16 (Anzahl von Fasern je Röhre)
- $V = 2{,}5 \cdot 10^7$ (mittlere Verstärkung der Photomultiplierkanäle)
- n_{PE} = 15 (mittlere Photoelektronenzahl je nachgewiesenem Teilchen)
- n_F = 160 (Anzahl der Fasern pro Detektorlage) sowie der
- Elementarladung e_0

ergibt sich ein totaler Anodenstrom von ca. 5,5 µA, d.h. bezogen auf 820 µA ca. 7 ‰.

Um Schwankungen der Verstärkung der Röhre zu vermeiden, sollte der Anodenstrom jedoch in der Größenordnung von 1 - 3 ‰ des Stroms durch den Spannungsteiler liegen [MIC63]. Daher ist eine Erhöhung des Stromflusses durch den Spannungsteiler unumgänglich. Zur Stabilisierung der Verstärkung wurde zusätzlich die Kapazität der Kondensatoren C1 bis C3 von 10 nF auf 47 nF erhöht.

Nach oben wird jedoch der zulässige Stromfluß durch den Spannungsteiler durch zwei Faktoren begrenzt:

1. Die Hochspannungsversorgung stellt eine Stromstärke von maximal 2 mA zur Verfügung.
2. Die Abführung der im Spannungsteiler freiwerdenden Wärme muß gewährleistet sein. Um eine unzulässige Erwärmung des Spannungsteilers zu vermeiden, darf eine Verlustleistung von 2 Watt nicht überschritten werden.

Daher ist eine Erhöhung des Stroms durch den Spannungsteiler auf über 1,5 mA nicht ratsam.

Außerdem wurde untersucht, inwieweit eine Veränderung des Spannungsteilungsverhältnisses günstigere Eigenschaften für den Betrieb im EDDA-Detektor schafft. Die Messungen wurden an einer Prototyp - Röhre (Seriennummer ZC 7662) durchgeführt.
Dazu wurde ein Spannungsteiler nach Herstellerempfehlung angefertigt, bei dem die Widerstände R1 und R2 durch Regelwiderstände ersetzt wurden. Durch systematische Variation der Spannungen U1 und U2 wurde der günstigste Betriebspunkt für eine Betriebsspannung von U = 1250 V gesucht.

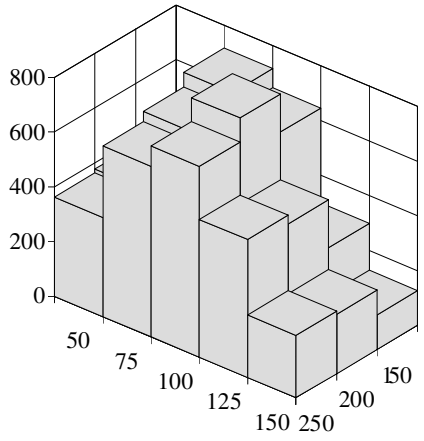


Abb. 5.2.3. Einfluß der Widerstände R1 und R2 auf die Signalamplitude des Hamamatsu R 4760 (gemessen an Pixel 4)

Die maximale Signalamplitude wird für die von Hamamatsu vorgeschlagenen Werte von R1 = 200 kΩ und R2 = 100 kΩ erreicht.

Eine Erhöhung von U1 (zulässiger Maximalwert: 500 V [HAM93]) verringert jedoch die Unterschiede zwischen den Signalamplituden der einzelnen Kanäle. Bei konstant gehaltener Gesamtspannung führt eine Erhöhung von U1 allerdings zu einer Reduzierung von U2 bis U11 und damit zu einer geringeren Verstärkung der Röhre. Dies kann bei einem Teil der Röhren dazu führen, daß die Signalamplituden einzelner Pixel für eine Ankopplung an das PCOS-System (Vgl. Kap. 6) unzureichend sind. Daher wurde U1 gegenüber dem Hamamatsu -Vorschlag um 100 V und die Gesamtspannung ebenfalls um 100 V auf 1350 V erhöht.
Dies führt zu einer verbesserten Homogenität der Röhre (Verhältnis der Signalamplituden bei gleichmäßiger Ausleuchtung aller Pixel der Röhre 1 : 4,4 statt 1 : 7). Da jedoch ein Dauerbetrieb der Röhre bei Spannungen oberhalb 1250 V nicht empfohlen wird [HAM93], ist das von Hamamatsu vorgegebene Spannungsteilungsverhältnis für den Betrieb im EDDA - Detektor vorzuziehen.

Die Bestückung des Spannungsteilers (vgl. Abb. 4.2.2.) wurde folgendermaßen abgeändert:

R1, R11	110 kΩ ± 1%, 0,25 W
R2, R4 - R9	56 kΩ ± 1%, 0,25 W
R3	68 kΩ ± 1%. 0,25 W
R10	160 kΩ ± 1%, 0,5 W
R12 - R14	51 Ω ± 5%, 0,25 W
C1, C3	47 nF ± 5%, 250 V
C2	47 nF ± 5%, 400 V

Für den so modifizierten Spannungsteiler wurde eine auf die Anschlußdrähte der Röhre auflötbare Platine entwickelt und getestet. Das Platinenlayout ist in Anhang B abgebildet.

5.3 Eigenschaften des Hamamatsu R 4760

Im Folgenden sollen die Eigenschaften des Multianodenphotomultipliers Hamamatsu R 4760 dargestellt werden. Die Messungen wurden größtenteils an den ersten zur Verfügung stehenden Serienexemplaren des Typs R 4760 durchgeführt.

5.3.1. Single Electron Peak

In Kapitel 2.2 wurde bereits der Single-Electron-Peak (SEP) als wichtige Größe zur Eichung von Photomultiplier-Spektren vorgestellt. Zusätzlich ermöglicht es die Kenntnis der Lage des SEP, die Verstärkung der einzelnen Multiplierkanäle

zu bestimmen. Mit dem in Abb. 2.2.3 vorgestellten Aufbau wurden die Einelektronen-Spektren der R 4760 aufgenommen. Dabei wurde die Lichtintensität in mehreren Schritten soweit reduziert, bis der Signalpeak sich nicht mehr zum Nullkanal hin bewegt, sondern nur noch an Intensität verliert.
Die Messungen wurden mit der in Abb. 2.2.3 dargestellten Schaltung durchgeführt.

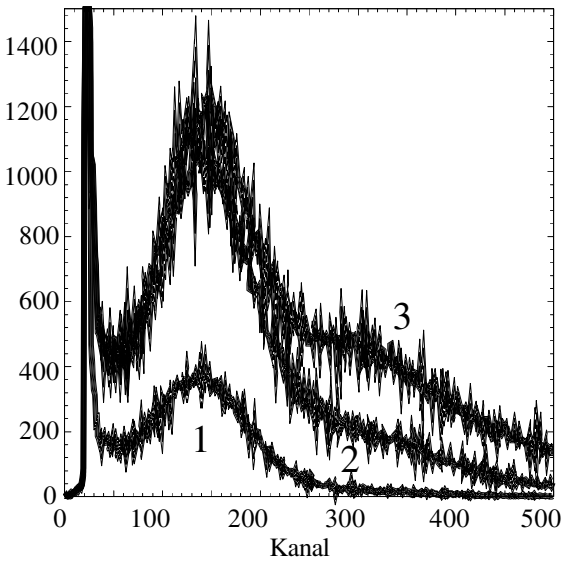


Abb. 5.3.1 ADC-Spektrum der Hamamatsu R 4760 bei 85-facher Verstärkung (1 ADC-Kanal entspricht 28 fC) und verschiedenen Lichtintensitäten ($I_1 < I_2 < I_3$); das Einelektronensignal ist bei Kanal 140 zu erkennen. Spektrum 3 zeigt bei Kanal 300 ein Zweielektronensignal (vgl. Abb. 2.2.4.).

Im Gegensatz zu anderen Multianodenphotomultipliern (z.B. Philips XP 4702 / XP 4722 [WIE91], [JOO92]) ist bei der Hamamatsu R 4760 bei allen Pixeln der Single Electron Peak deutlich erkennbar.
Somit ist es möglich, aus der Lage des Schwerpunkes des Single-Electron-Peaks die Verstärkung der Multiplierkanäle abzuschätzen. Die Verstärkung V der Multiplierkanäle berechnet sich nach

$$V = \frac{CH_{SEP} \cdot A_{ADC}}{V_N \cdot e_0} \quad (5.3.2)$$

Mit

- CH_{SEP} : Abstand Single-Electron-Peak - Nullkanal in ADC - Kanälen
- A_{ADC} = 0,25 pC / Kanal:
  Auflösung des ADC

- $V_N = 15$: Verstärkungsfaktor des zwischen Photomultiplier und ADC geschalteten Verstärkers
- e_0 : Elementarladung

ergeben sich folgende Werte:

Kanal	eigene Messung	Herstellerangabe
1	$(1{,}9\pm0{,}3)\cdot10^7$	$2{,}2\cdot10^7$
2	$(1{,}8\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}8\cdot10^7$
3	$(1{,}4\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}3\cdot10^7$
4	$(1{,}8\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}9\cdot10^7$
5	$(1{,}4\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}5\cdot10^7$
6	$(1{,}1\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}6\cdot10^7$
7	$(1{,}6\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}7\cdot10^7$
8	$(1{,}6\pm0{,}2)\cdot10^7$	$2{,}2\cdot10^7$
9	$(1{,}5\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}4\cdot10^7$
10	$(2{,}0\pm0{,}3)\cdot10^7$	$2{,}0\cdot10^7$
11	$(1{,}4\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}1\cdot10^7$
12	$(1{,}6\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}7\cdot10^7$
13	$(1{,}5\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}6\cdot10^7$
14	$(1{,}8\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}7\cdot10^7$
15	$(1{,}1\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}9\cdot10^7$
16	$(1{,}4\pm0{,}2)\cdot10^7$	$1{,}8\cdot10^7$

Tab. 5.3.3 Verstärkung der Röhre Nr. MA 0064 bei U = 1250 V

Die Fehler ergeben sich aus

$$\Delta V = V \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta CH_{SEP}}{CH_{SEP}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A_{ADC}}{A_{ADC}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_N}{V_N}\right)^2} \quad (5.3.4)$$

mit

- $\Delta CH_{SEP} = 5$ ADC - Kanäle
- $\Delta A_{ADC} = 12{,}5$ fC / ADC - Kanal
- $\Delta V_N = 1$

Die Herstellerangaben (entnommen dem Datenblatt vom 11.2.93) stimmen gut mit den eigenen Abschätzungen überein. Deutliche Diskrepanzen sind lediglich bei den Pixeln 6, 8 und 15 zu erkennen. Die Herstellerangaben, deren Meßunsicherheit nicht angegeben wird, entstanden durch Messung der Anodenströme bei gleich mäßiger Beleuchtung der Kathoden mit Licht einer Wolfram - Halogenlampe (Farbtemperatur: 2856 K).

5.3.2 Quanteneffizienz

Die Quanteneffizienz ist ein wichtiges Maß für die Lichtempfindlichkeit der Photokathode eines Photomultipliers. Sie ist definiert als

$$\eta = \frac{n_{e^-}}{n_\gamma} \quad (5.3.5)$$

mit n_{e^-}: Anzahl der aus der Photokathode ausgeschlagenen Photoelektronen und
n_γ: Anzahl der auf die Photokathode auftreffenden Photonen

Zum Erreichen einer Nachweiseffizienz der Photomultiplier-Lichtpulse von >99% sind (vgl. Kap. 6) mindestens 10 Photoelektronen pro eintreffendem Lichtpuls notwendig. In Kapitel 3.1. wurde gezeigt, daß unter realistischen Bedingungen im Minimum mit ca. 20 Photoelektronen je Puls (gemessen mit einem Photomultiplier Hamamatsu R 1635-02; $\eta = 0{,}24$) zu erwarten sind. Dies entspricht ca. 85 Photonen je Lichtpuls. Daraus ergibt sich die Forderung, daß die Quanteneffizienz der Multiplierkanäle mindestens 12 % betragen muß, um die erforderliche Photoelektronenzahl zu gewährleisten.

Da die Quanteneffizienz der Photokathode von der Energie der auftreffenden Photonen abhängig ist (vgl. Anhang B, Abb. B), soll im Folgenden der Begriff Quanteneffizienz für den jeweiligen Wert bei einer Lichtwellenlänge von $\lambda \approx 440$ nm stehen. Dies entspricht dem Bereich der Emissionswellenlänge der verwendeten szintillierenden Fasern und der zum Test verwendeten blauen LED.

Der Hersteller bestimmt die Lichtempfindlichkeit der Photokathode durch Messung des Photoelektronenstroms an der 1. Dynode bei Beleuchtung der Photokathoden mit Gleichlicht einer Wolfram - Halogenlampe. Dabei werden zwei verschiedene Abhängigkeiten gemessen:

- Abhängigkeit des Photoelektronenstroms von der durch die Photonen in der Photokathode deponierten Leistung ('Radiant Sensitivity' S_λ) und
- Abhängigkeit des Photoelektronenstroms von der Lichtintensität, mit der die Photokathode durch die Wolfram - Halogenlampe beleuchtet wird ('Luminous Sensitivity' S_k)

Quanteneffizienz und Radiant Sensitivity hängen eng zusammen; es gilt [HAM88]:

$$\eta = \frac{1{,}24 \cdot S_\lambda \left[\frac{\mu A}{W}\right]}{\lambda[\mathrm{nm}]} \quad (5.3.6;\ \text{s. auch Anhang B, Abb. B4}).$$

Der Hersteller gibt allerdings in seinen den Photomultipliern beiliegenden Datenblättern ausschließlich die 'Luminous Sensitivity' an. Eine Umrechnung

zwischen Luminous Sensitivity und Quanteneffizienz ist nur bedingt möglich; zur Abschätzung kann die Herstellerangabe dienen, daß die typischen Werte für die Hamamatsu R4760 bei $S_\lambda = 50$ mA/W (entspricht $\eta = 0{,}14$ bei $\lambda = 440$ nm) und $S_k = 50$ µA/lm betragen.
Zur Bestimmung der Quanteneffizienz unter Betriebsbedingungen, die denen beim Einsatz im EDDA - Detektor entsprechen, wurde zunächst die Leuchtintensität einer Vergleichslichtquelle (über den in Kap. 4 vorgestellten Pulsgenerator angesteuerte blaue LED) bestimmt.

Dazu wurde mit Hilfe eines Photomultipliers bekannter Quanteneffizienz (Hamamatsu R1635-02; $\eta = 0{,}24$) ein ADC-Spektrum der LED - Lichtpulse aufgenommen und mit dem Spektrum eines Single - Electron - Peaks verglichen (s. Kapitel 2.2, Formel 2.2.5).

Dabei wurde folgende Schaltung verwendet:

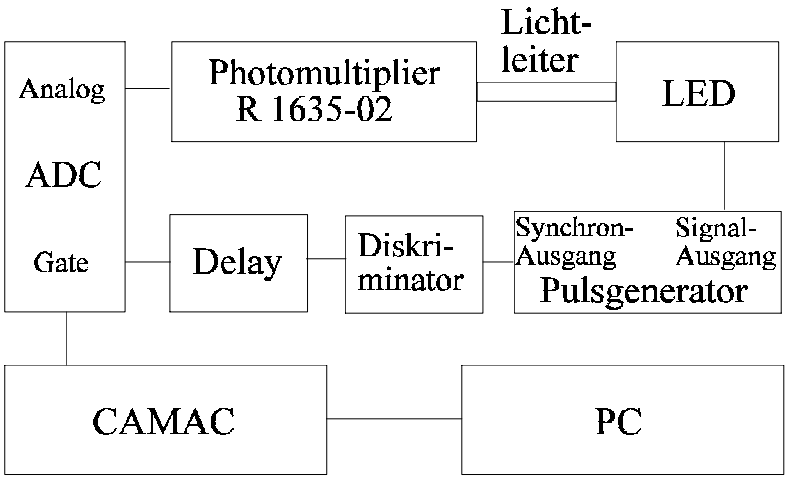


Abb. 5.3.6 Schaltung zur Bestimmung der Lichtintensität der LED-Lichtpulse

Die so geeichte Vergleichslichtquelle (500 ± 25 Photonen / Lichtpuls) wurde nun zur Beleuchtung der einzelnen Kathoden der Hamamatsu R 4760 verwendet und die Quanteneffizienz nach (5.3.5) berechnet. Es hat sich gezeigt, daß die Angaben des Herstellers trotz des erheblichen Unterschieds im Meßverfahren gut mit den eigenen Messungen übereinstimmen, wie ein Vergleich zwischen Herstellerangabe und Meßwert am Beispiel der Röhre Nr. MA 0021 zeigt:

Pixel	Quanteneffizienz (QE)	QE (nach Herstellerangabe)
1	0,17±0,01	0,16
2	0,15±0,01	0,14
3	0,16±0,01	0,13
4	0,17±0,01	0,14
5	0,16±0,01	0,15
6	0,14±0,01	0,14
7	0,15±0,01	0,14
8	0,11±0,01	0,13
9	0,15±0,01	0,15
10	0,16±0,01	0,14
11	0,19±0,01	0,14
12	0,16±0,01	0,14
13	0,18±0,01	0,14
14	0,20±0,01	0,15
15	0,16±0,01	0,13
16	0,16±0,01	0,14

Tab. 5.3.7. Quanteneffizienzen der Röhre Nr. MA 0021

In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß bei einigen Röhren des Typs Hamamatsu R4760 die Verstärkung der Multiplierkanäle bei Photoelektronenzahlen oberhalb ca. 20 deutlich abnimmt. Betroffen sind Kanäle, deren Verstärkung größer als 10^7 ist. Da bei dem hier vorgestellten Meßverfahren Photoelektronenzahlen zwischen ca. 50 und 100 (je nach Quanteneffizienz des jeweiligen Photomultiplierkanals) auftreten, ist ein Rückgang der Verstärkung gegenüber der Verstärkung bei Aufnahme des SEP nicht auszuschließen. Daher ist eine Berechnung der Photoelektronenzahl nach (2.2.5) unzuverlässig.

Deshalb wurde für die Werte in Tabelle 5.3.7 die Photoelektronenzahl aus Lage und Breite des Signalpeaks gewonnen. Dabei wurde angenommen, daß die Impulsamplituden um den Mittelwert μ (dem die ADC-Kanalzahl CH_{SIG} entspricht; $\mu = \text{const} \cdot CH_{SIG}$) poissonverteilt sind:

$$P(n,\mu) = \frac{\mu^n \cdot e^{-\mu}}{n!} \qquad (5.3.8)$$

Die Standardabweichung der Verteilung beträgt

$$\sigma = \sqrt{\mu} = \text{const} \cdot \sqrt{CH_{SIG}} \qquad (5.3.9)$$

Für hinreichend große Photoelektronenzahlen (n > 5) ist es möglich, σ ohne nennenswerten Fehler aus der Halbwertsbreite (FWHM) der Verteilung zu erhalten, was streng nur bei Gaussverteilungen möglich ist.

Mit $$\sigma = \frac{FWHM}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2}} \approx \frac{FWHM}{2,355} \qquad (5.3.10)$$

gilt dann: $$N_{PE} = \left(2,355 \cdot \frac{CH_{SIG}}{FWHM} \right)^2 \qquad (5.3.11)$$

Die Tabelle (5.3.7) zugrundeliegenden Photoelektronenzahlen wurden nach (5.3.11) berechnet.

5.3.3 Übersprechen ('Crosstalk')

Aufgrund der räumlichen Nähe benachbarter Kanäle von Multianodenphotomultipliern ist ein Übersprechen (Crosstalk) von Signalen in die Nachbarkanäle nicht auszuschließen. Das Übersprechen kann 2 Ursachen haben:

- optisches Übsersprechen: Der eintreffende Lichtpuls fällt teilweise auf Photokathoden benachbarter Kanäle
- elektronisches Übersprechen: Die von der Photokathode emittierten Photoelektronen oder die von den Dynoden freigesetzten Sekundärelektronen treten teilweise in benachbarte Kanäle über.

Aufgrund der speziellen Konstruktion der Frontplatte der Hamamatsu R 4760 (16 separat in eine Metallplatte eingelassene Kathodenfenster) ist ein optisches Übersprechen weitgehend auszuschließen.

Zur Bestimmung des Übersprechens mittels Schaltung 5.3.13 wurde Pixel 6 der Prototypröhre (Seriennummer ZC7226) mit einer blauen LED beleuchtet (Intensität: 500 ± 25 Photonen / Puls).

Es gilt

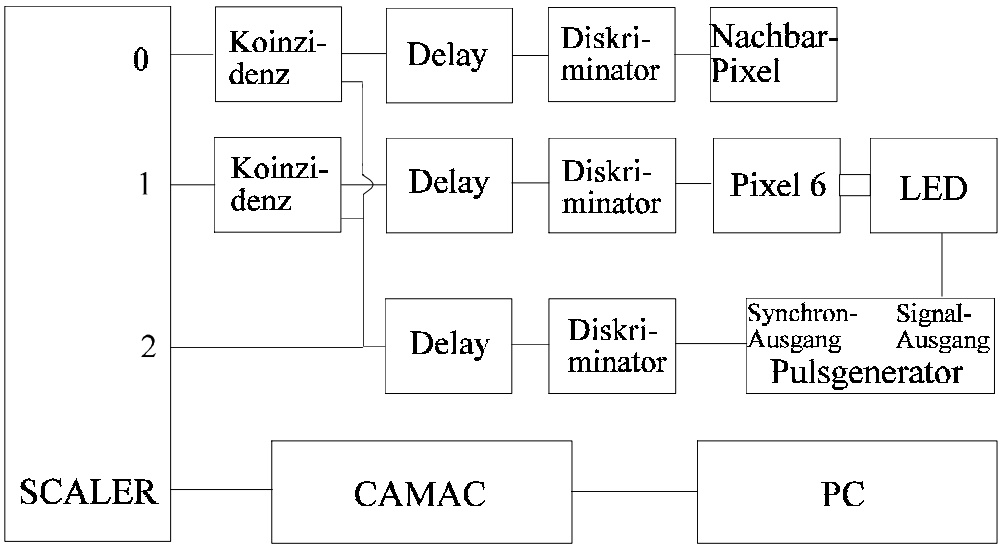
$$CT = \frac{N_{SIG}}{N_{LED}} \quad (5.3.11) \quad .$$

mit:

- CT: Übersprechen
- N_{SIG}: Zählrate der LED - Pulse
- N_{SIG}: Zählrate der vom betrachteten Multiplierkanal detektierten Pulse

Die Diskriminatorschwellen wurden unterhalb der Amplitude des Single - Electron - Peaks des jeweiligen Pixels eingestellt; als Übersprechen wurden diejenigen

Signale angesehen, die innerhalb eines Zeitfensters von 50 ns zeitgleich mit dem LED - Lichtpuls waren.



5.3.13 Schaltung zur Bestimmung des Übersprechens

1	2	3
5	6	7
9	10	11

(a)

0,77± 0,06	0,63± 0,06	0,37± 0,04
1,61± 0,09	999± 2	0,36± 0,04
0,19± 0,03	0,11± 0,02	0,09± 0,02

(b)

5.3.14. Anordnung der Pixel der Hamamatsu R4760 (a); Übersprechen in ‰ (b)

Der Summe des Übersprechens in alle benachbarten Kanäle beträgt (4,1±0,1) ‰ und stimmt somit gut mit der Herstellerangabe von 3 ‰ überein und liegt somit um mehr als eine Größenordnung niedriger als bei anderen Multianoden -Photomultipliern [JOO92]. Aufgrund der niedrigen Amplitude (in der Regel im Bereich von Ein- und Zweielektronensignalen) ist das Übersprechen zudem leicht vom Nutzsignal des jeweiligen Photomultiplierkanals zu diskriminieren.

5.4 Zusammenfassung

Der Hamamatsu R 4760 erfüllt die Anforderungen, die an einen Multianoden - Photomultiplier zur Auslese szintillierender Fasern im EDDA - Detektor gestellt werden. Mit einer mittleren Quanteneffizienz von 15 % bis 16 % ist eine zum effizienten Nachweis der Szintillatorlichtpulse ausreichende Photoelektronenzahl gewährleistet. Allerdings ist es dem Hersteller z.Zt. nicht möglich, bei großen Lieferstückzahlen eine ausreichende Quanteneffizienz aller Röhrenkanäle zu gewährleisten. Bei einigen Röhren ist die Quanteneffizienz von bis zu vier Kanälen unzureichend, so daß im Mittel nur 14 bis 15 nutzbare Kanäle je Photomultiplier zur Verfügung stehen. Die Verstärkung variiert zwischen den Kanälen einer Röhre im Regelfall um einen Faktor 2 bis 3. Diese geringe Schwankungsbreite erlaubt eine unproblematische Ankopplung an das LeCroy PCOS III - System (vgl. Kap. 6). Die einzelnen Kanäle sind weitgehend voneinander entkoppelt; das Übersprechen zwischen den Kanälen beträgt nur ca. 3 bis 4 ‰.