

Messungen an Photomultipliern  
im Magnetfeld bis zu 1.2 Tesla  
und Parametrisierung  
ihrer Eigenschaften für den Bau  
eines Spaghettikalorimeters

T. Bipp

Diplomarbeit  
von  
Thomas Bipp

II. Institut für Experimentalphysik  
der Universität Hamburg  
im Juni 1994

Messungen an Photomultipliern  
im Magnetfeld bis zu 1.2 Tesla  
und Parametrisierung  
ihrer Eigenschaften für den Bau  
eines Spaghettikalorimeters

Diplomarbeit  
von  
Thomas Bipp

II. Institut für Experimentalphysik  
der Universität Hamburg  
im Juni 1994



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Einleitung	1
<b>1 Der Universaldetektor H 1</b>	<b>5</b>
1.1 Der Neubau des rückwärtigen Kalorimeters . . . . .	8
<b>2 Photomultiplier</b>	<b>13</b>
2.1 Photomultipliertypen . . . . .	13
2.2 Die Photokathode . . . . .	15
2.3 Das Dynodensystem . . . . .	18
2.4 Die Spannungsversorgung . . . . .	19
2.5 Die Verstärkung von Photomultipliern . . . . .	21
2.6 Photomultiplier im Magnetfeld . . . . .	23
<b>3 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>25</b>
3.1 Der Versuchsaufbau . . . . .	25
3.1.1 Der mechanische Aufbau . . . . .	25
3.1.2 Die Spannungsteiler . . . . .	28
3.1.3 Die Lichtquellen und Lichtleiter . . . . .	29
3.1.4 Der Magnet . . . . .	31
3.2 Die Durchführung der Messungen . . . . .	31
3.2.1 Der Versorgungsspannungstest . . . . .	33
3.2.2 Der Magnetfeldtest . . . . .	33
3.2.3 Die Kathodenabtastungen . . . . .	33
3.2.4 Der Stabilitätstest . . . . .	34
3.2.5 Der Temperaturtest . . . . .	35
3.2.6 Die Impulslinearitätstests . . . . .	35
3.2.7 Untersuchungen hinsichtlich von Alterungseffekten und der zu erwartenden Lebensdauer . . . . .	39
3.3 Das Meßprogramm . . . . .	40

<b>4 Ergebnisse</b>	<b>41</b>
4.1 Der Langzeitstabilitätstest . . . . .	41
4.2 Der Versorgungsspannungstest . . . . .	42
4.2.1 Die 1" - Photomultiplier . . . . .	42
4.2.2 Die 2" - Photomultiplier . . . . .	43
4.3 Der Magnetfeldtest . . . . .	45
4.3.1 Die 1" - Photomultiplier . . . . .	45
4.3.2 Die 2" - Photomultiplier . . . . .	47
4.4 Die Kathodenabtastungen . . . . .	48
4.4.1 Die 1" - Photomultiplier . . . . .	48
4.4.2 Die 2" - Photomultiplier . . . . .	50
4.5 Die Untersuchungen bzgl. der Linearität . . . . .	52
4.5.1 Die 2" - Photomultiplier . . . . .	52
4.5.2 Die 1" - Photomultiplier . . . . .	53
4.6 Die Untersuchungen auf Temperatureffekte . . . . .	54
4.7 Die Tests bzgl. der Alterung und der Lebensdauer . . . . .	55
<b>Zusammenfassung</b>	<b>57</b>
<b>A Technische Daten der Photomultiplier</b>	<b>59</b>
<b>B Technische Daten der Leuchtdiode</b>	<b>61</b>
<b>C technische Daten des Magneten</b>	<b>64</b>
<b>D techn. Daten zur Temperatur- und Strommessung</b>	<b>66</b>
<b>E Meßergebnisse der individuellen PMs</b>	<b>68</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>104</b>

# Abbildungsverzeichnis

0.1	Die HERA - Speicherringe . . . . .	1
1.1	Der H1 - Detektor . . . . .	6
1.2	Das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter (BEMC) . . . . .	9
1.3	Das neue rückwärtige Kalorimeter (SPACAL) . . . . .	11
2.1	Skizzen verschiedener Photomultipliertypen . . . . .	14
2.2	Spektrale Empfindlichkeit einiger Photokathoden . . . . .	17
2.3	Ein Elektronenfokussierungssystem für Photomultiplier . . . . .	18
2.4	verschiedene Spannungsteiler für Photomultiplier . . . . .	20
2.5	Verstärkungsrückgang eines Photomultipliers im Magnetfeld . . . . .	23
3.1	Skizze des mechanischen Aufbaus . . . . .	26
3.2	Photographie des mechanischen Aufbaus . . . . .	27
3.3	Photographie des XY-Meßtisches und der Signal- und Hochspannungsdurchführungen . . . . .	27
3.4	Schaltbild der Spannungsteiler . . . . .	28
3.5	Skizze der LED im Meßaufbau . . . . .	29
3.6	Das LED-Emissionsspektrum . . . . .	30
3.7	Skizze der Lichtleitfaser . . . . .	30
3.8	Blockschaltbild des Meßaufbaus . . . . .	31
3.9	Skizze der Kathodenabtastschemata . . . . .	34
3.10	Linearitätstestaufbau für die 1'' - PMs . . . . .	35
3.11	Blockschaltbild des Linearitätstests für die 1'' - PMs . . . . .	36
3.12	Skizze des ADC-Spektrums . . . . .	37
3.13	Linearitätstestaufbau für die 2'' - PMs . . . . .	38
3.14	mechanischer Aufbau des Alterungstests . . . . .	39
4.1	Meßergebnis des Versorgungsspannungstests (1''- PMs) . . . . .	42
4.2	Meßergebnis des Versorgungsspannungstests (2''- PMs) . . . . .	44
4.3	Meßergebnis des Magnetfeldtests (1''- PMs) . . . . .	45
4.4	Histogramm der Verstärkungsverlustfaktoren (1''- PMs) . . . . .	46
4.5	Meßergebnis des Magnetfeldtests (2''- PMs) . . . . .	47
4.6	Meßergebnis einer Kathodenabtastung (1''- PM) . . . . .	49

---

4.7	Histogramm der mittleren Inhomogenitätswerte (1"- PMs) . . . . .	50
4.8	Meßergebnis einer Kathodenabtastung (2"- PM) . . . . .	51
4.9	Meßergebnis des Linearitätstests (2"- PM) . . . . .	53
4.10	Meßergebnis des Temperaturtests . . . . .	54
4.11	Meßergebnis des Alterungstests . . . . .	56
A.1	Photographie eines 1"- Photomultipliers . . . . .	60
B.1	äußere Abmessungen der LED . . . . .	62
B.2	Strom-Spannungskennlinie der LED . . . . .	62
B.3	Lichtintensität-Vorwärtsstromkennlinie der LED . . . . .	62
B.4	Lichtintensität-Halbleitertemperaturkennlinie der LED . . . . .	63
B.5	Lichtintensität-Abstrahlwinkelcharakteristik der LED . . . . .	63
C.1	Erregungskurve des Magneten . . . . .	65
D.1	Schaltbild der Temperaturmessung . . . . .	66

# Einleitung

Das Teilgebiet der Physik, welches das Verständnis der kleinsten Strukturen ( $\leq 10^{-15}$  m) anstrebt, ist die Elementarteilchenphysik.

Die Heisenbergsche Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$  gibt einen Einblick, welche Energien man benötigt, um entsprechende Strukturen auflösen zu können. Solch hohe Teilchenenergien lassen sich mit Teilchenbeschleunigern erzielen. Man erhält deutlich höhere Schwerpunktsenergien, wenn man das bewegte Projektil nicht nur auf ein ruhendes Target schießt, sondern sich das Target auch auf das Projektil zubewegen läßt. Diese Tatsache führte zum Konzept des Speicherringes. In der Vergangenheit sind weltweit schon mehrere Anlagen gebaut worden, in denen  $p\bar{p}$ -,  $pp$ - und  $e^+e^-$ -Reaktionen untersucht werden. Im Jahr 1991 wurde im Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) die Hadronen-Elektronen-Ringanlage (HERA) in internationaler Zusammenarbeit fertiggestellt. Abbildung 0.1 zeigt eine schematische Darstellung dieser Anlage und in Tabelle 0.1 sind einige ihrer Kenngrößen aufgeführt.

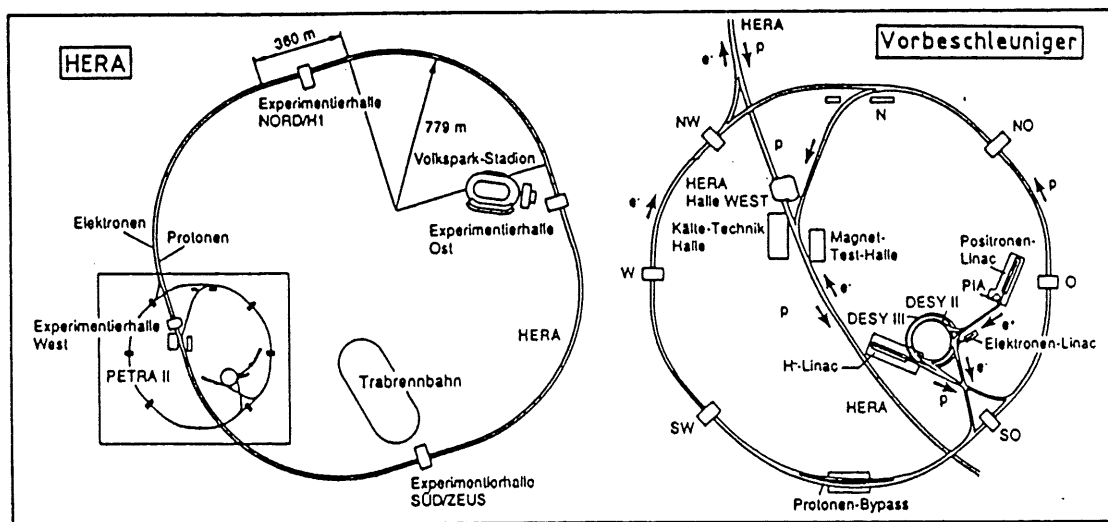


Abbildung 0.1: Die HERA - Speicherringe und die Vorbeschleuniger

Sie ist weltweit die erste Anlage, die Streuversuche von bewegten Elektronen an gegensinnig bewegten Protonen bis zu einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} \approx 314$  GeV ermöglicht. Diese Schwerpunktsenergie ermöglicht – in



Experimenten mit fixiertem Target unerreicht – Viererimpulsüberträge bis zu  $Q^2 \approx 4 \times 10^4 \text{ GeV}^2$ .

	p - Ring	e - Ring	Einheit
Energie	820	30	GeV
Luminosität	$1.5 \times 10^{31}$		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
integrierte Luminosität	$10^5$		$\text{nb}^{-1}/\text{y}$
Wechselwirkungspunkte	4		
Magnetfeldstärke	4.68	0.165	T
Teilchenanzahl	210	80	$10^{11}$
Strom pro Teilchenbunch	760	290	$\mu\text{A}$
Anzahl der Bunche	210	210	
Zeit zwischen zwei Bunchen	96	96	ns
Injektionsenergie	40	14	GeV
Füllzeit	20	15	min
Energieverlust pro Umlauf	$6.2 \times 10^{-6}$	127	MeV
Kreuzungswinkel zwischen den Strahlen am Experiment	0		[°]

Tabelle 0.1: Liste einiger HERA - Kenngrößen (Planungsziel)

HERA besteht aus zwei Speicherringen: einem für die Protonen und einem für die Elektronen. Jeder Ring hat eine Länge von 6300 m und ist in 10...25 m Tiefe verlegt. Die Protonenstrahlführung wird mit supraleitenden Magneten und die Elektronenstrahlführung wird mit normalleitenden Magneten bewerkstelligt. Die Beschleunigung der Protonen wird mit normalleitenden und die der Elektronen mit normal- und supraleitenden Resonatoren bewirkt.

Die Protonen werden aus negativ geladenen Wasserstoffionen gewonnen und anfangs mit einem Linearbeschleuniger auf eine Energie von 50 MeV beschleunigt. Bei Injektion in den Ringbeschleuniger DESY III werden die Elektronen abgestreift und die Protonen dort auf eine Energie von 7.5 GeV beschleunigt. Ist diese Energie erreicht, werden sie in den Ringbeschleuniger PETRA injiziert und auf eine Energie von 40 GeV beschleunigt. Mit dieser Energie werden die Protonen in den HERA-Protonenring überführt.

Die Elektronen werden von einem Linearbeschleuniger auf eine Energie von 500 MeV gebracht und anschließend in einem kleinen Speicherring gesammelt. Über den Ringbeschleuniger DESY II, welcher die Elektronen auf eine Energie von 7 GeV beschleunigt und PETRA, welcher die Elektronen auf eine Energie von 12 GeV bringt, gelangen sie dann in den HERA-Elektronenring.

Die Strahlrohre, und damit auch die Elektronen und Protonen, treffen an vier Wechselwirkungszonen zusammen. Die Elektron-Proton-Wechselwirkungen wer-

den dort anhand zweier Experimente – ZEUS in Experimentierhalle Süd und H1 in Experimentierhalle Nord – untersucht [H1 93/103, Lev 91, Fla 92].

Die H1-Kollaboration beabsichtigt eine Verbesserung der rückwärtigen Detektorregion durch den Bau eines Spaghetti-Kalorimeters, um das vorhandene Blei-Szintillator-Sandwichkalorimeter zu ersetzen. Es muß in einem homogenen Magnetfeld von 1.2T arbeiten und soll eine gute zeitliche Auflösung ( $\Delta t \approx 1 \text{ ns}$ ) gestatten. Die Signalauslese beim alten Kalorimeter erfolgt mit Photodioden. Es ist deswegen notwendig, beim neuen Kalorimeter zur Signalauslese Photomultiplier (PM) mit gitterartiger Dynodenstruktur<sup>1</sup> zu verwenden. Dieser neue Photomultipliertyp ist bisher wenig erforscht worden. Die vorliegende Arbeit behandelt Testmessungen an einer Anzahl der vorher genannten Photomultipliern. Die für den Bau und den Betrieb des neuen Kalorimeters relevanten Eigenschaften werden gemessen bzw. formuliert. Da die vorliegende Arbeit mit dem H1-Detektor zusammenhängt, wird dieser im nachfolgenden Kapitel kurz vorgestellt. Das zweite Kapitel liefert einige Hintergrundinformationen zu Photomultipliern. Das dritte Kapitel beschreibt die Meßaufbauten und die Durchführung der Messungen. Das vierte Kapitel beinhaltet die dabei gewonnenen Ergebnisse und den Abschluß dieser Arbeit bildet eine Zusammenfassung.

---

<sup>1</sup>Hamamatsu R5506 (1") bzw. R2490-05 mod (2")



# Kapitel 1

## Der Universaldetektor H 1

HERA wurde konzipiert und konstruiert, um Experimente zur Vertiefung des Verständnisses der kleinsten Strukturen zu ermöglichen. Der Detektor H 1 wurde gebaut, um experimentelle Daten zu liefern. Dazu werden Messungen unternommen, die u.a. folgende Ziele haben:

- Bestimmung der Strukturfunktion des Protons bei hohem Viererimpulsübertrag  $Q^2$  und kleinem Impulsanteil  $x_{Bjorken}$  des wechselwirkenden Partons.
- Bestimmung der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung  $\alpha_S$  über einen weiten  $Q^2$ -Bereich.
- Messung von Photoproduktion und Bestimmung der Strukturfunktion des Photons.
- Suche nach neuen Teilchen wie Bosonen und schweren Leptonen zur Erweiterung des Standardmodells.
- Suche nach Substrukturen von Quarks und Leptonen.

Der Detektor muß, um dieser Zielsetzung entsprechen zu können, eine gute Identifikation von Leptonen ermöglichen. Er muß über den gesamten Raumwinkelbereich sensitiv sein, und er muß eine gute Energie- und Impulsauflösung gestatten. Abbildung 1.1 zeigt eine Skizze des H 1-Detektors. Da die Protonen mit wesentlich höheren Impulsen als die Elektronen am Wechselwirkungspunkt (WWP) eintreffen, ist der Detektor asymmetrisch aufgebaut. Es folgt eine kurze Beschreibung der einzelnen Komponenten:

- 1) Die Zentralen Spurkammern; es handelt sich hierbei um eine Anordnung mehrerer Drift- und Vieldrahtproportionalkammern zur Spurbestimmung geladener Teilchen im Winkelbereich von  $25^\circ \leq \Theta \leq 160^\circ$ .

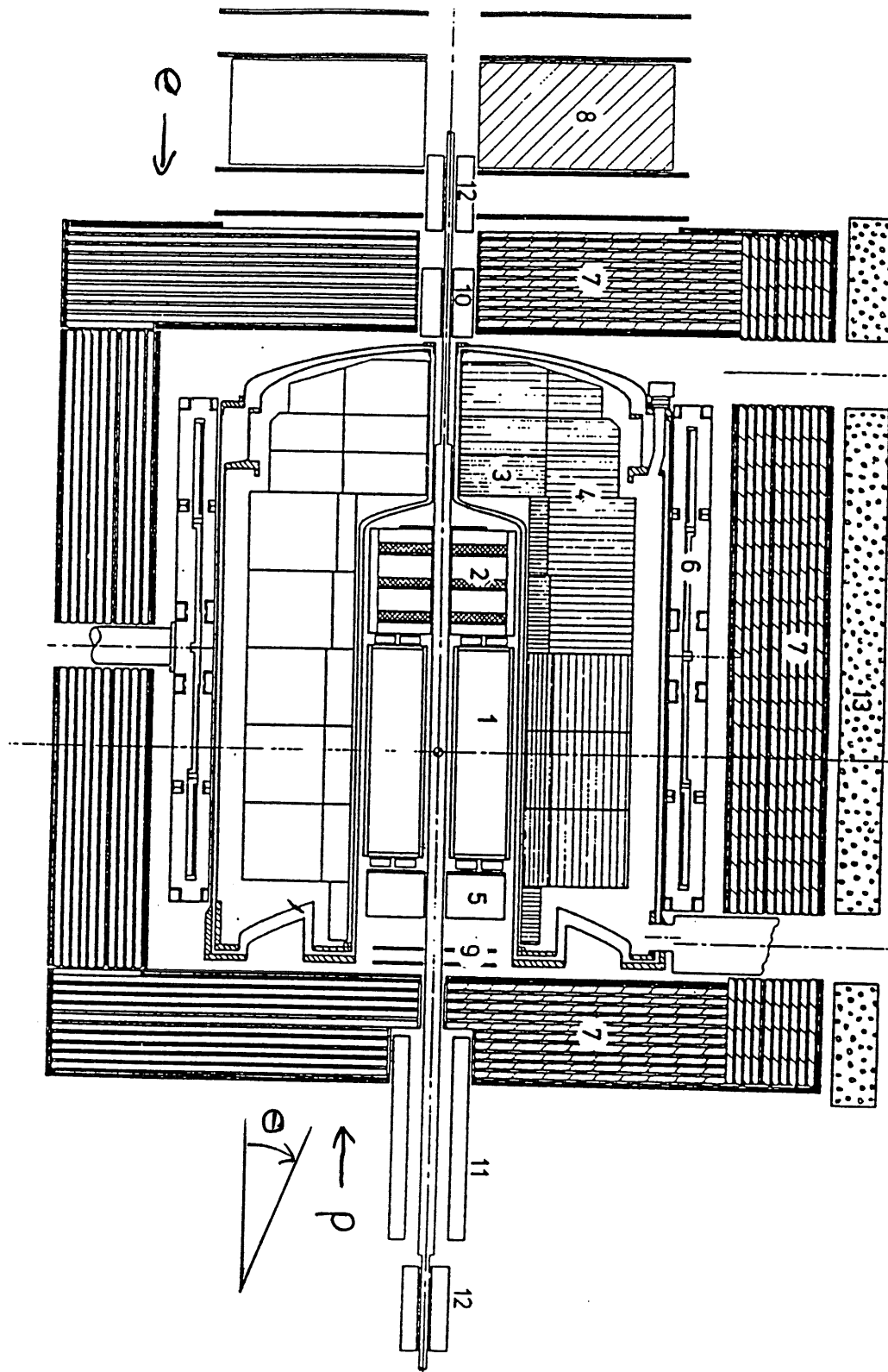


Abbildung 1.1: Skizze des H1-Detektors (Längsschnitt), der Wechselwirkungspunkt ist markiert

- 2) Die Vorwärtsspurkammern; sie liefern Daten zur Spurrekonstruktion zwischen  $5^\circ \leq \Theta \leq 25^\circ$ . Die Vorwärtsrichtung entspricht der Protonenflugrichtung.
- 3) Das elektromagnetische Kalorimeter; dieses Kalorimeter ist aus Bleiplatten und dem dazwischen befindlichen Nachweismedium Argon (flüssig) aufgebaut. Es mißt die Teilchenenergien mit Hilfe elektromagnetischer Schauerbildung in einem Winkelbereich von  $4^\circ \leq \Theta \leq 152^\circ$ . Die von den Teilchenschauern im Argon deponierte Ladungsmenge wird mit dünnen Folien gesammelt.
- 4) Das hadronische Kalorimeter; dieses Kalorimeter besteht aus flüssigem Argon (LAr), welches sich zwischen Edelstahlplatten befindet. Es mißt die Teilchenenergien mittels hadronischer Schauerbildung.
- 5) Das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter; es besteht aus Blei- und Szintillatorplatten, die Signalauslese geschieht mittels Photodioden. Es mißt die Teilchenenergien mit Hilfe elektromagnetischer Schauerbildung in einem Winkelbereich von  $155^\circ \leq \Theta \leq 173^\circ$ . Es arbeitet in dem von Spule 6) erzeugten Magnetfeld.
- 6) Die Magnetfeldspule; diese supraleitende Spule erzeugt in ihrem Inneren ein homogenes und zum Strahlrohr parallel ausgerichtetes Magnetfeld mit  $B = 1.15 \text{ T}$ , damit der Impuls geladener Teilchen aus der Krümmung der Spuren bestimmt werden kann.
- 7) Das instrumentierte Eisen; es besteht aus 10 Eisenplatten mit je 75 mm Stärke. Die Platten haben einen Abstand von bis zu 50 mm. In diesen Zwischenräumen befinden sich Streamerkammern. Das System führt den magnetischen Fluß der Spule 6) zurück, mißt die Energie der aus den Kalorimetern 4) und 5) austretenden Hadronenschauer und dient der Müonidentifikation.
- 8) Das Vorwärtsspektrometer; es besteht aus einem Toroidmagneten und einer Anordnung von Driftkammern, um den Müonenimpuls in Vorwärtsrichtung ( $3^\circ \leq \Theta \leq 17^\circ$ ) zu messen.
- 9) Das Flugzeitmessungssystem (ToF); das ToF besteht aus einer Anordnung von mehreren Szintillatorplatten, die Signalauslese erfolgt mit Transmissionsdynodenphotomultipliern<sup>1</sup>. Es deckt in Rückwärtsrichtung in einer Entfernung von 2.12 m den Bereich der zentralen Spurenkammern ab. Es arbeitet in dem von Spule 6) erzeugten Magnetfeld. Mit zeitlicher Bestimmung seiner Signale wird eine Unterscheidung von protoneninduzierten Untergrundereignissen und Wechselwirkungspunkt ereignissen möglich.

---

<sup>1</sup>Hamamatsu R 2490-01

Nicht im Bild eingezeichnet sind die innere Vetowand<sup>2</sup> und die äußere Vetowand<sup>3</sup>. Sie erfüllen eine ähnliche Funktion wie das ToF, wobei die äußere Vetowand größer ist und zusätzlich den Bereich der LAr-Kalorimeter abdeckt. Die Signalauslese erfolgt mit Photomultipliern<sup>4</sup>, die zur Reduktion des magnetischen Streufeldes<sup>5</sup> mit Eisenröhren und  $\mu$ -Metallzylindern umgeben sind.

- 10) Das Plug-Kalorimeter; es ist aus Kupferplatten aufgebaut und die Signalauslese erfolgt mittels großflächiger Siliziumdioden. Es deckt den Winkelbereich  $0.6^\circ \leq \Theta \leq 3^\circ$  in Vorwärtsrichtung ab. Es weist die Protonenfragmente nach.
- 11) Der Kompensationsmagnet; dieser supraleitende Magnet kompensiert das an diesem Ort von der Magnetfeldspule 6) erzeugte Streufeld, damit die Elektronen und Protonen im Strahlrohr außerhalb des H1-Detektors unbeeinflusst bleiben.
- 12) Die H1-Strahlführungsmagnete; sie lenken den Elektronen- und den Protonenstrahl im Strahlrohr auf die gewünschte Bahn.
- 13) Die Betonabschirmung; sie schirmt die aus dem Detektor austretende Strahlung ab.

Das in 5) vorgestellte rückwärtige Kalorimeter (BEMC) ist für diese Arbeit von besonderer Bedeutung. Deshalb wird es im nun folgenden Unterkapitel detaillierter beschrieben [H1 92/245, H1 92/252, H1 93/103].

## 1.1 Der Neubau des rückwärtigen Kalorimeters

Das BEMC hat vornehmlich die Aufgabe, die Energie der aus tiefinelastischen Prozessen stammenden Elektronen unter kleinen Winkeln zu messen. In Abbildung 1.2 ist der Aufbau des BEMC dargestellt. Es besteht aus 88 Modulen. Diese sind aus Bleiplatten (Dicke:  $d = 2.5$  mm) und mit Szintillator dotierten Polystyrolplatten ( $d = 4$  mm) in Sandwichbauweise zusammengesetzt. Das Szintillationslicht wird über Wellenlängenschieber von Photodioden<sup>6</sup> ausgelesen. Insgesamt gibt es 472 Auslesekanäle. Die Tiefe der Module beträgt 390 mm, die quadratischen Module haben eine Kantenlänge von 160 mm. Die Randmodule haben z.T. trapezförmige oder dreieckige Querschnitte. Die weiteren Daten werden in Stichpunkten aufgelistet:

---

<sup>2</sup>8.1 m Distanz vom WWP in Rückwärtsrichtung

<sup>3</sup>6.5 m Distanz vom WWP in Rückwärtsrichtung

<sup>4</sup>Valvo XP 2041

<sup>5</sup> $B \approx 10$  mT

<sup>6</sup>Hamamatsu S 2575

- Die Länge entspricht etwa 22.5 Strahlungslängen  $X_0$  bzw. 0.97 hadronischen Wechselwirkungslängen  $\Lambda$ .
- Der Molière - Radius beträgt ca. 3.4 cm .

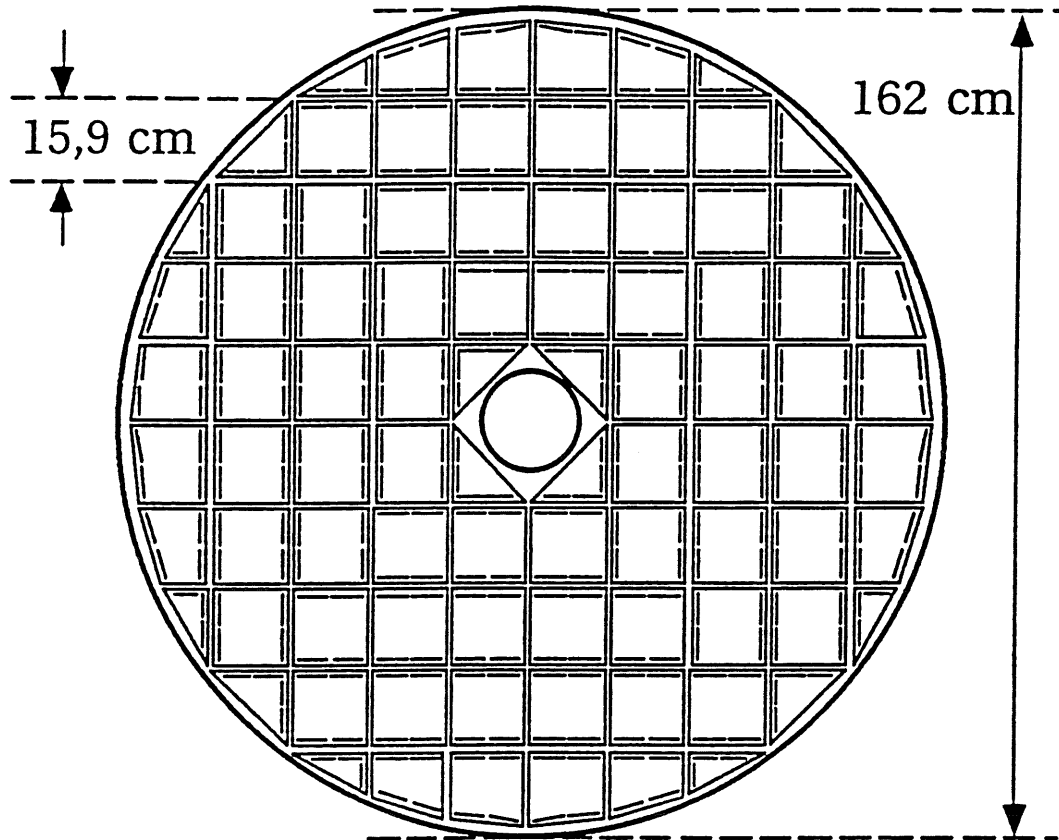


Abbildung 1.2: Schnittzeichnung des BEMC (Schnittebene  $\perp$  Strahlachse), die kurzen Linien deuten die Wellenlängenschieber an; das Loch in der Mitte ist für das Strahlrohr

- Die Energieauflösung beträgt für Elektronen  $\sigma(E)/E = 10\%/\sqrt{E}$  .
- Für elektromagnetische Schauer beträgt die absolute Energiekalibration  $\pm 2\%$
- Die Signalinhomogenität nahe der Wellenlängenschieber beträgt ca. 10% .
- Die Granularität beträgt  $16 \times 16 \text{ cm}^2$  .
- Minimal ionisierende Teilchen (MIPs) können nicht nachgewiesen werden.



Der H1-Detektor, und damit auch das BEMC, wurde zu einer Zeit konzipiert, als die Aufmerksamkeit hauptsächlich auf Prozesse mit relativ großem  $x_{Bjorken}$  gerichtet war. Die hadronischen Endzustände bewegen sich dann größtenteils in Vorwärtsrichtung der Protonen. Bei kleinen Werten der Bjorkenvariablen (bis  $x_{Bjorken} \approx 10^{-4}$ ) werden die hadronischen Endzustände und die Elektronen in den rückwärtigen Teil des H1-Detektors gestreut. Um in diesem ( $Q^2, x_{Bjorken}$ )-Bereich zu neuen Erkenntnissen gelangen zu können, sind die Eigenschaften des BEMC nicht hinreichend. Deswegen wird ein neues Kalorimeter gebaut: ein Spaghetti-Kalorimeter (SPACAL). Dieser Kalorimetertyp ist im Jahr 1981 von D. Perrin und P. Sonderegger vorgeschlagen worden, und es sind auch schon Kalorimeter dieser Art, z.B. am JETSET-Experiment, in Betrieb [Per 81, Her 90]. Das geplante Kalorimeter soll folgenden Anforderungen genügen:

- für Elektronen mit  $E = 30 \text{ GeV}$  beträgt die Energieauflösung  $\sigma(E)/E = 2\%$ ,
- Erschließung eines größeren Winkelbereiches ( $152^\circ \leq \Theta \leq 178^\circ$ ),
- Absolutkalibration für elektromagnetische Schauer:  $\pm 0.5\%$ ,
- feinere Granularität zur besseren Elektron/Pion-Unterscheidung mit dem Ziel, daß die Wahrscheinlichkeit der Verwechslung von Elektronen und Pionen bei  $E \approx 3 \text{ GeV}$  kleiner als  $1\%$  ist,
- der Molière - Radius ist kleiner als  $2 \text{ cm}$ ,
- zur besseren Untergrundidentifikation soll die Zeitauflösung der Teilchendurchgänge kleiner als  $1 \text{ ns}$  sein (Untergrundrate/WWP-Rate  $\approx 10^4$  !),
- geringere Signalinhomogenitäten an den Modulgrenzen von ca.  $1\%$ ,
- die Messung von MIPs soll möglich sein.

Abbildung 1.3 zeigt eine technische Zeichnung des geplanten SPACAL. Das SPACAL ist aus übereinander gestapelten Bleiplatten aufgebaut. Jede Bleiplatte hat ein Rillenprofil, in das szintillierende Lichtleitfasern eingelegt werden. Das SPACAL wird aus einer elektromagnetischen und einer hadronischen Sektion bestehen. Die Energieauflösung für elektromagnetische Schauer hängt beim SPACAL vom Blei/Faser-Volumenverhältnis ( $R$ ) und dem Faserdurchmesser ( $d$ ) folgendermaßen ab [Rd 91]:

$$\sigma(E)/E = 6.5\% \sqrt{R d}/\sqrt{E}$$

Die elektromagnetische Sektion wird ein Blei/Faser-Volumenverhältnis von 2:1 haben. Die Fasern haben einen Durchmesser von  $0.5 \text{ mm}$ . Die hadronische Sektion wird ein Blei/Faser-Volumenverhältnis von 4:1 haben. Die Fasern haben einen Durchmesser von  $1 \text{ mm}$ . Die geplante Länge des elektromagnetischen Teils

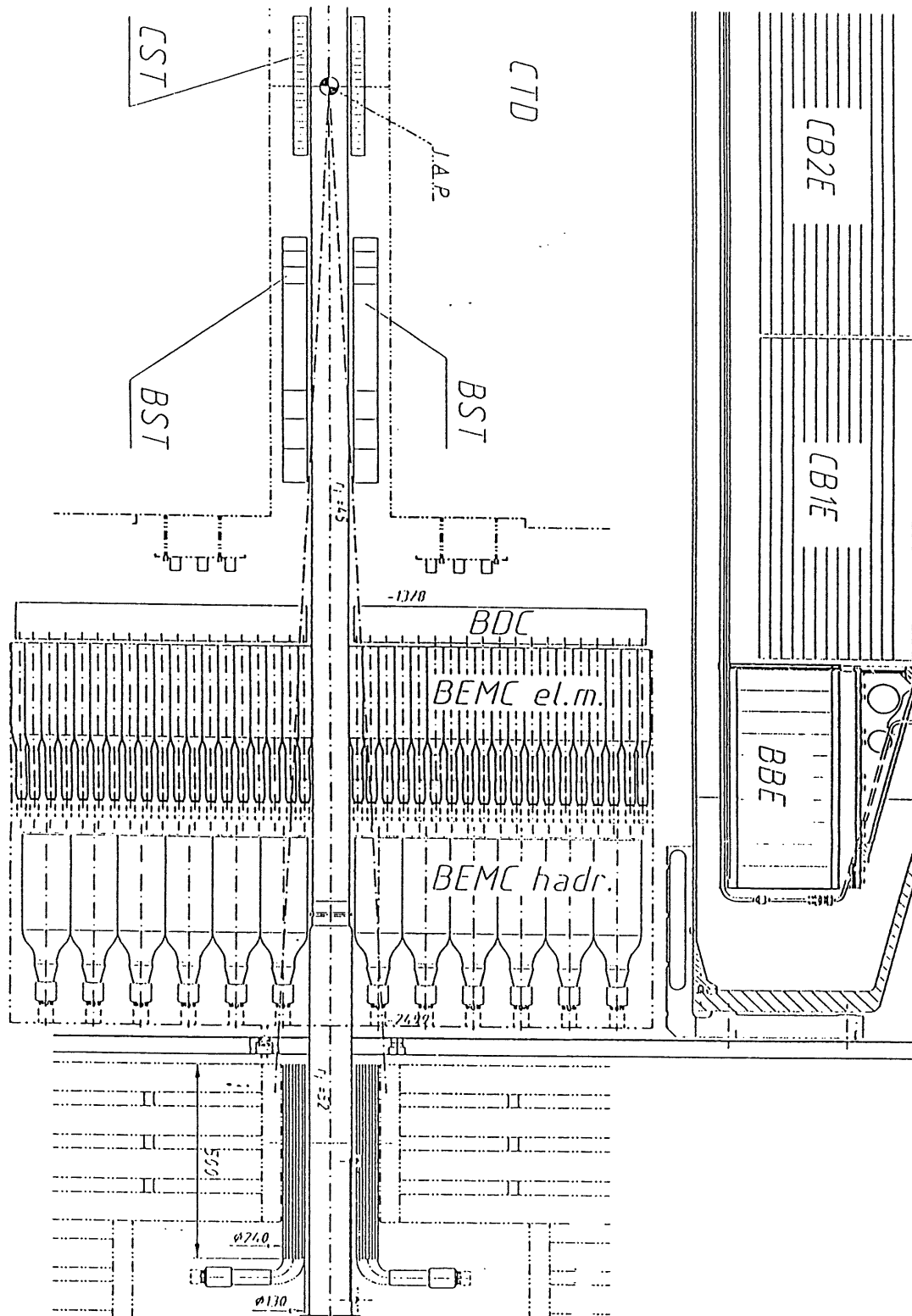


Abbildung 1.3: Planskizze des neuen BEMC (SPACAL) in der rückwärtigen Region des H1 - Detektors; der WWP ist markiert

von 25 cm entspricht einer hadronischen Abschwächungslänge  $\Lambda$  bzw. 27 Strahlungslängen  $X_0$ . Das Szintillationslicht wird mit an Lichtmischern angekoppelten Transmissionsdynodenphotomultipliern nachgewiesen. Die elektromagnetische Sektion wird von etwa 1200 1"-Photomultipliern<sup>7</sup> und die hadronische Sektion von 136 2"-Photomultipliern<sup>8</sup> ausgelesen werden [H1 93, H1 93/103, Jan 93, Bar 94].

---

<sup>7</sup>Hamamatsu R.5505

<sup>8</sup>Hamamatsu R.2490-05 mod

# Kapitel 2

## Photomultiplier

Das in der Wissenschaft wohl am weitesten verbreitete Instrument zur Konversion schwacher Lichtsignale in elektrisch nutzbare Signale ist der Photomultiplier (PM). Am Anfang dieses Kapitels wird auf den Aufbau von PMs und auf die seiner Funktion zugrunde liegenden Phänomene eingegangen werden. Danach folgt ein Überblick über die gebräuchlichsten elektrischen Beschaltungen eines Photomultipliers. Ferner wird eine Methode zur Bestimmung der Stromverstärkung eines PM vorgestellt werden. Am Schluß dieses Kapitels wird das Verhalten von Photomultipliern im Magnetfeld beschrieben.

### 2.1 Photomultipliertypen

Ein Photomultiplier besteht im wesentlichen aus vier Funktionsgruppen die sich in einer evakuierten Glasröhre befinden:

- einer Photokathode, die die Konversion von Photonen in Elektronen bewerkstelligt,
- ein elektronenoptisches Fokussierungssystem, welches die Elektronen der Photokathode zur 1. Dynodenstufe beschleunigt,
- einem Sekundärelektronenvervielfacher, bestehend aus mehreren Dynoden und
- einer Anode, die die Ladungsmenge hinter der letzten Dynodenstufe aufammelt und am Abgriff zur Verfügung stellt.

In Abbildung 2.1 sind die Skizzen der gängigsten Photomultipliertypen dargestellt [Ham 90].

- (a) Circular-cage (kreisförmig angeordnete Dynoden); Diese gibt es in der head-on und in der side-on Bauform. Bei der side-on Ausführung ist die Photokathode für Photonen undurchlässig. Die Emission der Photoelektronen

erfolgt auf der gleichen Seite der Photokathode, auf welcher die Photonen einfallen. Beim head-on Typ ist die Photokathode halbtransparent, und die Photoelektronen werden auf der dem Photoneneinfall abgewandten Photokathodenseite emittiert. Die Besonderheiten dieses Typs sind die kompakte Bauform und eine kurze Gesamtlaufzeit.

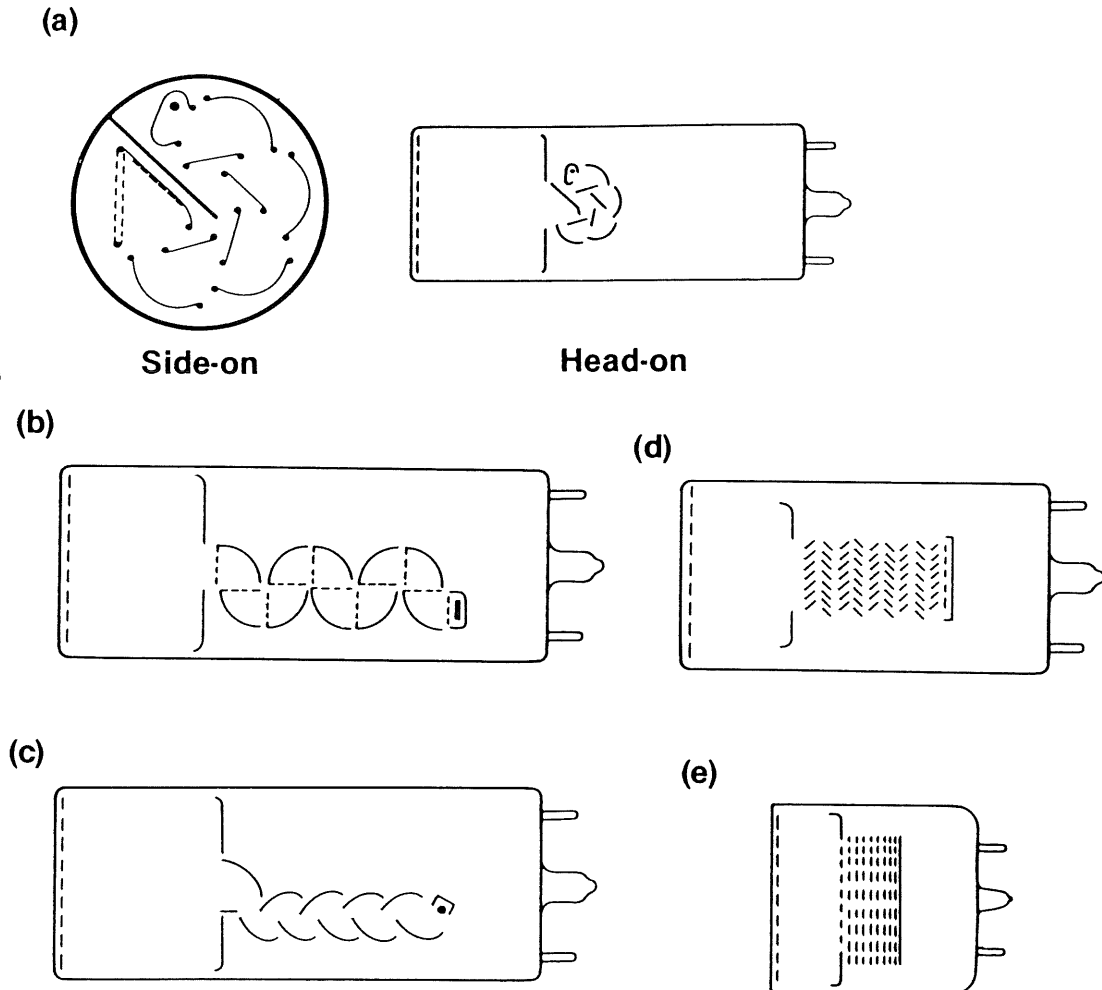


Abbildung 2.1: Die verschiedenen Photomultipliertypen

- (b) Box-and-grid (schachtelartige Dynodenanordnung); Die viertelkreisförmigen Dynoden sind durch die Beschleunigungsgitter voneinander getrennt. Der Nachteil dieser Bauform ist die für manche Zwecke zu lange Laufzeitdifferenz.
- (c) Linear-focused (linear fokussierende Dynodenanordnung); Dieser Typ zeichnet sich durch eine gute Impulslinearität, eine kurze Laufzeitdifferenz und eine kurze Gesamtlaufzeit aus.

- (d) Venetian-blind (jalousieähnliche Dynodenanordnung); Nachteil dieses Typs ist die lange Laufzeitdifferenz. Von Vorteil ist die hohe Stromverstärkung, die durch die großen Dynodenflächen bedingt ist.
- (e) Proximity-mesh (netzartige Dynodenstruktur, Transmissionsdynoden); Die direkt nacheinander aufgereihten Dynodenstufen bewirken eine sehr kurze Laufzeitdifferenz und eine kurze Gesamtlaufzeit. Die Stromverstärkung dieses Typs fällt im Gegensatz zu anderen Bauformen in äußeren magnetischen Feldern nicht so stark ab.

## 2.2 Die Photokathode

Der Photoeffekt beschreibt die Tatsache, daß Metalle und Halbleiter unter Photonenbestrahlung Elektronen freisetzen können. Die kinetische Energie der emittierten Elektronen ( $E_k$ ) ergibt sich aus dem Planckschen Wirkungsquantum ( $h$ ), der Frequenz des einfallenden Photons ( $\nu$ ) und der Austrittsarbeit des Kathodenmaterials ( $\Phi$ ) folgendermaßen:

$$E_k = h\nu - \Phi \quad (2.1)$$

Aus der Bedingung, daß  $E_k \approx 0$  ist, folgt bei bekannter Austrittsarbeit die Grenzwellenlänge ( $\lambda_0$ ) des Photons, mit der die Elektronen freigesetzt werden können:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\Phi} \quad (2.2)$$

Photonen mit größerer Wellenlänge können keine Elektronen mehr freisetzen. In Tabelle 2.1 sind die Austrittsarbeiten und Grenzwellenlängen einiger Elemente und Verbindungen aufgeführt [Ard 62].

Element	$\Phi$ [eV]	$\lambda_0$ [nm]	Verbindung	$\Phi$ [eV]	$\lambda_0$ [nm]
Cäsium (Cs)	1.94	639	Ag - O - Cs	1.11	bis 1100
Rubidium (Rb)	2.10	580	Na - K - Cs - Sb (Trialkali)	1.43	bis 850
Kalium (K)	2.24	560	K - Cs - Sb (Bialkali)	1.87	bis 650
Natrium (Na)	2.28	543	Rb - Cs - Sb (Bialkali)	1.87	bis 650
Antimon (Sb)	4.03	300	Te - Cs	3.81	bis 320
Kupfer (Cu)	4.48	277	Cs - I	6.09	bis 200
Silber (Ag)	4.70	264			

Tabelle 2.1: Austrittsarbeiten und Grenzwellenlängen einiger Elemente und Verbindungen

Das quantitative Maß für die Effektivität der ursächlich von Photonen freigesetzten Elektronen wird als Quantenausbeute bezeichnet und folgendermaßen definiert:

$$\eta(\lambda_{\text{phot}}) = \frac{\text{Anzahl der emittierten Elektronen}}{\text{Anzahl der immittierten Photonen}} \quad (2.3)$$

Die Quantenausbeute ist eine wichtige Eigenschaft einer Photokathode, und sie ist abhängig von dem Material, der Schichtdicke und den Oberflächen- und Volumenverhältnissen. Gängige Photokathoden weisen eine Schichtdicke von ca. 25 nm auf. Die semitransparente Ausführung stellt eine auf ein Eintrittsfenster aufgedampfte Schicht dar. Die undurchlässige Photokathode besteht aus einem Kupferträger und einer darauf aufgedampften Schicht aktiven Materials. Diese Bauweise führt dazu, daß sie große Ströme (einige Ampere) ohne Schaden überstehen kann.

Die Quantenausbeute beträgt für gängige Photokathoden bis zu 30 %. Die Metall-Halbleiter-Verbindungen haben gegenüber den reinen Metallen eine wesentlich höhere Quantenausbeute. Die Ursache dafür ist nach [Sch 70] darin zu suchen, daß die Halbleiter in den Verbindungen für einen erheblich geringeren Anteil an Leitungsbandelektronen sorgen, als bei reinen Metallen vorhanden wären. Die durch Photonen freigestzten Valenzelektronen erleiden bei der Drift zur Oberfläche weniger Energieverlust durch Stöße mit quasifreien Elektronen. Es werden also mehr Elektronen emittiert.

Von den Herstellern wird eine die Photokathode charakterisierende Größe angegeben, in die die Wellenlänge der immittierten Photonen ( $\lambda$  [nm]) und die Quantenausbeute ( $\eta$  [%]) eingehen. Sie heißt Spektrale Empfindlichkeit ( $SK_e(\lambda)$  [mA/W]) und wird in Milliampere pro Watt angegeben:

$$SK_e(\lambda) = \frac{\eta \lambda}{124} \quad (2.4)$$

In der Zahl 124 sind die Naturkonstanten  $h$ ,  $c$  und  $e$  zusammengefaßt. In Abbildung 2.2 sind die Verläufe der Spektralen Empfindlichkeit von semitransparenten Hamamatsu-Photokathoden dargestellt [Ham 90]. Die Quantenausbeute ist in Form von Geraden eingezeichnet. Im Folgenden werden einige Typen näher erklärt:

- 100 M: Diese Photokathode besteht aus Cs-I und ist auf ein Fenster aus  $\text{Mg F}_2$  aufgebracht. Sie kann ohne Verdunkelung verwendet werden, da ihr sensitiver Bereich zwischen 115 nm und 200 nm liegt. Bei Lagerung und Betrieb muß darauf geachtet werden, daß  $\text{Mg F}_2$  stark hygroskopisch ist.
- 200 S: Diese Photokathode besteht aus Cs-Te und ist auf einem Fenster aus synthetischem Silizium aufgebracht. Sie kann ebenfalls ohne Verdunkelung eingesetzt werden, und ihr sensitiver Bereich liegt zwischen 160 nm und 320 nm. Bei Lagerung und Betrieb muß darauf geachtet werden, daß synthetisches Silizium sehr spröde ist.

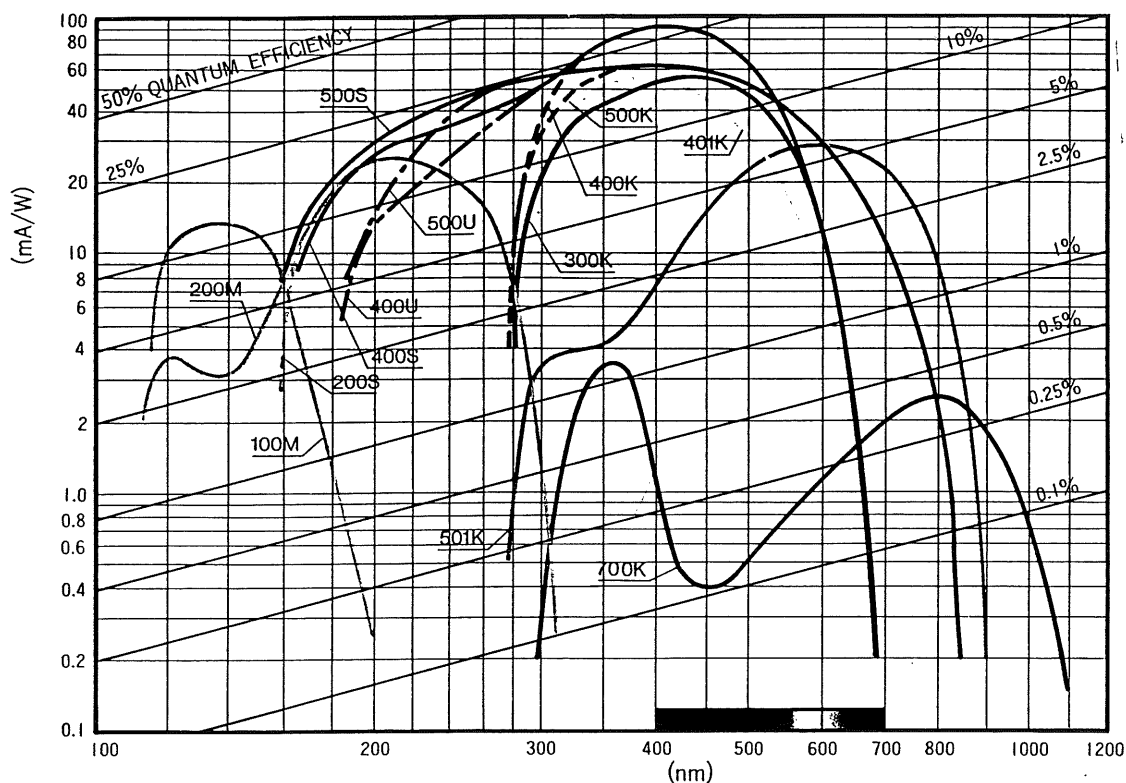


Abbildung 2.2: Die Spektrale Empfindlichkeit einiger Photokathoden aufgetragen gegen die Photonenwellenlänge

- 400 K,U,S: Diese Photokathode besteht aus einem Gemisch von K - Cs - Sb und Rb - Cs - Sb (Bialkali), und sie ist auf einem Fenster aus Borosilikat (400 K) bzw. UV-Glas (400 U) bzw. synthetischem Silizium (400 S) aufgebracht. Man kann mit der Wahl des Fenstermaterials den kurzwelligen Teil des sensitiven Bereiches beeinflussen. Die sensitiven Bereiche sind: 300... 650 nm (400 K), 185... 650 nm (400 U) und 160... 650 nm (400 S). Die in dieser Arbeit getesteten 1"- PMs sind mit dieser Kathode und einem UV-Glas Fenster ausgestattet. Die 2"- PMs sind mit dieser Kathode und einem Borosilikat-Fenster ausgestattet.
- 500 K: Diese Photokathode besteht aus Na - K - Cs - Sb (Multi- oder Trialkali) und ist auf einem Fenster aus Borosilikat aufgebracht. Der sensitive Bereich erstreckt sich von 300 nm bis 850 nm.
- 700 K: Diese Photokathode besteht aus Ag - O - Cs und ist auf einem Borosilikatfenster aufgebracht. Ihr sensitiver Bereich liegt zwischen 400 nm und 1100 nm. Um den durch thermische Elektronenemission bedingten Dunkelstrom niedrig zu halten, muß die Photokathode während des Betriebs gekühlt werden (bis  $-80^{\circ}\text{C}$ ).



## 2.3 Das Dynodensystem

Die Trajektorien der Elektronen

- zwischen der Photokathode und der ersten Dynodenstufe,
- zwischen den Dynodenstufen und
- zwischen der letzten Dynodenstufe und der Anode

können durch elektronenoptische Fokussierungssysteme beeinflusst werden. Diese Systeme sind aus speziell geformten Blechen und Gittern aufgebaut und bewirken einen gewünschten elektrostatischen Potentialverlauf längs der möglichen Elektronentrajektorien. Abbildung 2.3 zeigt Skizzen solcher Fokussierungssysteme.

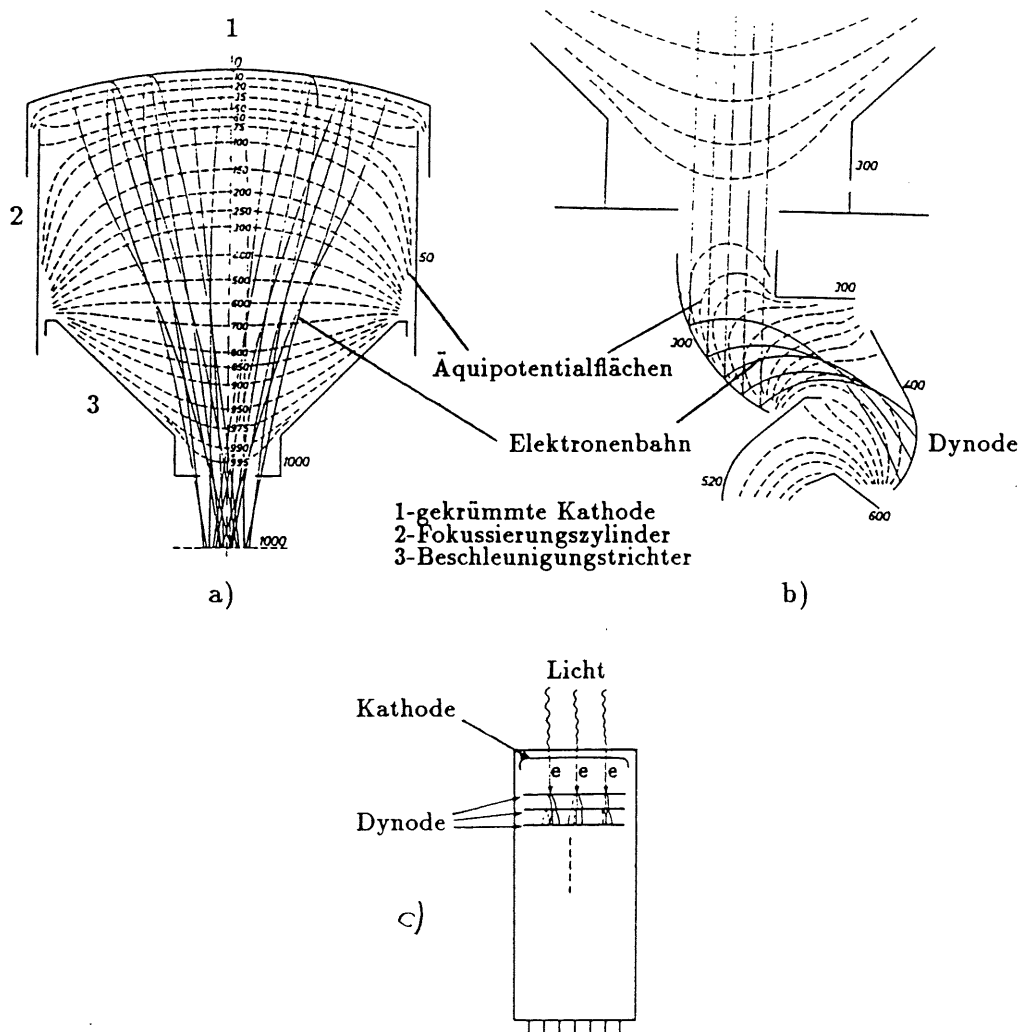


Abbildung 2.3: Teilbild a) und b) zeigen Skizzen des Fokussierungssystems für den PM Valvo 56 AVP [Val 69].

Bei dem in Teilbild c) skizzierten Photomultiplier wurde auf ein Fokussierungssystem fast gänzlich verzichtet. Die sehr kurze Laufzeitdifferenz der Elektronen ist durch die Transmissionsdynoden konstruktiv bedingt. Folgende Kriterien gelten bei der technischen Realisierung von Fokussierungssystemen:

- Es sollen keine Elektronen zwischen Photokathode, Dynoden und Anode verloren gehen.
- Die Laufzeitdifferenz der Elektronen soll unabhängig vom Photoneneinstrahlort auf der Photokathode sein.
- Zwischen den Dynodenstufen soll die Länge der Elektronentrajektorien gleich lang sein.

Die Wirkung des Elektronenvervielfachers beruht auf dem Phänomen der Sekundärelektronenemission. Ähnlich wie beim Photoeffekt können auch Elektronen mit mehr als einigen Elektronenvolt Energie bei Metallen und Halbleitern eine Elektronenemission bewirken. Die meisten Sekundärelektronen haben eine Anfangsenergie von 2...3 eV [Ard 88]. Die Elektronenemissionsrate ( $\delta$ ) hängt nach [Rei 85] nicht nur von dem Auftreffwinkel der Primärelektronen auf die Dynode ab, sondern hauptsächlich von der Energie, die ihnen durch die Beschleunigungsspannung ( $U$ ) zugeführt wurde [Leo 89]:

$$\delta = \frac{\text{Anzahl der emittierten Elektronen}}{\text{Anzahl der immittierten Elektronen}} = A U^\alpha \quad (2.5)$$

$A$  und  $\alpha$  sind experimentell bestimmte Konstanten, wobei in  $\alpha$  die Materialeigenschaften und die geometrischen Verhältnisse der Dynode eingehen.  $\alpha$  hat typischerweise den Wert 0.7 bis 0.8 [Ham 90].

Die Dynoden bestehen aus einem massiven metallenen Träger, z.B. aus Kupfer, auf welchem eine aktive Schicht aus Cs-Sb von wenigen Nanometern Schichtdicke aufgedampft wurde. Die für diese Arbeit besonders hervorzuhebenden Netzdynoden bestehen aus Kupfer (94%) und Silber (5%) und sind mit einer Bialkalischicht versehen worden. Die Dicke dieser Dynoden beträgt etwa  $2 \mu\text{m}$ . Die Oberfläche erscheint wie ein regelmäßiges Gitter dessen Stegbreite etwa  $5.5 \mu\text{m}$  beträgt, und dessen quadratische Aussparungen eine Kantenlänge von etwa  $12 \mu\text{m}$  haben [Mor 89].

## 2.4 Die Spannungsversorgung

Die Funktion des Spannungsteilers ist es, den Photomultiplier an den Verwendungszweck anzupassen. Die Kriterien, die bei der Auslegung der elektronischen Schaltung berücksichtigt werden müssen, hängen ab von

- den Photomultipliereigenschaften,

- den nachzuweisenden Signalen und
- den Betriebsbedingungen, bei denen die Messungen stattfinden sollen.

Er wird zumeist aus einer Reihe von Widerständen aufgebaut und teilt die Gesamtpotentialdifferenz zwischen Kathode und Anode den Dynoden in gewünschten Teilpotentialdifferenzen zu. In Abbildung 2.4 sind Spannungsteiler mit negativer und mit positiver Spannungsversorgung für Gleichlicht- als auch Lichtimpulsbetrieb dargestellt. Es gibt folgende Möglichkeiten der Versorgungsspannungspolung:

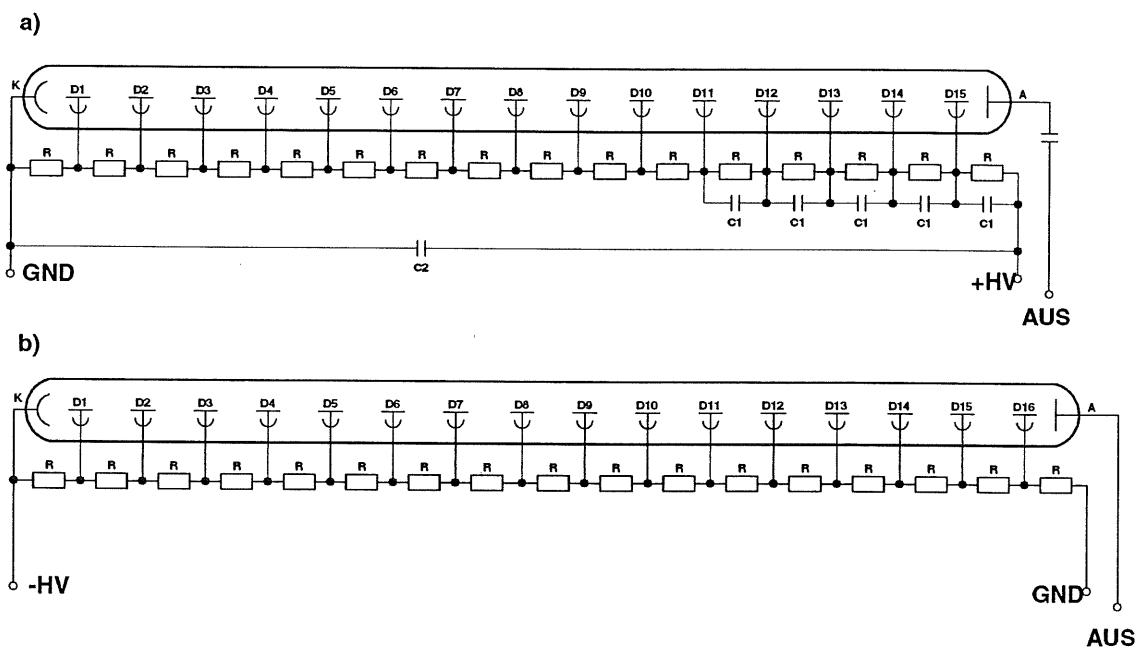


Abbildung 2.4: Spannungsteiler für Lichtimpulsbetrieb mit positiver Versorgungsspannung (a) und für Gleichlichtbetrieb mit negativer Versorgungsspannung (b)

- Der negative Pol liegt auf der Kathode, das Nullpotential liegt auf der Anode. Von Nachteil ist hierbei, daß der Dunkelstrom nach dem Einschalten der Versorgungsspannung recht hoch ist und erst allmählich absinkt. Ursache dafür ist nach [Sch 70] eine Szintillation im Fenstermaterial, die durch HV-Überschläge von der Kathode zu einem nahegelegenen äußeren Gegenstand erfolgen. Der Vorteil dieser Polung ist der, daß das Anodensignal direkt ausgekoppelt werden kann.
- Das Nullpotential liegt auf der Kathode, das positive Potential liegt auf der Anode. Von Nachteil ist hierbei, daß das Anodensignal nicht direkt ausgekoppelt werden kann. Normalerweise wird dann zur Signalauskopplung ein Hochpaß verwendet.

Der durch den Spannungsteiler fließende Strom wird als Querstrom ( $I_Q$ ) bezeichnet:

$$I_Q = \frac{U_{ges}}{R_{ges}} \quad (2.6)$$

Er sollte den maximalen Anodenstrom um das zwanzigfache übersteigen, damit die Amplitudenlinearität des Ausgangssignals hinreichend gewahrt bleibt [Ham 90]. Andererseits sollte er so niedrig wie möglich sein, um eine Erwärmung der Widerstände zu vermeiden.

Wenn die zu messenden Signale ausschließlich pulsförmig sind, kann die Versorgungsspannung der letzten Dynodenstufen stabilisiert werden, indem man parallel zu den Spannungsteilerwiderständen Kondensatoren schaltet. Wünscht man z.B. die Linearität besser als 1 %, so muß die Ladungsmenge des Kondensators ( $Q_C$ ), der die Spannung für die letzte Dynodenstufe stabilisiert, die maximale Ladungsmenge des an der Anode abgegriffenen Pulses ( $Q_p$ ) um das hundertfache übertreffen:

$$Q_C \geq 100 Q_p \quad (2.7)$$

Die Höhe des Querstromes richtet sich dann nach der maximalen Frequenz ( $\nu_p$ ), mit der diese Anodenspitzenpulse erwartet werden:

$$I_Q \geq \nu_p Q_C \quad (2.8)$$

## 2.5 Die Verstärkung von Photomultipliern

Wie bereits in Kapitel 2.3 vorgestellt, ergibt sich die mittlere Sekundärelektronenemissionsrate ( $\delta$ ) einer Dynode folgendermaßen:

$$\delta = \frac{\text{Anzahl der emittierten Elektronen}}{\text{Anzahl der immittierten Elektronen}} = A U^\alpha \quad (2.9)$$

Unter der Annahme, daß diese Rate für jede Dynode den gleichen Betrag hat, ergibt sich die Gesamtverstärkung ( $G$ ) für einen n-stufigen Photomultiplier [Leo 89]:

$$G = \delta^n = A^n U^{\alpha n} = \frac{A^n}{(n+1)^{\alpha n}} (U_{ges})^{\alpha n} \quad (2.10)$$

$U$  ist hier die Potentialdifferenz, die zwischen den aufeinanderfolgenden Dynodenstufen besteht.  $U_{ges}$  entspricht der Versorgungsspannung zwischen der Kathode und der Anode. Die Verstärkung des Photomultipliers hängt von der n-ten Potenz der Versorgungsspannung ab. Eine Schwankung der Versorgungsspannung von  $\Delta U \approx 1 \text{ ‰}$  für einen 15-stufigen PM bewirkt eine Schwankung in der Verstärkung von  $\Delta G \approx 1.5 \text{ ‰}$ .

Im Folgenden wird ein einfaches Modell zur Abschätzung der Verstärkung vorgestellt [Don 86, Bra 81]. Ein auf die Photokathode treffendes Photon schlägt dort durch Photoeffekt mit der Wahrscheinlichkeit  $\eta$  ein 'Photoelektron' aus. Dieses wird in einem elektrischen Feld beschleunigt, trifft auf die erste Dynode und setzt dort im Mittel  $\delta$  Elektronen frei. Für jede weitere Dynodenstufe setzt jedes Elektron im Mittel  $\delta$  Elektronen frei. Die Statistik dieser Prozesse hat Schwankungen der an der Anode abgegriffenen Ladungsmenge zur Folge, die mit einem Analog-Digital-Wandler (ADC) beobachtet werden können. Beleuchtet man den PM mit einer konstant gepulsten Leuchtdiode, so kann man aus der relativen Breite des ADC-Spektrums (*FWHM*) abschätzen, welcher mittleren Photoelektronenzahl ( $N_{pe}$ ) der Mittelwert des ADC-Spektrums (*MEAN*) entspricht. Folgende Annahmen wurden gemacht:

- Die Zahl der erzeugten Photoelektronen ist poissonverteilt:

$$(\sigma_{pe})_{relativ}^2 = \frac{1}{N_{pe}} \quad (2.11)$$

- Die Zahl der erzeugten Sekundärelektronen ist poissonverteilt ( $i$  steht für die  $i$ -te Dynodenstufe):

$$(\sigma_{Dyn_i})_{relativ}^2 = \frac{\delta^{-i}}{N_{pe}} \quad (2.12)$$

daraus folgt mit

$$(\sigma_{MEAN})_{relativ}^2 = (\sigma_{pe})_{relativ}^2 + \sum_i (\sigma_{Dyn_i})_{relativ}^2 \quad (2.13)$$

die mittlere Photoelektronenzahl

$$N_{pe} = \frac{1 + \sum_i \delta^{-i}}{(\sigma_{MEAN})_{relativ}^2} \approx \frac{\delta}{\delta - 1} \frac{1}{\left(\frac{FWHM}{2.355 MEAN}\right)^2} \quad (2.14)$$

Genauere Werte für  $N_{pe}$  erhält man, wenn der Mittelwert ( $\bar{A}$ ) und die Streuung ( $\sigma_A$ ) des gemessenen Spektrums mit den Meßwerten des Pedestalspektrums ( $\sigma_p, A_p$ ) korrigiert werden:

$$N_{pe} = \frac{\delta}{\delta - 1} \frac{\sigma_A^2 - \sigma_p^2}{\bar{A} - A_p} \quad (2.15)$$

Die Stromverstärkung für einen 15-stufigen PM ( $G = \delta^{15}$ ) wird dann mit folgender Bedingung iterativ bestimmt:

$$e N_{pe} \delta^{15} = (\bar{A} - A_p) K \quad (2.16)$$

$K$  ist eine Konstante, die den ADC charakterisiert und beträgt  $K = 0.25 \text{ pC/Kanal}$ . Die so ermittelten Verstärkungen weichen von denen ab, die mit den Hamamatsu-Datenblätter berechnet wurden. Für die 1"-PMs erwies sich diese Methode als brauchbar. Die Abweichungen betragen weniger als 30 %. Für die 2"-PMs erwies sich diese Methode als unbrauchbar, da die mit dieser Methode berechneten Werte um den Faktor 2...10 zu hoch waren.

## 2.6 Photomultiplier im Magnetfeld

Bei allen Photomultipliertypen wird die Stromverstärkung durch ein äußeres Magnetfeld beeinflusst. Die Elektronen werden von ihren normalen Trajektorien abgelenkt und sind im Extremfall für den Vervielfachungsprozeß verloren. Der auf Magnetfeldeinwirkung sensitivste Bereich im Photomultiplier ist der Raum zwischen der Photokathode und der ersten Dynode. Bei unsymmetrischen Fokussierungssystemen ist der Verstärkungsrückgang auch von der relativen Orientierung des PM zum Magnetfeldvektor abhängig. In Abbildung 2.5 ist der relative Verstärkungsrückgang des linear fokussierenden PM Valvo XP 2020 (siehe Abb. 2.1 c) dargestellt [Phi 90].

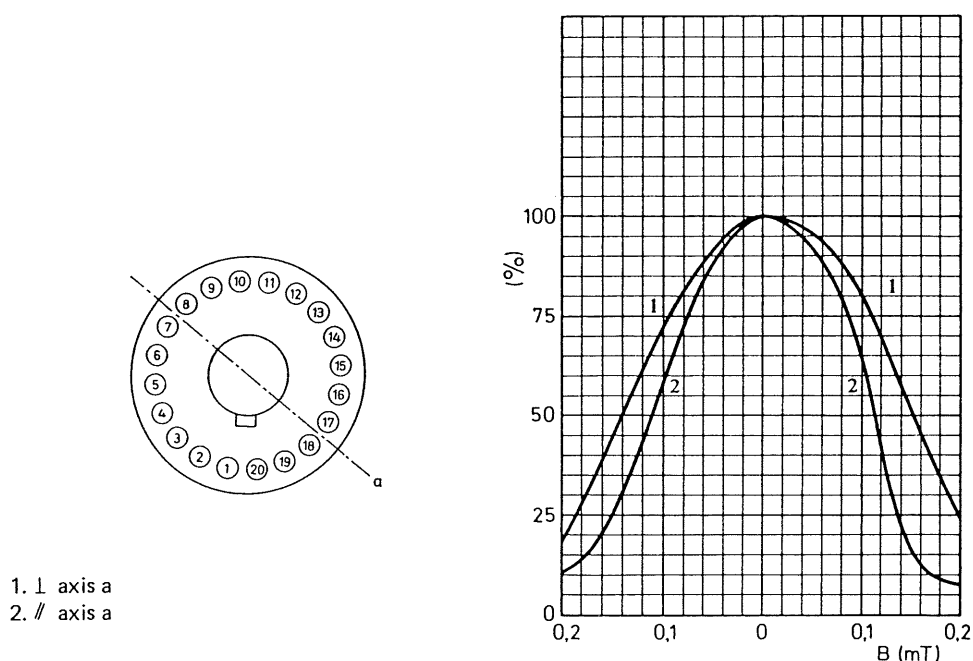


Abbildung 2.5: relativer Verstärkungsrückgang aufgetragen gegen die Magnetfeldstärke; die Achse a gibt die Orientierung des PM im Magnetfeld an.

Schon bei einer Magnetfeldstärke von  $B = 2 \times 10^{-4} \text{ T}$  ist die relative Verstärkung auf Werte zwischen 8 % und 25 % abgefallen. Umgibt man den Photo-

multiplier mit einem äußeren Mantel aus magnetisch weichem Eisen und einem darunterliegenden Mantel aus  $\mu$ -Metall, so lassen sich Abschirmwirkungen bis  $1 \times 10^4$  erzielen [Sch 70]. Dieser Wert stellt jedoch eine Obergrenze dar, da sich das Verhältnis Länge/Durchmesser und die Wandstärke des Abschirmmantels nicht beliebig steigern läßt.

Eine Alternative dazu stellt ein Photomultiplier mit einem Vervielfachungssystem aus Transmissionsdynoden dar (siehe Abb. 2.1 e). Diese Dynoden lassen sich linear hintereinander anordnen. Die so definierte Richtung stellt die einzige Achse dar, entlang derer die Elektronen elektrostatisch beschleunigt werden. In früheren Untersuchungen

- am 8-stufigen PM Hamamatsu-R 2182 [Fin 89],
- am 16-stufigen PM Hamamatsu-R 2490 [Mor 89] und
- am 15-stufigen PM Hamamatsu-R 3432-01 [Jan 93]

wurde festgestellt, daß die Verstärkung im axialen Magnetfeld bei etwa  $B \approx 0.5$  T auf die Hälfte, und bei  $B \approx 1.2$  T auf ca. 2% abgesunken ist. Desweiteren wurde die Verstärkung unter Variation des Winkels zwischen PM-Achse und Magnetfeldachse geprüft. Bis zu einem Winkel von  $\pm 20^\circ$  steigt die Verstärkung auf das 1.5-fache an, und sie sinkt bis zu einem Winkel von  $\pm 30^\circ$  wieder auf den ursprünglichen Wert ab. Bei noch größeren Winkeln fällt die Verstärkung stark ab und geht fast auf Null zurück. Die Zeitauflösung (Laufzeitdifferenz) und die Gesamtlaufzeit sind nicht von der Magnetfeldstärke, - wohl aber von dem Winkel zwischen der PM-Achse und dem Magnetfeldvektor abhängig. Bei größeren Winkeln als  $20^\circ$  vergrößert sich die Laufzeitdifferenz und die Gesamtlaufzeit geringfügig.

# Kapitel 3

## Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden Informationen über die Durchführung der einzelnen Messungen geliefert. Es wird gezeigt werden, woraus die Meßaufbauten bestanden haben und welche Eigenschaften der Photomultiplier<sup>1</sup> (PM) überprüft wurden. Desweiteren wird über die Ausleseelektronik und das Datennahmesystem berichtet. Zum Abschluß dieses Kapitels wird eine Tabelle aufgeführt, die einen Überblick über das Meßprogramm gibt.

### 3.1 Der Versuchsaufbau

#### 3.1.1 Der mechanische Aufbau

Untersuchungen von Photomultipliern müssen in einem möglichst lichtdichten Gehäuse durchgeführt werden. Da ein Großteil der Messungen im Magnetfeld stattfinden sollte, wurden für den Bau der Testbox ausschließlich nichtmagnetische Werkstoffe wie Aluminium, Messing, nichtmagnetischer Stahl, PMMA (Plexiglas), GFK, Polystyrol, nichtmagnetische Kabel usw. verwendet. Die inneren Gehäusewände wurden mit mattschwarzer Farbe bestrichen um Streulicht zu minimieren. Eine Skizze des mechanischen Aufbaus ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Abbildung 3.2 zeigt eine Photographie des mechanischen Aufbaus und Abbildung 3.3 zeigt eine Photographie der Testbox.

---

<sup>1</sup>Hamamatsu R.2490-05 MOD (2'') und R.5506 (1''), technische Daten im Anhang A



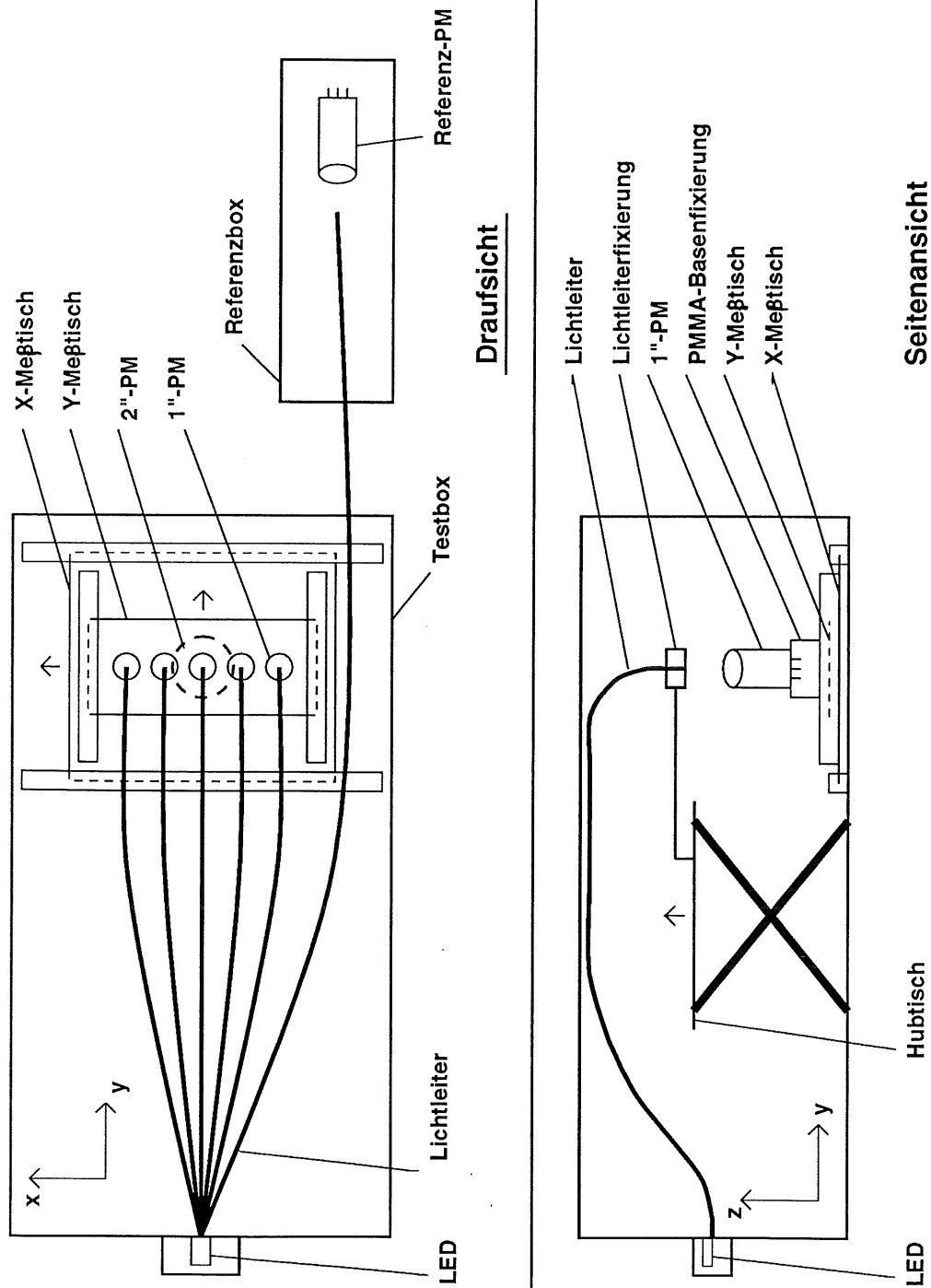


Abbildung 3.1: Skizze des mechanischen Aufbaus

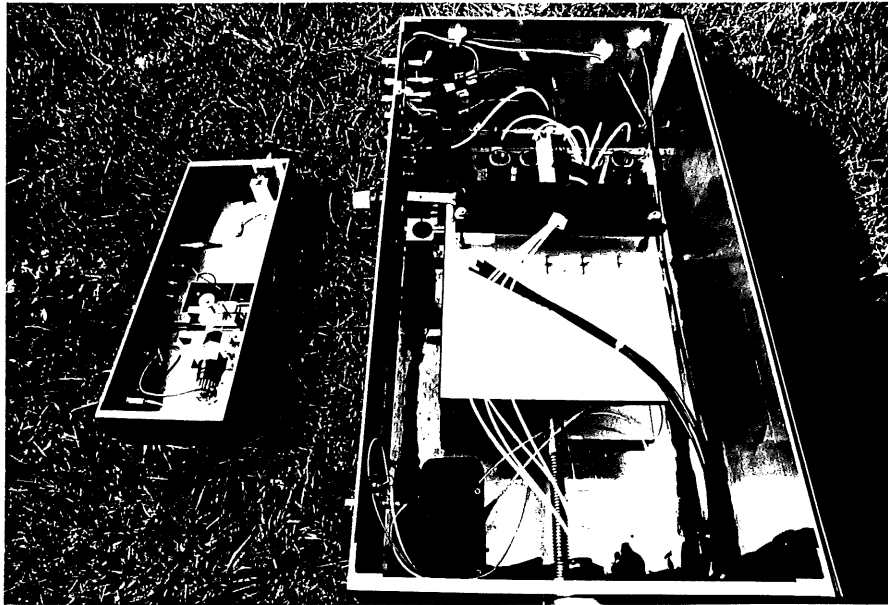


Abbildung 3.2: Photographie des mechanischen Aufbaus

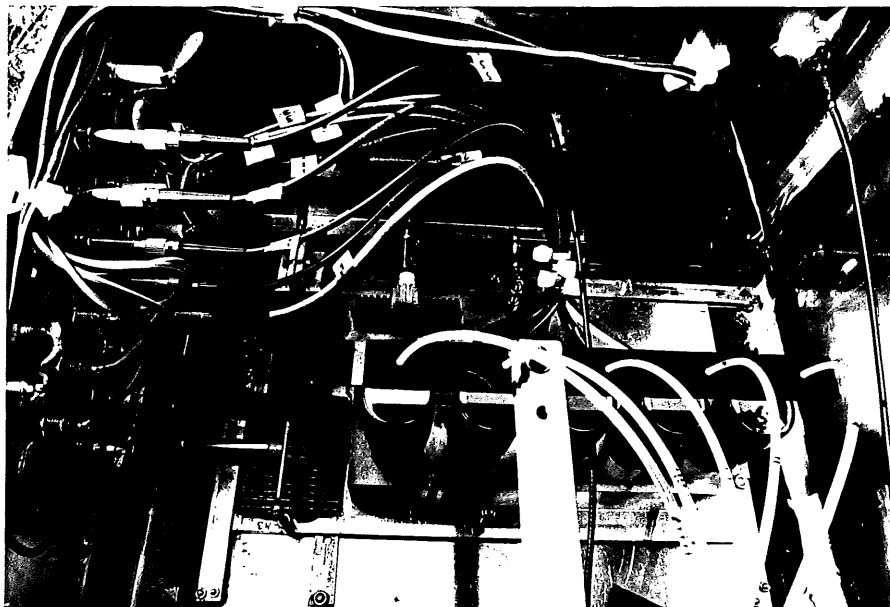


Abbildung 3.3: Photographie des XY-Meßtisches und der Signal- und Hochspannungsdurchführungen

Die Gehäusemaße der Testbox sind  $(H, B, T)$ :  $166 \text{ mm} \times 563 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$ , die Maße der Referenzbox sind  $63 \text{ mm} \times 320 \text{ mm} \times 124 \text{ mm}$ . Die Basen<sup>2</sup> der Photomultiplier wurden in eine PMMA-Halterung eingepaßt. Man konnte entweder an fünf 1" - PMs gleichzeitig oder an einem 2" - PM Messungen durchführen. Als Referenzphotomultiplier diente ein weiterer 1" - PM. Es bestand die Möglichkeit, bei geschlossener Testbox die X- und die Y-Position der PMs als auch den Abstand des Lichtleiterendes vom PM-Fenster zu variieren. Alle Lichtleiter waren am LED-Ende miteinander verklebt und an der Testbox fixiert. Die LED war mittels einer Paßhülse mechanisch an die Testbox gekoppelt. Die Lichtleiter transmittierten die Lichtpulse von der LED zu dem jeweiligen PM. Die Länge des Lichtleiters zur Referenzbox betrug 1.2 m, die anderen fünf Lichtleiter waren 0.5 m lang. Die Bewegung der Meßtische erfolgte mit manuellem Zahnstangenantrieb. Die Bewegung des Hubtisches erfolgte mittels Handrad. Die Position des X- und Y-Tisches als auch die Z-Position der Lichtleiterenden relativ zu den PM-Fenstern wurden mittels Widerstandsweggebern<sup>3</sup> bestimmt, die während der Messungen von Ohmmetern überwacht wurden. Die systematischen Fehler in X- bzw. in Y-Richtung betragen  $\Delta x, \Delta y \leq 0.5 \text{ mm}$ . Die Position eines jeden Meßpunktes war mit einem Fehler von  $\pm 0.5 \text{ mm}$  reproduzierbar.

### 3.1.2 Die Spannungsteiler

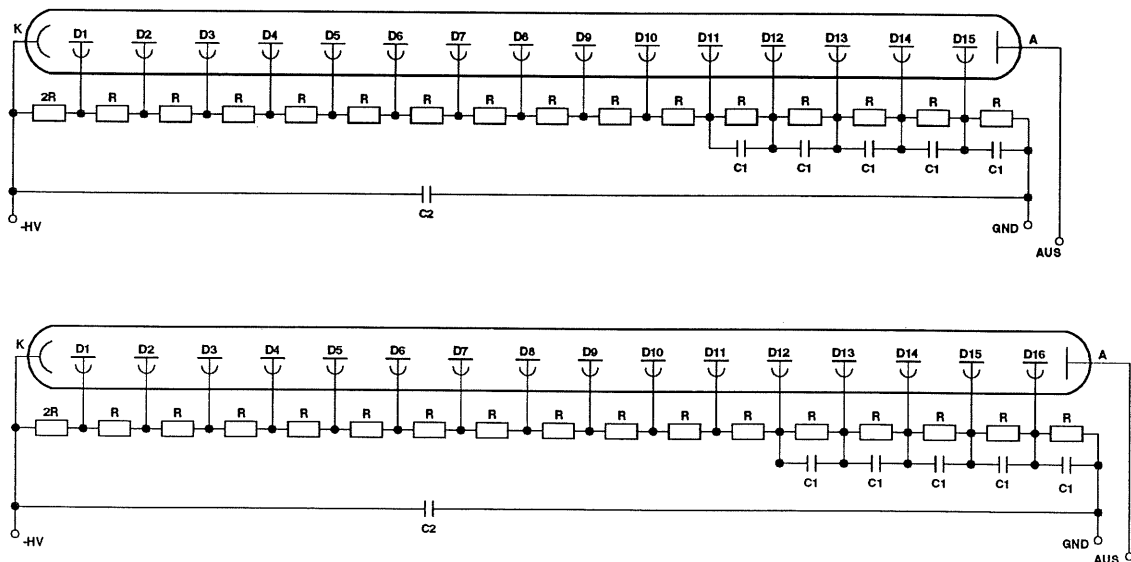


Abbildung 3.4: Schaltbild der Spannungsteiler

In Abbildung 3.4 sind die Schaltbilder der Spannungsteiler sowohl für den 15-

<sup>2</sup>Einheit aus Spannungsteiler und Photomultipliersockel

<sup>3</sup>Novotechnik B 300 1a 303

stufigen 1'' - PM als auch den 16-stufigen 2'' - PM aufgezeichnet. Da der PM ausschließlich im Lichtimpulsbetrieb arbeiten soll, wurde ein Spannungsteiler verwendet, welcher einen guten Kompromiß hinsichtlich der Stromverstärkung, der Impulslinierität, des Zeitverhaltens und des Stromverbrauches darstellt. Er erzeugt einen linearen Potentialabfall längs aller Dynodenstufen. Der negative Pol der Gesamtspeisespannung ist mit der Kathode verbunden. Das Anodensignal wurde in Geräte mit einer Eingangsimpedanz von  $R_I = 50 \Omega$  eingespeist. Die verwendeten Bauteile hatten folgende Werte:  $R = (1 \pm 0.01) \text{ M}\Omega$ ,  $C_1 = (2.2 \pm 0.2) \text{ nF}$ ,  $C_2 = (6.8 \pm 0.7) \text{ nF}$ . Der Querstrom des Spannungsteilers für den 1'' - PM beträgt nach Gleichung 2.6 bei  $U_B = 2000 \text{ V}$  etwa  $I_B \approx 1.2 \times 10^{-4} \text{ A}$ . Verlangt man eine Linearität der Verstärkung von  $\Delta I_A / I_A \approx 1\%$ , so kann nach Gleichung 2.7 ein Kondensator mit  $C = 2.2 \text{ nF}$  eine Ladungsmenge von  $\Delta Q_{max} \approx 1.8 \times 10^{-9} \text{ C}$  bereitstellen. Mit dieser Ladungsmenge und dem vorher berechneten Querstrom folgt nach Gleichung 2.8 eine maximale Pulsfrequenz von  $\nu_{max} \approx 65 \text{ kHz}$ .

### 3.1.3 Die Lichtquellen und Lichtleiter

Als Lichtquelle dient eine Leuchtdiode<sup>4</sup> (LED). Abbildung 3.5 zeigt, wie sie im Meßaufbau integriert ist. Die LED war mittels einer Paßhülse in ein Loch in der

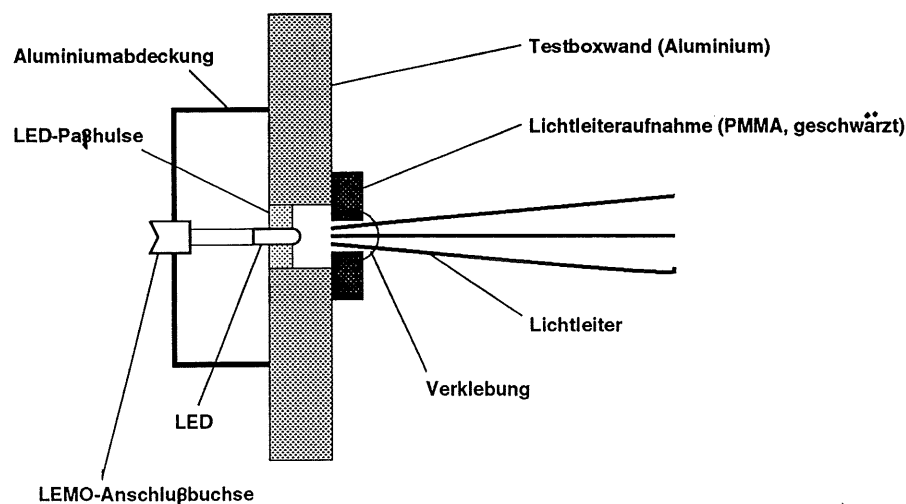


Abbildung 3.5: Skizze der LED im Meßaufbau

Testboxwand eingepaßt und strahlte mit einem Abstand von  $d \approx 2 \text{ mm}$  direkt in die Lichtleiter ein. Das Amplitudenmaximum ihres Emissionsspektrums liegt bei der Wellenlänge  $\lambda_p = 565 \text{ nm}$ . Die Bandbreite bei der Hälfte des Intensitätsmaximums (FWHM) beträgt  $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$ . Abbildung 3.6 zeigt das Emissionsspektrum bei einem Vorwärtsstrom  $I_F = 10 \text{ mA}$  und einer Umgebungstemperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

<sup>4</sup>VALVO CQS 95 (3mm,grün), technische Daten siehe Anhang B

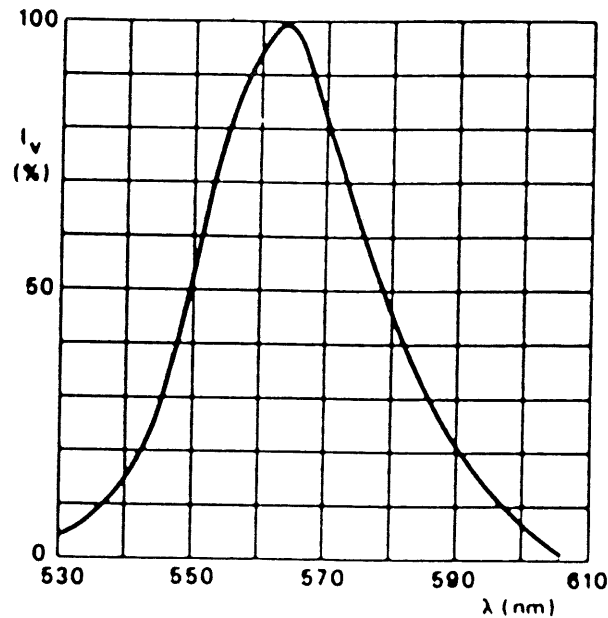


Abbildung 3.6: Das LED-Emissionsspektrum (aus [Val 85])

Die Lichtleitung von Lichtleitfasern beruht auf dem Phänomen der Totalreflexion. Tritt das Licht unter einem hinreichend kleinen Einfallswinkel in eine Stirnfläche der Lichtleitfaser ein, so wird es zum anderen Ende der Faser geleitet. Geringe Verluste werden nur durch Streu- und Absorptionszentren bewirkt. Es wurden Lichtleitfasern<sup>5</sup> mit 1 mm Durchmesser aus Kunststoff verwendet. Die Eintritts- und Austrittsflächen der Fasern wurden poliert, um Verluste zu minimieren. Abbildung 3.7 zeigt eine Skizze dieser Faser [Bic 91].

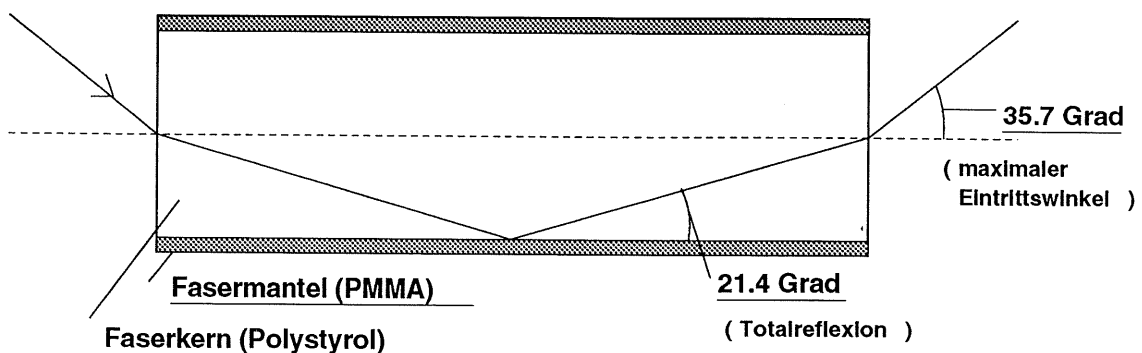


Abbildung 3.7: Skizze der Lichtleitfaser

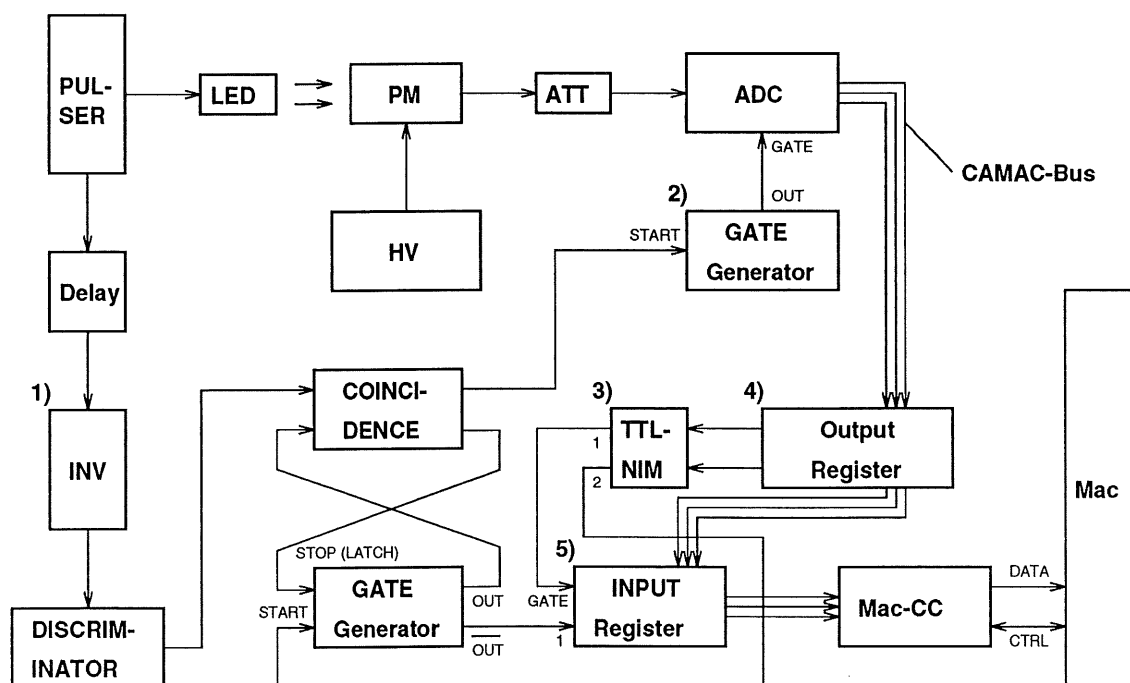
<sup>5</sup>Kuraray SCSF-81, technische Daten siehe Anhang B

### 3.1.4 Der Magnet

Alle Messungen, bei denen die Testbox in einem Magnetfeld plaziert wurde, fanden im Luftspalt eines Ablenkmagneten vom Typ MA<sup>6</sup> statt [Des 66]. Der Dipolmagnet stellt über einen Raum von 1200 mm × 400 mm × 168 mm ein homogenes Magnetfeld zur Verfügung. Die Abweichung vom Mittelwert des Magnetfeldes in diesem Raum beträgt weniger als 0.2% [Mor 89]. Die Magnetfeldstärke kann mittels Variation des Stromes im Bereich 0...2 T nahezu stufenlos eingestellt werden. Die für viele Messungen benötigte Magnetfeldstärke von 1.2 T wurde mit einem Magnetometer<sup>7</sup> überprüft. Mit diesem Gerät wurde auch das Streufeld außerhalb des Magneten am Ort der Referenzbox mit  $B \leq 1 \times 10^{-4}$  T bestimmt.

## 3.2 Die Durchführung der Messungen

In Abbildung 3.8 ist das Blockschaltbild des Meßaufbaus dargestellt.



1): Linear Fan-Out, LeCroy 428F ; 2): Dual-Gate Generator, LeCroy 222

3): Level-Adapter, LeCroy 688AL ; 4): Output-Register 9042 ; 5): Input-Register LeCroy 2341S

Abbildung 3.8: Blockschaltbild des Meßaufbaus

<sup>6</sup>technische Daten und Erregungskurve siehe Anhang C

<sup>7</sup>Bruker B - H 15 B, technische Daten siehe Anhang C

Der Pulsgenerator<sup>8</sup> speiste in die LED ein Signal ein, welches mit einem Oszilloskop<sup>9</sup> überprüft wurde. Es ergaben sich folgende Meßwerte (an  $50 \Omega$ ): Amplitude  $U_{max} \approx 5 \text{ V}$ , Halbwertsbreite (FWHM)  $\Delta t \approx 50 \text{ ns}$ , Anstieg- und Abfallzeit (10%  $\leftrightarrow$  90% der Amplitude)  $t_{r,f} \approx 12 \text{ ns}$ , Pulsfrequenz  $\nu \approx 200 \text{ Hz}$ . Die LED erzeugte entsprechende Lichtpulse, die mittels der Lichtleiter zu den PMs transferiert wurden. Die Versorgungsspannung<sup>10</sup> der PMs konnte in Stufen von einem Volt eingestellt werden.

Die Ladung der Photomultiplierpulse wurden von einem Analog-Digital-Wandler<sup>11</sup> (ADC) ausgelesen und dort digitalisiert. Bei diesem Gerät ist der Meßbereich 0...256 pC in 1024 Kanäle unterteilt. Der ADC war nur dann sensitiv, wenn am Steuereingang ein logisches NIM-Signal anlag. Dieses Signal wurde mit Hilfe eines Triggerausgangssignales des Pulsgenerators erzeugt. Das Triggersignal wurde entsprechend des gewünschten Zeitablaufes verzögert und in den Diskriminator<sup>12</sup> eingespeist. Der Diskriminator lieferte ein logisches NIM-Signal an die Koinzidenzeinheit<sup>13</sup>. Wenn der Rechner<sup>14</sup> bereit war, Daten auf die Festplatte zu schreiben, so lag am zweiten Eingang der Koinzidenzeinheit ein NIM-Signal an. Waren beide Bedingungen gleichzeitig erfüllt (Ereignis), so wurde ein NIM-Signal in den Gate-Generator eingelesen, welcher darauf ein NIM-Signal, hier mit  $\Delta t \approx 200 \text{ ns}$ , in den Steuereingang des ADC einspeiste. Während dieser Zeitspanne wurde die Ladungsmenge des PM-Signals aufintegriert. Wenn ein PM eine Amplitude lieferte, die den Meßbereich des ADC überstieg, wurden kalibrierte Abschwächer verwendet.

Das digitalisierte Signal wird in ein CAMAC-Interface<sup>15</sup> eingelesen und von dort zur Datenverarbeitung weitergegeben. Das Programm 'MacDaq' schreibt die Daten auf die Festplatte, und es erzeugte mit diesen Daten Pulshöhenspektren, welche auf dem Monitor überwacht wurden. Die Daten wurden später zur DESY-IBM<sup>16</sup> transferiert. Die Analyse fand dort mit Fortran- und PAW-Programmen statt.

Vor und nach jeder Messung wurde die LED vom Pulsgenerator getrennt und danach ein Sockelspektrum (Pedestal) mit 1000 Events bei einer Triggerfrequenz von  $\nu \approx 100 \text{ Hz}$  aufgenommen. Der Mittelwert dieses Sockelspektrums mußte in der späteren Analyse von den gemessenen Verteilungen abgezogen werden. Anfangs wurden Wiederholungen von Messungen gemacht, um die Reproduzierbarkeit beziffern zu können.

---

<sup>8</sup>Hewlett-Packard 8007 B

<sup>9</sup>Le Croy 9400

<sup>10</sup>HV-Gerät Le Croy 4032

<sup>11</sup>Le Croy 2249 A

<sup>12</sup>Le Croy 621 BLZ

<sup>13</sup>Le Croy 365

<sup>14</sup>Apple Macintosh II ci

<sup>15</sup>MAC-CC, CERN-EP TYP 392

<sup>16</sup>IBM 3270-43

Das Signal der Referenzröhre wurde in der späteren Analyse benutzt, um Fluktuationen der Lichtsignale, hervorgerufen durch Schwankungen des Ausgangssignales des Pulsgenerators oder der LED-Umgebungstemperatur korrigieren zu können.

### 3.2.1 Der Versorgungsspannungstest

Diese Messungen fanden nicht im Magnetfeld statt. Die Versorgungsspannung der Referenzröhre betrug 2000 V. Die fünf 1" - PMs wurden in einem Spannungsintervall von 1000 ... 2500 V mit einer Schrittweite von 100 V untersucht. Der 2" - PM wurde in einem Spannungsintervall von 1400 ... 2700 V mit einer Schrittweite von 100 V untersucht. Die Kathodenflächen wurden zu 100 % beleuchtet. Die Messungen wurden mit dem in Abbildung 3.8 dargestellten Meßaufbau durchgeführt. Bei zu hohen Versorgungsspannungen mußten Abschwächer eingesetzt werden. Die Pulsfrequenz betrug  $\nu \approx 200$  Hz. Für eine Messung bei einem Spannungswert wurden 1500 Ereignisse aufgenommen.

### 3.2.2 Der Magnetfeldtest

Die Testbox wurde im Magnetfeld plaziert. Der Magnetfeldvektor war parallel zu der Symetrieachse (z-Achse) der PMs ausgerichtet. Das Signal der Referenzröhre außerhalb des Magneten wurde dazu verwendet, um eventuelle Wirkungen des Magnetfeldes auf die LED bei der späteren Analyse berücksichtigen zu können [Jan 93]. Die Versorgungsspannung der fünf 1" - PMs und der Referenzröhre betrug 2000 V. Die Versorgungsspannung des 2" - PM betrug 2500 V. Gemessen wurde bei den Magnetfeldstärken 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 und 1.2 T. Die Kathoden wurden zu 100 % beleuchtet. Der Meßaufbau ist bis auf kleine Änderungen wie in Abbildung 3.8 dargestellt erhalten geblieben. Um auch bei 1.2 T noch einen genügend hohen Signalpegel zu erhalten, wurde die Halbwertsbreite des in die LED eingespeisten Pulses auf  $\Delta t \approx 200$  ns erhöht. Parallel dazu mußte die Länge des Steuerpulses für den ADC auf 1000 ns erhöht werden. Es wurde ein für diese lange Steuerzeit besser geeigneter ADC<sup>17</sup> verwendet. Bei niedrigen Magnetfeldstärken mußten Abschwächer eingesetzt werden. Die Pulsfrequenz betrug  $\nu \approx 200$  Hz. Für eine Messung bei einem Magnetfeldwert wurden 1500 Ereignisse aufgenommen.

### 3.2.3 Die Kathodenabtastungen

Diese Messungen wurden zweifach durchgeführt, nämlich einmal ohne und einmal mit Magnetfeld von 1.2 T. Das Signal der Referenzröhre wurde wieder benutzt, um Schwankungen der Lichtsignale korrigieren zu können. Ihre Versorgungsspannung betrug 2000 V. Die Versorgungsspannung der fünf 1" - PMs betrug ebenfalls 2000 V.

---

<sup>17</sup>Le Croy 2249 W



Die Versorgungsspannung des 2" - PM betrug 2500 V. Die Abtastschemata sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

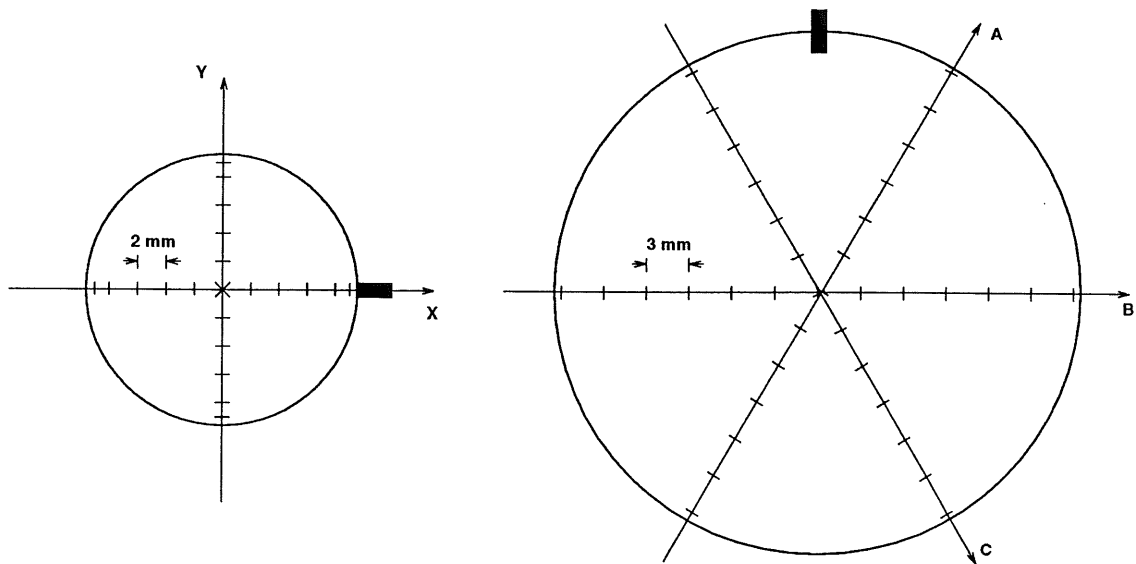


Abbildung 3.9: Links ist das Schema für den 1" - PM dargestellt. Rechts ist das Schema für den 2" - PM dargestellt. Der Betrachter schaut von oben auf die PM-Fenster. Die länglichen Markierungen geben die Position des unbesetzten Anschlusses der Basis an.

Die Distanz zwischen den Lichtleiterenden und den PM-Fenstern betrug  $d = (1 \pm 0.1)$  mm. Für die Abtastungen im Magnetfeld wurde der Meßaufbau von Kapitel 3.2.2 verwendet. Für die Abtastungen ohne Magnetfeld wurde der Meßaufbau von Kapitel 3.2.1 verwendet. Für jeden Meßpunkt wurden 1500 Ereignisse aufgenommen.

### 3.2.4 Der Stabilitätstest

Bei der Messung wurden jeweils fünf 1" - PMs auf Stabilität überprüft. Als Referenzphotomultiplier wurde eine Röhre gleichen Typs verwendet, die sich in früheren Tests als stabil und zuverlässig erwiesen hatte. Mit ihrer Hilfe konnte man Unregelmäßigkeiten und Anomalien der getesteten PMs leichter erkennen. Die Versorgungsspannung aller PMs betrug  $U = 2000$  V. Die Messungen wurden mit dem in Abbildung 3.8 dargestellten Meßaufbau durchgeführt. Die Pulsfrequenz betrug  $\nu \approx 0.25$  Hz. Die Kathoden der PMs wurden zu 100 % beleuchtet. Der Test wurde nicht im Magnetfeld durchgeführt. Die Messungen erfolgten bei konstanter Umgebungstemperatur. Sie dauerten zwischen 10 und 72 Stunden und hatten zwischen 9000 und 64800 Ereignisse. Es wurden vor und nach den Langzeittests Kurzzeit-

messungen mit 1500 Ereignissen bei einer Frequenz von  $\nu \approx 100$  Hz durchgeführt, um einen schnellen Überblick über etwaige Veränderungen der PMs zu bekommen.

### 3.2.5 Der Temperaturtest

Bei dieser Messung wurden fünf 1" - PMs auf ihr Verhalten bei Temperaturänderung untersucht. Dieser Test fand nicht im Magnetfeld statt. Die Testbox wurde auf einer Heizplatte plaziert und mit einigen Tüchern etwas von der Raumluft isoliert. Die Referenzbox wurde in einem mit Dämpfungsmaterial gefüllten Pappkarton untergebracht, damit auch sie etwas von der Umgebungsluft isoliert war. Die Konstanz der Referenzboxtemperatur wurde während der Messungen mit einem Digitalthermometer<sup>18</sup> überprüft. Die Eichung der Absolutskala des Temperaturmeßsystems wurde ebenfalls mit diesem Gerät vorgenommen. Der Temperatursensor<sup>19</sup> war an dem Glaskörper der mittleren von den fünf Röhren angeklebt. Es wurden mehrfach Aufheiz- als auch Abkühlzyklen untersucht, wobei das Temperaturintervall 25 ... 42 °C betrug. Die Versorgungsspannung aller PMs betrug 2000 V. Die Kathoden wurden zu 100 % beleuchtet. Die Messungen wurden mit dem in Abbildung 3.8 dargestellten Meßaufbau durchgeführt. Sie dauerten zwischen 3 und 15 Stunden, und bei einer Pulsfrequenz von 1 Hz erhielt man zwischen 10800 und 54000 Ereignisse.

### 3.2.6 Die Impulslinearitätstests

Bei der Überprüfung der Amplitudenlinearität des PM-Ausgangssignales wurden geänderte Meßaufbauten verwendet. Der Meßaufbau für die 1" - PMs unterschied sich von dem Meßaufbau für den 2" - PM. Der mechanische Aufbau für den Test der 1" - PMs ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

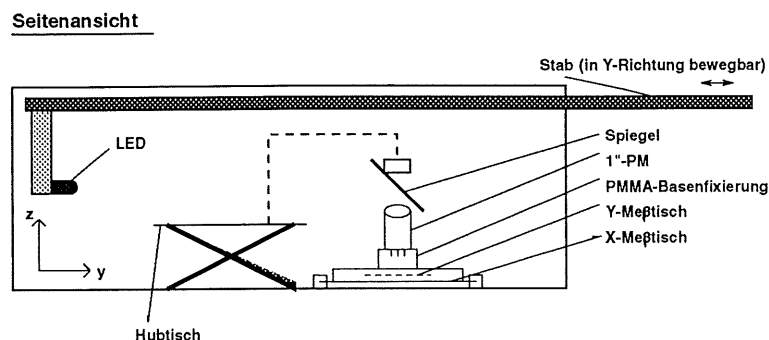


Abbildung 3.10: Linearitätstestaufbau für die 1" - PMs

<sup>18</sup>Fluke 51 K/J Thermometer, technische Daten siehe Anhang D

<sup>19</sup>KTY 10-6, technische Daten siehe Anhang D

Die Tests wurden im Magnetfeld von 1.2 T durchgeführt. Es kam die gleiche LED wie in den vorangegangenen Tests zum Einsatz. Sie war an einem Stab befestigt und strahlte in Richtung eines direkt über den PMs fixierten Spiegels. Mit dem Stab konnte man von außerhalb der Testbox die Entfernung zwischen der LED und dem Spiegel variieren. Auch der elektronische Teil des Meßaufbaus wurde, wie in Abbildung 3.11 dargestellt, verändert. Dieses Blockschaltbild ist als Ergänzung des in Abbildung 3.8 dargestellten Blockschaltbildes zu verstehen, weil der Meßaufbau nur bis zur Koinzidenzeinheit verändert wurde.

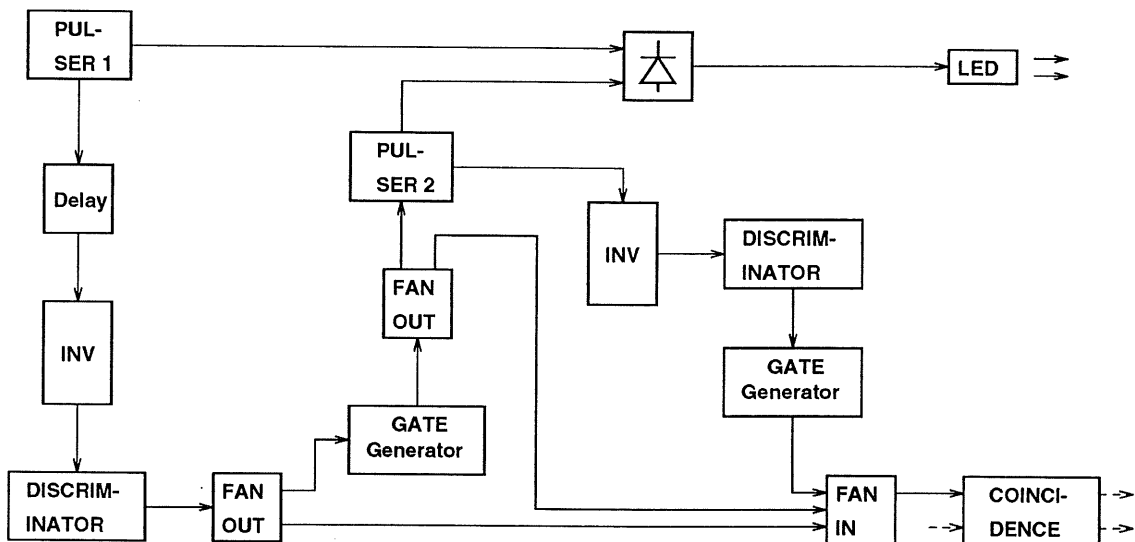


Abbildung 3.11: Blockschaltbild des Linearitätstests für die 1" - PMs

Der Pulsgenerator<sup>20</sup> speiste über eine Verteilerdiode<sup>21</sup>, die zur Trennung der Ausgangsstufen beider Pulsgeneratoren eingeschaltet war, ein Signal mit den folgenden Daten in die LED ein: Amplitude  $U_{max} \approx 7\text{ V}$ , Halbwertsbreite  $\Delta t \approx 100\text{ ns}$ , Anstiegs- und Abfallzeit  $t_{r,f} \approx 12\text{ ns}$ , Pulsfrequenz  $\nu \approx 1000\text{ Hz}$ . Das Triggersignal wurde, nachdem es den Inverter, die Verzögerung und den Diskriminator durchlaufen hatte, in ein logisches FAN-OUT<sup>22</sup> eingespeist. Dieses Modul kann zwei oder mehr Ausgangssignale liefern. Ein Ausgangssignal wurde in ein logisches FAN-IN<sup>22</sup> eingespeist. Das andere Ausgangssignal wurde in einen Gate-Generator eingespeist. Dieser diente als Verzögerungseinheit und lieferte mit ca.  $330\text{ }\mu\text{s}$  Verzögerungszeit ein NIM-Signal an den Ausgang. Dieses Signal wurde in ein logisches FAN-OUT gegeben, welches wieder zwei gleiche Ausgangssignale lieferte. Das eine Ausgangssignal wurde in das oben genannte logische FAN-IN

<sup>20</sup>Hewlett-Packard 214 A

<sup>21</sup>BYS26-45 (Schottky)

<sup>22</sup>Le Croy 429 A

gespeist, das andere Ausgangssignal wurde an den Triggereingang des zweiten Pulsgenerators<sup>8</sup> gelegt. Der zweite Pulsgenerator lieferte über eine Verteilerdiode ein Signal mit geringerer Amplitude an die LED: Amplitude  $U_{max} \approx 4\text{ V}$ , Halbwertsbreite  $\Delta t \approx 100\text{ ns}$ , Anstieg- und Abfallzeit  $t_{r,f} \approx 12\text{ ns}$ , Pulsfrequenz  $\nu \approx 1000\text{ Hz}$ . Das Triggerausgangssignal des zweiten Pulsgenerators wurde, nachdem es einen Inverter und einen Diskriminator durchlaufen hatte, an den Eingang eines weiteren Gate-Generators gegeben. Dieser lieferte ein um etwa  $330\text{ }\mu\text{s}$  zeitverzögertes NIM-Signal aus dem Ausgang an das oben genannte logische FAN-IN. Dieses lieferte immer dann ein NIM-Signal an den Diskriminator, wenn an einem beliebigen Eingang ein NIM-Signal anlag.

Es konnten zwei 1" - PMs gleichzeitig getestet werden. Die Versorgungsspannung betrug 2500 V. Die Länge des Steuersignales für den ADC<sup>11</sup> betrug  $\Delta t \approx 400\text{ ns}$ . Eine Meßreihe bestand aus 11 Meßpunkten. Begonnen wurde sie mit der minimalen Distanz zwischen LED und Spiegel. Dies erforderte eine hohe Abschwächung von 42 dB, damit der hohe Puls noch im ADC-Spektrum erschien. Eine Skizze des beobachteten Spektrums ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Es sind die Verteilungen des hohen Pulses (H), des kleinen Pulses (L) und des Pedestals zu sehen.

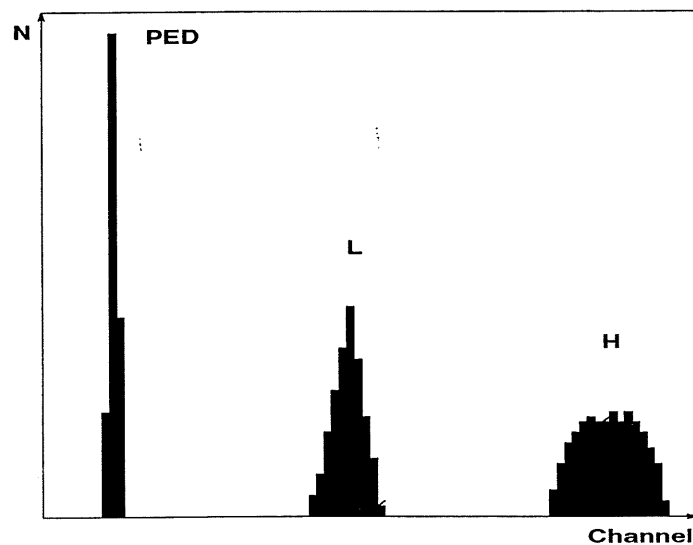


Abbildung 3.12: Skizze des ADC-Spektrums

Der nächste Meßpunkt wurde bei einer um 3 dB kleineren Abschwächung genommen, wobei die Distanz zwischen LED und Spiegel derart vergrößert wurde, daß man etwa die gleichen Mittelwerte der Einzelverteilungen erhielt. Mit diesem Verfahren umging man eventuelle Nichtlinearitäten des ADC-Moduls. Für jeden Abschwächerwert wurden 3000 Ereignisse aufgenommen.

Aus mechanischen Gründen mußte der Aufbau für den Test der 2'' - PMs, wie in Abbildung 3.13 dargestellt, abgeändert werden. Es kam die gleiche LED wie in den vorangegangenen Tests zum Einsatz. Sie wurde direkt über dem PM-Fenster positioniert und strahlte in dessen Richtung. Die Distanz zwischen LED und PM-Fenster betrug  $d \approx 4 \text{ mm}$ . Zwischen LED und PM wurden bis zu sechs Lagen Polyimidfolie<sup>23</sup>, je Lage mit einer Stärke von  $D = (75 \pm 10) \mu\text{m}$ , geschoben. Eine Lage Folie zwischen LED und PM bewirkte einen Abfall des PM-Ausgangssignales um ca. 50%. Die Folie war an einem Stab befestigt, mit dessen Hilfe sie von außerhalb der Testbox zwischen die LED und den PM geschoben werden konnte.

### Seitenansicht

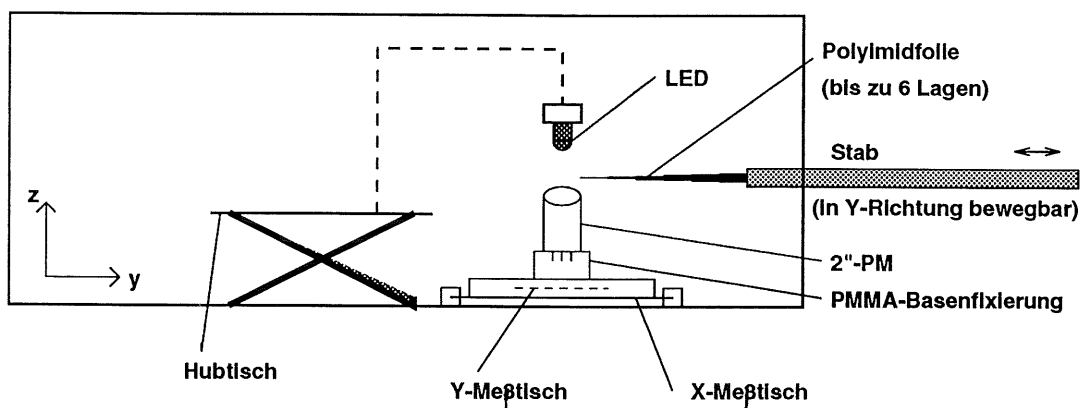


Abbildung 3.13: Linearitätstestaufbau für die 2'' - PMs

Es wurde der elektronische Teil des Meßaufbaus von Kapitel 3.2.2 verwendet, wobei jedoch die Halbwertsbreite des in die LED eingespeisten Signales nur 100 ns betrug. Die Versorgungsspannung des PM betrug 2600 V. Auch bei dieser Meßreihe wurden Abschwächer systematisch eingesetzt. Eine Meßreihe bestand aus sieben Meßpunkten. Begonnen wurde die Meßreihe ohne Folie zwischen LED und PM, bei diesem Meßpunkt wurde die höchste Abschwächung ( $U_0/U_{ADC} \approx 36 \text{ dB}$ ) eingesetzt. Dann wurde ein 3 dB-Dämpfungsglied zwischen Pulsgeneratorausgang und LED geschaltet und die Messung wiederholt. Darauf folgend wurde eine Pedestalmessung durchgeführt. Für jede Teilmessung wurden 1500 Ereignisse aufgenommen. Nun folgte der zweite Meßpunkt mit einer Lage Folie zwischen LED und PM und einer Abschwächung von 30 dB. Vor jeder Meßreihe mußte nach dem Einschalten des Magneten zwei Stunden gewartet werden, bis sich die Temperatur in der Testbox stabilisiert hatte.

<sup>23</sup>Du Pont Allzweck-Polyimidfolie KAPTON (Folientyp H).

### 3.2.7 Untersuchungen hinsichtlich von Alterungseffekten und der zu erwartenden Lebensdauer

Bei diesen Untersuchungen wurde ein völlig anderer Meßaufbau verwendet. In Abbildung 3.14 ist eine Skizze des mechanischen Meßaufbaus dargestellt.

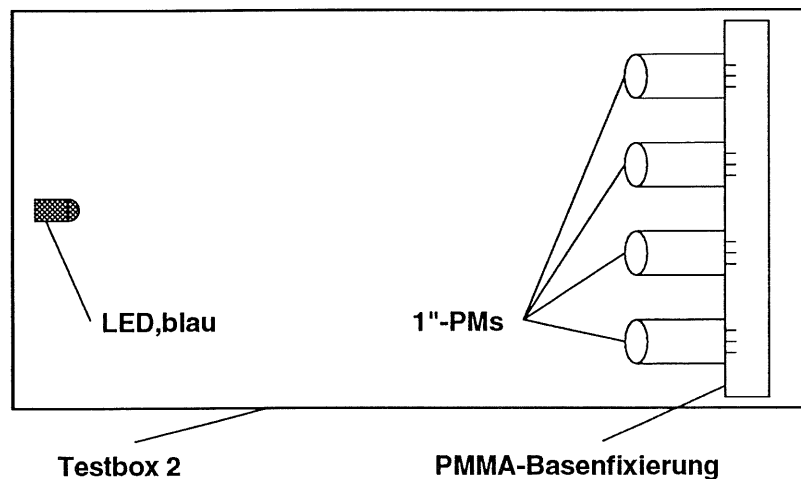


Abbildung 3.14: mechanischer Aufbau des Alterungstests

Bei der Testbox 2 handelt es sich um einen lichtdichten, aus Aluminiumwänden bestehenden Kasten, der folgende Außenmaße hat ( $H, B, T$ ):  $109 \text{ mm} \times 421 \text{ mm} \times 145 \text{ mm}$ . Es waren zwölf Basen für 1'' - PMs in eine PMMA-Halterung eingepaßt. In 300 mm Entfernung war eine blaue LED<sup>24</sup> positioniert, die in Richtung der PMs strahlte. Sie konnte in diesem Test verwendet werden, weil sie nur hier eine ausreichende Lichtintensität lieferte, und ihr Emissionsspektrum dem Spektrum des im Kalorimeter entstehenden Szintillationslichtes besser entsprach. Der Test wurde nicht im Magnetfeld durchgeführt. Er dauerte etwa 255 Stunden an. Die Umgebungstemperatur betrug  $T = (21 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Die LED wurde mit einem Gleichstrom von  $U_{DC} \approx 0.14 \text{ mA}$  gespeist. Alle Strommessungen wurden mit einem Elektrometer<sup>25</sup> gemacht. Die Versorgungsspannungen der PMs wurden im Bereich von 1800... 2300 V derart eingestellt, daß zu Beginn ein Anodenstrom von  $I_A \approx 30 \mu\text{A}$  gemessen wurde. Die Anoden waren während des Tests mit  $50 \Omega$  abgeschlossen.

Die Stabilität der LED wurde mit Hilfe eines PM folgendermaßen überprüft: Seine Versorgungsspannung wurde zu Beginn und bei allen weiteren Messungen auf 2000 V eingestellt. Der gemessene Strom bei der ersten Messung diente für alle späteren Meßwerte als Normierungswert. Während der langen Zeit, die zwischen

<sup>24</sup>Kinglight L-53 BC; 5 mm, klar,  $\lambda_{max} \approx 470 \text{ nm}$  und  $\Delta\lambda \approx 65 \text{ nm}$  [Jan93]

<sup>25</sup>Keithley 610 C, technische Daten im Anhang D

den kurzen Messungen verstrich, wurde seine Versorgungsspannung auf 1500 V gedrosselt, weil bei ihm ein Alterungseffekt vermieden werden sollte.

### 3.3 Das Meßprogramm

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über alle durchgeführten Messungen.

	<i>Lichtquelle</i>	<i>Magnetfeld</i> [Tesla]	<i>Spannung</i> [Volt]	<i>Anzahl</i>
Stabilitätstest 1"- PM	LED,grün	0	2000	29
Spannungstest 1"- PM 2"- PM	LED,grün	0 0	1000... 2500 1400... 2700 (in 100 V-Schritten)	48 7
Magnetfeldtest 1"- PM 2"- PM	LED,grün	0... 1.2 0... 1.2 (in 0.2 T-Schritten)	2000 2500	50 7
Kathodenscans 1"- PM 2"- PM	LED,grün	0 , 1.2 0 , 1.2	2000 2500	52 7
Temperaturtest 1"- PM	LED,grün	0	2000	5
Linearitätstest 1"- PM 2"- PM	LED,grün	1.2 1.2	2500 2600	5 3
Alterungstest 1"- PM	LED,blau	0	1800... 2300	11

Tabelle 3.1: Das Meßprogramm

# Kapitel 4

## Ergebnisse

In diesem Kapitel werden nacheinander die Ergebnisse der Meßreihen vorgestellt. Der Leser erfährt die wichtigsten Hintergrundinformationen, mit denen aus den Rohdaten die Ergebnisse abgeleitet wurden. Zu Beginn eines jeden Typs von Messungen wurden mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt, um systematische und statistische Fehler beziffern zu können. Es wird, wo es nötig erscheint, ein Bezug zu früheren Veröffentlichungen hergestellt und anschließend diskutiert. Einige Tabellen und Diagramme der einzelnen Meßergebnisse werden aus formalen Gründen im Anhang E aufgeführt.

Zu Beginn der Analyse eines jeden Impulshöhenspektrums wurde eine Anpassung (Fit) an das Spektrum mit einer Gaußfunktion vorgenommen. Das Fehlermaß des  $\chi^2$ -Tests gab über Schwankungen während der Messungen Auskunft, die nicht auf Verstärkungsschwankungen des PM gemäß der Poissonstatistik zurückzuführen waren. Die Verteilungen wurden durch den Mittelwert ( $A$ ) und die Standardabweichung ( $\sigma_A$ ) charakterisiert.

### 4.1 Der Langzeitstabilitätstest

Es wurden neunundzwanzig 1"-PMs untersucht. Beim ersten Anlegen der Versorgungsspannung nach der Lieferung wurde häufig eine Instabilität des PM-Ausgangssignales und des Dunkelstromes beobachtet. Bei den meisten Röhren hat sich nach 30 Minuten das Verhalten stabilisiert. Manche Röhren waren erst nach 12 Stunden stabil.

Bei wiederholtem Anlegen der Versorgungsspannung wurde während der ersten fünf Minuten ein Anstieg der Verstärkung um ca. 5% verzeichnet. Danach waren die Verstärkungen aller PMs über eine Zeitdauer von bis zu 72 Stunden im Rahmen der Poissonstatistik stabil. Der Fehler, der aus den statistischen Schwankungen resultiert, beträgt für eine Stichprobe von  $N = 1500$  Events:  $\sigma_A/\sqrt{N} \leq 0.1\%$ .



## 4.2 Der Versorgungsspannungstest

Diese Tests wurden durchgeführt, um einen Eindruck von dem Verstärkungsintervall der PMs für das entsprechende Versorgungsspannungsintervall zu bekommen.

### 4.2.1 Die 1'' - Photomultiplier

Es wurden achtundvierzig 1''-PMs ohne umgebendes Magnetfeld getestet. In Abbildung 4.1 ist das Ergebnis, welches als typisch angesehen werden kann, einer Meßreihe von insgesamt 16 Meßreihen dargestellt. Es zeigt die Stromverstärkung von 5 Röhren im Versorgungsspannungsbereich von 1000...2500 V.

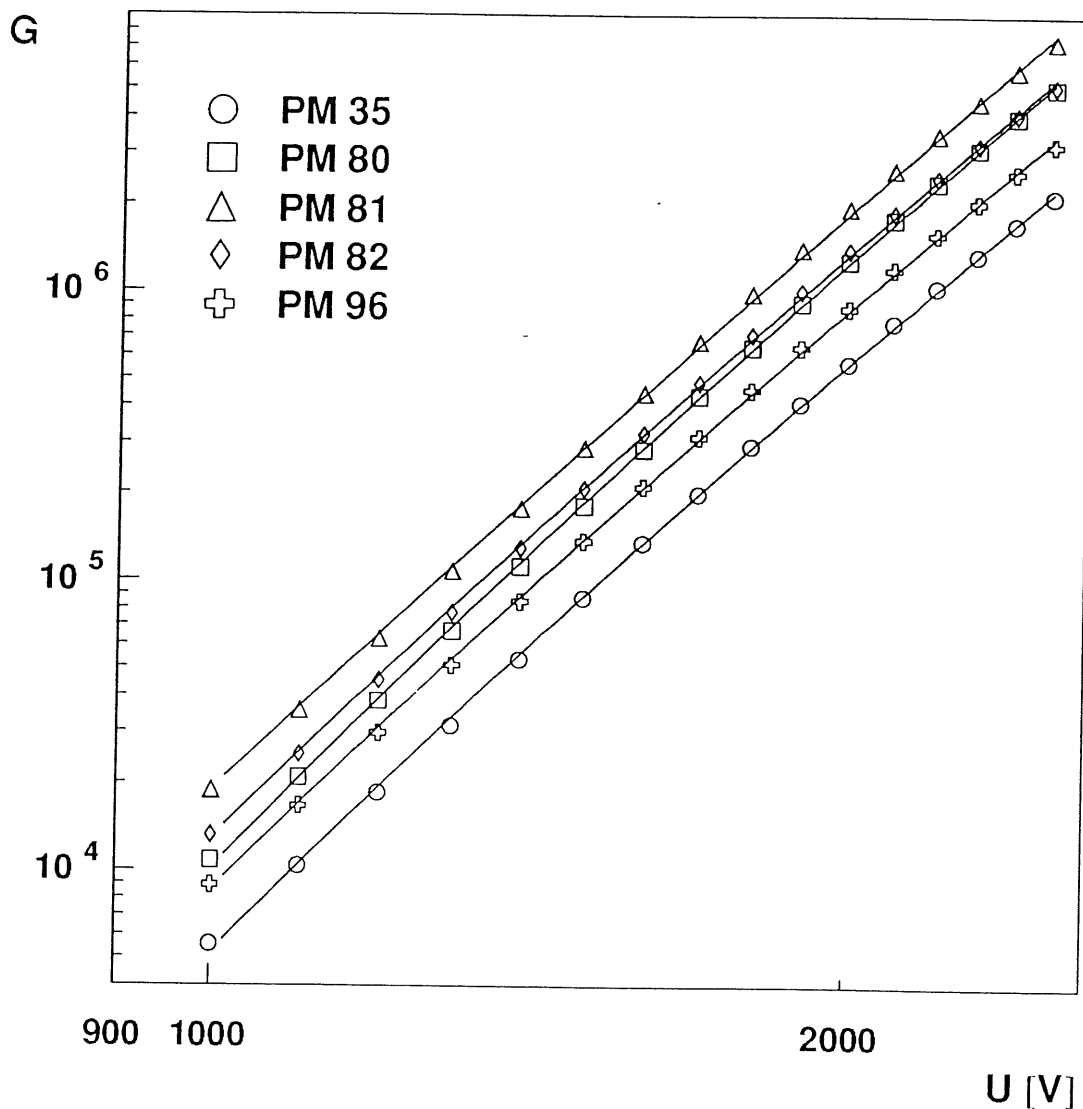


Abbildung 4.1: Die absolute Verstärkung  $G$  von fünf 1''-PMs bei  $B = 0$  T aufgetragen gegen die Versorgungsspannung  $U$

Sowohl die Ordinaten- als auch die Abszissenwerte wurden logarithmisch aufgetragen. Die Graphen erscheinen als linear ansteigende Geraden, wobei die Verstärkung bei 2500 V etwa um den Faktor 350 höher ist, als bei 1000 V. Die Ordinatenwerte wurden aus den ADC-Mittelwerten<sup>1</sup> des Pedestals ( $P$ ), der Teströhre ( $T$ ) und der Referenzröhre ( $R$ ) sowie aus den Werten der Datenblätter für die Anodensensitivität ( $SA_v$ ) und die Kathodensensitivität ( $SK_v$ ) folgendermaßen berechnet:

$$G_{B=0T, U=2000V} = \frac{SA_v}{SK_v} = \kappa \cdot \left( \frac{T_{2000} - P_{2000}}{R_{2000} - P_{2000}} \right)$$

$\kappa$  ist ein Skalierungsfaktor, mit dessen Hilfe die Verstärkung für alle anderen Spannungswerte ( $U \neq 2000$  V) ermittelt wurden. Die relativen Fehler werden kleiner als 2% geschätzt, — vorausgesetzt die Daten von Hamamatsu haben kleinere Fehler als 1.5%. Die Verstärkung der PMs steigt im Bereich 2000...2500 V etwa um den Faktor 3.7 und im Bereich 1800...2400 V etwa um den Faktor 6 an. Im letztgenannten Spannungsintervall wurde an die 7 Meßpunkte eine Funktion gefittet, um die Verstärkung zwischen den Meßpunkten berechnen zu können. Folgende Funktion erwies sich als geeignet:

$$G(U[V]) = \left( \frac{U[V] + P_1}{P_2} \right)^{P_3}$$

Es ergaben sich die folgende Mittelwerte, wobei die Fehler den RMS der Verteilung für 48 Röhren darstellen. Die Fitparameter der einzelnen PMs sind im Anhang E aufgeführt.

$$P_1 = (1356 \pm 110) \text{ V}$$

$$P_2 = (848 \pm 25) \text{ V}$$

$$P_3 = (10.01 \pm 0.15)$$

### 4.2.2 Die 2'' - Photomultiplier

Es wurden sieben 2''-PMs ohne umgebendes Magnetfeld getestet. In Abbildung 4.2 ist das Ergebnis von 7 Meßreihen dargestellt. Es zeigt die Stromverstärkung von 7 Röhren im Versorgungsspannungsbereich 1400...2700 V. Sowohl die Ordinaten- als auch die Abszissenwerte wurden logarithmisch aufgetragen. Die Graphen erscheinen als linear ansteigende Geraden, wobei die Verstärkung bei 2700 V etwa um den Faktor 82 höher ist, als bei 1400 V. Die Ordinatenwerte wurden wie in Kapitel 4.2.1 berechnet, und für die Fehler gilt die gleiche Abschätzung wie zuvor. Die Verstärkung im Bereich 2000...2500 V steigt etwa den Faktor 4.2 an. Die Verstärkung im Bereich 2000...2700 V steigt etwa den Faktor 6.8 an. Im letztgenannten Spannungsintervall wurde an die 8 Meßpunkte die gleiche Funktion, wie zuvor in Kapitel 4.2.1 vorgestellt, gefittet.

<sup>1</sup>gemessen bei  $U = 2000$  V

Für 7 Röhren ergaben sich folgende Werte:

$$P_1 = (411.5 \pm 45.3) \text{ V}$$

$$P_2 = (319.2 \pm 5.9) \text{ V}$$

$$P_3 = (7.488 \pm 0.105)$$

Die Fitparameter der einzelnen PMs sind im Anhang E aufgeführt. Vergleicht man die Faktoren des Verstärkungsanstiegs der 1''- und der 2''-PMs im Bereich 2000...2500 V, so zeigt sich, daß beim 2''-PM der Verstärkungsanstieg in diesem Spannungsbereich höher ist, als beim 1''-PM.

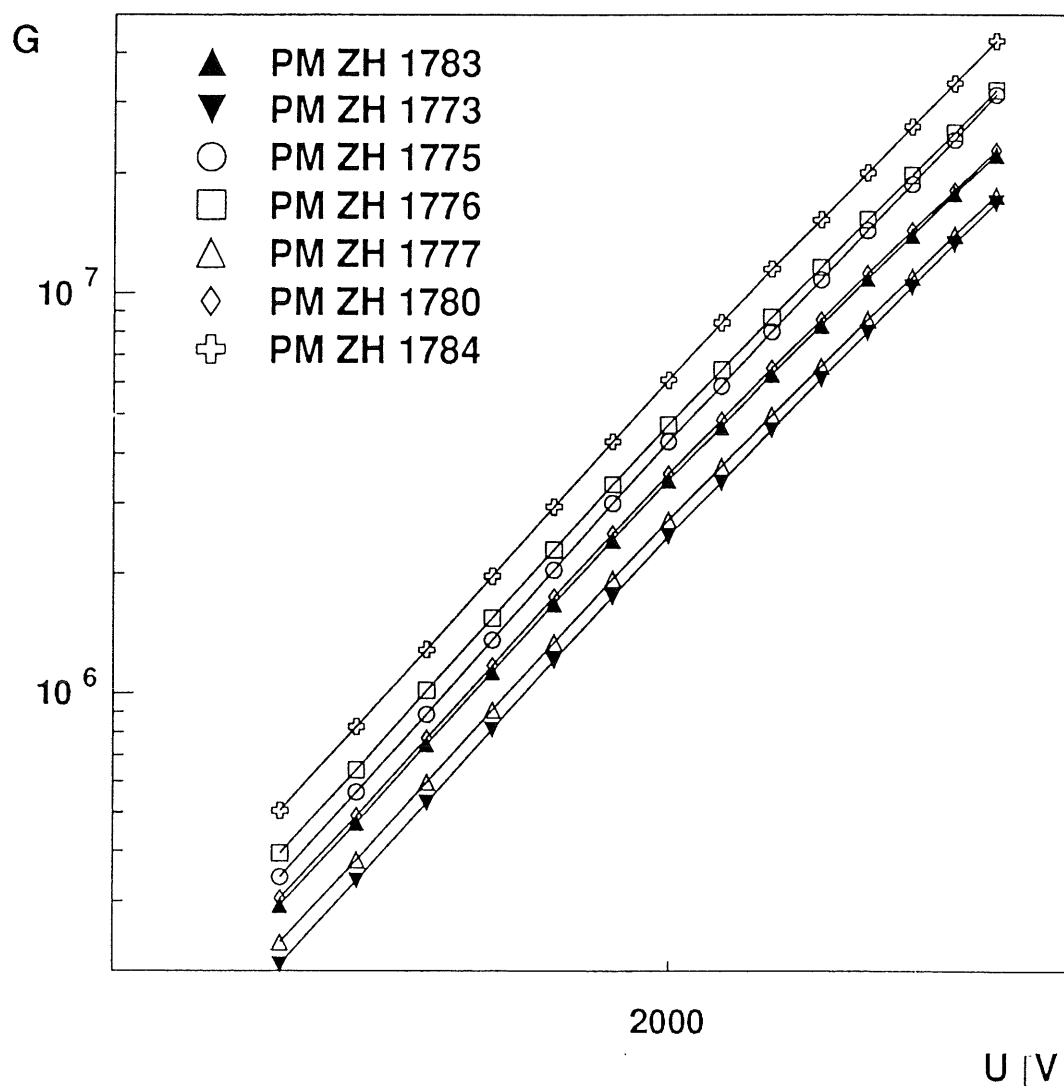


Abbildung 4.2: Die absolute Verstärkung  $G$  von sieben 2''-PMs bei  $B = 0 \text{ T}$  aufgetragen gegen die Versorgungsspannung  $U$

### 4.3 Der Magnetfeldtest

Da das Spaghetti-Kalorimeter später in einem Magnetfeld von 1.2 T arbeiten soll, wurden die Messungen bis 1.2 T durchgeführt. Die den elektromagnetischen Teil auslesenden 1"-PMs müssen bei dieser Feldstärke mindestens eine Verstärkung von  $1 \times 10^4$  haben. Die 2"-PMs im hadronischen Teil müssen bei dieser Feldstärke mindestens eine Verstärkung von  $2 \times 10^4$  aufweisen [H1 93].

#### 4.3.1 Die 1" - Photomultiplier

Es wurden fünfzig 1"-PMs bei einer Versorgungsspannung von 2000 V untersucht. In Abbildung 4.3 ist das Ergebnis, welches als typisch angesehen werden kann, einer Meßreihe von insgesamt 21 Meßreihen dargestellt.

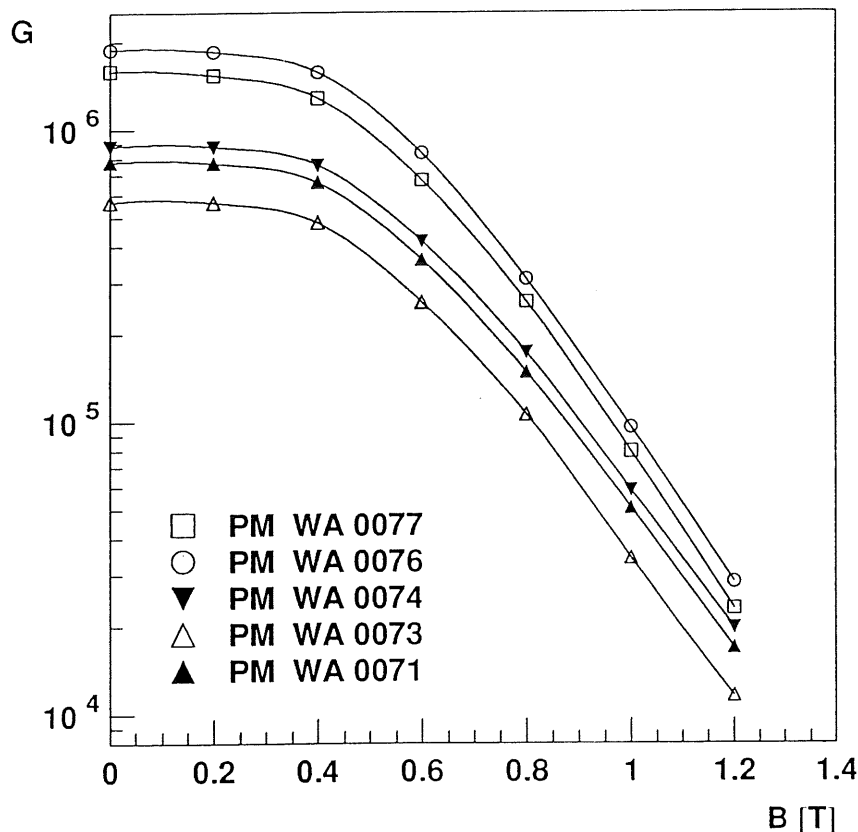


Abbildung 4.3: Die absolute Verstärkung  $G$  von fünf 1"-PMs bei  $U = 2000$  V aufgetragen gegen die Magnetfeldstärke  $B$

Bis zu etwa 0.3 T ist die Verstärkung nahezu stabil, und ab etwa 0.5 T fällt sie exponentiell ab. Die logarithmisch aufgetragenen Ordinatenwerte wurden aus den Mittelwerten der ADC-Spektren, ganz ähnlich wie in Kapitel 4.2.1 vorgestellt, berechnet:

$$G_{B=0T} = \frac{SA_v}{SK_v} = \kappa \cdot \left( \frac{T_0 - P_0}{R_0 - P_0} \right)$$

$\kappa$  ist wieder ein Skalierungsfaktor. Er wurde verwendet, um die Verstärkung bei Magnetfeldstärken mit  $B \neq 0$  zu berechnen. Die Fehler der Messungen werden wieder kleiner als 2% geschätzt.

Um das Verhalten der PMs zu parametrisieren, wurde an die sieben Meßwerte folgende dreiparametrische Funktion gefittet:

$$G(B \text{ [T]}) = \frac{P_1}{1 + \exp \frac{B[T] - P_2}{P_3}}$$

Parameter 1 gibt die Verstärkung bei  $B = 0$  T an. Parameter 2 gibt die Magnetfeldstärke an, bei der die Verstärkung auf die Hälfte abgesunken ist. Parameter 3 gibt Auskunft über die Steigung der Funktion. Für 50 Röhren ergaben sich folgende Werte:

$$P_1 = (1.118 \pm 0.367) \times 10^6$$

$$P_2 = (0.5144 \pm 0.0460) \text{ T}$$

$$P_3 = (0.1695 \pm 0.0110) \text{ T}$$

Die Fitparameter der einzelnen PMs sind im Anhang E aufgeführt.

Von 50 getesteten Röhren wiesen bei  $B = 1.2$  T drei eine Verstärkung von weniger als  $1 \times 10^4$  auf. Die mittlere Verstärkung bei dieser Magnetfeldstärke beträgt

$$G = (2.082 \pm 0.820) \times 10^4$$

Abbildung 4.4 zeigt die Verteilung der Verstärkungsverlustfaktoren  $G_0/G_{1.2}$  von 50 Röhren. Der Mittelwert beträgt  $G_0/G_{1.2} = 50.26$  und die Streuung beträgt  $\sigma = 8.87$ . Die Werte der einzelnen PMs sind im Anhang E aufgeführt.

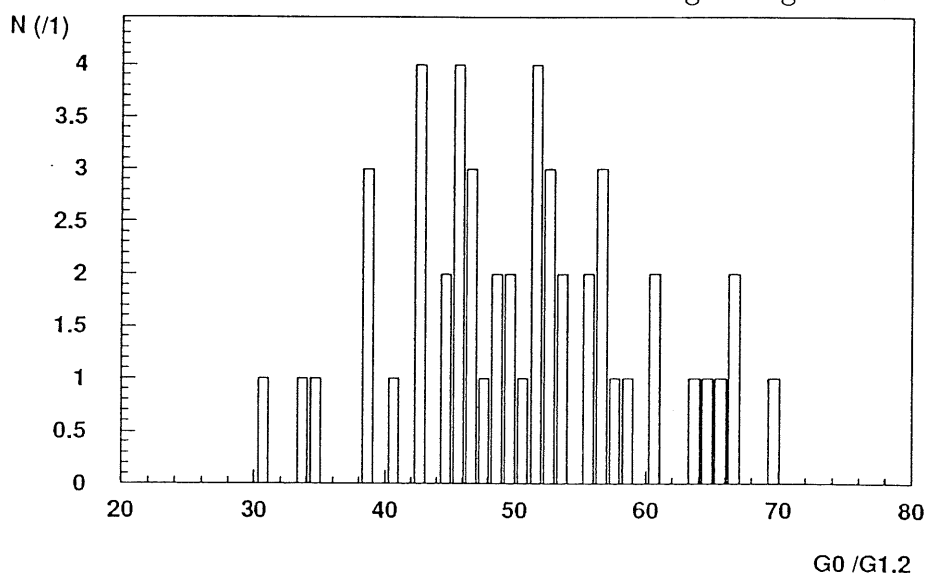


Abbildung 4.4: Histogramm der Verstärkungsverlustfaktoren

### 4.3.2 Die 2'' - Photomultiplier

Es wurden sieben 2''-PMs bei einer Versorgungsspannung von 2500 V getestet. In Abbildung 4.5 ist das Ergebnis von 7 Meßreihen dargestellt. Es zeigt die Stromverstärkung von 7 Röhren im Bereich von 0...1.2 T.

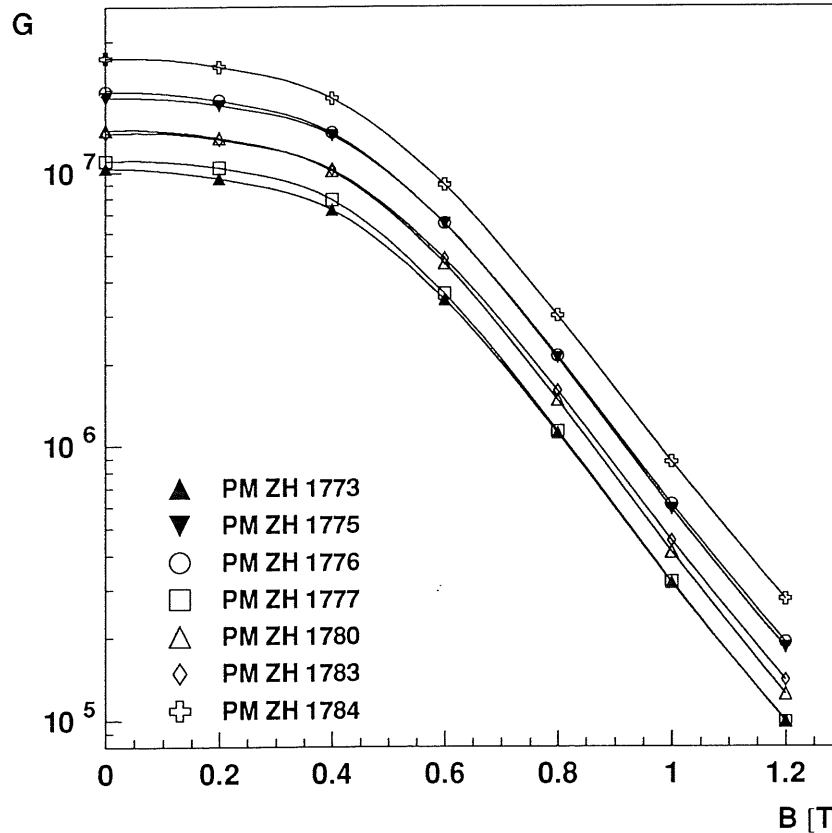


Abbildung 4.5: Die absolute Verstärkung  $G$  von sieben 2''-PMs bei  $U = 2500$  V aufgetragen gegen die Magnetfeldstärke  $B$

Bis zu einer Feldstärke von 0,2 T ist die Verstärkung nahezu konstant, und ab 0,45 T fällt sie exponentiell ab. Die logarithmisch aufgetragenen Ordinatenwerte wurden wie zuvor berechnet, und für die Fehler gilt die gleiche Abschätzung wie bei den 1''-PMs. Es wurde die gleiche Funktion, wie in Kapitel 4.3.1 vorgestellt, an die 7 Meßwerte gefittet, und es ergaben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= (17.79 \pm 6.07) \times 10^6 \\
 P_2 &= (0.4712 \pm 5.4 \times 10^{-3}) \text{ T} \\
 P_3 &= (0.1520 \pm 1.6 \times 10^{-3}) \text{ T}
 \end{aligned}$$

Die Fitparameter der einzelnen PMs sind im Anhang E aufgeführt.

Die mittlere Verstärkung bei 1,2 T beträgt  $G = (15.18 \pm 5.67) \times 10^4$ . Der Verstärkungsverlustfaktor für die 7 Röhren von  $B = 0$  nach  $B = 1.2$  T beträgt

$G_0/G_{1.2} = (107.8 \pm 7.1)$ . Die Werte der einzelnen Röhren sind im Anhang E aufgeführt.

Alle getesteten Röhren übertrafen bei weitem die geforderte Mindestverstärkung bei  $B = 1.2\text{ T}$  von  $2 \times 10^4$ . Ein Vergleich mit den 1"-PMs zeigt, daß der Verstärkungsverlustfaktor bei  $1.2\text{ T}$  um mehr als das doppelte höher ist. Vergleicht man die Werte des Parameters 2 bei der Fitfunktion, so geht die Verstärkung der 1"-PMs bei  $0.514\text{ T}$  und bei den 2"-PMs bereits bei  $0.471\text{ T}$  auf die Hälfte zurück.

## 4.4 Die Kathodenabtastungen

In dem Entwurf des Spaghetti-Kalorimeters ist es vorgesehen, zwischen den Szintillationsfasern und den Photomultipliern Lichtmischer einzubauen. Da die Fluktuationen, bedingt durch die verschiedenen Einstrahlorte der Fasern in den Lichtmischer, nicht mehr als 0.5 % betragen sollen, muß die Länge des Lichtmischers an die Sensitivitätshomogenität der Photokathoden angepaßt sein. Ebenso muß die Querschnittsfläche des Lichtmischers an den mittleren Durchmesser der Photokathode angepaßt sein [H1 93].

### 4.4.1 Die 1" - Photomultiplier

Es wurden zweiundfünfzig 1"-PMs mit einer Versorgungsspannung von  $2000\text{ V}$  bei  $B = 0\text{ T}$  und bei  $B = 1.2\text{ T}$  getestet. In Abbildung 4.6 ist ein Ergebnis, welches als typisch angesehen werden kann, für einen PM dargestellt. Bei vielen Wiederholungsmessungen gab es 5 PMs pro Meßreihe und insgesamt  $2 \times 15$  Meßreihen. In diesem Diagramm ist der normierte ADC-Mittelwert gegen den Kathodeneinstrahlort aufgetragen. Die Meßpunkte sind mit einer Linie verbunden worden. Die Diagramme aller anderen PMs sind im Anhang E aufgeführt.

Die je 11 Meßpunkte wurden entlang zweier orthogonaler Linien, wie in Kapitel 3.2.3 Abbildung 3.9 dargestellt, aufgenommen. Die Ordinatenwerte ( $A$ ) wurden aus den Mittelwerten der ADC-Spektren der Teströhre ( $T$ ), der Referenzröhre ( $R$ ) und des Pedestals ( $P$ ) folgendermaßen berechnet:

$$A_j = \frac{T_j - P_j}{R_j - P_j} \quad \text{mit} \quad \bar{T} = \frac{\sum_i T_i - P_i}{9}; \quad j \in [-9, -8, \dots, 8, 9], \quad i \in [-8, -6, \dots, 6, 8]$$

$j$  charakterisiert die einzelnen Meßpunkte. Bei der Mittelwertbildung (Mittelwert  $\bar{T}$ ) wurden die äußeren Meßpunkte (-9, 9) nicht berücksichtigt.

Die Kurven zeigen an den Rändern ab Abtastpunkt  $\pm 8$  einen deutlichen Abfall, obwohl die Photokathode einen Durchmesser von  $17.5\text{ mm}$  hat. Die horizontale Linie im Diagramm ist bei 70.8 % des Mittelwertes, also bei -3 dB, eingezeichnet und definiert den nutzbaren Durchmesser längs der Abtastlinie. Der mittlere Durchmesser wurde dann aus den Werten der beiden orthogonalen Abtastlinien jeweils für  $B = 0\text{ T}$  und für  $B = 1.2\text{ T}$  ermittelt.

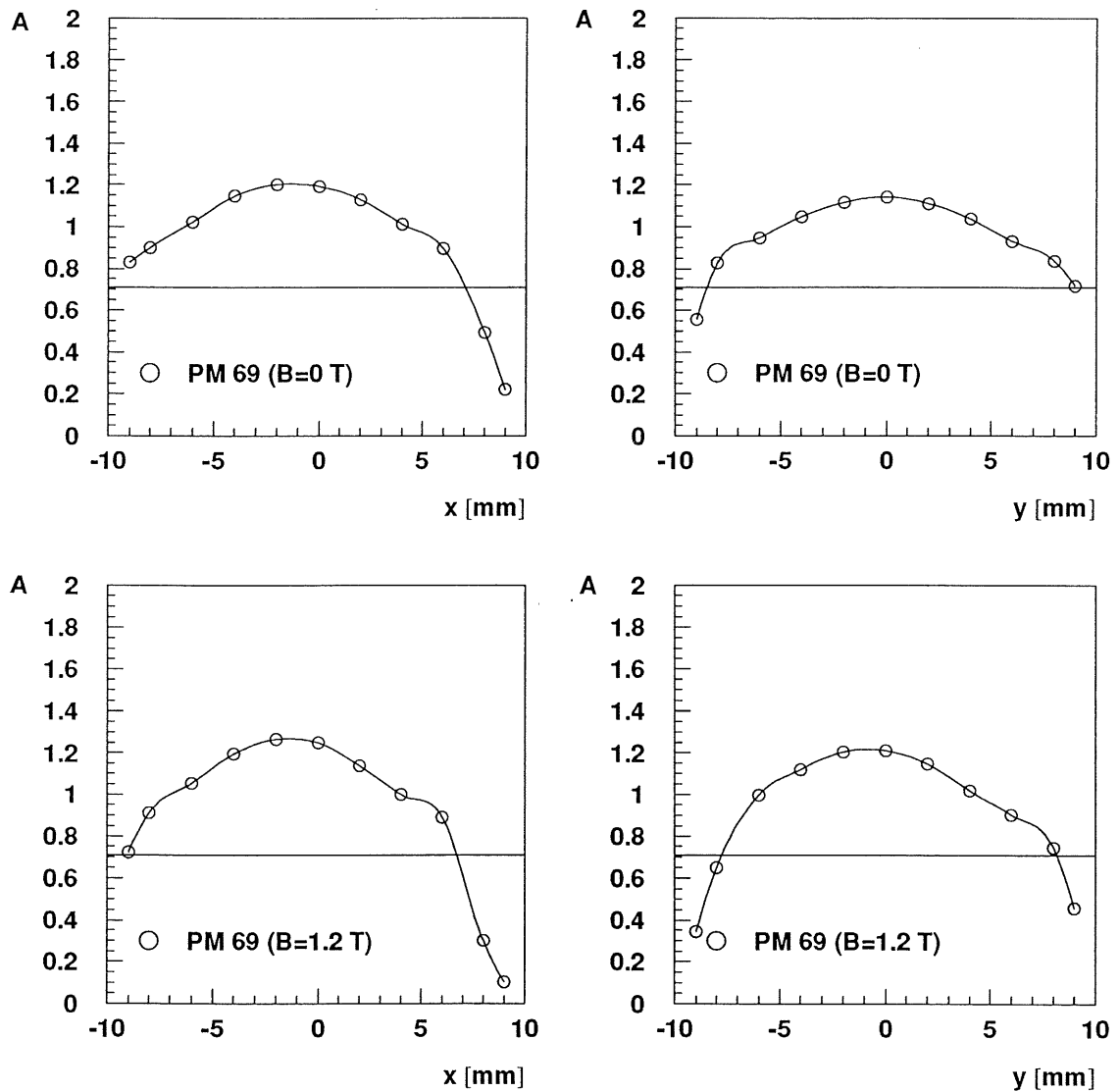


Abbildung 4.6: Normiertes Signal des PM WA-0069 bei  $B = 0\text{ T}$  und  $B = 1.2\text{ T}$  aufgetragen gegen den Kathodeneinstrahlort entlang der X- und der Y-Achse

Für 52 Röhren ergaben sich folgende mittlere Durchmesser:

$$\begin{aligned}
 B = 0.0\text{ T} : \quad \overline{D_0} &= (15.57 \pm 0.80)\text{ mm} \\
 B = 1.2\text{ T} : \quad \overline{D_B} &= (15.21 \pm 0.76)\text{ mm}
 \end{aligned}$$

Der mittlere Durchmesser sinkt im Magnetfeld also um 2.31 % ab. Bei 0 T wiesen 5 PMs und bei 1.2 T wiesen 13 Röhren einen mittleren Durchmesser von weniger als 15 mm auf. Die Werte der einzelnen Röhren sind im Anhang E aufgeführt.

In Abbildung 4.7 sind die Histogramme der mittleren Inhomogenitätswerte für  $B = 0\text{ T}$  und  $B = 1.2\text{ T}$  dargestellt.

Die Sensitivitätsinhomogenität der PMs entlang einer Abtastlinie wurde wie



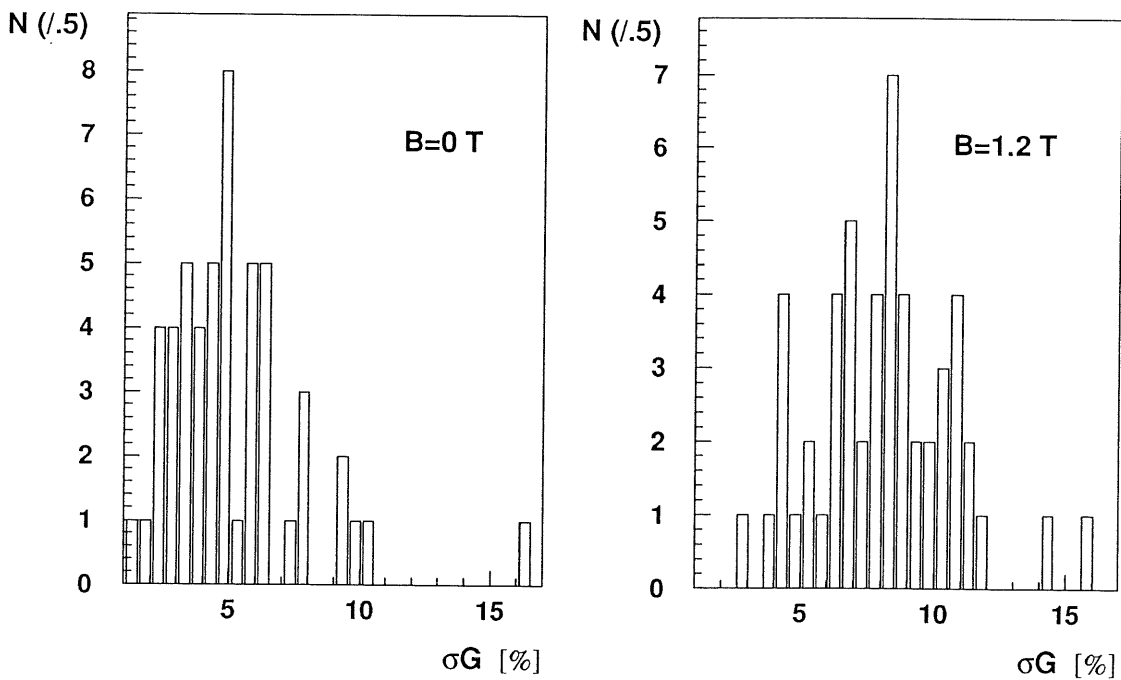


Abbildung 4.7: Histogramme der mittleren Inhomogenitäten der 1''-PMs

ein RMS folgendermaßen berechnet:

$$\sigma G = \sqrt{\frac{\sum_i \left( \frac{T_i - P_i}{R_i - P_i} - \bar{T} \right)^2}{9 - 1}} ; \quad i \in [-8, -6, \dots, 6, 8]$$

$i$  charakterisiert die Meßpunkte, die bei der Berechnung der Inhomogenität berücksichtigt wurden. Die mittlere Inhomogenität war dann als der Mittelwert aus den Werten der beiden Abtastlinien definiert. Für 52 Röhren ergaben sich folgende Inhomogenitätswerte:

$$\begin{aligned} B = 0.0 \text{ T} : \quad \sigma G_0 &= (5.077 \pm 2.598) \% \\ B = 1.2 \text{ T} : \quad \sigma G_B &= (8.029 \pm 2.578) \% \end{aligned}$$

Es fällt auf, daß die Inhomogenität im Magnetfeld deutlich ansteigt. Die mittleren Inhomogenitätswerte der einzelnen PMs sind im Anhang E aufgeführt.

#### 4.4.2 Die 2'' - Photomultiplier

Es wurden sieben 2''-PMs mit und ohne Magnetfeld von 1.2 T bei einer Versorgungsspannung von 2500 V getestet. In Abbildung 4.8 ist das Ergebnis für eine Röhre dargestellt, deren Parameter den Parametermittelwerten aller PMs am nächsten sind. In diesen Diagrammen ist der normierte ADC-Mittelwert gegen den Kathodeneinstrahlort aufgetragen, die Meßpunkte sind mit einer Linie verbunden worden. Die Diagramme aller anderen PMs sind im Anhang E aufgeführt.

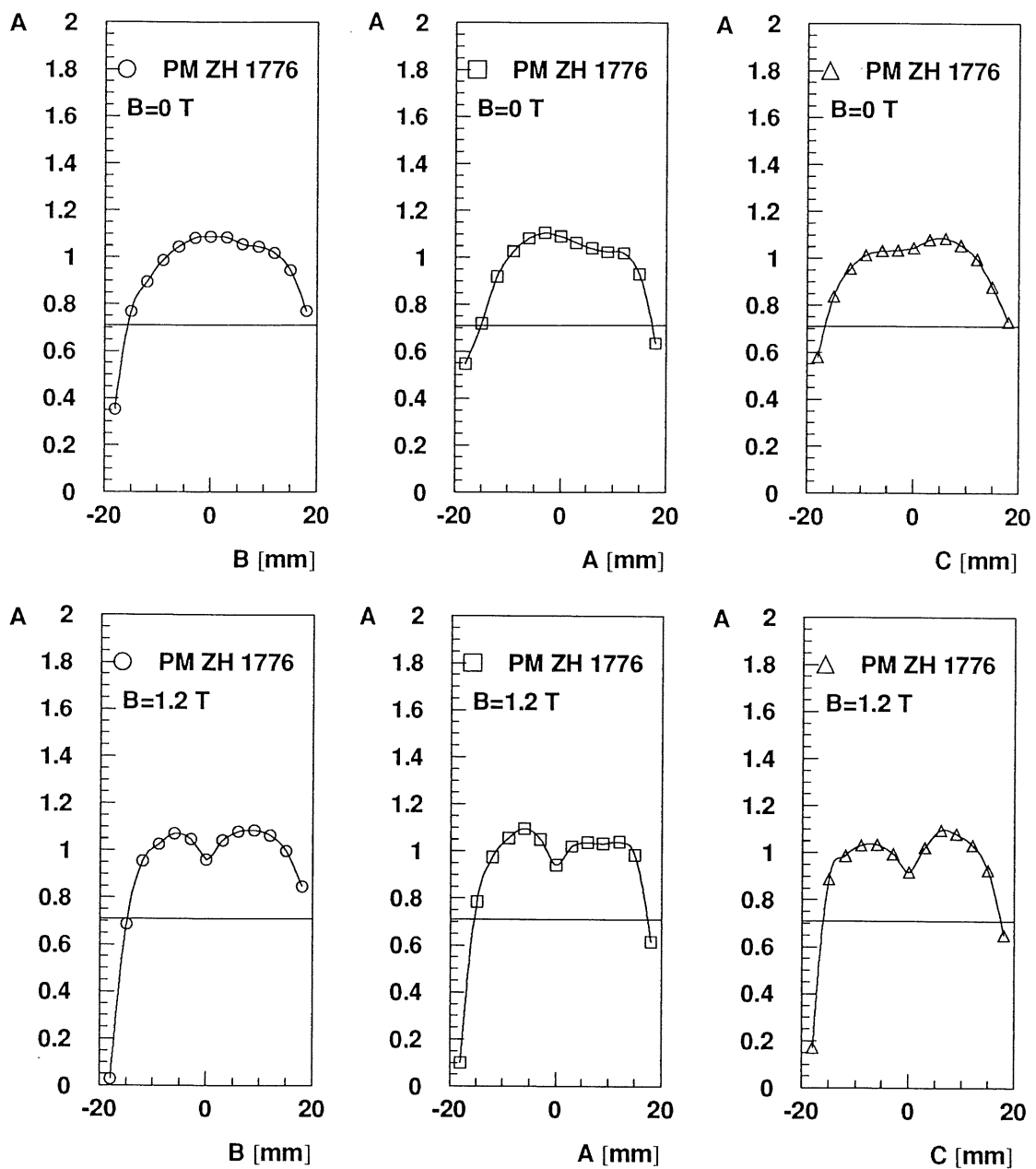


Abbildung 4.8: Normierte Signalamplitude des PM ZH-1776 bei  $B = 0 \text{ T}$  und  $B = 1.2 \text{ T}$  aufgetragen gegen den Kathodeneinstrahlort entlang dreier Achsen

Die je 13 Meßpunkte wurden entlang dreier Linien, wie in Kapitel 3.2.3 Abbildung 3.9 dargestellt, aufgenommen. Die Ordinatenwerte wurden ähnlich wie im Kapitel 4.2.1 bestimmt, wobei wieder die äußersten Meßpunkte, hier 18 mm und -18 mm, bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt wurden.

Die Kurve zeigt einen Verlauf, der auch bei einigen 1"-PMs beobachtet wurde, nämlich daß die Verstärkung bei Illumination des Kathodenzentrums im Magnetfeld deutlich absinkt. Die horizontale Linie, bei 70.8% des Mittelwertes gelegen,

definiert wieder den nutzbaren Durchmesser längs der Abtastlinie. Der mittlere Durchmesser war dann der Mittelwert der drei nutzbaren Durchmesser. Für 7 Röhren ergaben sich folgende Werte des mittleren Durchmessers:

$$\begin{aligned} B = 0.0 \text{ T} : \quad \overline{D}_0 &= (32.54 \pm 2.86) \text{ mm} \\ B = 1.2 \text{ T} : \quad \overline{D}_B &= (32.30 \pm 2.13) \text{ mm} \end{aligned}$$

Im Vergleich zu den 1"-PMs fällt der mittlere Durchmesser für  $B = 0 \text{ T}$  nach  $B = 1.2 \text{ T}$  nicht so deutlich ab. Die Werte der einzelnen Röhren sind im Anhang E aufgeführt.

Die mittleren Inhomogenitätswerte der 2"-PMs wurden entsprechend der Werte für die 1"-PMs bestimmt. Für 7 Röhren ergaben sich folgende Werte der mittleren Inhomogenität:

$$\begin{aligned} B = 0.0 \text{ T} : \quad \sigma G_0 &= (6.122 \pm 1.662) \% \\ B = 1.2 \text{ T} : \quad \sigma G_B &= (5.703 \pm 2.524) \% \end{aligned}$$

Die mittlere Inhomogenität der 2"-PMs sinkt im Magnetfeld leicht ab, wobei jedoch das Resultat sich noch deutlich verändern könnte, wenn man eine größere Anzahl an Röhren testen würde. Die mittleren Inhomogenitätswerte der einzelnen Röhren sind im Anhang E aufgeführt.

## 4.5 Die Untersuchungen bzgl. der Linearität

Eine fundamentale Voraussetzung bei der Auswertung von durch Kalorimetern gewonnenen Daten ist, daß bei den Photomultipliern die Ladungsmenge des Ausgangssignales proportional zu der auf die Photokathode gefallene Photonenanzahl eines bestimmten Wellenlängenspektrums ist. Die Proportionalität muß über den gesamten Meßbereich des Kalorimeters im Rahmen der Meßauflösung, für das geplante Spaghetti-Kalorimeter soll die Meßauflösung 1% betragen [H1 93], erfüllt sein.

Für den elektromagnetischen Teil des Kalorimeters, den die 1"-PMs auslesen werden, ergaben erste Messungen an Testmodulen eine Rate von 2.8 Photoelektronen pro MeV deponierter Energie. Eine Abschätzung zeigt, daß bei einer Maximalenergie von  $E_{max} \approx 30 \text{ GeV}$  und einer Stromverstärkung von  $G \approx 2 \times 10^4$  das PM-Ausgangssignal bis zu einer Ladungsmenge von  $Q_p \approx 270 \text{ pC}$  linear sein muß. Wenn man eine Pulsdauer von  $t_p \approx 10 \text{ ns}$  annimmt, so wird ein Maximalstrom von  $I_{max} \approx 26.9 \text{ mA}$  erreicht.

### 4.5.1 Die 2" - Photomultiplier

Es wurden insgesamt drei 2"-PMs bei einer Versorgungsspannung von 2600 V im Magnetfeld von  $B = 1.2 \text{ T}$  getestet. In Abbildung 4.9 ist das Ergebnis für eine

Meßreihe von insgesamt 12 Meßreihen dargestellt. Längs der Ordinate ist das normierte Pulshöhenverhältnis  $R_i/\bar{R}$  aufgetragen. Längs der Abszisse ist der Anodenspitzenstrom des hohen Pulses logarithmisch aufgetragen. Seine Spitzenspannung wurde nach jedem Meßpunkt mit einem Oszilloskop gegen  $50\ \Omega$  gemessen.

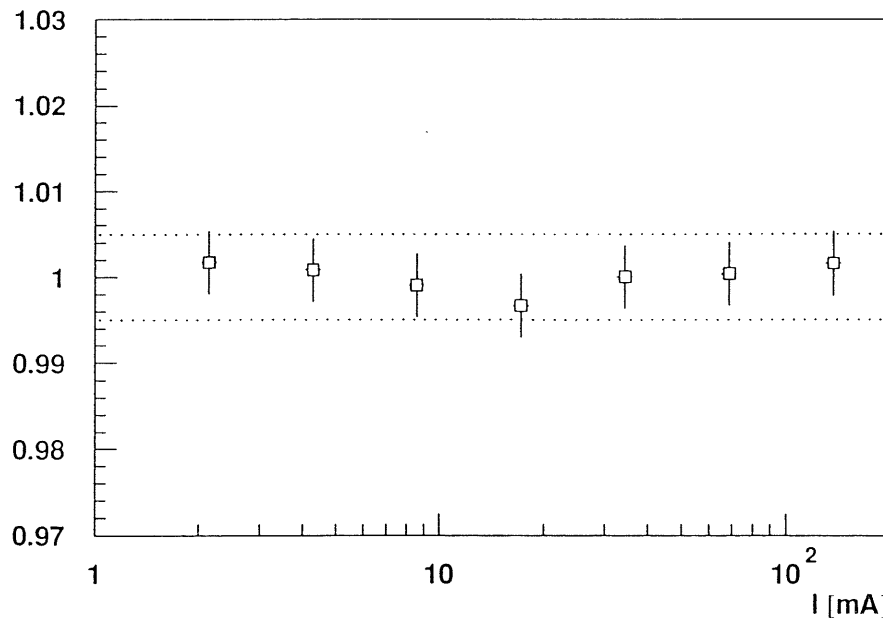


Abbildung 4.9: Normiertes Pulshöhenverhältnis ( $R_i/\bar{R}$ ) aufgetragen gegen den Anodenspitzenstrom ( $I$ ) des hohen Pulses für den PM ZH-1777. Die Punktlinien entsprechen  $\pm 0.5\%$ .

Die 7 Meßpunkte wurden, wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben, nacheinander aufgenommen, die Fehler der Ordinatenwerte werden auf  $\sigma \leq 0.5\%$  geschätzt. Diese Schätzung beruht einzig auf der Reproduzierbarkeit der Meßwerte. Die Fehler der Messungen mit dem Oszilloskop sind kleiner als  $2\%$ .

Die Linearität ( $\sigma R$ ) wurde aus den Mittelwerten der ADC-Spektren (siehe Kapitel 3.2.6) des Pedestals ( $P$ ), des hohen Pulses ( $H$ ) und des niedrigen Pulses ( $L$ ) folgendermaßen berechnet:

$$\sigma R \leq \left| \frac{R_i}{\bar{R}} - 1 \right| \quad \text{mit} \quad R_i = \frac{H_i - P_i}{L_i - P_i} \quad \text{und} \quad \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad n = 7$$

$R_i$  ist das Pulshöhenverhältnis für den  $i$ -ten Meßpunkt. Der Wert für die Linearität bis zu einem Anodenspitzenstrom von  $I_A = 100\ \text{mA}$  beträgt:

$$\sigma R \leq 0.5\%$$

#### 4.5.2 Die 1'' - Photomultiplier

Es wurden insgesamt fünf 1''-PMs bei einer Versorgungsspannung von 2500 V im Magnetfeld von  $B = 1.2\ \text{T}$  getestet. Die Linearität wurde, wie in Kapitel 4.5.1

beschrieben, bestimmt. Bis zu einem Spitzenstrom von  $I_A = 27 \text{ mA}$  ergibt sich  $\sigma R \leq 0.5 \%$ , und bis zu einem Anodenspitzenstrom von  $I_A = 80 \text{ mA}$  ergibt sich  $\sigma R \leq 1 \%$ .

Die Linearität des 1"- wie des 2"- PM erfüllt die Anforderungen.

## 4.6 Die Untersuchungen auf Temperatureffekte

Wie zuvor schon erwähnt, soll die Meßauflösung des Spaghetti-Kalorimeters etwa 1% betragen. Diese hohe Anforderung und die Tatsache, daß am Ort des alten Kalorimeters im H1 Detektor Betriebstemperaturen um  $35^\circ\text{C}$  gemessen wurden, waren die Veranlassung dafür, diesen Test durchzuführen. Im Hamamatsukatalog [Ham 90] ist die Verstärkung als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Die Photokathoden wurden auch in diesem Test mit Lichtpulsen der Wellenlänge  $\lambda \approx 565 \text{ nm}$  bestrahlt.

Es wurden fünf 1"- PMs bei einer Versorgungsspannung von 2000 V ohne umgebendes Magnetfeld getestet. In Abbildung 4.10 ist ein Meßergebnis, welches als typisch angesehen werden kann, für einen PM aus einer Messung dargestellt.

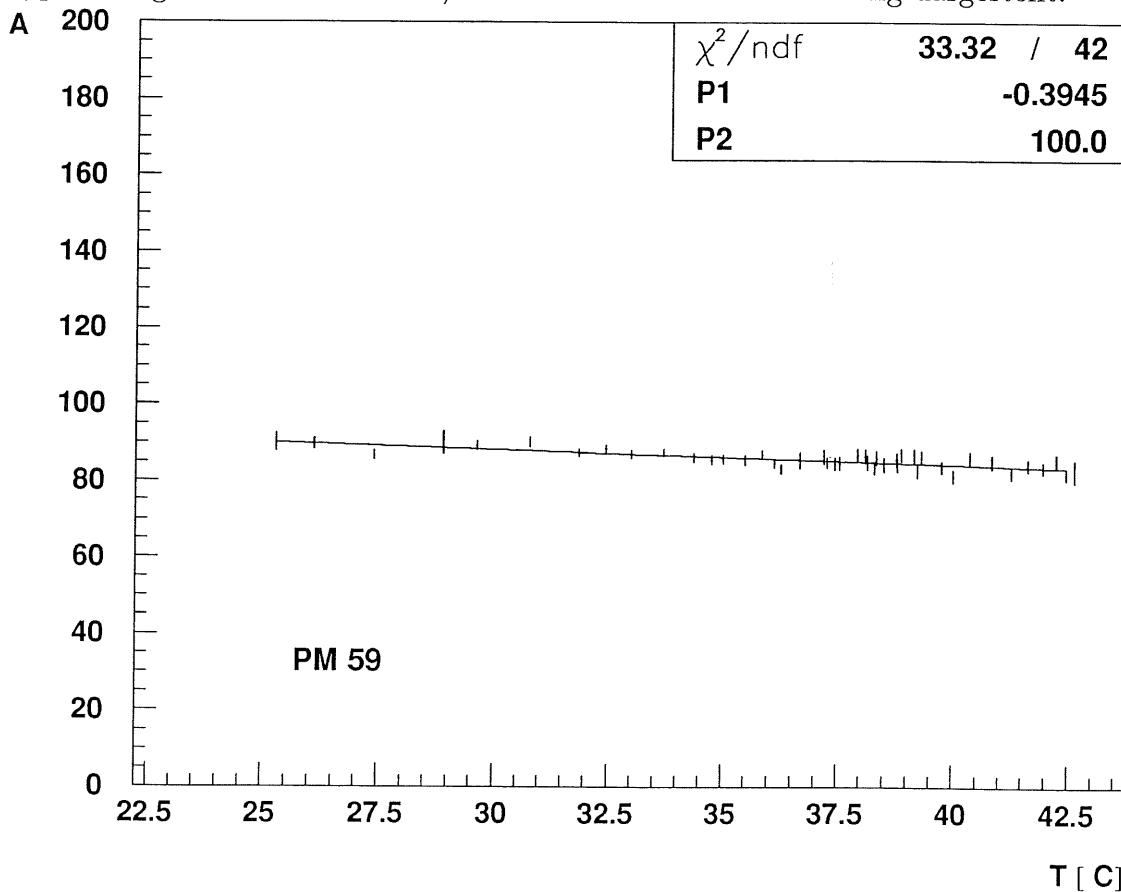


Abbildung 4.10: Normierte Signalamplitude aufgetragen gegen die Temperatur ( $T$ ) für den PM WA-0059

Es gab 5 PMs pro Messung und insgesamt 7 Messungen. In dem Diagramm ist der normierte ADC-Mittelwert gegen die Temperatur aufgetragen. Der Graph besteht aus 44 Meßpunkten. Jeder Meßpunkt repräsentiert 300 Ereignisse und wurde in etwa 4.5 Minuten aufgenommen. Durch die Meßpunkte verläuft eine Gerade, die der Fitfunktion  $f = P_1 \cdot T [^\circ \text{C}] + P_2$  entspricht. Die Abszissenwerte der Meßpunkte entsprechen den durch den Temperatursensor gewonnenen ADC-Mittelwerten für 300 Ereignisse. Die Umrechnung von ADC-Mittelwerten ( $A$ ) in die Temperatur ( $T$ ) erfolgte mit folgender Gleichung:

$$T [^\circ \text{C}] = -\frac{A - 653.34}{4.645}$$

Diese Gleichung ergab sich aus dem Temperaturkoeffizienten des Temperatursensors, der ADC-Auflösung (0.25 pC/Kanal) und den Werten der Meßschaltung<sup>2</sup>.

Die Ordinatenwerte wurden aus den Mittelwerten für 300 Ereignisse der Teströhre ( $T$ ) und der Referenzröhre ( $R$ ) sowie aus dem Mittelwert des Pedestalspektrums ( $P$ ) folgendermaßen berechnet:

$$\kappa \left( \frac{T_i - P}{R_i - P} \right) = P_1 \cdot T [^\circ \text{C}] + 100, \quad i \in [1, 2, 3, \dots, 44]$$

$\kappa$  ist ein Skalierungsfaktor, der die zu erwartende Signalamplitude bei  $0^\circ \text{C}$  auf 100 normiert. Parameter 1 ist dann die Steigung der Geraden und gibt gleichzeitig den Temperaturkoeffizienten in der Dimension  $\% / ^\circ \text{C}$  an.

In einem Temperaturintervall von  $(25 \dots 42)^\circ \text{C}$  beträgt der Temperaturkoeffizient der Verstärkung:

$$k_{\vartheta} = -(0.4 \pm 0.1) \% / ^\circ \text{C}$$

Der angegebene Fehler stellt den RMS aller gemessenen Temperaturkoeffizienten dar. Die Reproduzierbarkeit der Einzelwerte beläuft sich auf  $0.05 \% / ^\circ \text{C}$ .

## 4.7 Die Tests bzgl. der Alterung und der Lebensdauer

Das Maß für die Alterung eines PM ist der integrierte Anodenstrom. Während des Kalorimeterbetriebs werden die Photomultiplier hauptsächlich Signale auslesen, die durch Untergrundstrahlung hervorgerufen werden. Diese entsteht hauptsächlich bei Wechselwirkung des HERA-Protonenstrahls mit dem Restgas im Strahlrohr und mit dem Strahlrohr selbst. Das Verhältnis von Untergrundrate zu Nutzereignisrate beträgt ca.  $10^4$ . Jeder Photomultiplier darf nach ca. 8 Betriebsjahren noch nicht derart gealtert sein, daß die Stromverstärkung im Magnetfeld bei maximaler Versorgungsspannung von  $U = 2300 \text{ V}$  unter  $1 \times 10^4$  gefallen ist [H1 93]. Dies

<sup>2</sup>siehe Anhang D, Abbildung D 1

entspricht einem integrierten Anodenstrom von ca. 27,5 As. Da bei der Füllung der HERA-Ringe mit Teilchen ein besonders hoher Strom fließen würde, besteht die Absicht, die Versorgungsspannung der PMs in diesen Zeiten automatisch zu drosseln [H1 93].

Es wurden elf 1"-PMs bei einer Versorgungsspannung im Bereich von 1800...2300 V und einem Anfangsanodenstrom von  $30 \mu\text{A}$  ohne umgebendes Magnetfeld getestet. In Abbildung 4.11 ist das Ergebnis des Tests dargestellt. In dem Diagramm ist der normierte Anodenstrom gegen die verstrichene Testzeit aufgetragen.

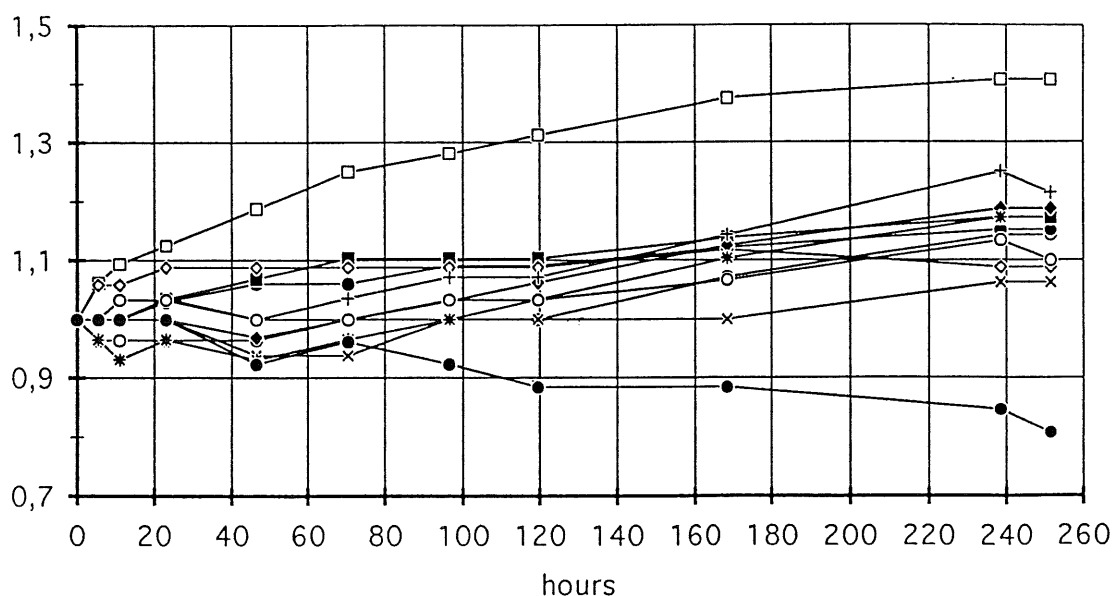


Abbildung 4.11: Normierte Anodengleichströme aufgetragen gegen die Zeit für 11 PMs

Die Ordinatenwerte ( $A$ ) wurden aus den gemessenen Anodenströmen<sup>3</sup> der Teströhre ( $T$ ) und der Referenzröhre ( $R$ ) folgendermaßen berechnet:

$$\kappa = \frac{R_1}{T_1} \quad A = \frac{T_i}{R_i} \cdot \kappa \quad i \in [2, 3, 4, \dots, 11]$$

Mit den Werten der ersten Messung wurde der Normierungsfaktor  $\kappa$  ausgerechnet.  $i$  ist der Index für die  $i$ -te Messung.

Nach 255 Stunden Testzeit weist der Anodenstrom von 9 Röhren einen Anstieg zwischen 4% und 12% auf, nur 2 Röhren zeigen eine größere Abweichung von -20% bzw. +41%. Alle Röhren, selbst die Röhre mit dem Signlrückgang, genügen den eingangs genannten Anforderungen.

<sup>3</sup>siehe Kapitel 3.2.7

# Zusammenfassung

Die H1-Kollaboration beabsichtigt eine Verbesserung der rückwärtigen Detektorregion. Es soll u.a. ein Spaghetti-Kalorimeter (SPACAL) gebaut werden, welches das gegenwärtige Blei-Szintillator-Sandwichkalorimeter ersetzen soll. Es muß in einem homogenen Magnetfeld von 1.2 T arbeiten und soll eine gute zeitliche Auflösung ( $\Delta t \approx 1$  ns) gestatten. Es ist deswegen notwendig, für die Signalauslese Photomultiplier (PM) mit gitterartiger Dynodenstruktur<sup>4</sup> zu verwenden.

Es wurden die für das SPACAL relevanten Größen von zweiundfünfzig 1"-PMs und sieben 2"-PMs gemessen. Die PMs wurden hinsichtlich der Variation der PM-Versorgungsspannung, des umgebenden Magnetfeldes, des Kathodeneinstrahlortes und der PM-Umgebungstemperatur sowie hinsichtlich der Langzeitstabilität und der Amplitudenlinearität untersucht. Außerdem wurde ein Test hinsichtlich von Alterung und Lebensdauer gemacht.

Die Anzahl der jeweils getesteten Photomultiplier entspricht einer Stichprobe von ca. 5% der Gesamtanzahl aller im geplanten Kalorimeter enthaltenen Röhren. Es bestand die Absicht, die gemittelten Meßwerte einer Stichprobe bei den Vertragsvereinbarungen mit Hamamatsu zu berücksichtigen, so daß die unzureichenden Photomultiplier aus späteren Lieferungen reklamiert werden können.

Die untersuchten 1"-PMs wiesen zwischen 2000 V und 2500 V ein Verstärkungsanstieg von 3.7 und die 2"-PMs einen Anstieg von 4.2 auf. Das Verstärkungsverhalten konnte mit folgender Funktion parametrisiert werden:

$$G(U[V]) = \left( \frac{U[V] + P_1}{P_2} \right)^{P_3}$$

Der Verstärkungsrückgang im Magnetfeld beträgt für die 1"-PMs  $50.3 \pm 8.9$ , und für die 2"-PMs beträgt der Rückgang  $107.8 \pm 7.1$ . Auch im Magnetfeld von  $B = 1.2$  T wiesen die 1"-PMs noch eine Verstärkung von  $2.08 \times 10^4$  und die 2"-PMs eine Verstärkung von  $15.2 \times 10^4$  auf. Das Verhalten der PMs im Magnetfeld konnte mit der folgenden Funktion parametrisiert werden:

$$G(B [T]) = \frac{P_1}{1 + \exp \frac{B[T] - P_2}{P_3}}$$

---

<sup>4</sup>Hamamatsu R 5506 (1") bzw. R 2490-05 mod (2")



Die mittleren Kathodendurchmesser verringern sich im Magnetfeld. Aus den Kathodenabtastungen bei  $B = 0\text{ T}$  und  $B = 1.2\text{ T}$  ergaben sich für den mittleren Kathodendurchmesser folgende Werte:

$$\begin{aligned} 1'' - PM_s (B = 0.0\text{ T}) &: \quad \overline{D_0} = 15.57\text{ mm} \\ 1'' - PM_s (B = 1.2\text{ T}) &: \quad \overline{D_B} = 15.21\text{ mm} \\ 2'' - PM_s (B = 0.0\text{ T}) &: \quad \overline{D_0} = 32.54\text{ mm} \\ 2'' - PM_s (B = 1.2\text{ T}) &: \quad \overline{D_B} = 32.30\text{ mm} \end{aligned}$$

Die mittlere Inhomogenität der 1''-PMs steigt im Magnetfeld an. Für die 2''-PMs sinkt die mittlere Inhomogenität geringfügig ab. Es ergaben sich für die mittlere Inhomogenität folgende Werte:

$$\begin{aligned} 1'' - PM_s (B = 0.0\text{ T}) &: \quad \sigma G_0 = 5.077\% \\ 1'' - PM_s (B = 1.2\text{ T}) &: \quad \sigma G_B = 8.029\% \\ 2'' - PM_s (B = 0.0\text{ T}) &: \quad \sigma G_0 = 6.122\% \\ 2'' - PM_s (B = 1.2\text{ T}) &: \quad \sigma G_B = 5.703\% \end{aligned}$$

Der Temperaturkoeffizient der Verstärkung wurde in dem Temperaturintervall  $25^\circ\text{C}$  bis  $42^\circ\text{C}$  gemessen und beträgt  $-(0.4 \pm 0.1)\%/^\circ\text{C}$ .

Die statistischen Verstärkungsschwankungen sind in einem Zeitraum von bis zu 72 Stunden kleiner als 3%.

Die Linearität der 2''-PMs ist bis zu einem Anodenspitzenstrom von 100 mA besser als 0.5%. Der gleiche Wert gilt für die 1''-PMs bis zu einem Anodenspitzenstrom von 27 mA.

Im Alterungstest wiesen bei einem integrierten Anodenstrom von 27.5 As ca. 82% der 1''-Photomultiplier nicht mehr als 12% Abweichung von der Anfangsverstärkung auf.

Die Ergebnisse bewegten sich im Rahmen der von Hamamatsu angegebenen Daten bzw. sie erfüllten die bei der Planung des Kalorimeters gestellten Anforderungen. Insgesamt genügten ca. 15% aller getesteten PMs nicht den Anforderungen.

# Anhang A

## Technische Daten der Photomultiplier

	1"-PM	2"-PM	Einheit
Durchmesser	26.5 ± 0.7	52 ± 1	mm
Bauhöhe	40 ± 1.5	52 ± 2	mm
Fenstermaterial	UV-Glas	Borosilikat	
Kathodenmaterial	Bialkali		
Kathodendurchmesser	16	36	mm
Spektraler Bereich	185... 650	300... 650	nm
maximale Empfindlichkeit	420 ± 50		nm
Kathodensensitivität	60		μA/lm
Anodensensitivität	30	300	A/lm
Dynodenoberfläche	Bialkali		
Dynodenstruktur	netzartig		
Anzahl der Stufen	15	16	
Dunkelstrom (2000 V; 2500 V)	10 ... 100	200 ... 2000	nA
Stromverstärkung (0 Tesla)	5 × 10 <sup>5</sup>	5 × 10 <sup>6</sup>	
Stromverstärkung (1 Tesla)	2 × 10 <sup>4</sup>	2 × 10 <sup>5</sup>	
Versorgungsspannung (max)	2300	2700	Volt
Anodenstrom (max)	0.01	0.1	mA
Umgebungstemperatur	-80 ... +50		°C
<b>Aus den Datenblättern von sechzig 1"-PMs ergab sich :</b>			
Kathodensensitivität	69.17	± 13.68 (RMS)	μA/lm
Anodensensitivität	72.58	± 32.88 (RMS)	A/lm
Stromverstärkung (0 Tesla)	1.01 × 10 <sup>6</sup>	± 0.353 × 10 <sup>6</sup> (RMS)	

Tabelle A.1: technischen Daten der Photomultiplier

Aus den Datenblättern von sieben 2"-PMs ergab sich :			
Kathodensensitivität	71	$\pm 12$ (RMS)	$\mu\text{A}/\text{lm}$
Anodensensitivität	1141	$\pm 369$ (RMS)	$\text{A}/\text{lm}$
Stromverstärkung (0 Tesla)	$16.3 \times 10^6$	$\pm 5.7 \times 10^6$ (RMS)	

Tabelle A.2: technischen Daten der gelieferten 2"- PMs

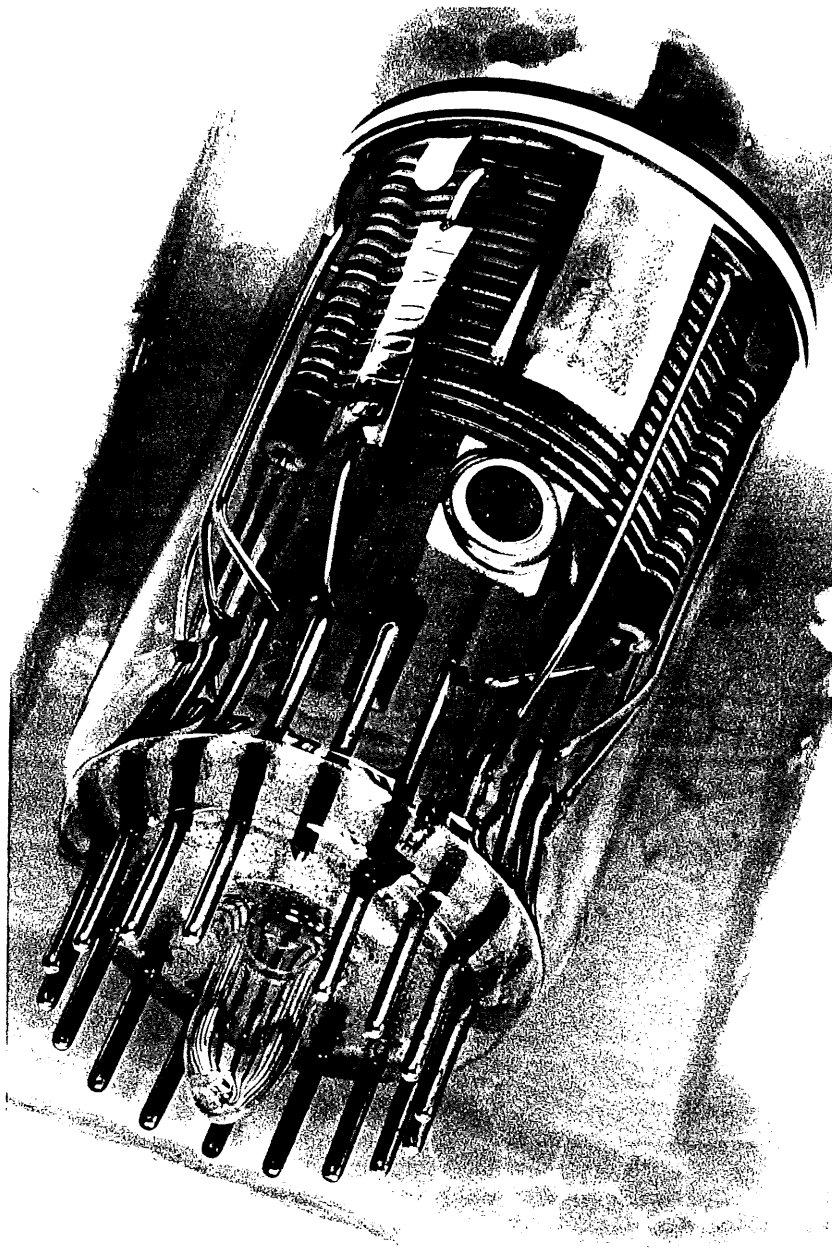


Abbildung A.1: Photographie eines 1"- Photomultipliers

## Anhang B

# Technische Daten der Leuchtdiode

Der Halbleiter der LED besteht aus Galliumphosphid (GaP) mit einigen Stickstoffverunreinigungen. Diese Verunreinigungen bewirken einen erhöhten Anteil von Strahlungsübergängen bzgl. der Gesamtheit aller Übergänge. Der Übergang ist indirekt, d.h. es werden Phononen ausgetauscht und der Wellenvektor  $\vec{K}$  ändert sich [Sze 81, Val 85].

Das Gehäuse besteht aus diffusem Epoxyd. Die Abstrahlcharakteristik ist sphärisch. In Tabelle B.1 sind die technischen Daten der LED aufgeführt. Abbildung B.1 zeigt die mechanischen Daten der LED. Abbildung B.2 zeigt ein Diagramm der Strom-Spannungskennlinie. Abbildung B.3 zeigt ein Diagramm der Lichtintensität-Vorwärtsstromkennlinie. Abbildung B.4 zeigt ein Diagramm der Lichtintensität-Halbleitertemperaturkennlinie. Abbildung B.5 zeigt ein Diagramm der Lichtintensität-Abstrahlwinkelcharakteristik. In Tabelle B.2 sind die technischen Daten des Lichtleiters aufgeführt [Kur 93].

Sperrspannung	$V_R = 5 \text{ Volt}$
Vorwärtsstrom (D.C.)	$I_F = 30 \text{ mA}$
Vorwärtsstrom (Spitzenwert: $t_p = 1 \mu\text{s}$ ; $f = 300 \text{ Hz}$ )	$I_{FRM} = 1 \text{ A}$
Leistungsverbrauch ( $T = 55^\circ\text{C}$ )	$P_{tot} = 90 \text{ mW}$
Lagerungstemperatur	$-30^\circ\text{C} \leq T_{STR} \leq 100^\circ\text{C}$
maximale Arbeitstemperatur	$T_j \approx 100^\circ\text{C}$

Tabelle B.1: LED-Daten (Grenzwerte)

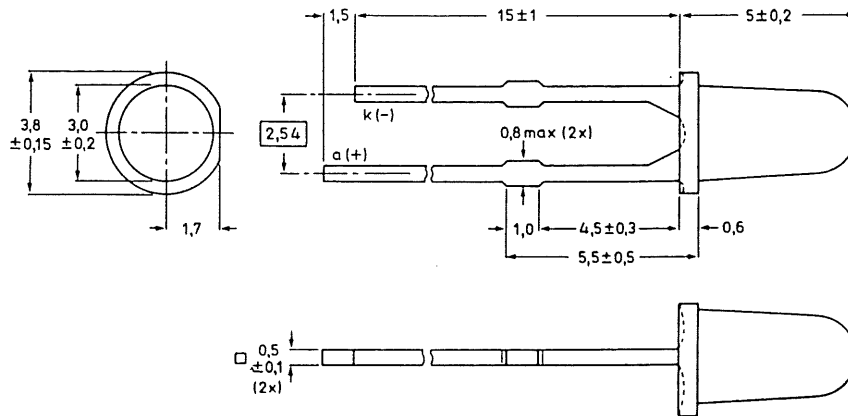


Abbildung B.1: äußere Abmessungen der LED

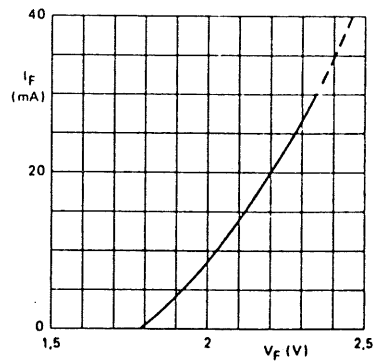


Abbildung B.2: Strom-Spannungskennlinie der LED

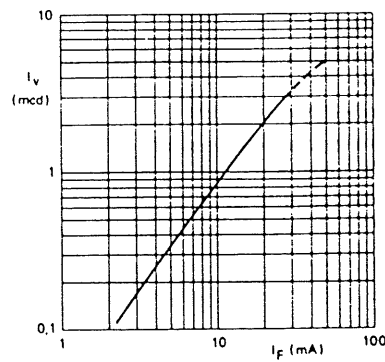


Abbildung B.3: Lichtintensität-Vorwärtsstromkennlinie der LED

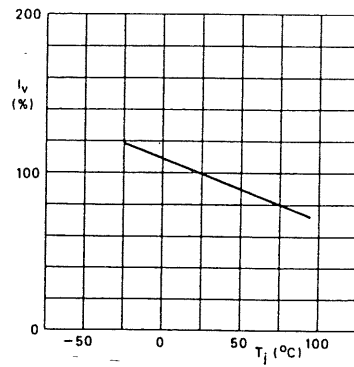


Abbildung B.4: Lichtintensität-Halbleitertemperaturkennlinie der LED

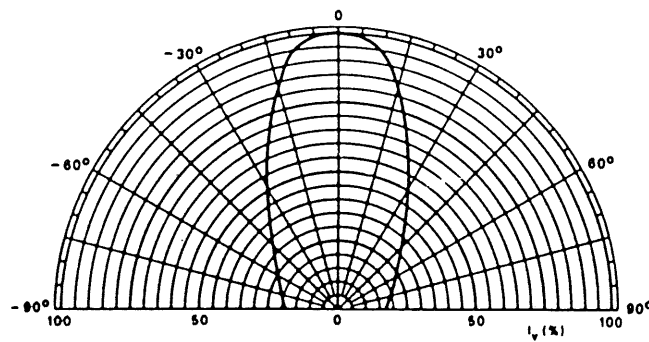


Abbildung B.5: Lichtintensität-Abstrahlwinkelcharakteristik der LED

Gesamtdurchmesser	$D = 1 \text{ mm}$
Fasermanteldicke	$d \approx 3\%$ des Gesamtdurchmessers
Faserkernmaterial (Brechungsindex)	Polystyrol ( $n = 1.59$ )
Fasermantelmaterial (Brechungsindex)	PMMA ( $n = 1.49$ )
Dämpfungsverlust ( $\lambda = 565 \text{ nm}$ )	$dI_{lost} = 200 \text{ dB/km}$
numerische Apertur	$A = 0.58$
Umgebungstemperatur	$-20^\circ\text{C} \leq T \leq 50^\circ\text{C}$
Maximaler Eintrittswinkel	$\vartheta_{tot} = 35.7^\circ$

Tabelle B.2: Die Lichtleitfaserdaten [Kur 93]

# Anhang C

## technische Daten des Magneten

Tabelle C.1 zeigt die technischen Daten des Ablenkmagneten vom Typ MA. Tabelle C.2 zeigt die technischen Daten des Magnetfeldmeßgerätes. Abbildung C.1 zeigt die Erregungskurve des Magneten [Des 66].

Magnetgewicht	$m = 20.8 \text{ t}$
Gesamtlänge	$l = 1975 \text{ mm}$
nutzbare Apertur (Höhe)	$h = 168 \text{ mm}$
nutzbare Apertur (Breite)	$b = 483 \text{ mm}$
maximale Stromstärke	$I = 1500 \text{ A}$
Feldstärke bei 1500 A	$B = 2.07 \text{ T}$
Leistungsverbrauch bei 1500 A	$P = 400 \text{ kW}$
Gesamtwiderstand bei 20 °C	$R = 0.16 \Omega$
Zeitkonstante bei 50 °C	$L/R = 1.35 \text{ s}$
Gesamtwindungszahl (4 Spulen)	$n = 192$
mittlere Windungslänge	$l_w = 5000 \text{ mm}$
Leiterquerschnitt (Quadrat mit Loch)	$12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}, \varnothing = 7 \text{ mm}$
Zahl der Kühlkreise pro Spule	8
Kühlwassermenge (1500 A, $\Delta T = 40 \text{ °C}$ )	$V/t = 140 \text{ l/min}$
Differenzdruck (für 140 l/min)	$\Delta p = 441.3 \text{ kPa}$

Tabelle C.1: Magnetdaten

Meßsonde	Hallprinzip
Absoluter Meßfehler	$(B_{abs} - B_{meas})/B_{abs} \leq 5 \times 10^{-5}$
Relativer Meßfehler	$\Delta B_{rel} \leq 0.1 \%$
Meßbereich	$-2.3 \text{ T} \leq B \leq 2.3 \text{ T}$
Auflösung	$\Delta B = 1 \times 10^{-5} \text{ T}$

Tabelle C.2: Magnetometerdaten

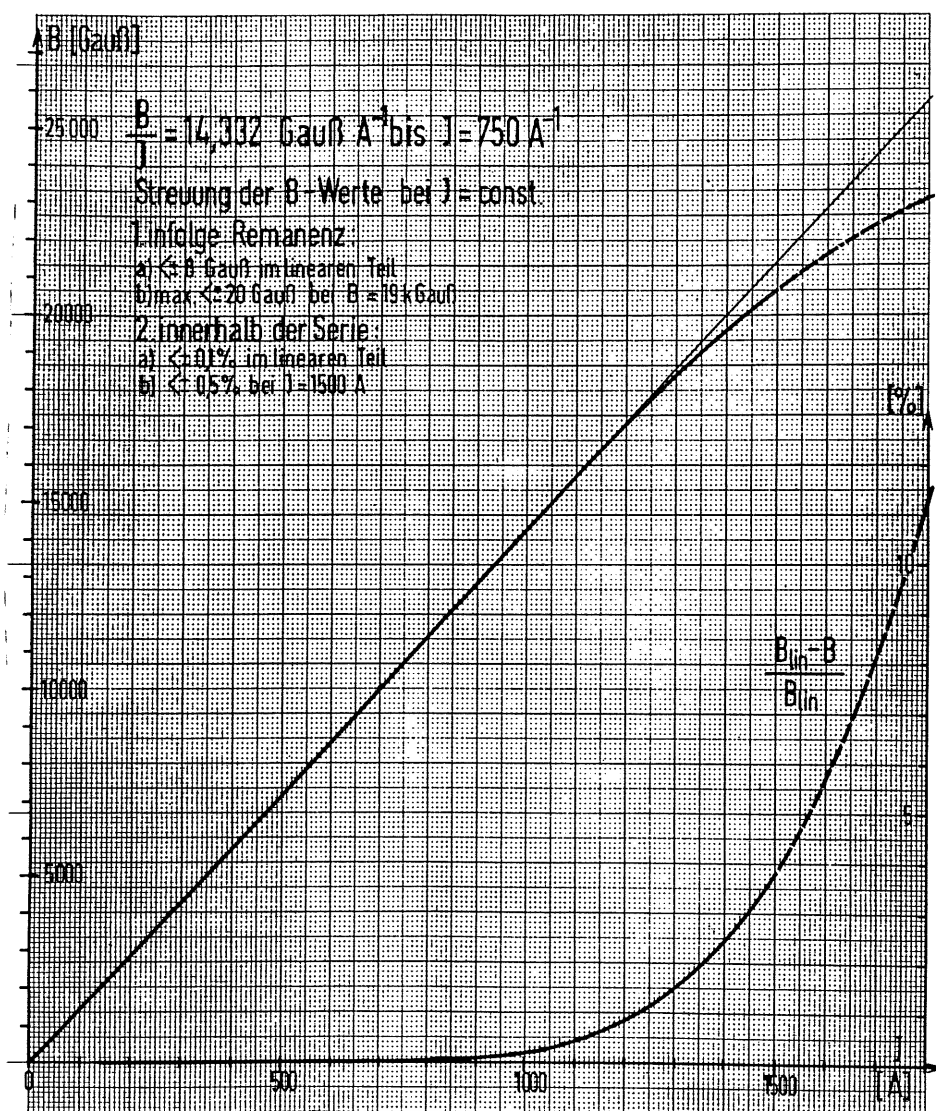


Abbildung C.1: Erregungskurve des Magneten



## Anhang D

### techn. Daten zur Temperatur- und Strommessung

Der Temperatursensor KTY 10-6 besteht aus Silizium und weist damit einen positiven Temperaturkoeffizienten (PTC) auf. Bei 25 °C weist er einen Widerstand von  $R = (2000 \pm 20) \Omega$  auf. Zwischen 20 °C und 45 °C weist er einen Temperaturkoeffizienten von  $k_{\vartheta} = +(15.31 \pm 0.55) \Omega/^{\circ}\text{C}$  auf. In Abbildung D.1 ist dargestellt, wie er in die Schaltung integriert war. Die temperaturstabilisierte Zenerdiode 1N 825 A hat

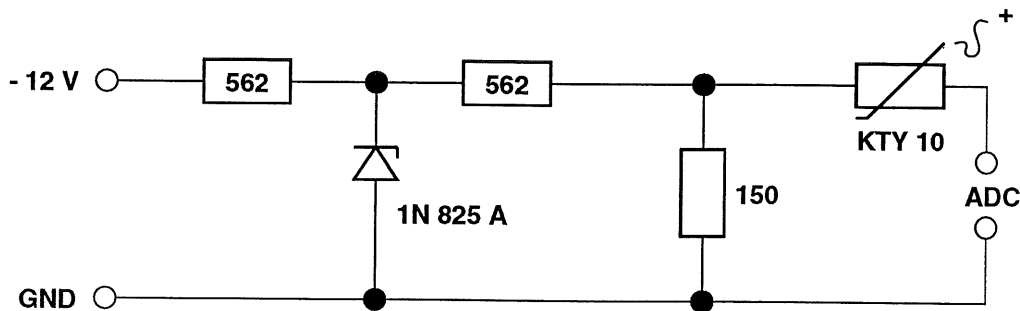


Abbildung D.1: Schaltbild der Temperaturmessung

eine Grenzspannung von  $U_Z \approx 6.2 \text{ V}$ . Ihr maximaler Strom beträgt  $I_{max} \approx 7.5 \text{ mA}$ . Ihr Temperaturkoeffizient beträgt  $K_{\vartheta} \approx 0.002 \%/^{\circ}\text{C}$ . Die technischen Daten des Digitalthermometers sind in Tabelle D.1 aufgeführt. Die technischen Daten des Elektrometers sind in Tabelle D.2 aufgeführt.

Meßfühlerartenbezeichnung	80 PK-1
Absoluter Meßfehler	$\pm 1.1^\circ\text{C}$
Relativer Meßfehler (zwischen $18^\circ\text{C}$ und $28^\circ\text{C}$ )	$\pm 0.1\%$
Meßbereich	$-40^\circ\text{C} \dots 260^\circ\text{C}$
Auflösung	$0.1^\circ\text{C}$

Tabelle D.1: Thermometerdaten

Meßbereich	$5 \times 10^{-15} \text{ A}$ bis $0.3 \text{ A}$
Relativer Meßfehler	$\pm 2\%$ des Vollausschlages
Eigenrauschen	$\leq \pm 3 \times 10^{-15} \text{ A}$
Offsetstrom	$\leq 5 \times 10^{-15} \text{ A}$

Tabelle D.2: Elektrometerdaten

# Anhang E

## Meßergebnisse der individuellen PMs

PM # WA- 00...	Verstärkung ( $B=0\text{ T}$ ) [ $10^6$ ]	Verstärkungs- verlustfaktor $G_0/G_{1.2}$	Kathoden- inhomogenität $\sigma G$ [%]		Kathoden- durchmesser $\bar{D}$ [mm]	
			$B=0\text{ T}$	$B=1.2\text{ T}$	$B=0\text{ T}$	$B=1.2\text{ T}$
04	1.39	66.50	2.915	6.23	15.94	15.80
05	0.77		3.025	7.745	15.94	15.51
10	0.94	64.07	4.145	6.09	15.94	15.65
14	1.30					
15	0.61	50.12	5.57	11.795	15.80	15.00
18	1.05	63.70	9.47	10.82	14.28	14.42
20	0.77	55.51	4.525	8.365	15.94	15.29
21	1.52		6.165	10.465	15.72	15.00
24	0.65	65.46	3.345	7.13	15.94	15.72
25	0.58	60.43	9.245	14.225	14.86	14.13
27	0.93	57.61	5.89	10.6	15.87	14.64
28	0.69	55.07	4.655	7.52	15.94	15.43
30	0.53					
32	0.78	56.47	3.705	5.025	15.94	15.87
34	1.18					
35	0.57	42.54	9.645	11.35	13.84	13.77
36	0.46	56.21	7.17	8.905	15.58	15.29
37	0.79	51.47	16.11	15.99	10.72	11.16
38	1.06	53.59	4.25	8.115	15.94	15.07
39	0.79	47.83	7.91	9.14	15.29	15.14
40	0.87	51.23	2.055	3.63	15.94	15.94
42	0.29					
43	0.84					
44	1.29					
46	1.54					
47	0.84	42.36	5.865	9.955	15.94	14.71
48	1.38	49.97	1.83	2.955	15.94	15.94

Tabelle E.1: Daten der einzelnen Photomultiplier

PM # WA- 00...	Verstärkung ( $B=0$ T) [ $10^6$ ]	Verstärkungs- verlustfaktor $G_0/G_{1.2}$	Kathoden- inhomogenität $\sigma G$ [%]		Kathoden- durchmesser $\bar{D}$ [mm]	
			$B=0$ T	$B=1.2$ T	$B=0$ T	$B=1.2$ T
49	1.28	58.81	3.36	5.975	15.94	15.72
50	1.43	49.66	2.545	4.015	15.94	15.94
51	1.13	46.99	2.01	4.055	15.94	15.94
52	0.81	42.68	10.295	10.81	15.94	15.94
53	1.15	40.40	4.535	6.76	15.94	15.51
54	1.29	46.05	3.665	7.025	15.94	15.29
55	1.32	45.25	4.575	7.735	15.94	15.22
58	1.68	46.97	3.98	8.485	15.94	15.14
59	0.73	33.06	2.935	5.175	15.94	15.94
61	1.26					
62	1.48	34.83	4.16	9.06	15.87	15.07
64	1.26	30.47	3.81	8.58	15.87	15.14
69	0.87	42.94	6.04	8.775	15.51	15.22
70	0.85	52.80	2.065	6.755	15.94	15.51
71	0.78	45.97	4.71	8.97	15.65	15.36
73	0.57	48.98	2.695	4.495	15.94	15.80
74	0.88	44.39	5.52	9.535	15.51	14.93
76	1.88	66.17	4.09	6.55	15.65	15.43
77	1.59	69.08	6.17	8.13	15.29	15.22
78	0.73	38.27	2.325	4.11	15.94	15.94
80	1.28	44.45	3.475	7.585	15.94	15.22
81	1.95	48.84	4.915	6.24	15.58	15.51
82	1.40	38.64	4.68	6.54	15.51	15.36
83	0.98	38.05	5.005	10.11	15.58	14.86
87	1.20	56.64	1.345	4.81	15.94	15.80
88	1.01	52.58	7.685	11.39	14.71	14.13
89	0.70	52.30	6.01	8.345	15.87	15.29
90	0.84	60.05	7.865	10.1	15.14	14.93
92	0.98	51.33	4.33	6.935	15.72	15.36
93	0.75	53.30	4.545	8.39	15.87	15.36
95	1.02	45.26	3.44	6.225	15.94	15.51
96	0.88	45.23	5.975	10.54	15.51	14.64
99	0.68	51.21	6.405	8.42	15.51	15.29
ZH- 17...						
73	10.35	113.1	7.084	10.195	35.65	35.55
75	18.66	110.1	8.553	7.902	27.92	28.79
76	19.67	107.1	4.744	4.073	33.52	33.23
77	10.98	109.9	4.491	2.726	34.88	33.24
79	9.21					
80	14.27	102.3	4.158	4.606	34.59	32.85
83	13.90	116.5	6.709	5.257	30.53	31.20
84	26.10	95.3	7.115	5.162	30.72	31.22

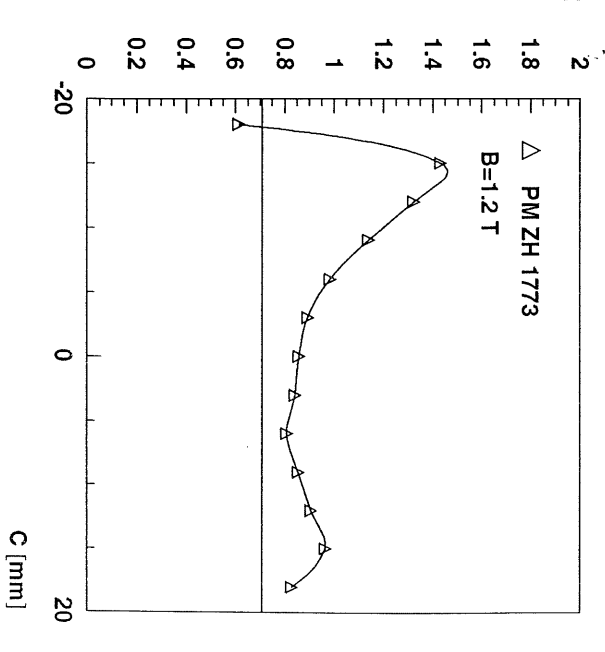
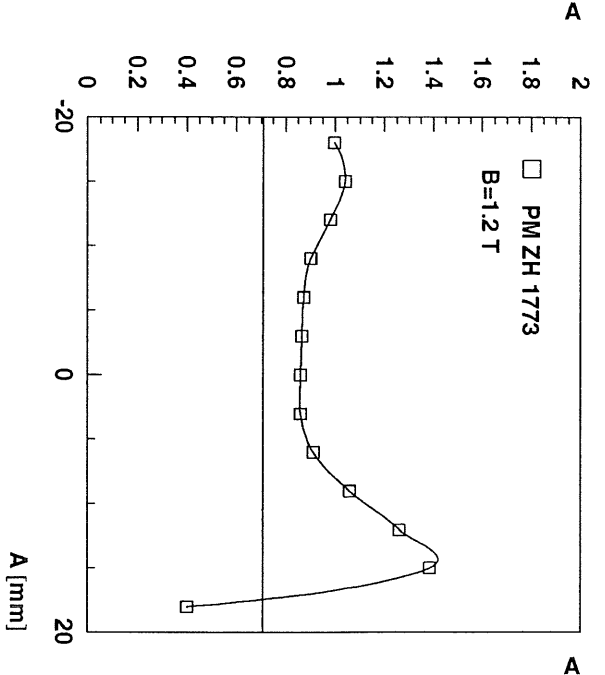
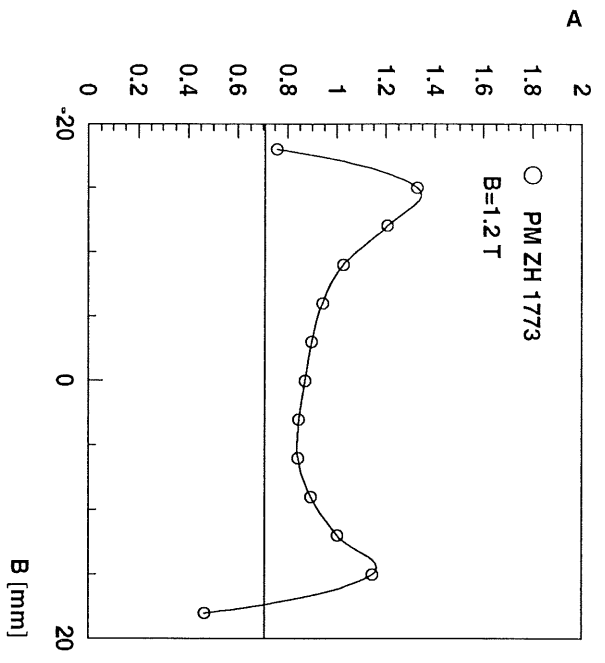
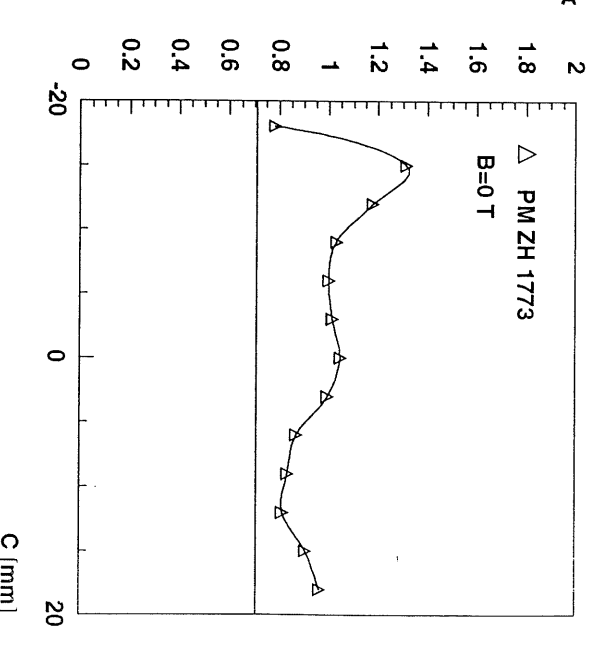
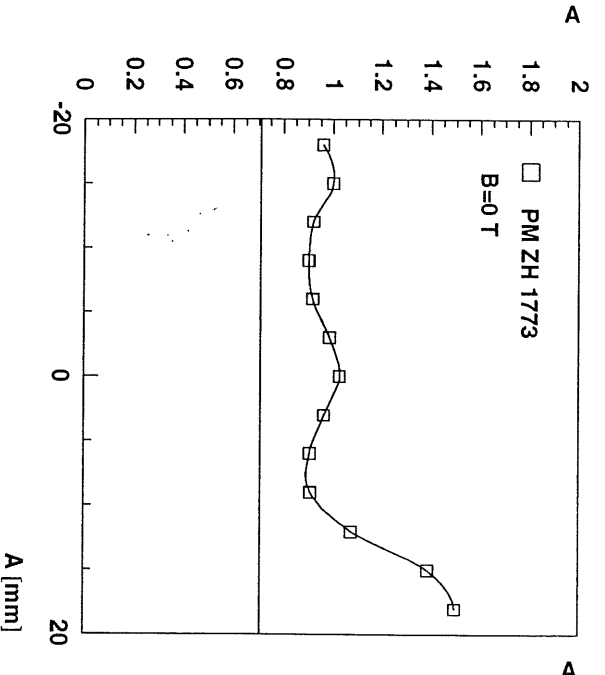
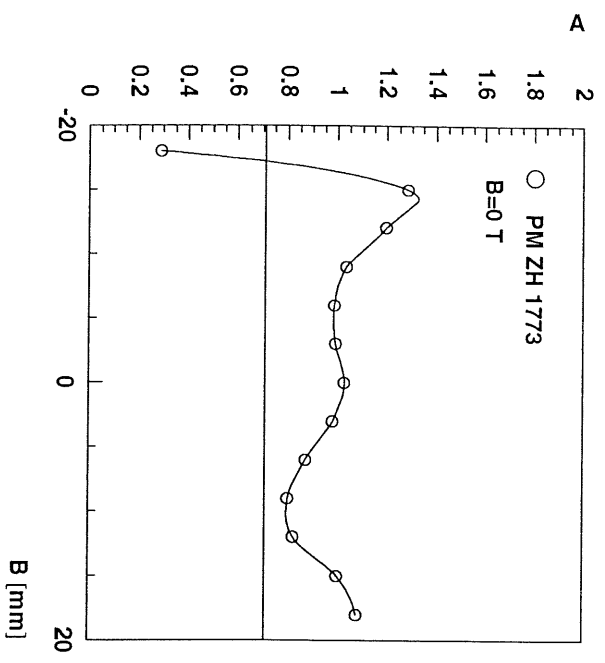
Tabelle E.1: Daten der einzelnen Photomultiplier

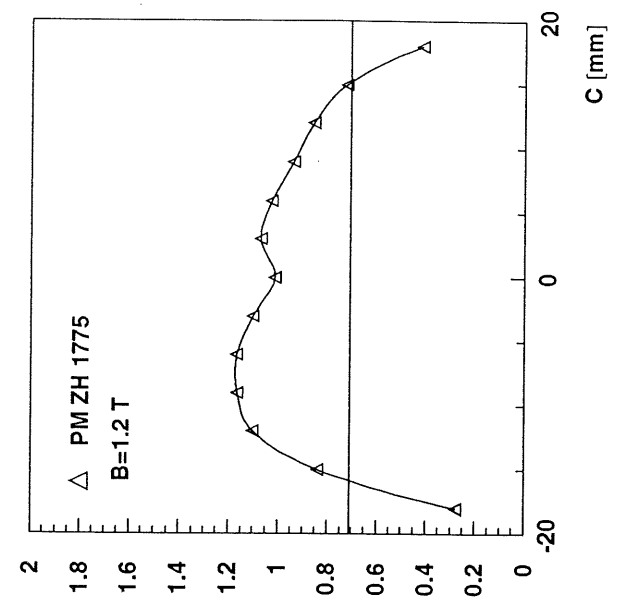
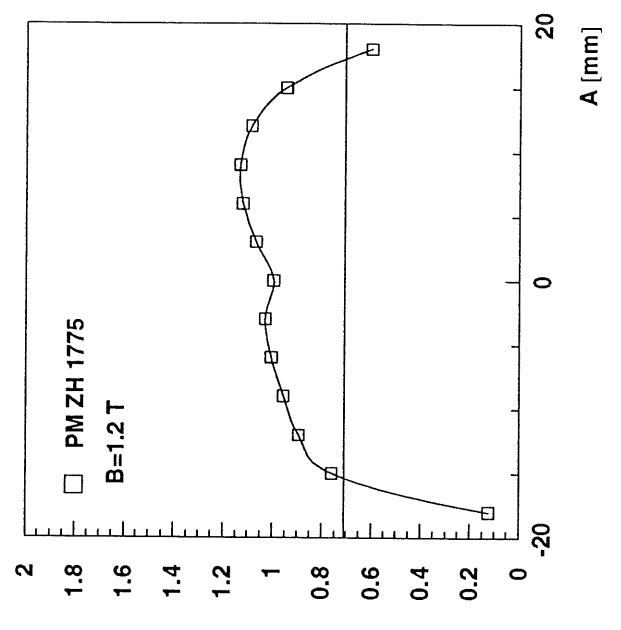
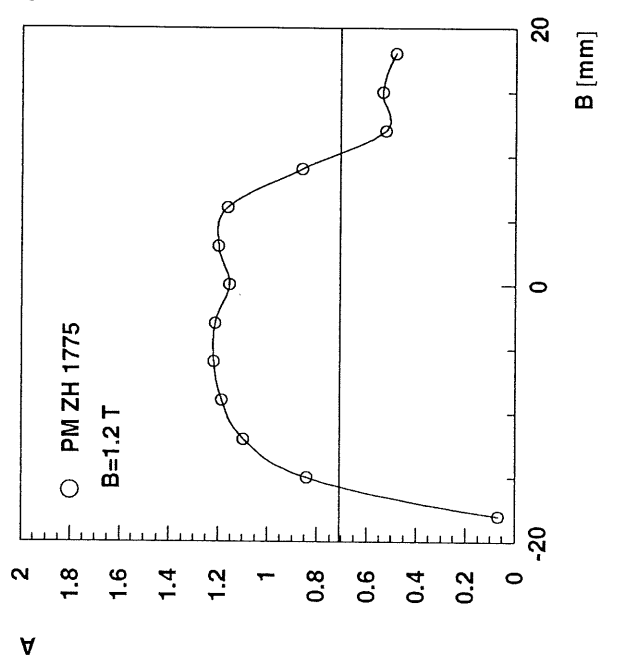
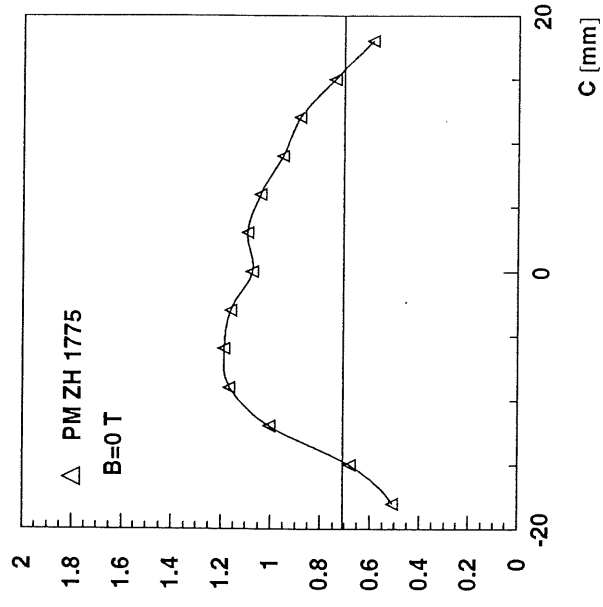
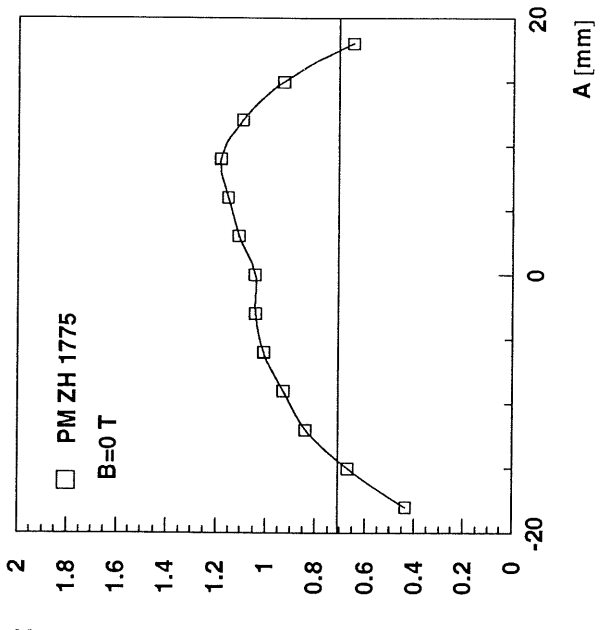
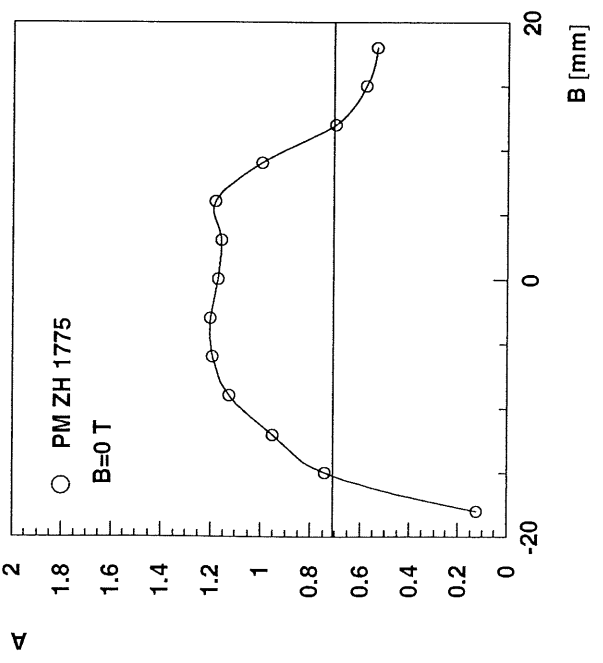
PM # WA-00. ...	Magnetfeld- parameter			Versorgungsspan- nungsparameter		
	$P_1$ [ $10^6$ ]	$P_2$ [T]	$P_3$ [T]	$P_1$ [V]	$P_2$ [V]	$P_3$
04	1.491	0.5082	0.1577	1333	833.6	10.21
05				1148	814.7	10.02
10	1.023	0.5235	0.1552	1391	861.3	10.04
15	0.6736	0.5154	0.1677	1427	887.5	9.866
18	1.139	0.5161	0.1570	1403	842.7	9.931
20	0.8478	0.5284	0.1618	1403	871.1	9.949
21				1176	792.4	10.25
24	0.7058	0.4961	0.1645	1399	879.5	9.898
25	0.6462	0.4971	0.1641	1348	878.0	9.926
27	1.034	0.5054	0.1657	1376	860.3	10.06
28	0.7609	0.5110	0.1627	1316	868.4	10.03
32	0.9785	0.3739	0.1919			
35	0.6523	0.5011	0.1743	1323	880.9	9.967
36	0.5796	0.3666	0.1916			
37	0.8804	0.5040	0.1689	1425	868.0	9.878
38	1.283	0.4194	0.1864			
39	0.8602	0.5250	0.1685	1566	878.0	9.694
40	0.9469	0.5150	0.1673	1333	852.6	10.01
47	1.130	0.3370	0.2124			
48	1.508	0.5105	0.1711	1496	850.0	9.998
49	1.392	0.5151	0.1623	1553	859.4	9.912
50	1.593	0.5079	0.1705	1509	850.5	10.00
51	1.242	0.5026	0.1753	1481	856.0	9.933
52	0.8999	0.5118	0.1770	1519	876.5	9.776
53	1.281	0.5213	0.1750	1410	839.4	9.941
54	1.439	0.5095	0.1733	1572	859.1	9.858
55	1.457	0.5166	0.1729	1454	848.1	10.02
58	1.833	0.5165	0.1720	1437	835.2	10.11
59	0.8029	0.5630	0.1773	1312	864.5	10.03
62	1.645	0.5373	0.1806	1218	816.9	10.34

Tabelle E.2: Fitparameter der einzelnen Photomultiplier

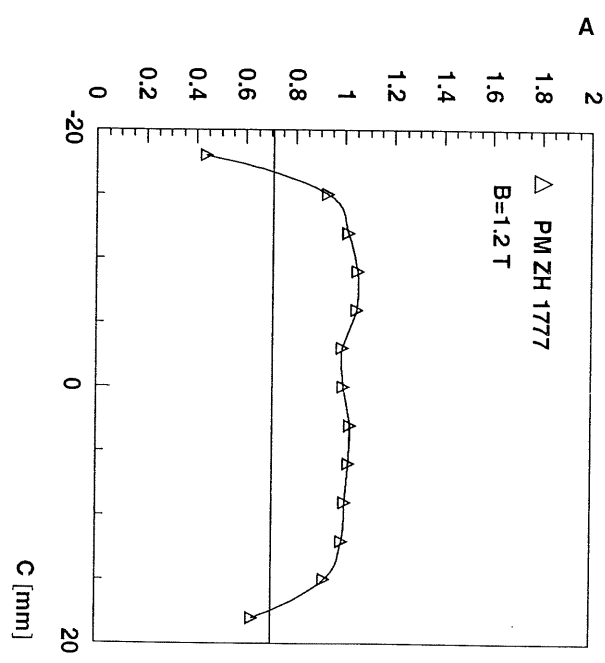
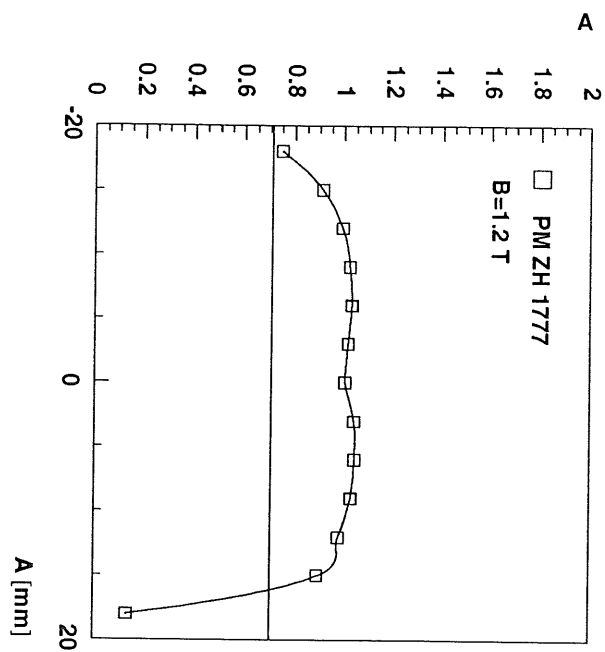
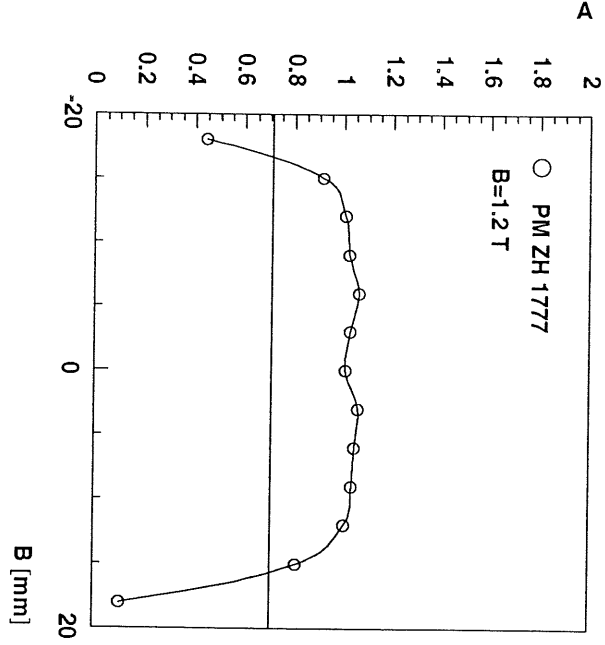
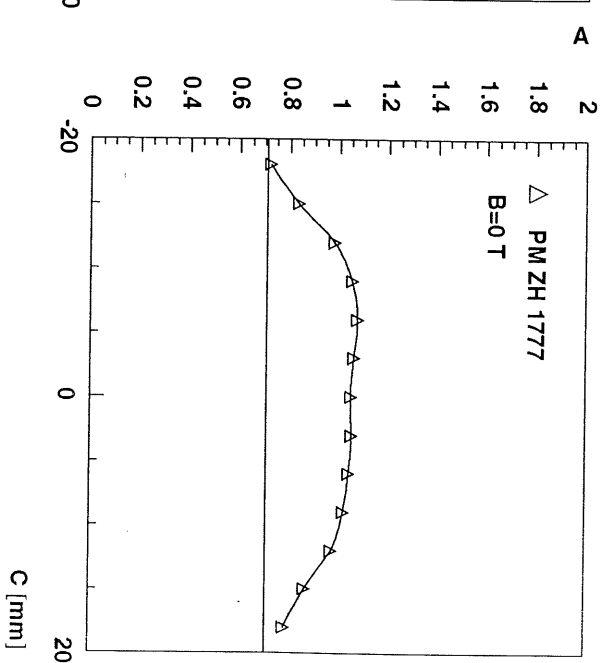
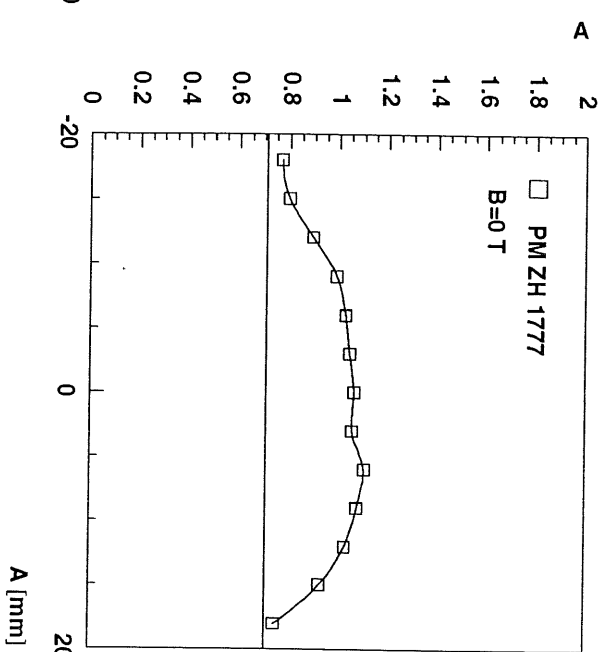
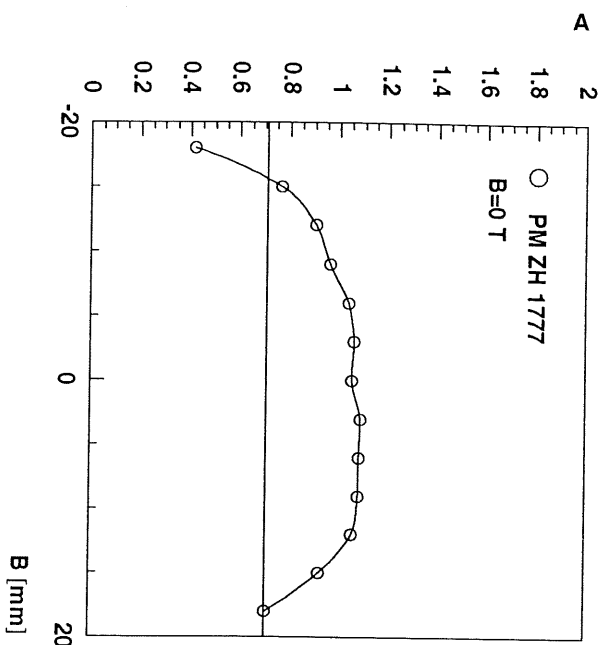
PM # WA-00...	Magnetfeld- parameter			Versorgungsspan- nungsparameter		
	$P_1$ [ $10^6$ ]	$P_2$ [T]	$P_3$ [T]	$P_1$ [V]	$P_2$ [V]	$P_3$
64	1.424	0.5345	0.1881	1160	815.8	10.36
69	0.9535	0.5471	0.1692	1114	802.8	10.07
70	0.9147	0.5307	0.1649	1314	849.5	10.00
71	0.8426	0.5536	0.1644	1458	875.9	9.86
73	0.6145	0.5543	0.1593	1454	894.1	9.785
74	0.9549	0.5601	0.1642	1214	799.3	9.82
76	2.026	0.5442	0.1529	1281	811.0	10.33
77	1.689	0.5410	0.1531	1433	833.1	10.07
78	0.8112	0.5392	0.1740	1255	859.1	10.12
80	1.420	0.5313	0.1709	1241	824.6	10.26
81	2.142	0.5381	0.1660	1334	818.0	10.29
82	1.555	0.5336	0.1760	1301	830.0	10.24
83	1.088	0.5204	0.1795	1239	820.9	10.03
87	1.293	0.5363	0.1601	1392	848.8	10.09
88	1.117	0.5428	0.1614	1334	837.9	9.998
89	0.7675	0.5524	0.1591	1402	878.3	9.925
90	0.9288	0.5166	0.1614	1377	858.6	9.946
92	1.066	0.5463	0.1599	1275	827.5	10.01
93	0.8189	0.5113	0.1666	1362	870.5	9.992
95	1.116	0.5452	0.1654	1276	830.1	10.06
96	0.9577	0.5422	0.1661	1284	812.2	9.784
99	0.7480	0.5239	0.1653	1305	863.9	9.997
PM # ZH-17...	Magnetfeld- parameter			Versorgungsspan- nungsparameter		
	$P_1$ [ $10^6$ ]	$P_2$ [T]	$P_3$ [T]	$P_1$ [V]	$P_2$ [V]	$P_3$
73	11.28	0.4665	0.1528	371.2	325.3	7.415
75	20.54	0.4748	0.1516	331.9	310.8	7.578
76	21.53	0.4671	0.1531	422.1	316.8	7.558
77	12.08	0.4663	0.1504	432.4	325.3	7.370
80	15.52	0.4681	0.1497	464.0	321.9	7.418
83	15.16	0.4795	0.1519	441.1	322.0	7.428
84	28.41	0.4759	0.1542	441.5	312.5	7.646

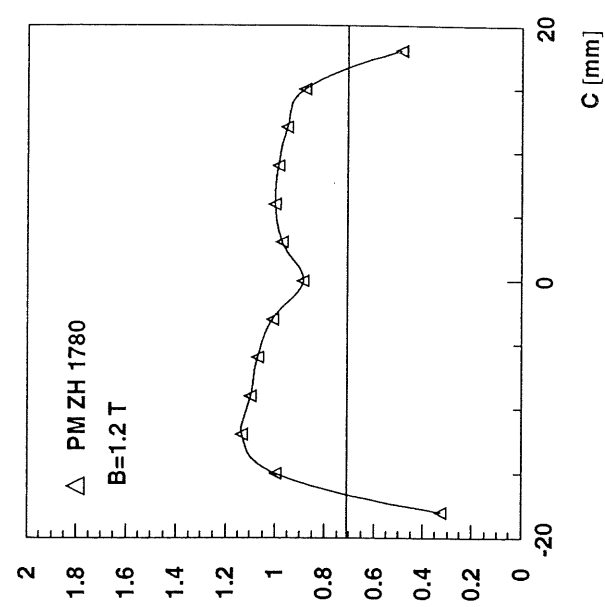
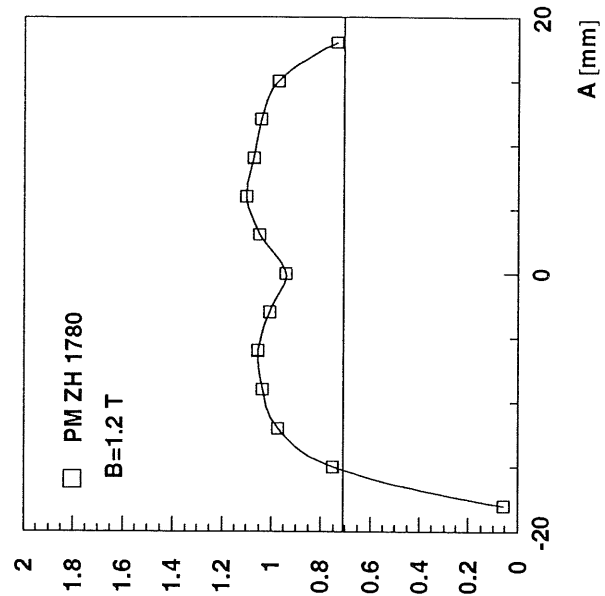
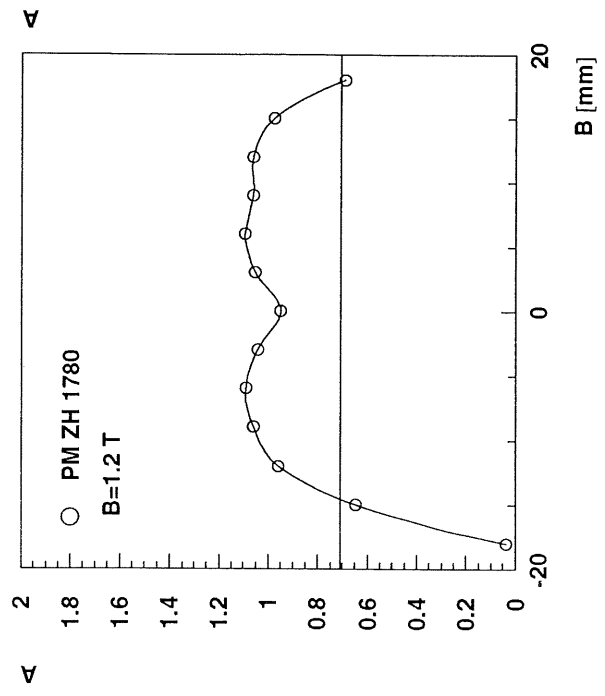
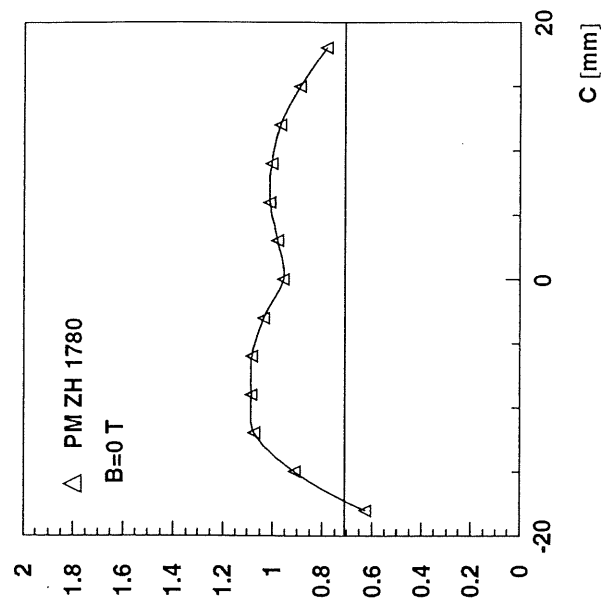
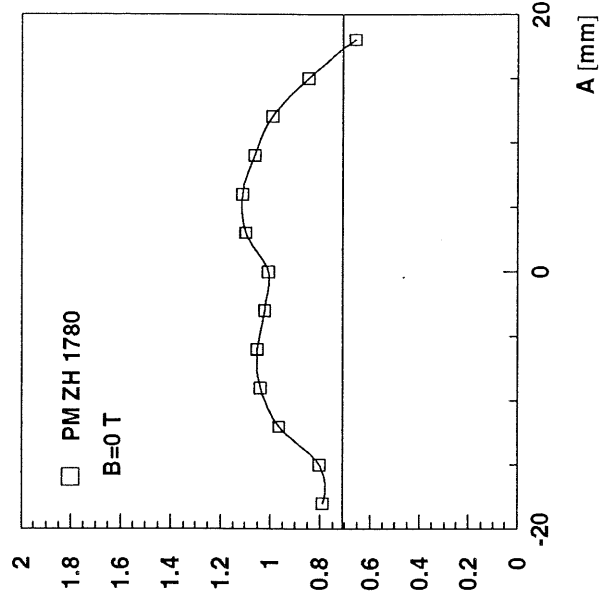
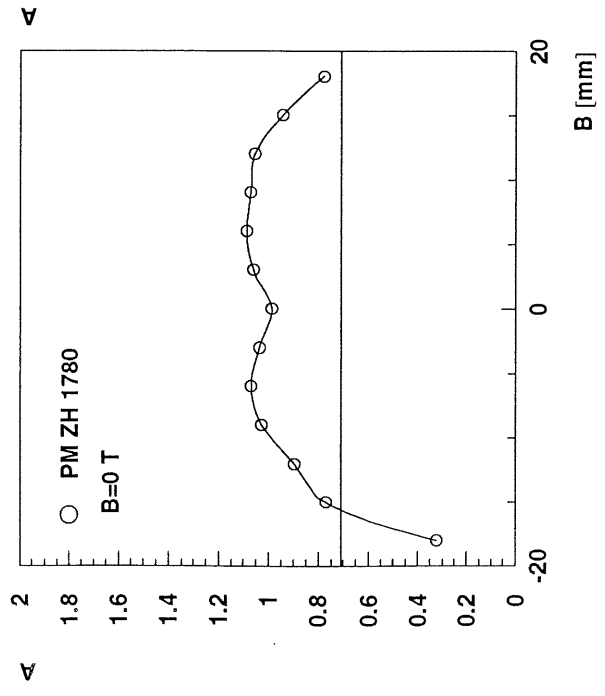
Tabelle E.2: Fitparameter der einzelnen Photomultiplier

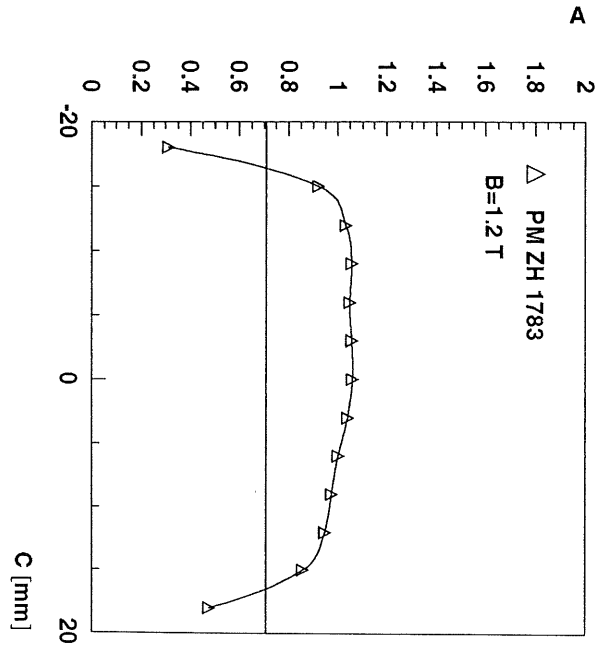
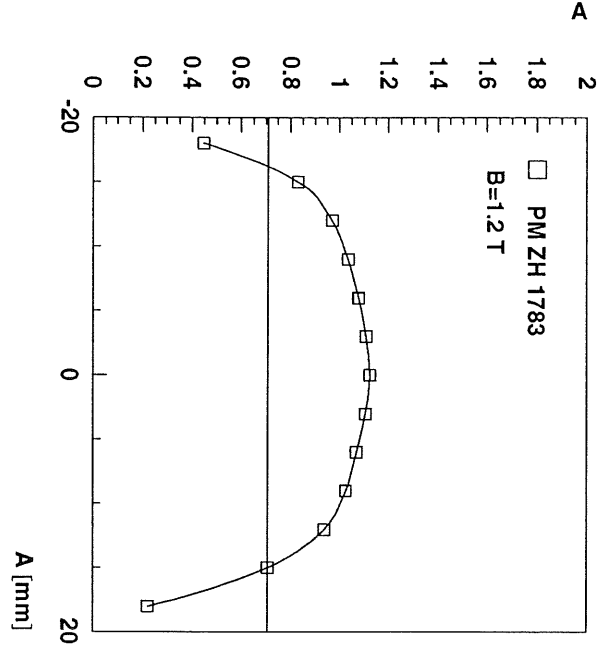
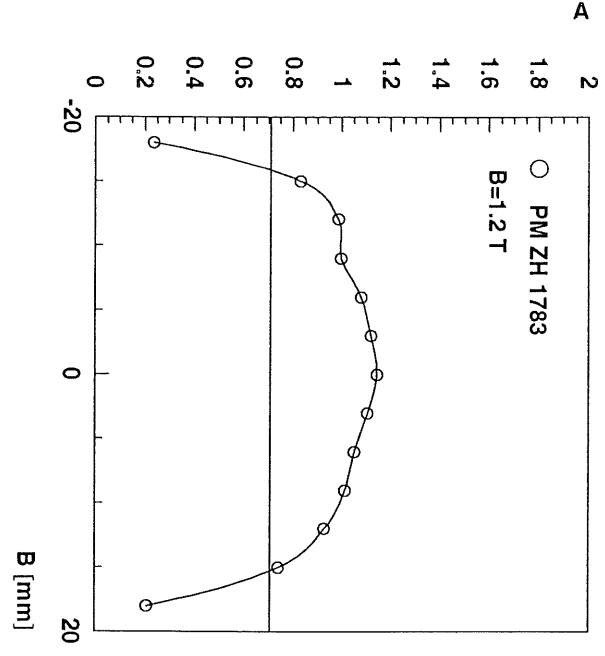
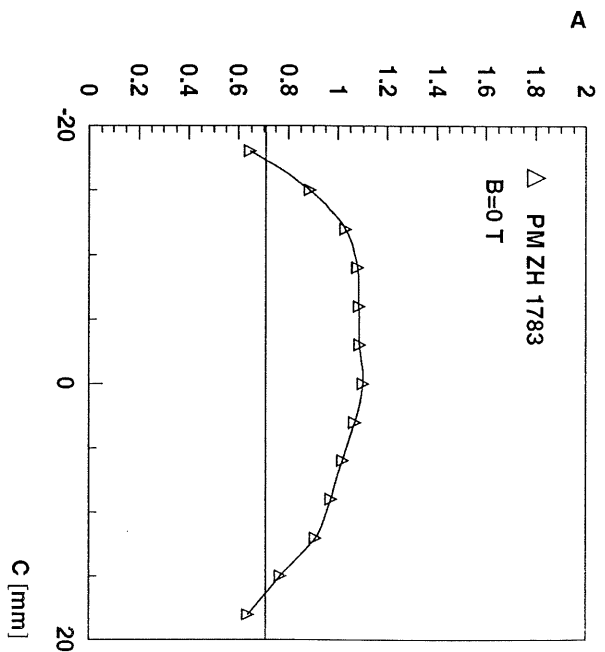
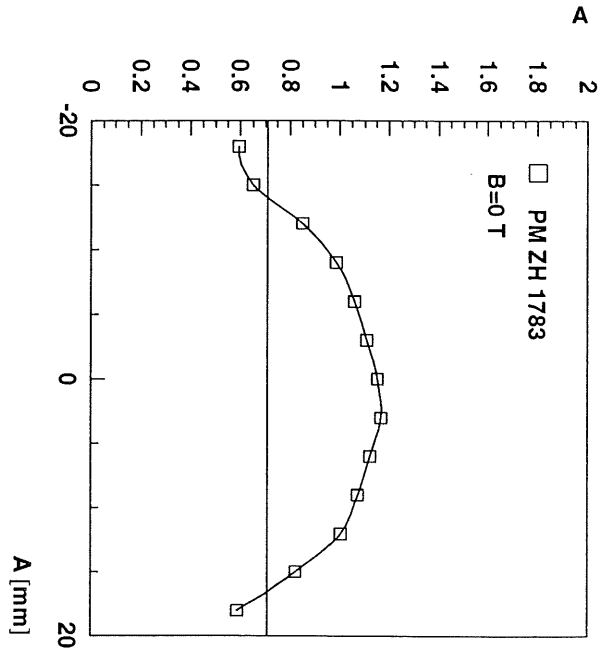
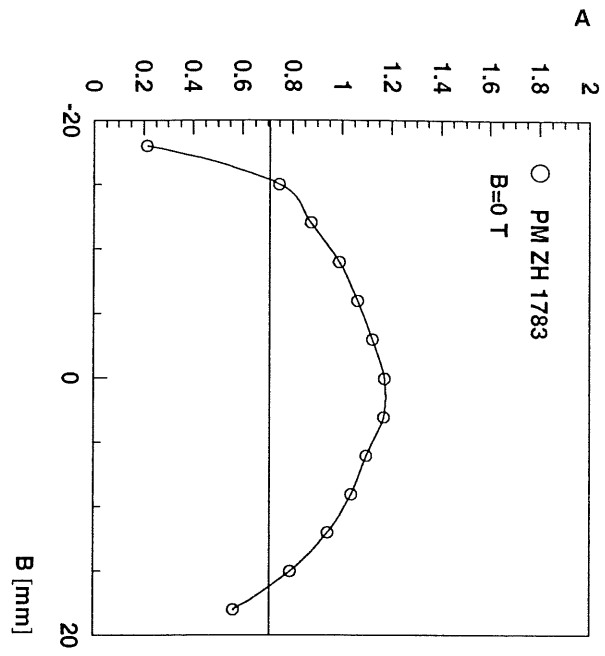


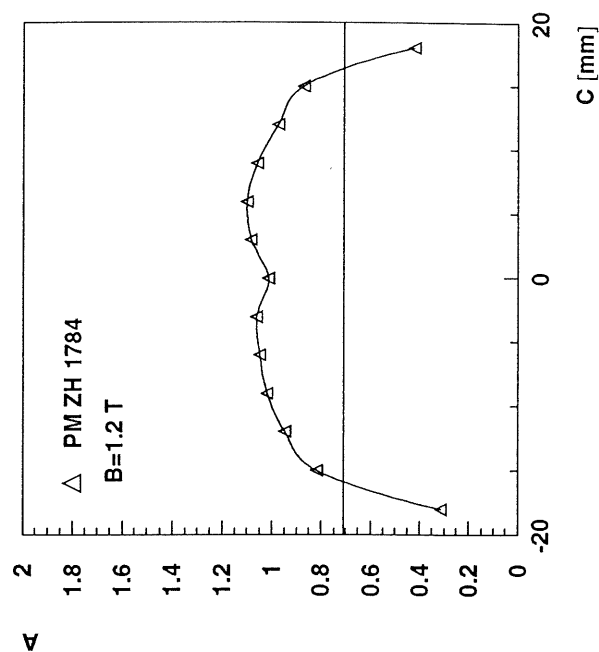
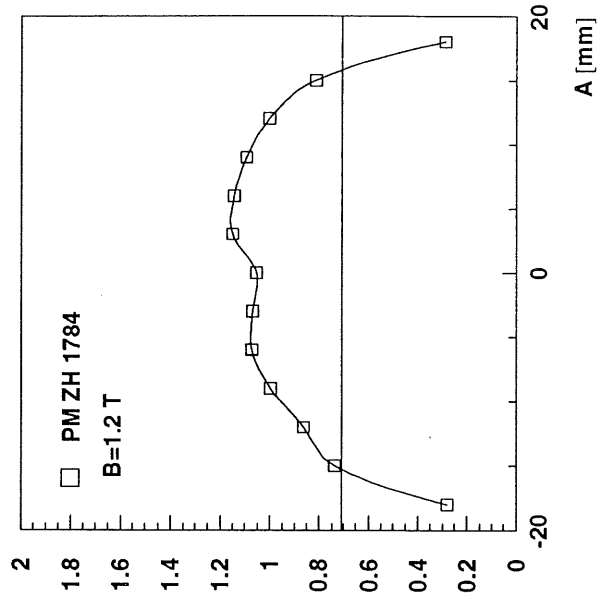
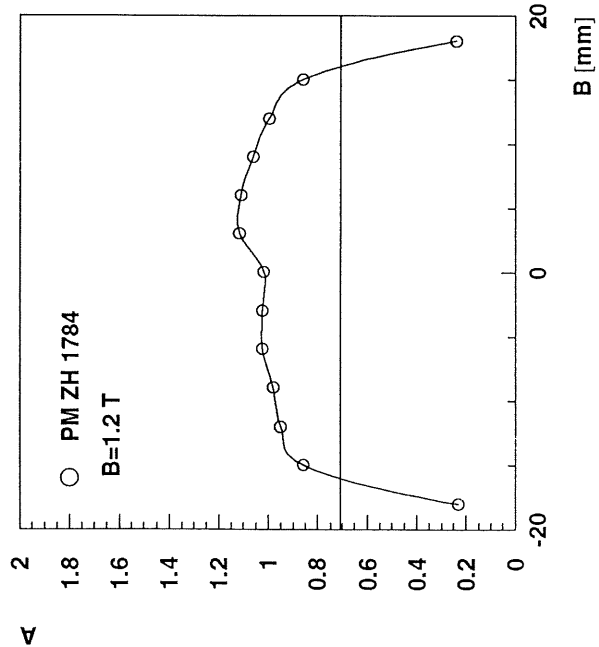
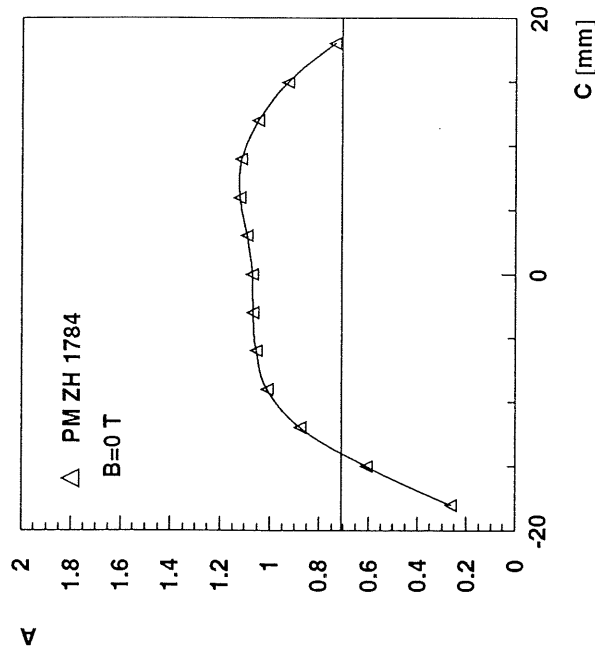
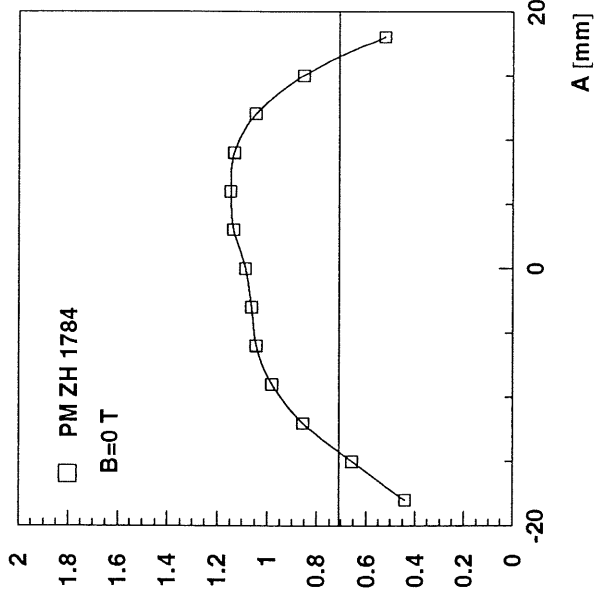
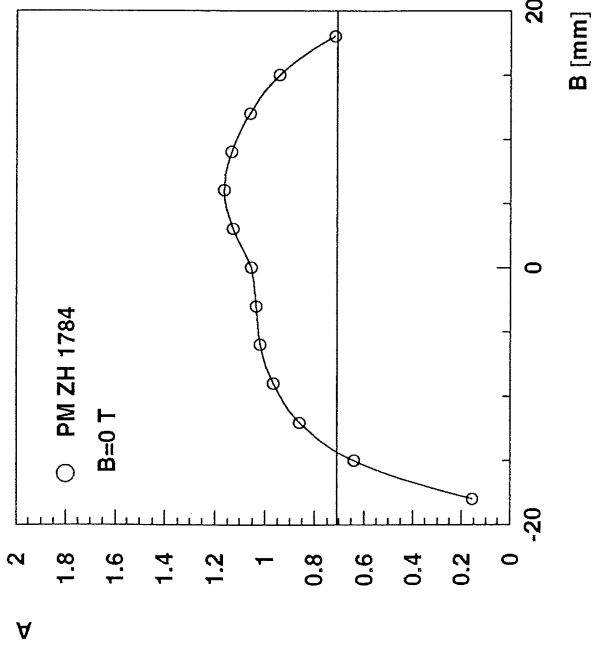


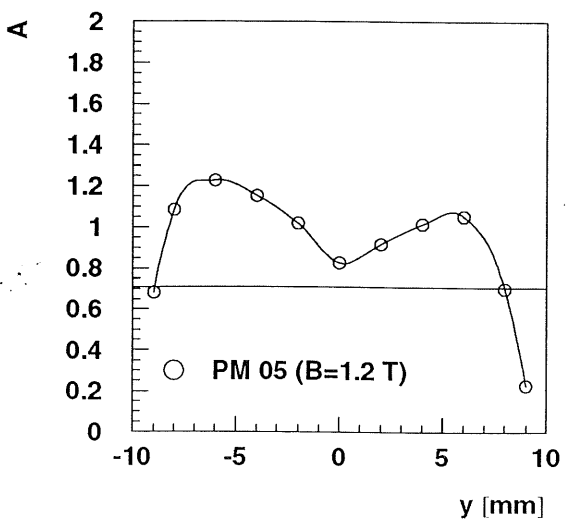
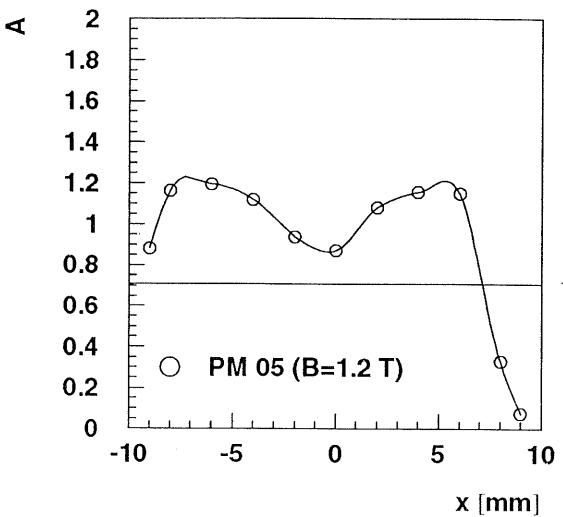
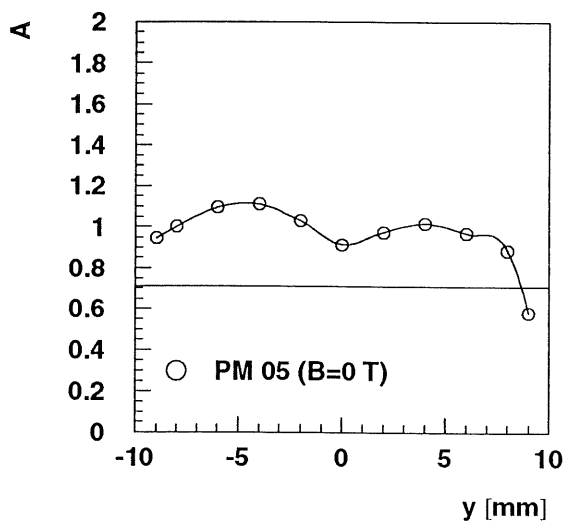
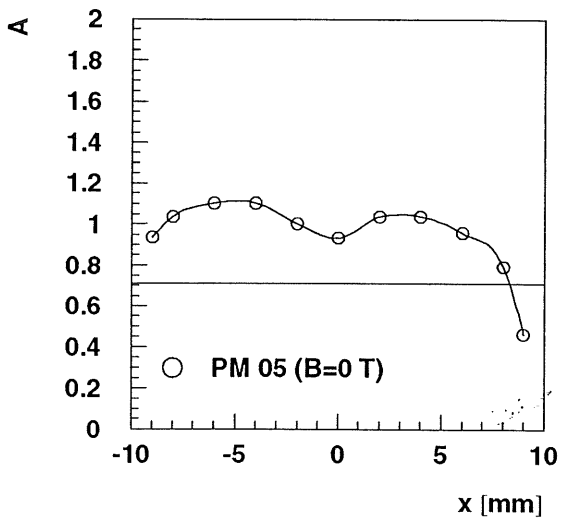
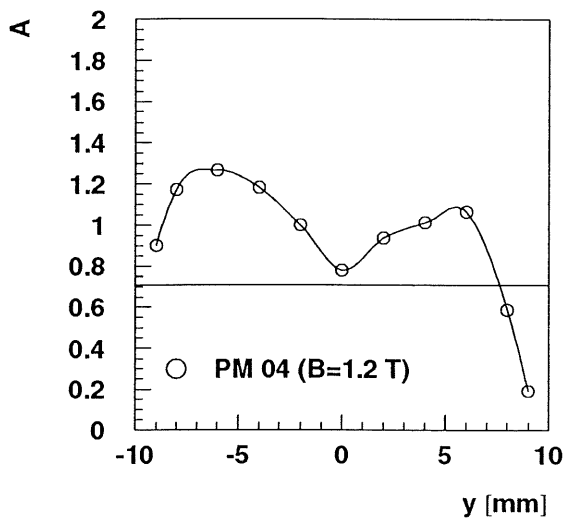
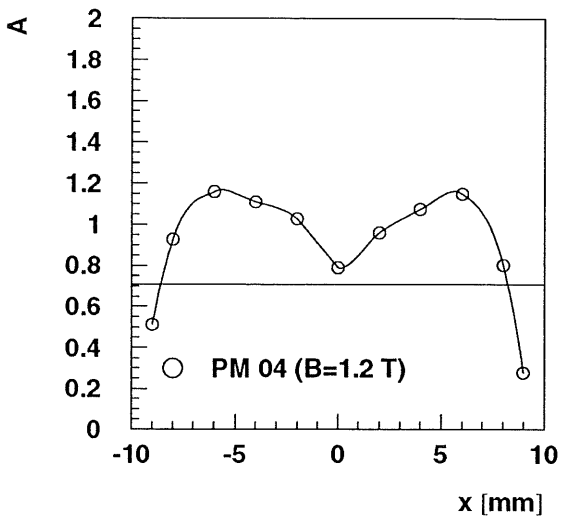
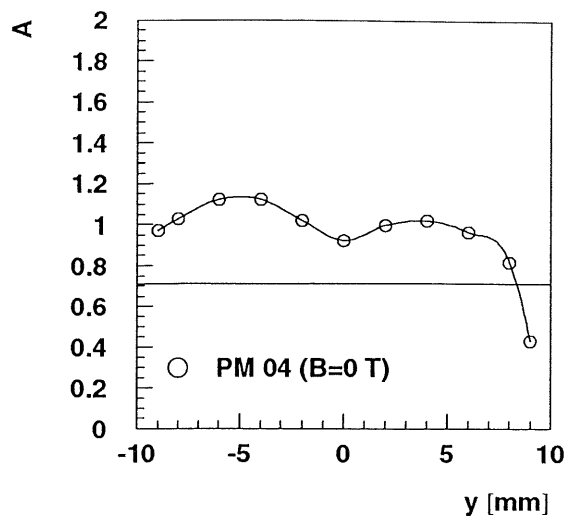
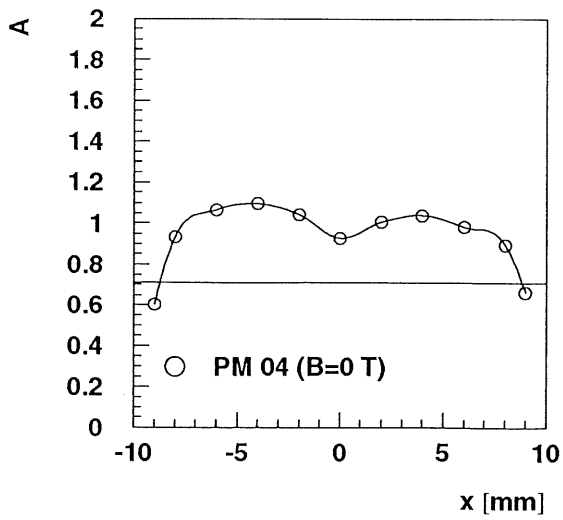


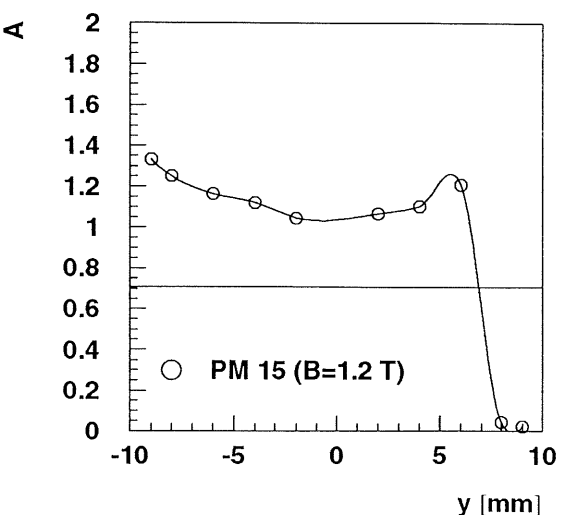
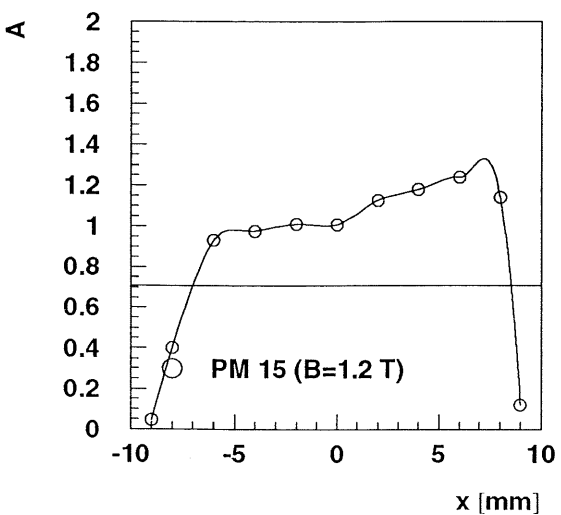
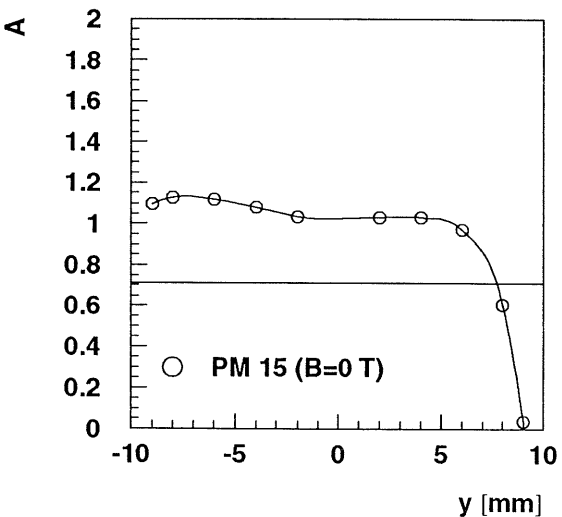
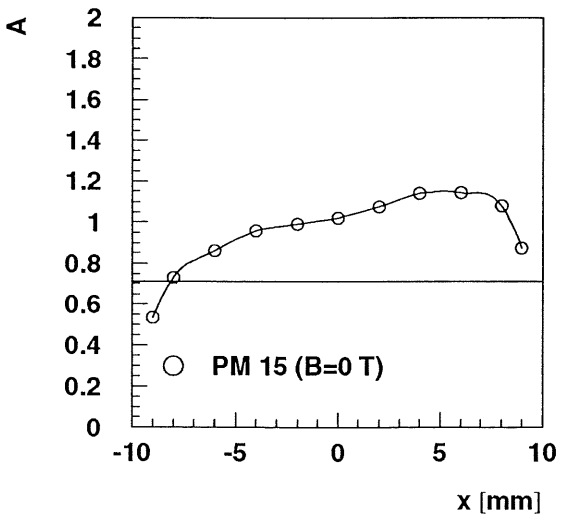
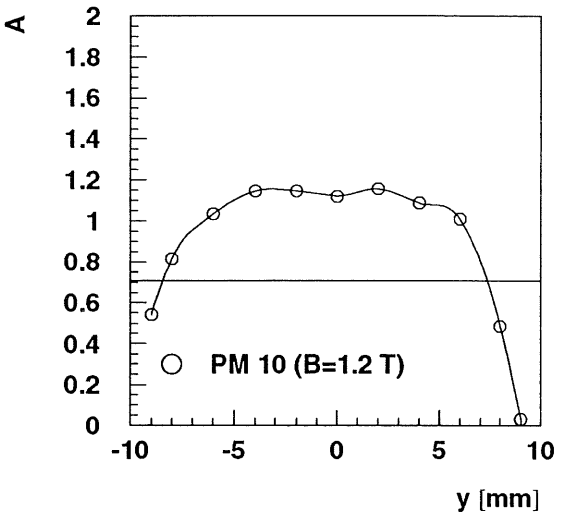
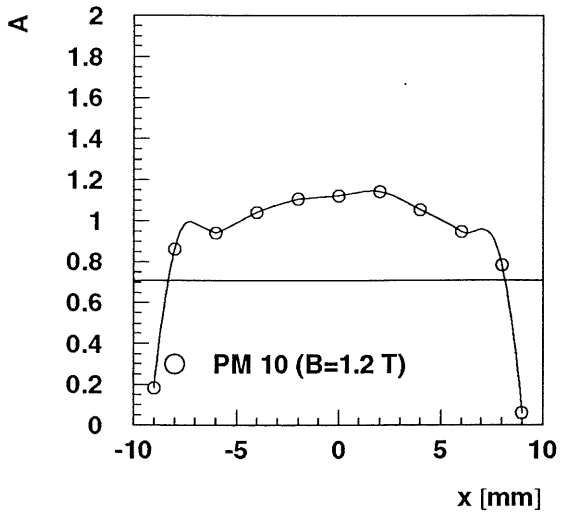
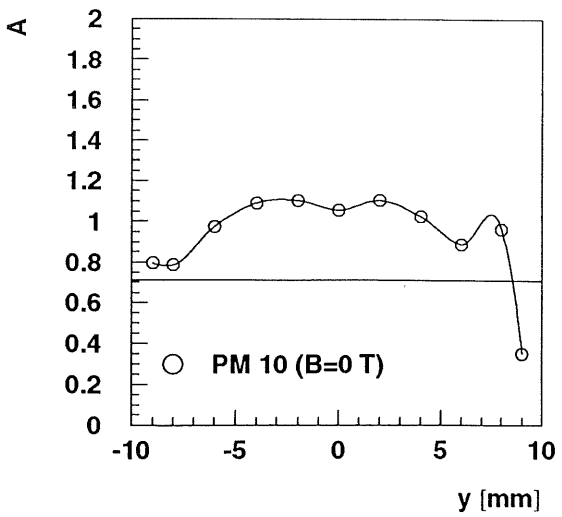
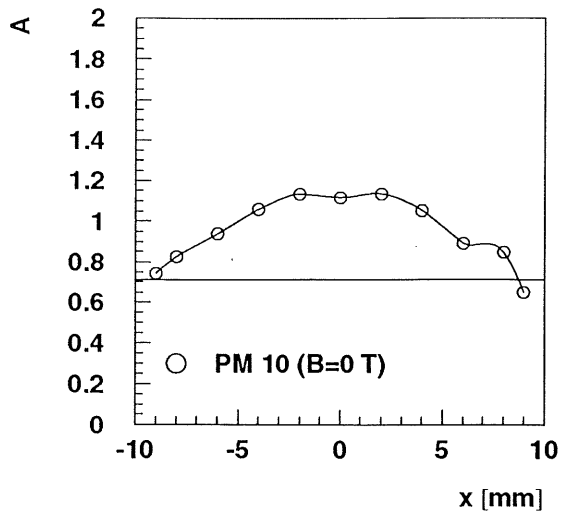


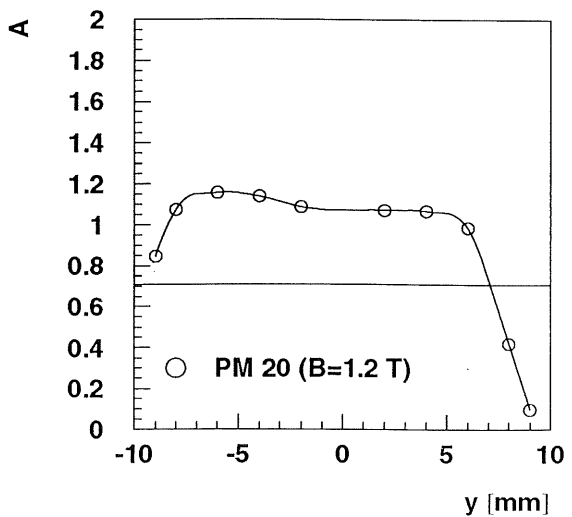
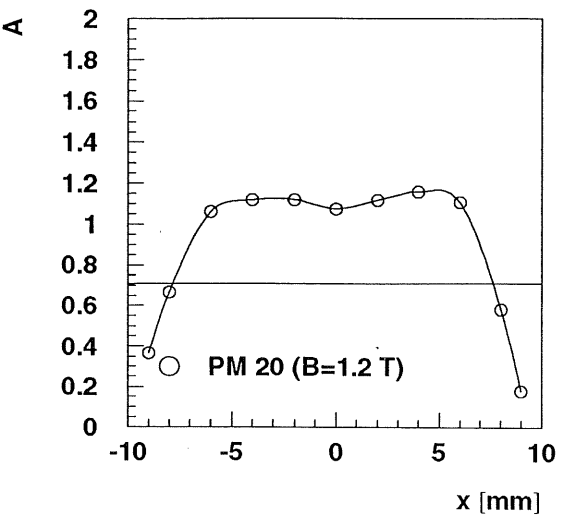
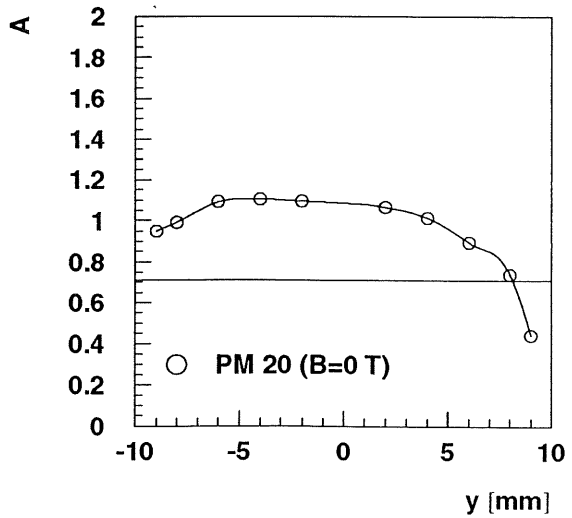
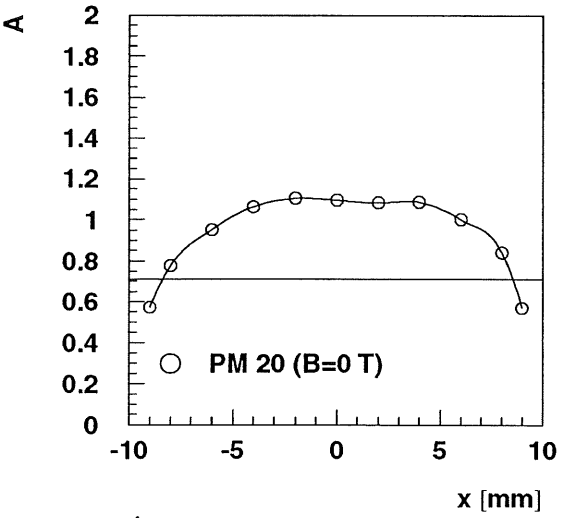
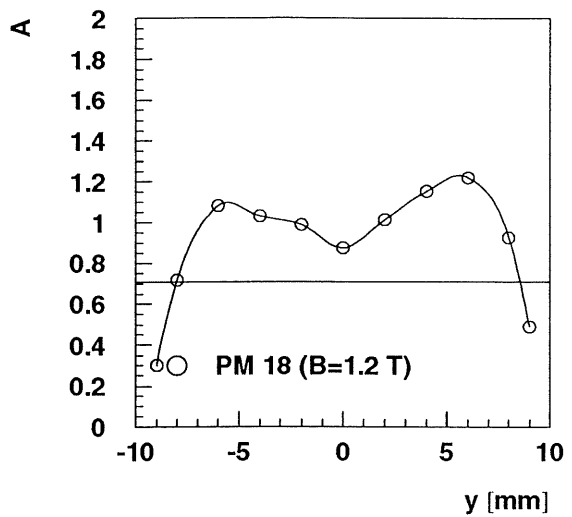
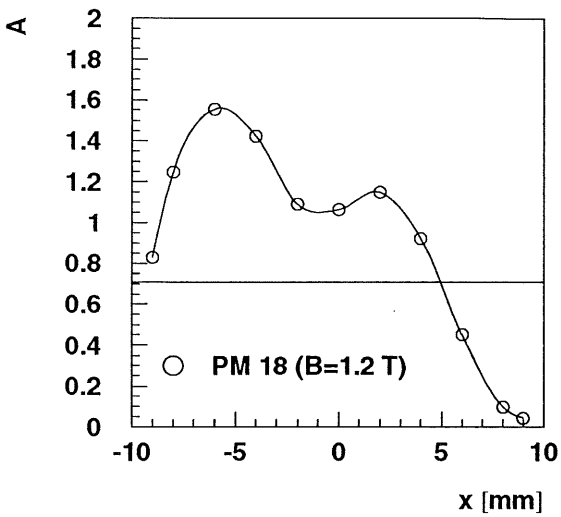
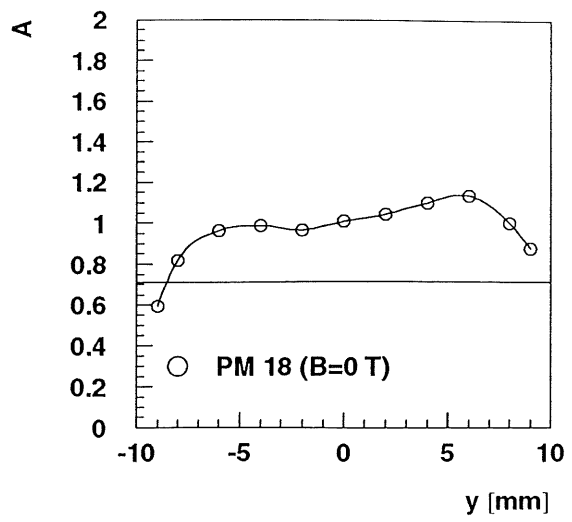
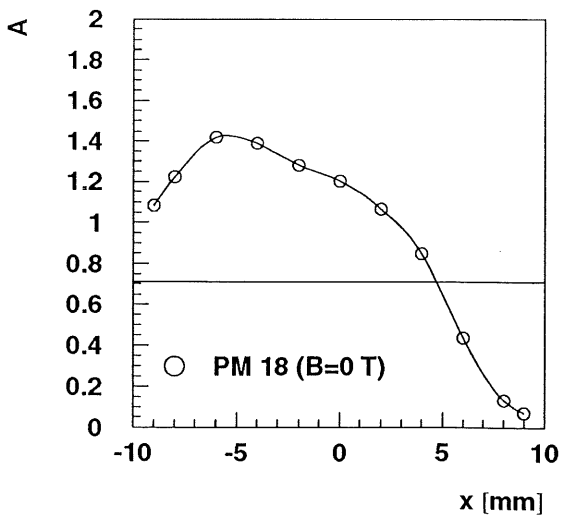


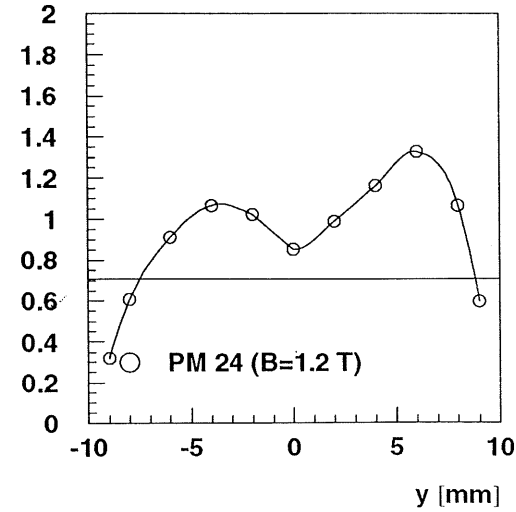
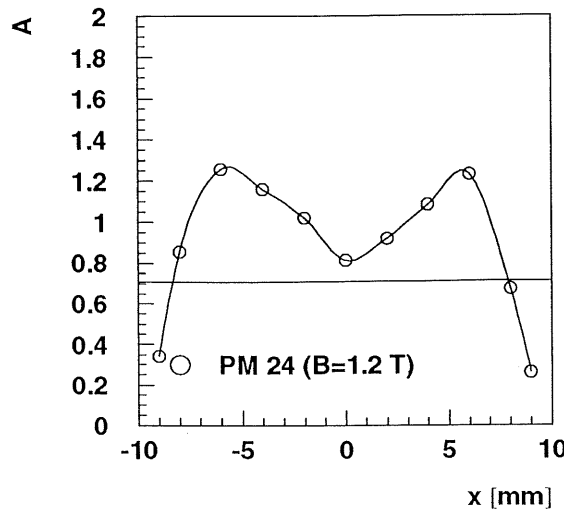
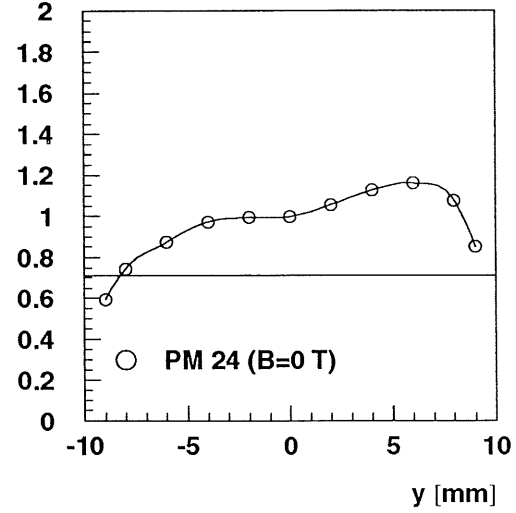
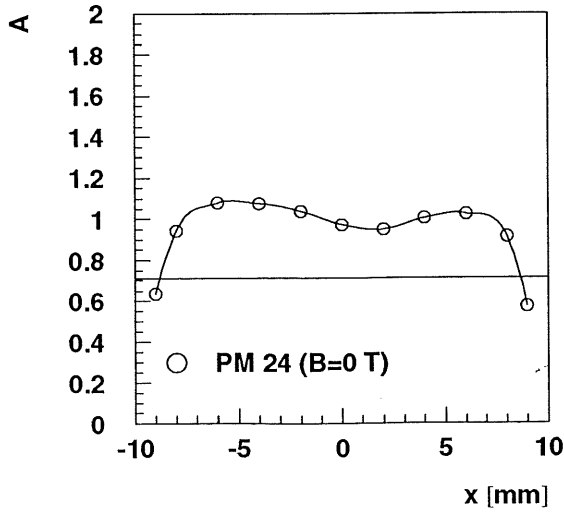
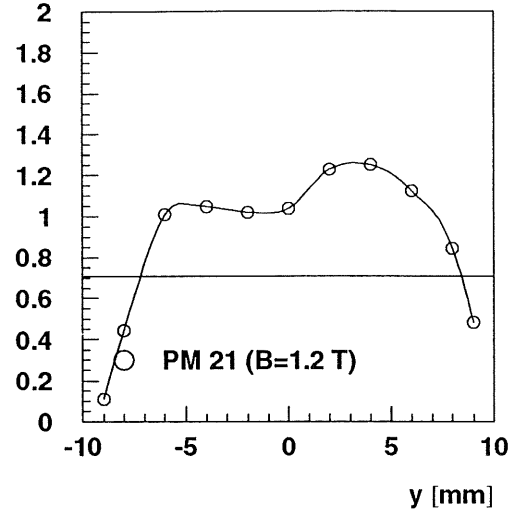
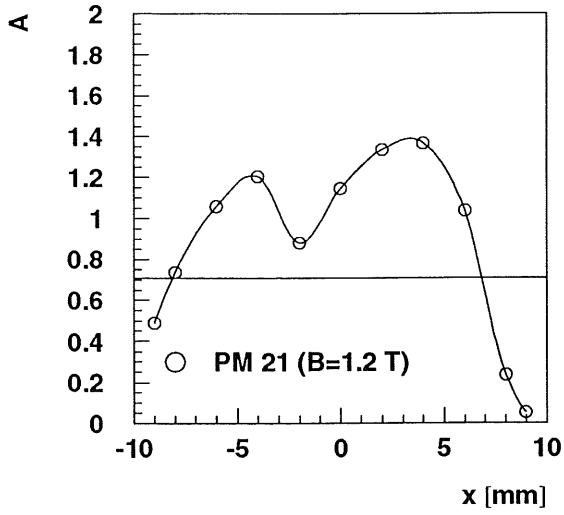
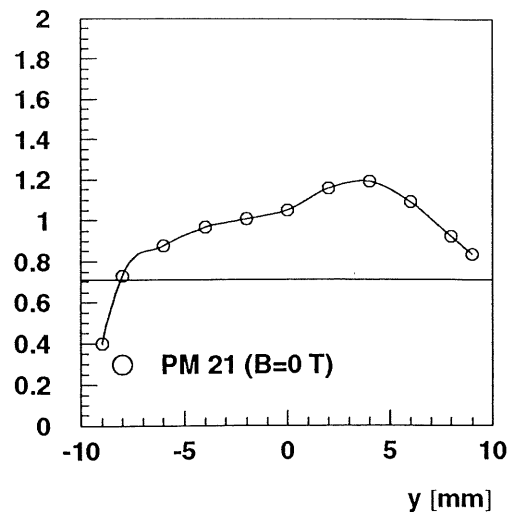
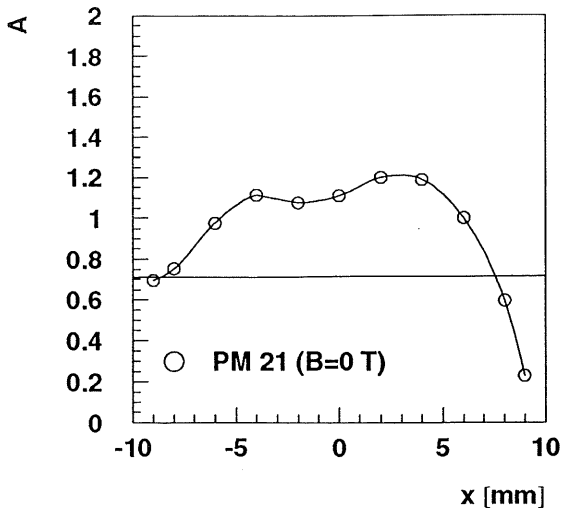




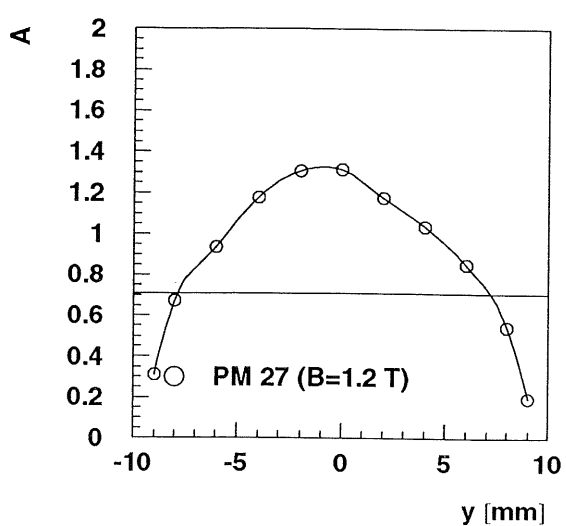
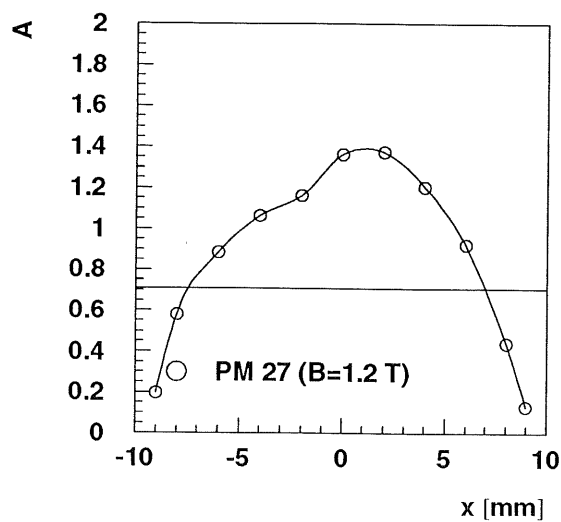
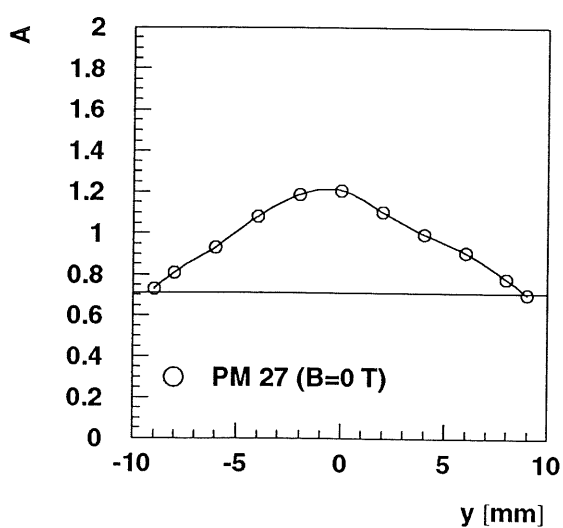
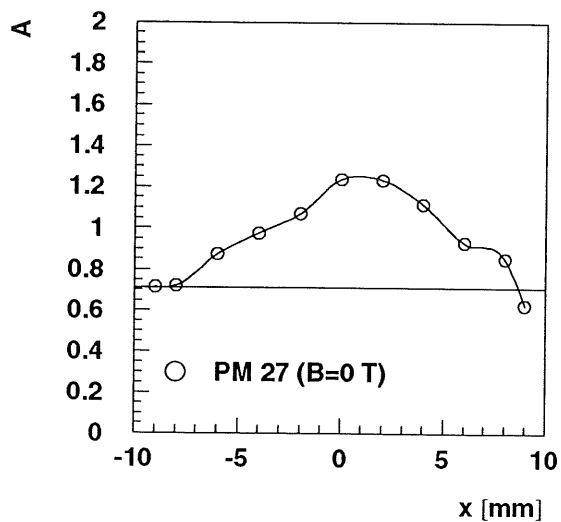
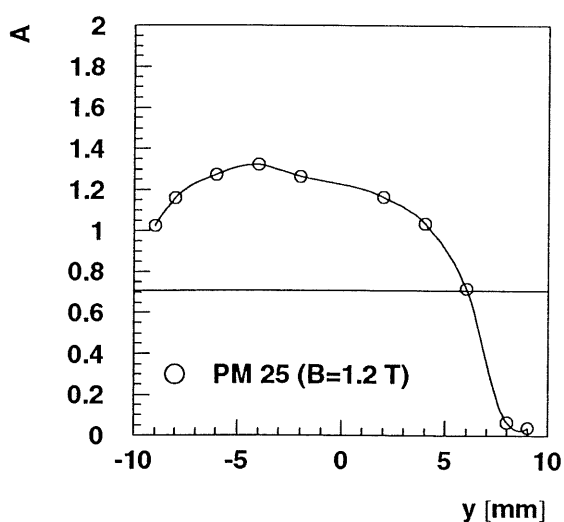
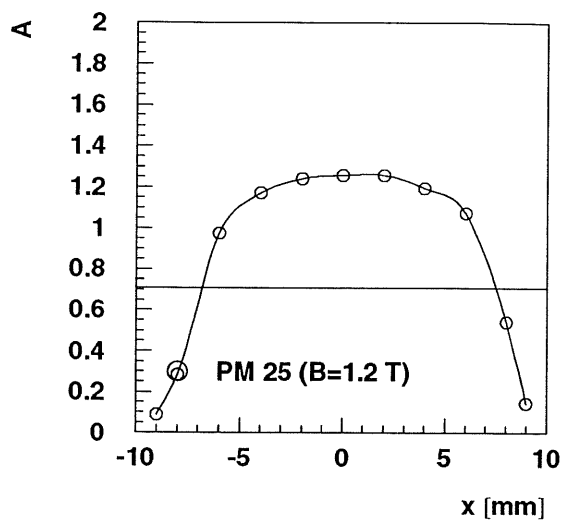
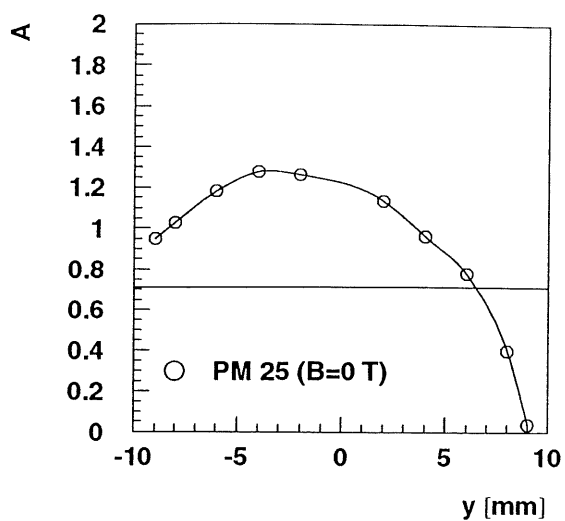
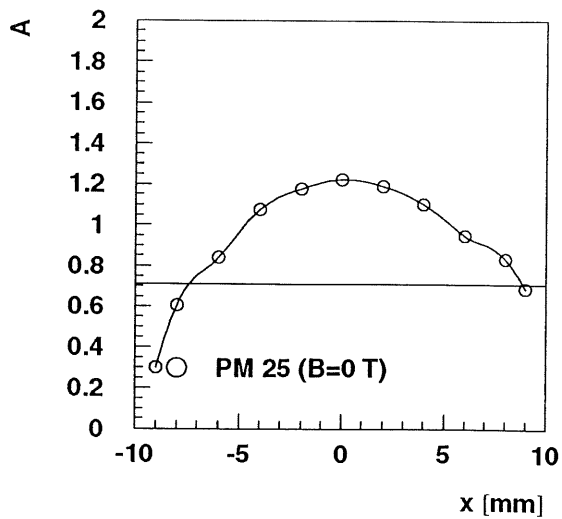


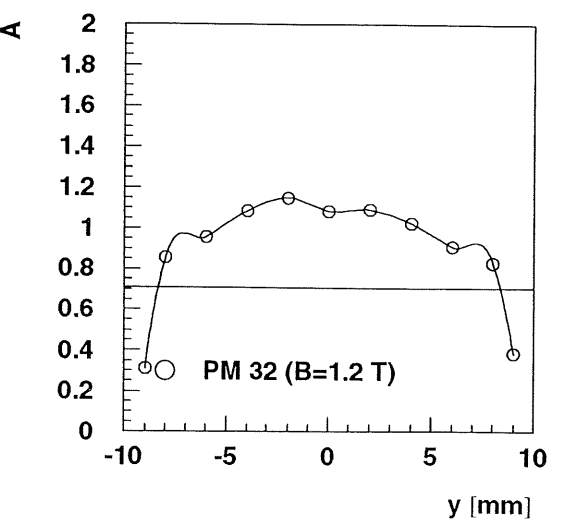
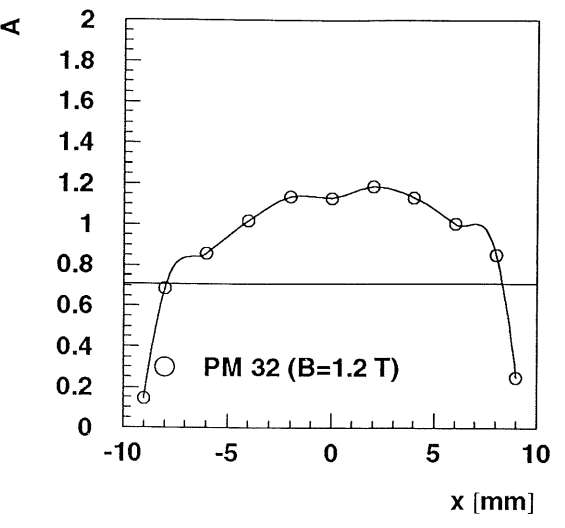
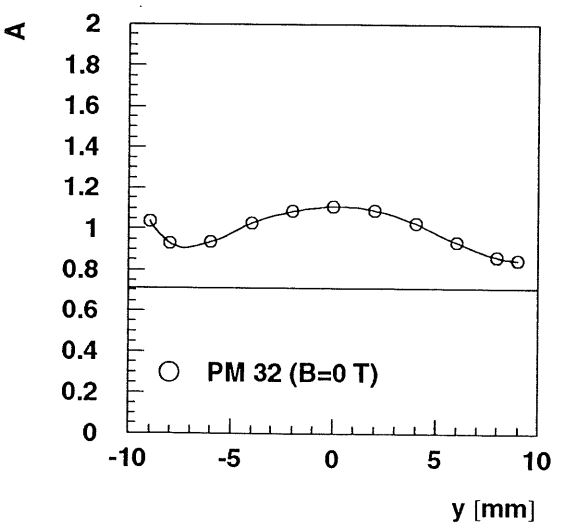
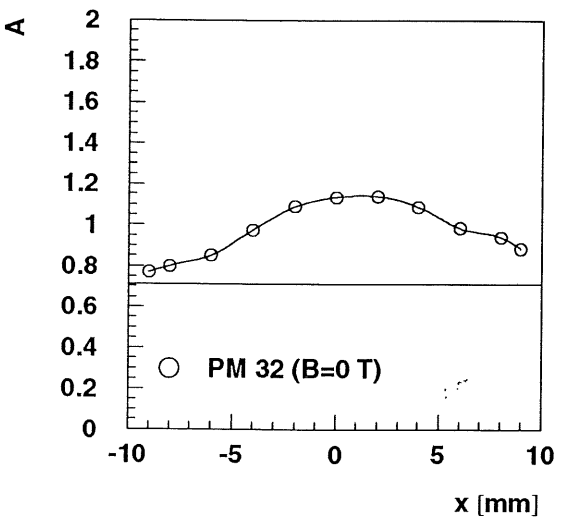
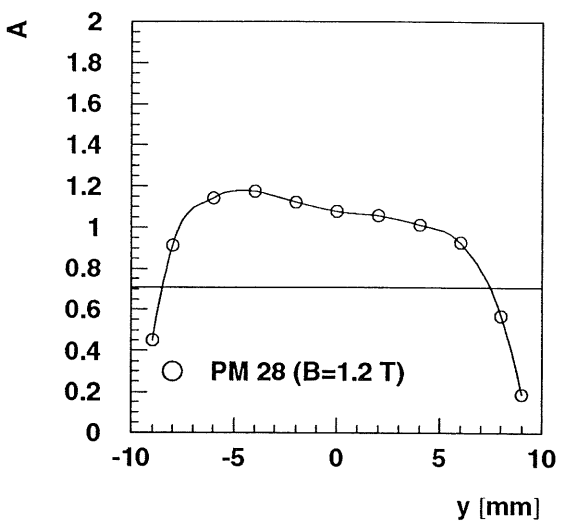
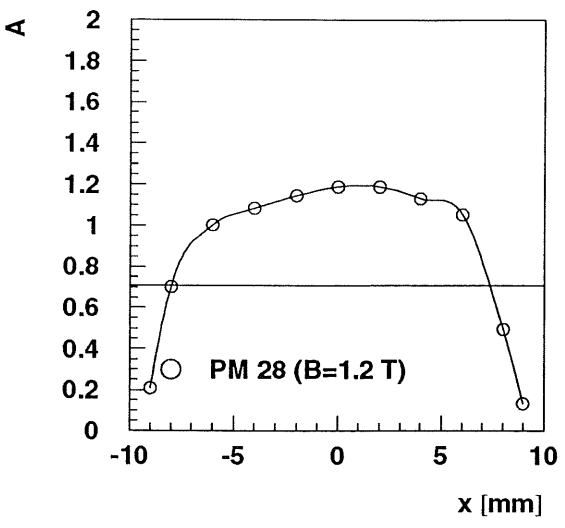
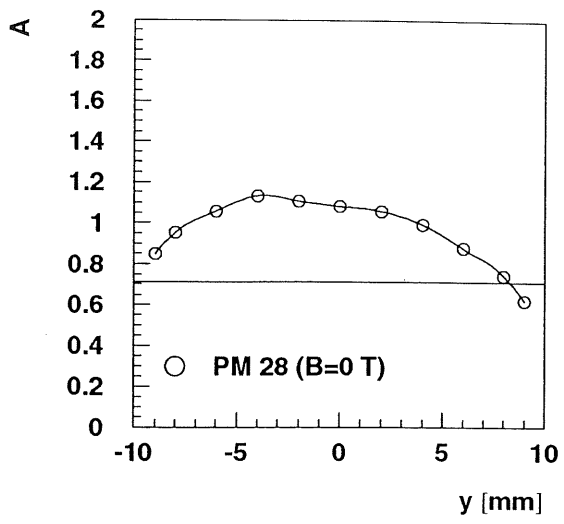
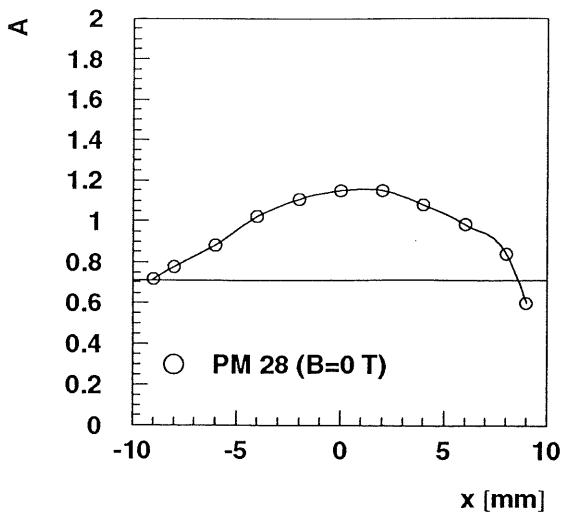


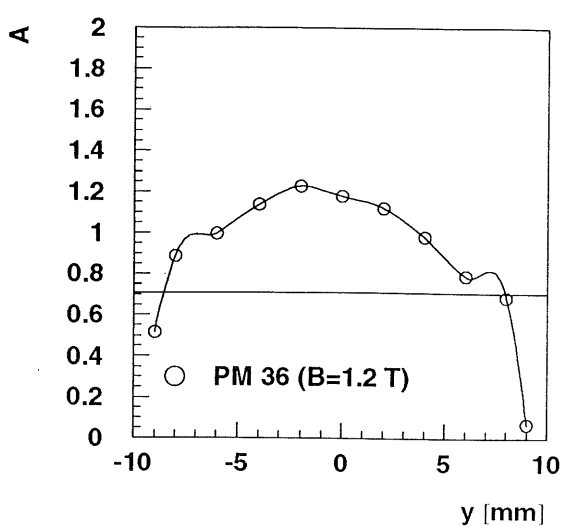
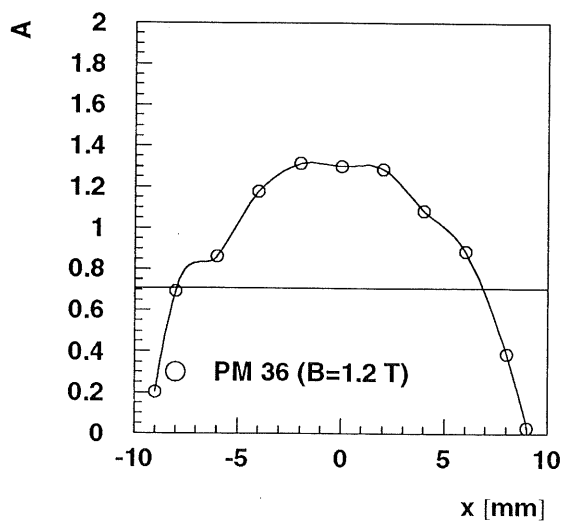
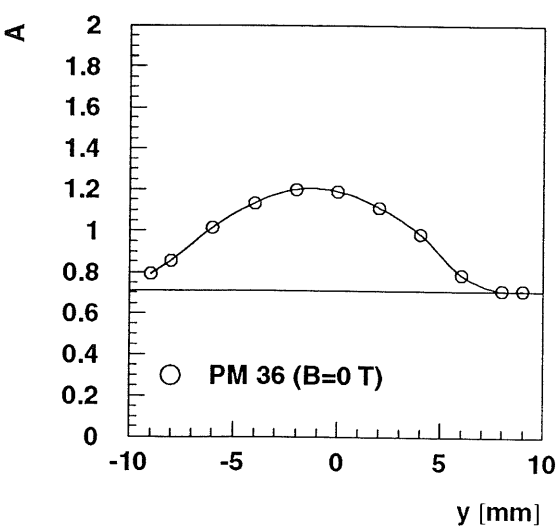
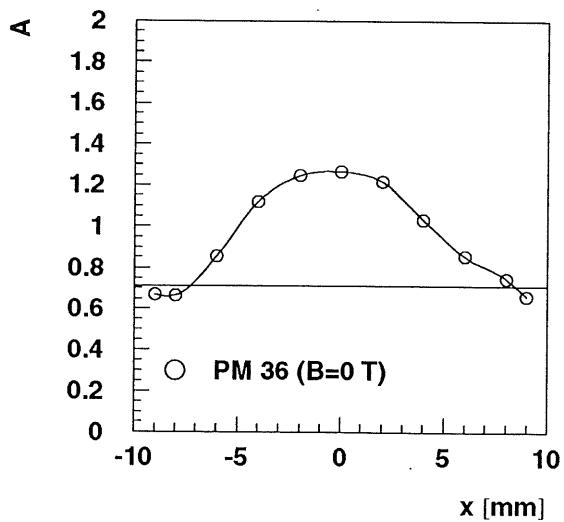
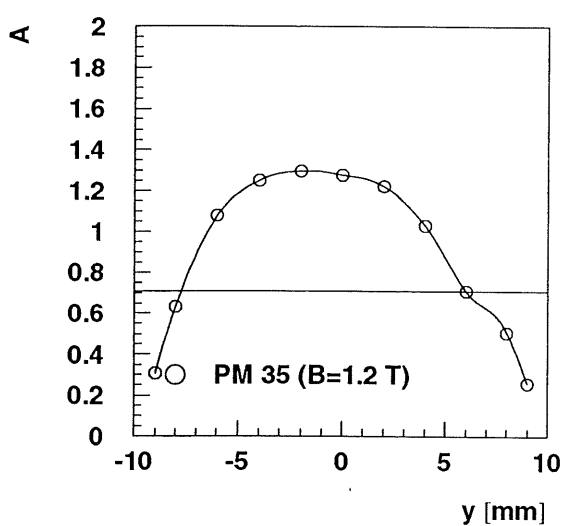
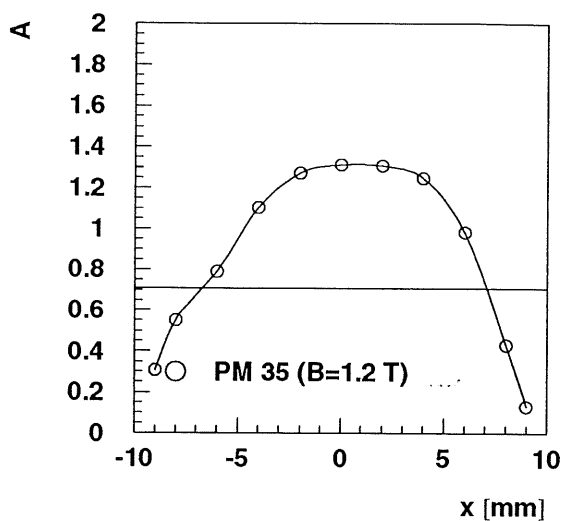
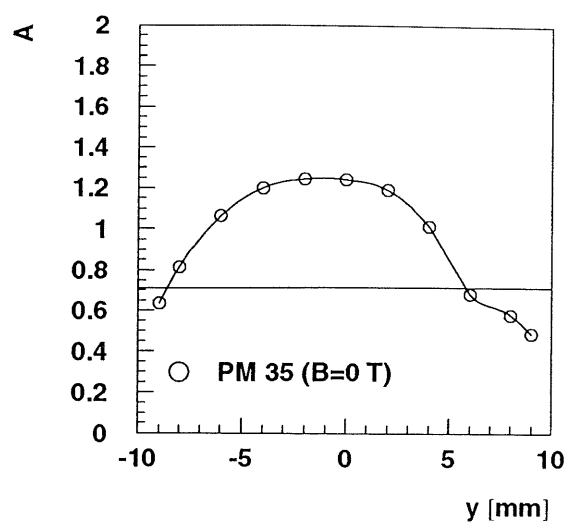
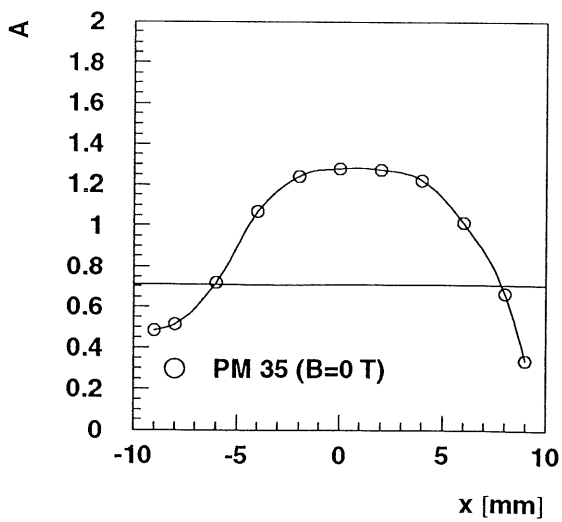


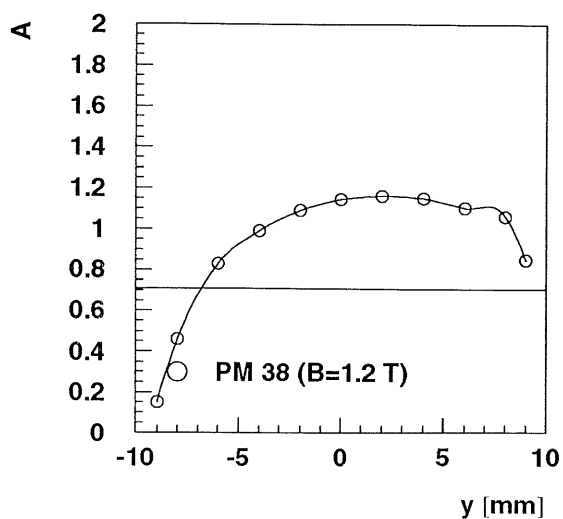
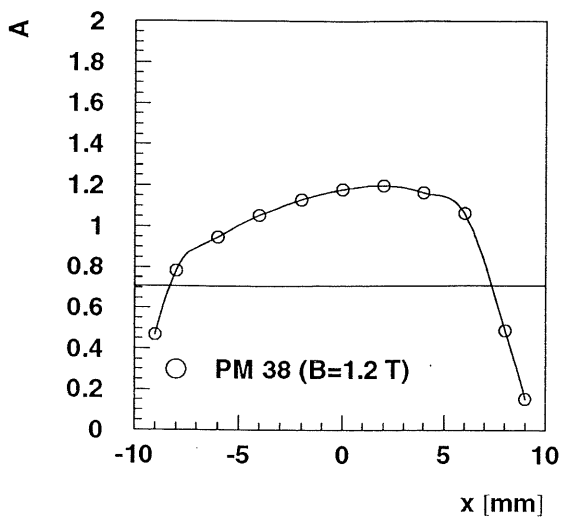
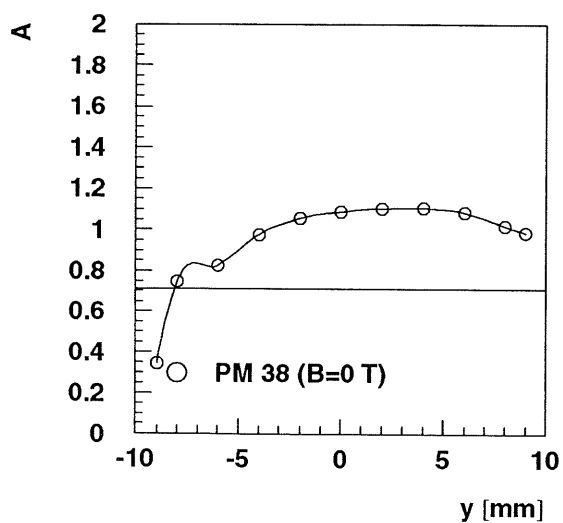
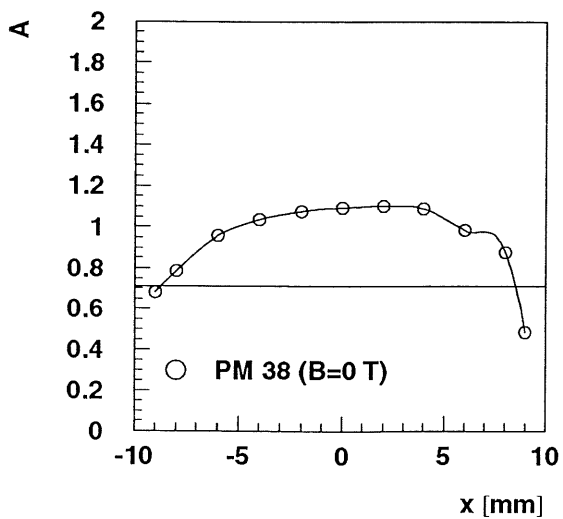
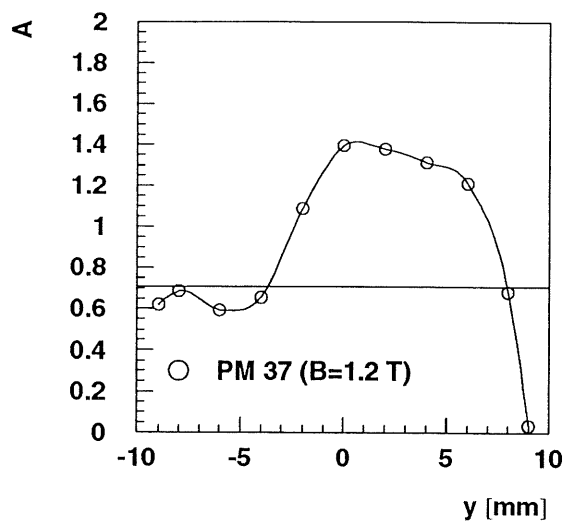
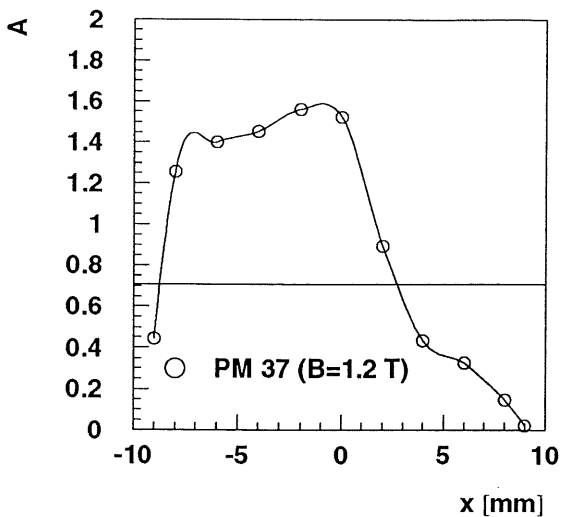
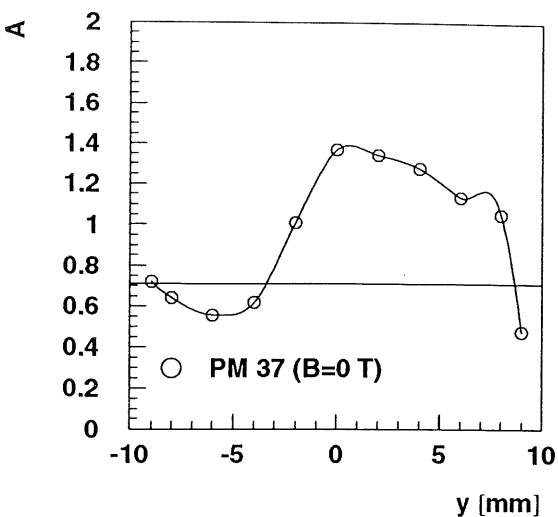
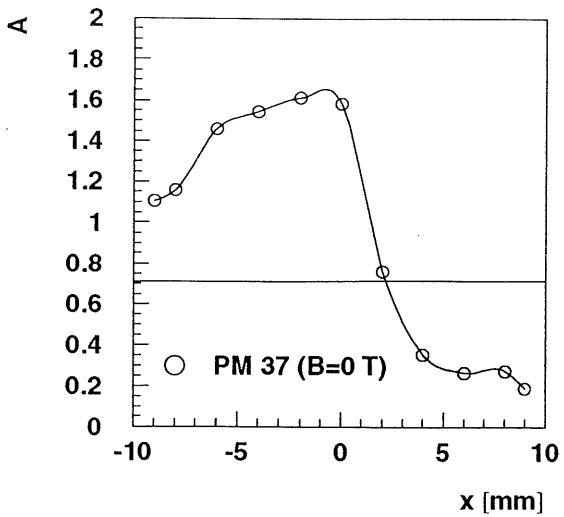


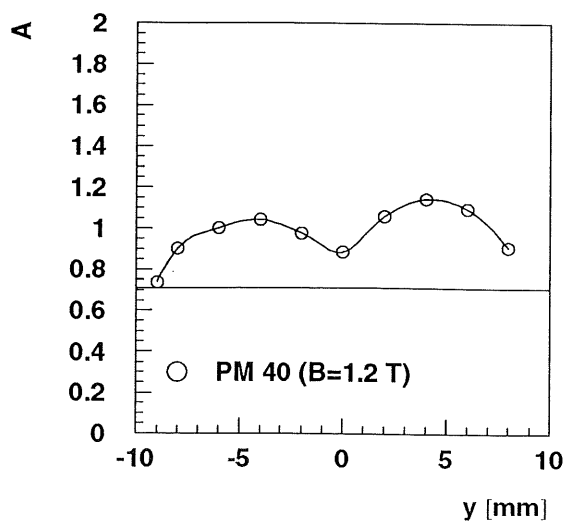
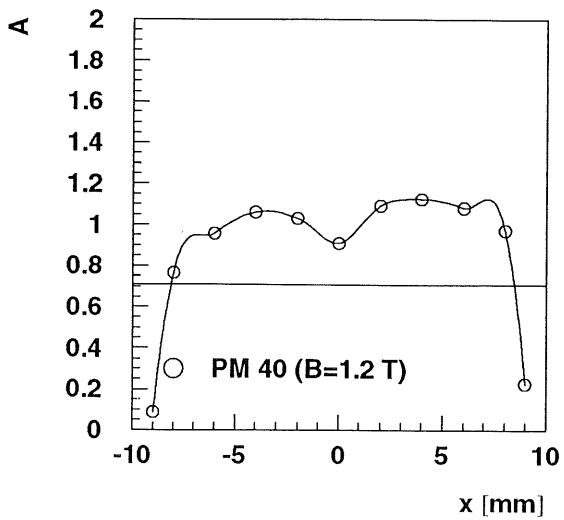
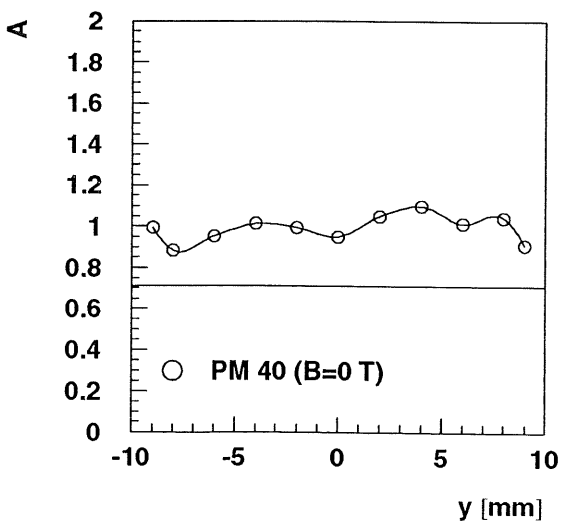
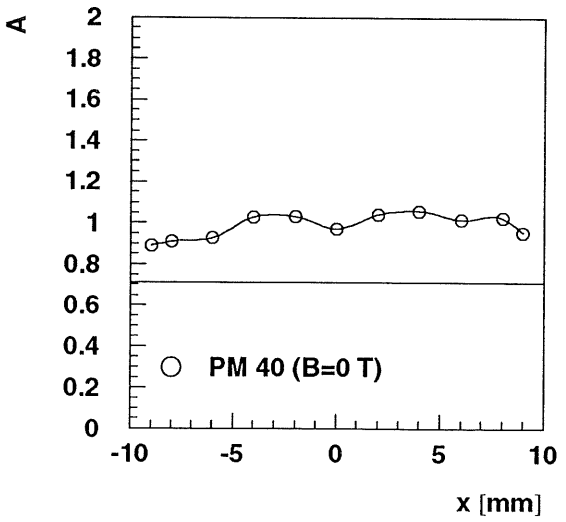
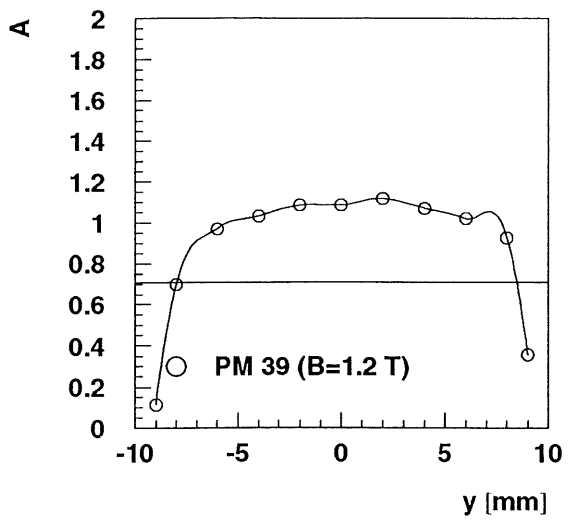
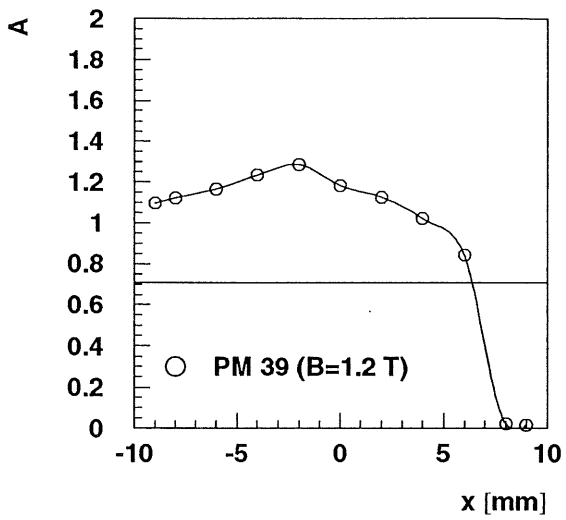
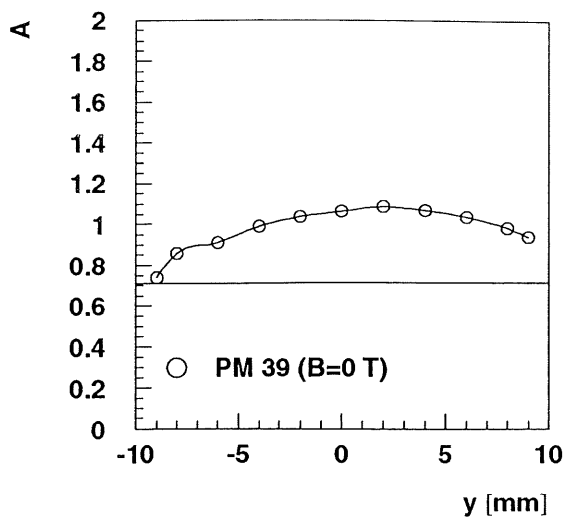
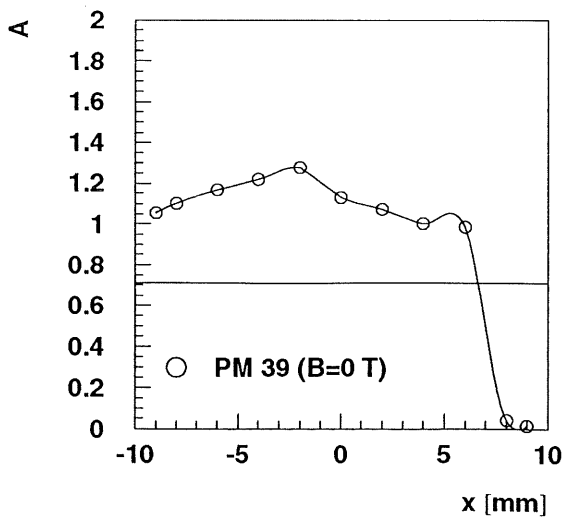


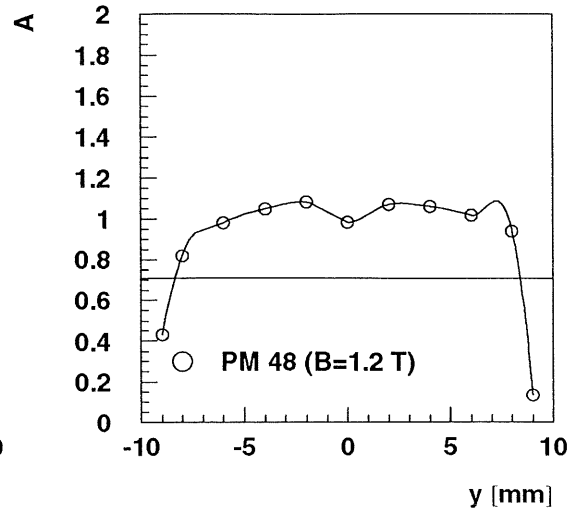
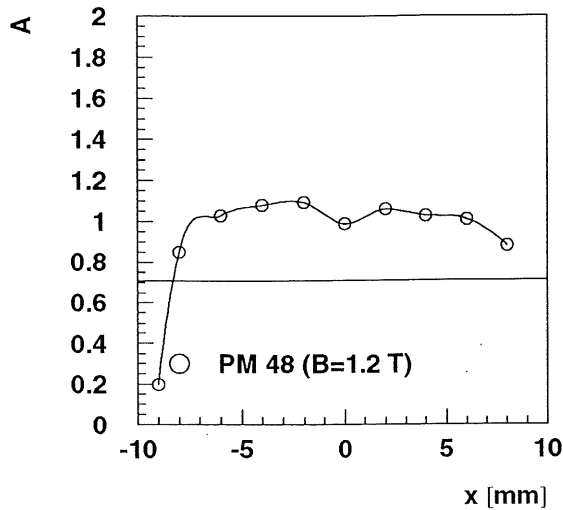
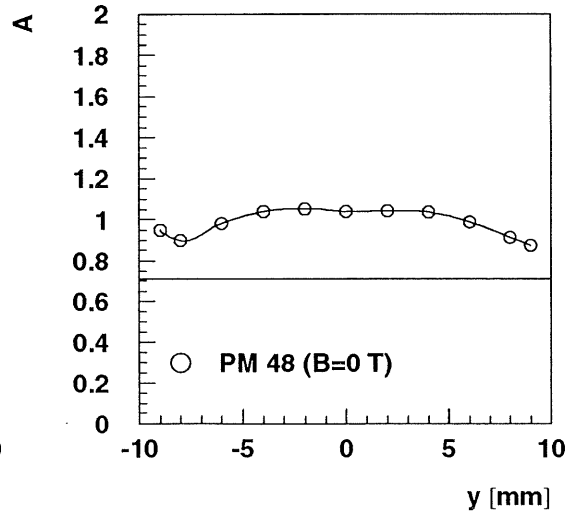
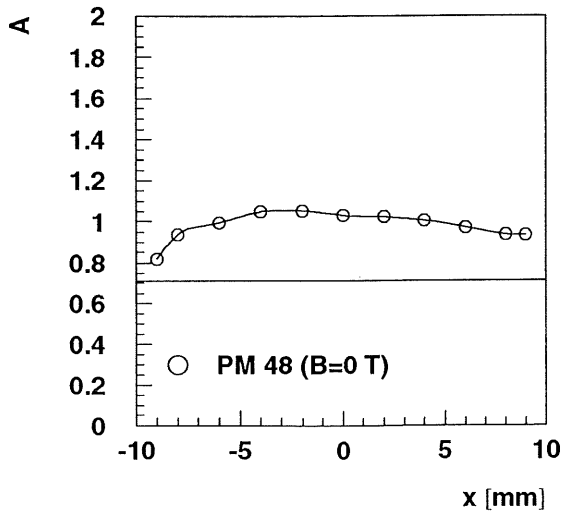
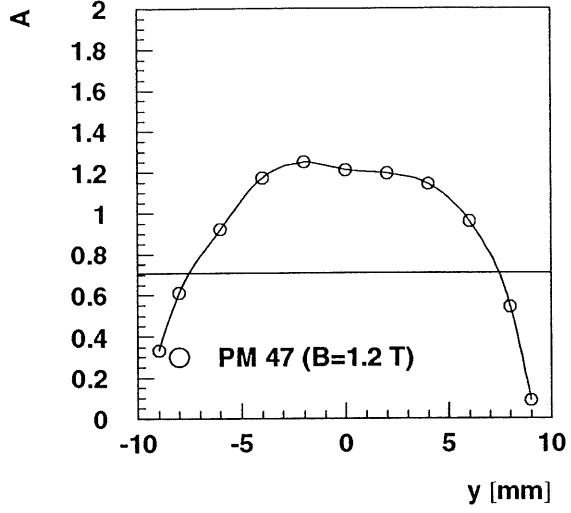
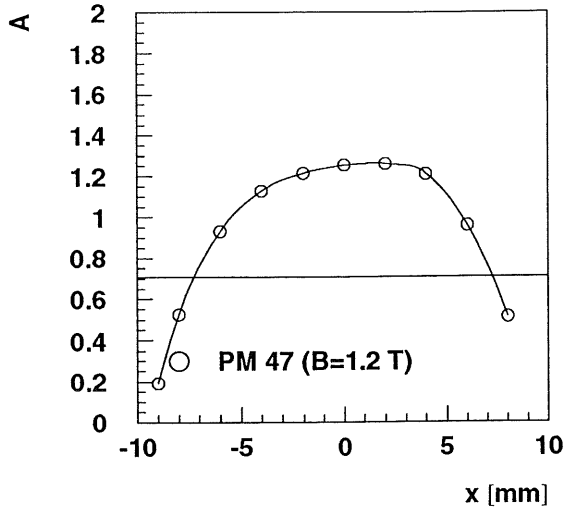
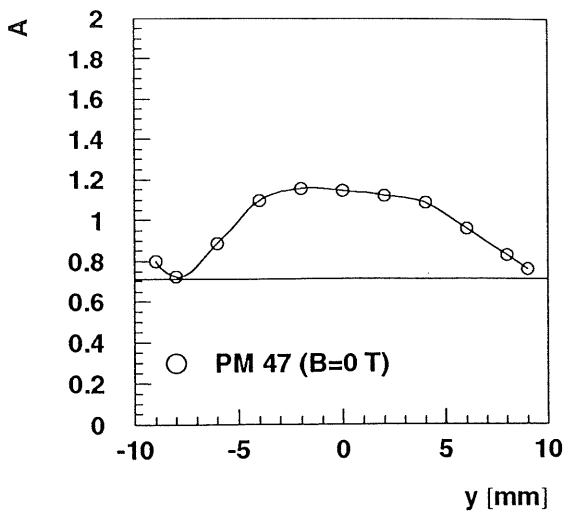
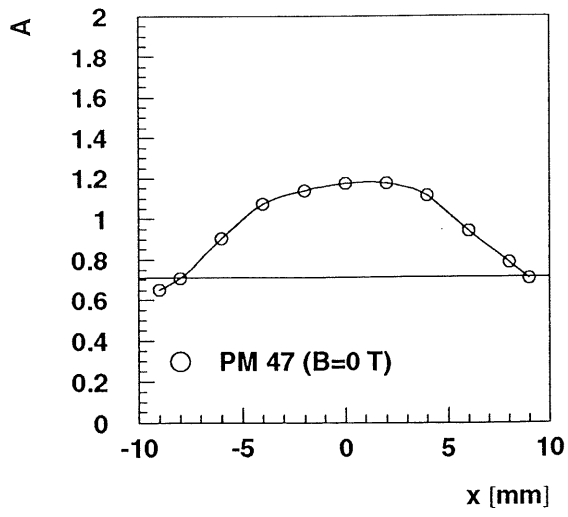


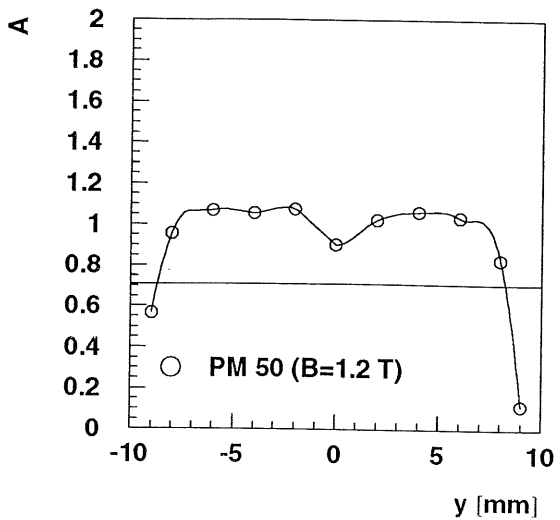
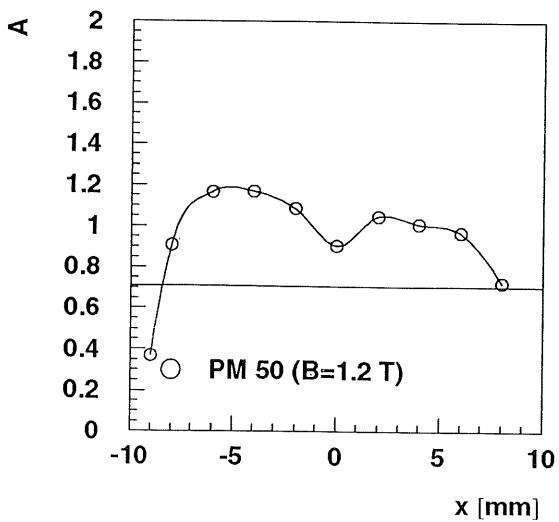
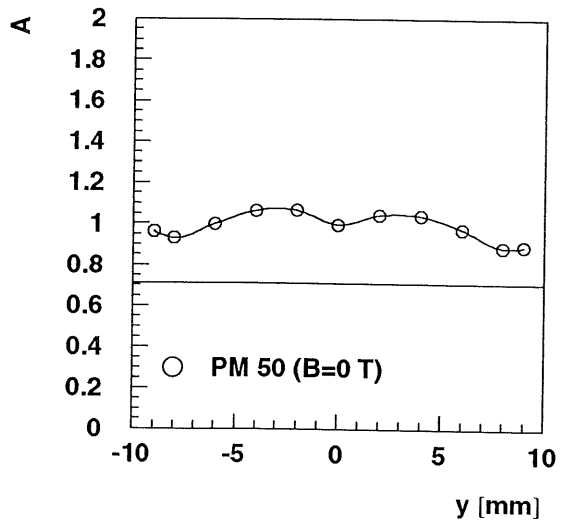
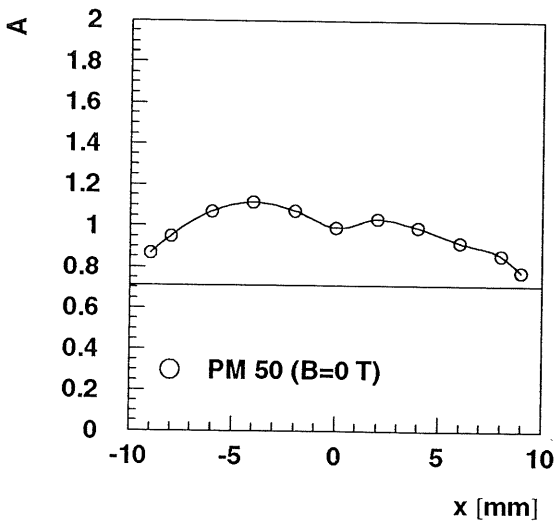
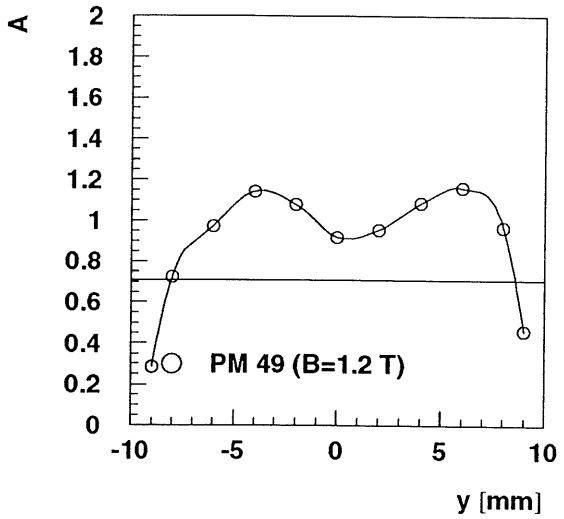
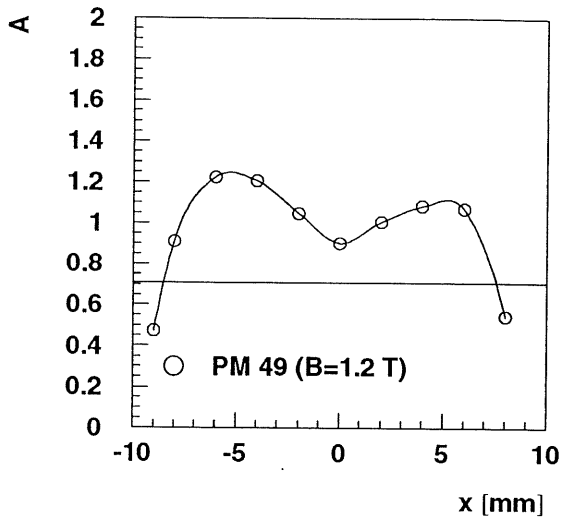
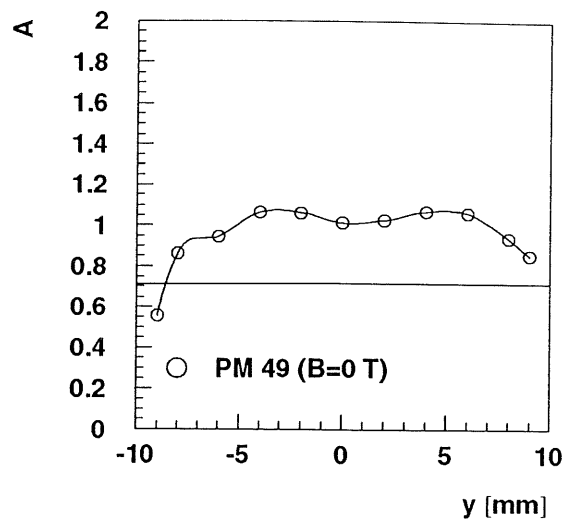
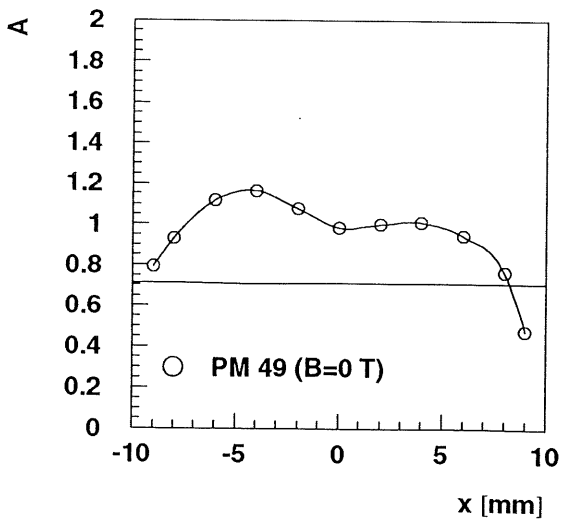


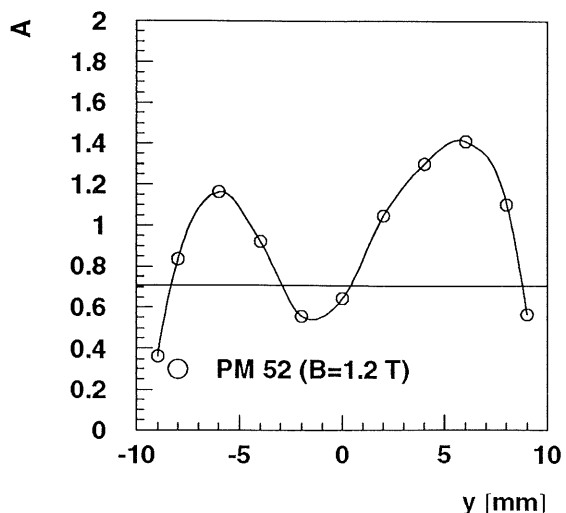
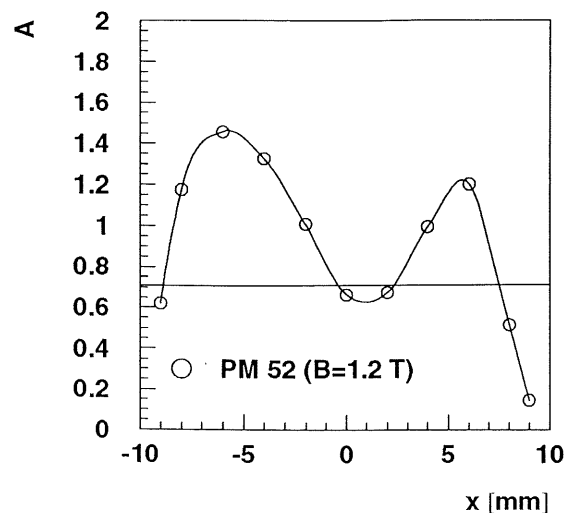
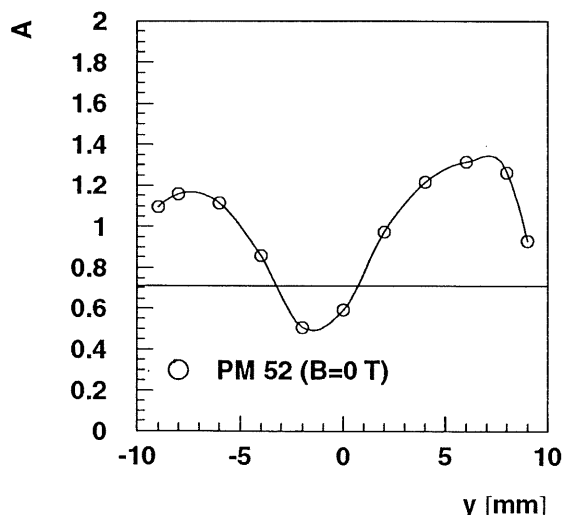
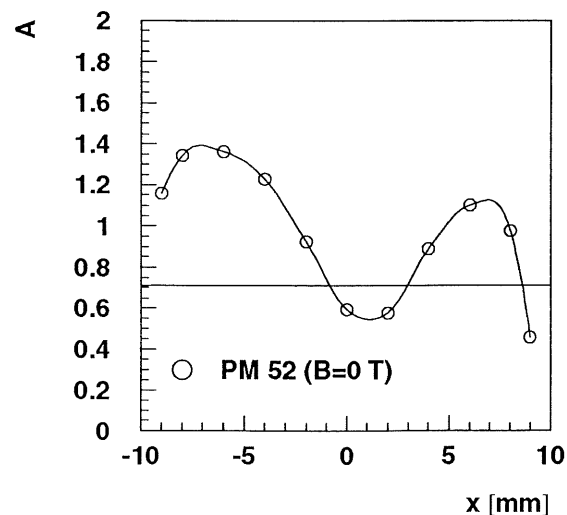
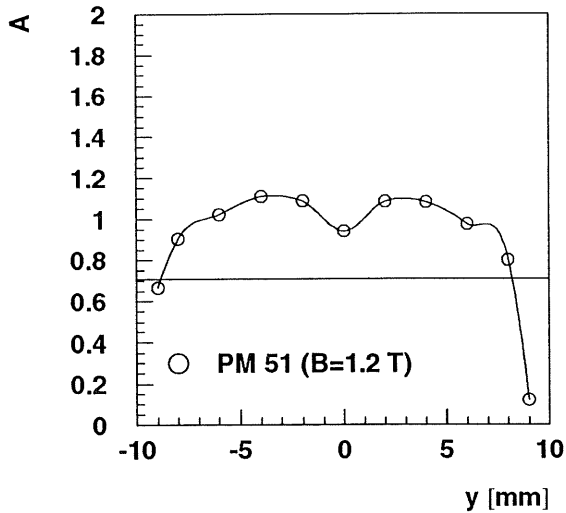
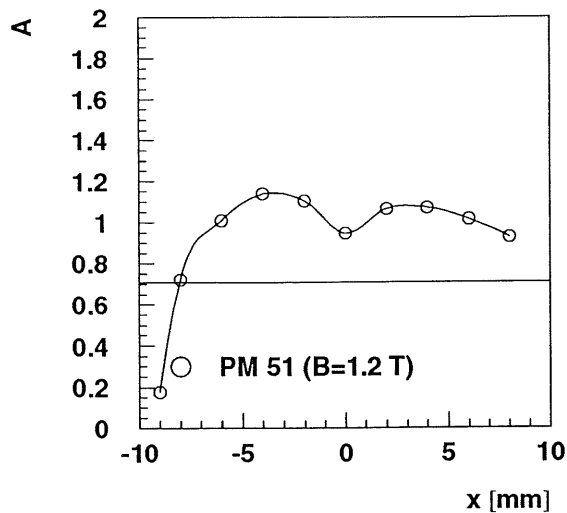
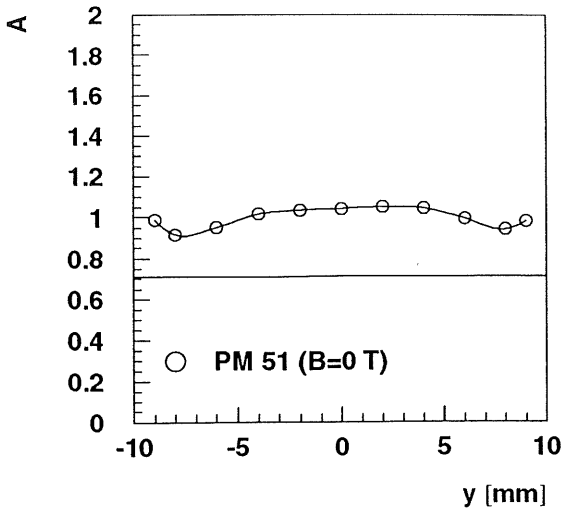
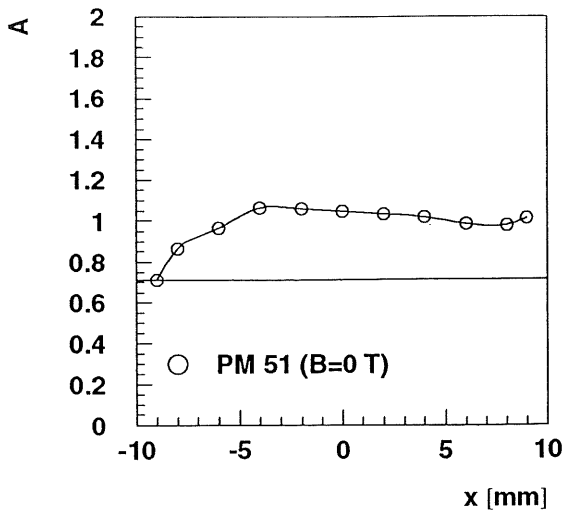




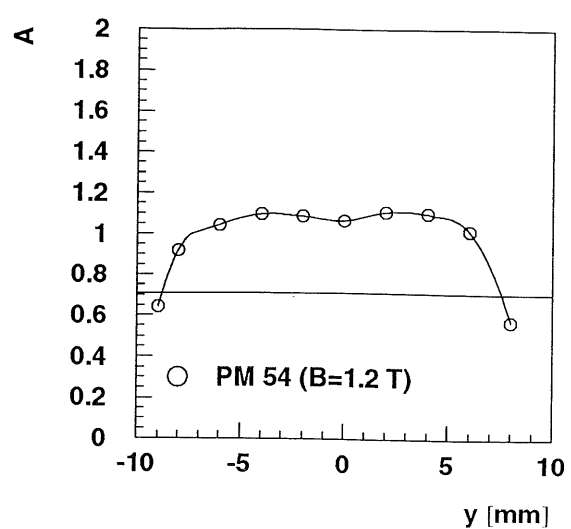
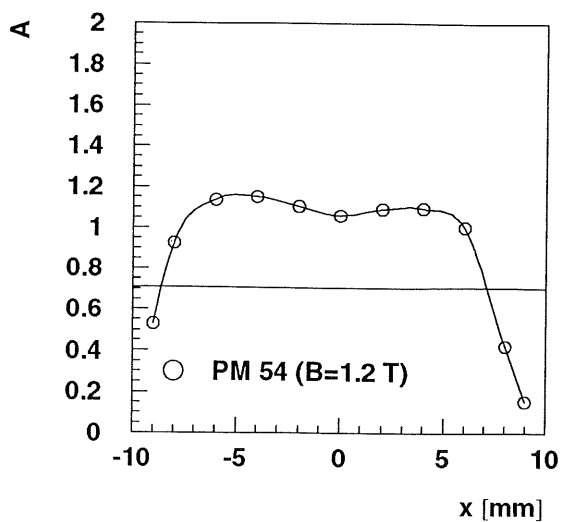
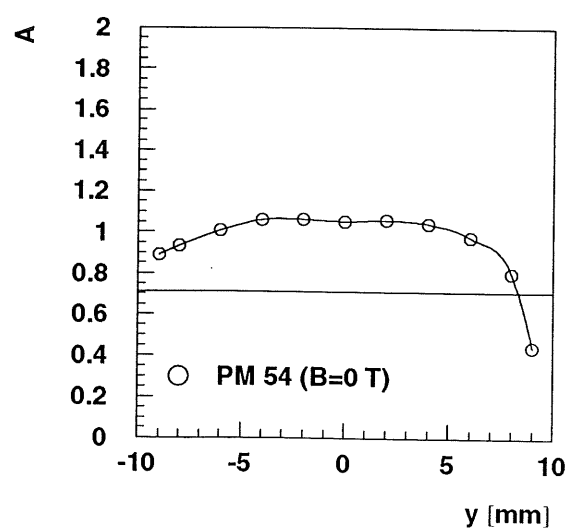
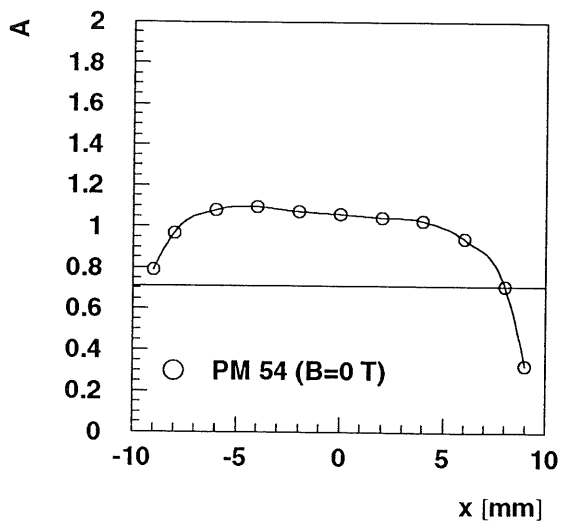
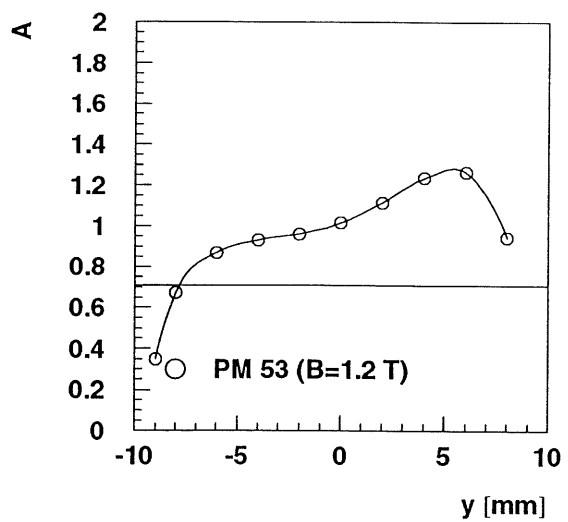
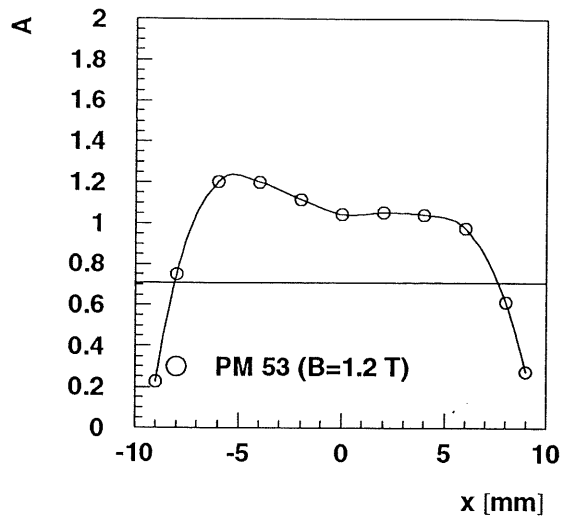
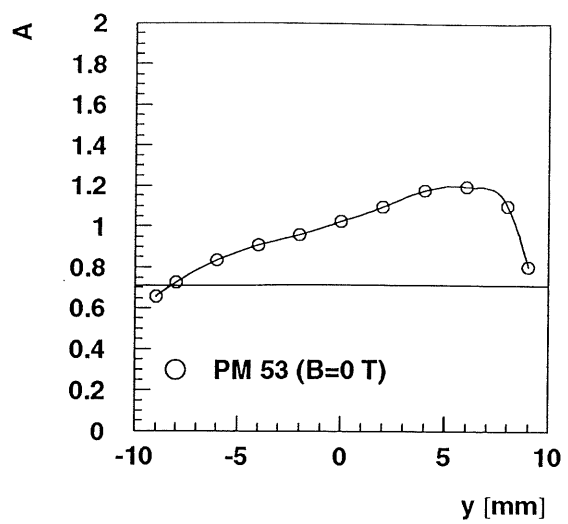
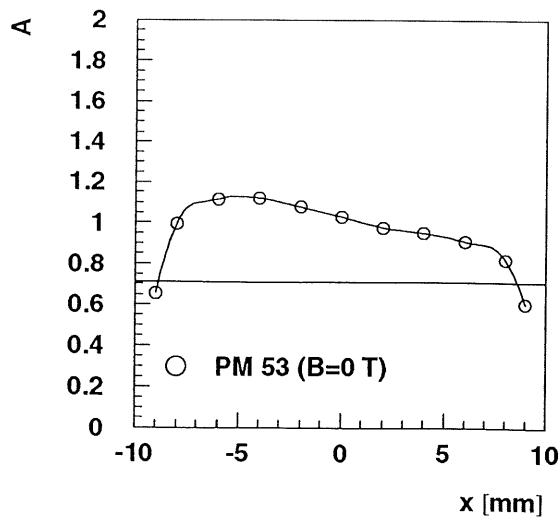


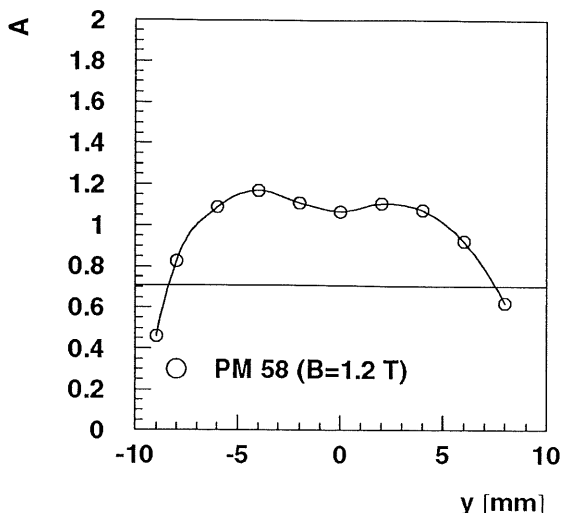
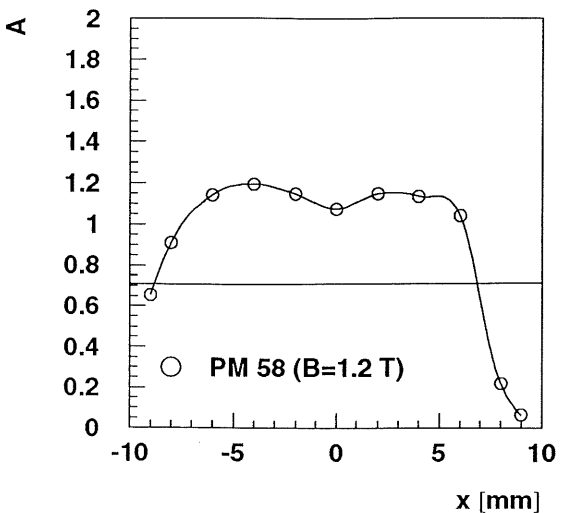
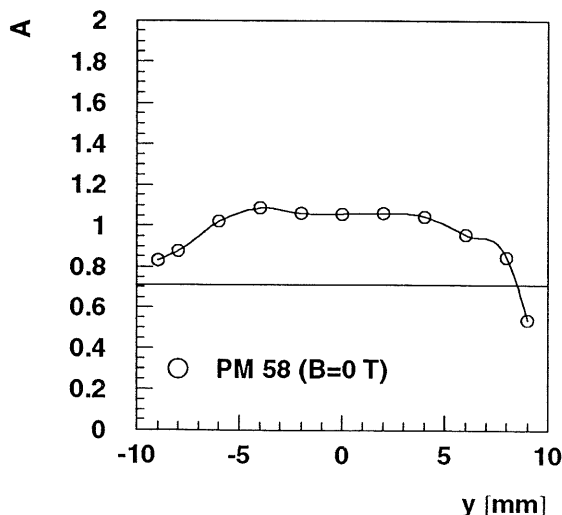
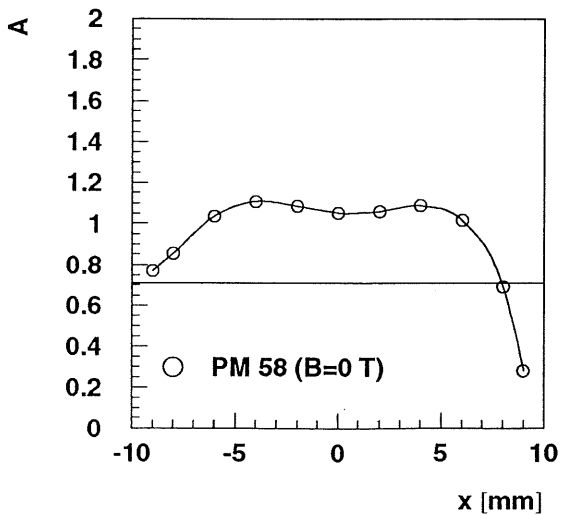
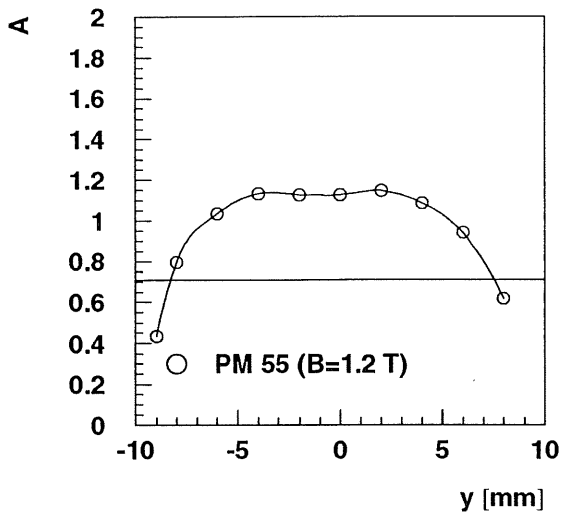
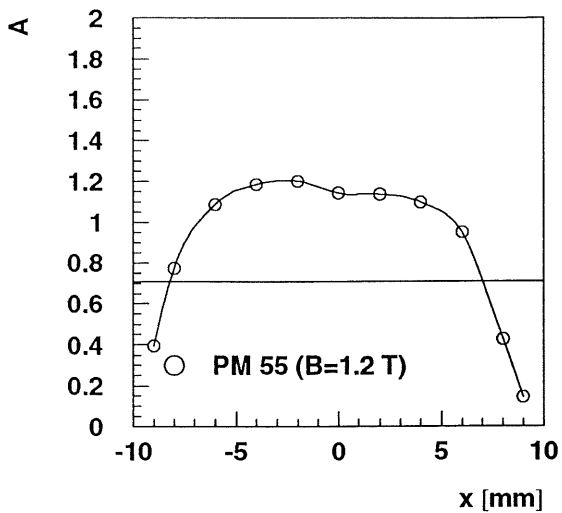
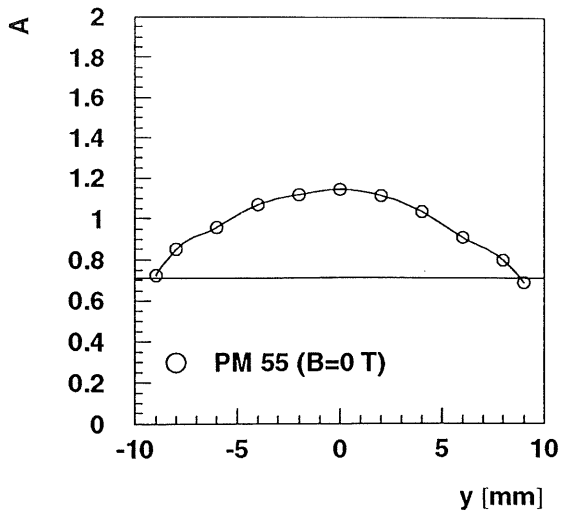
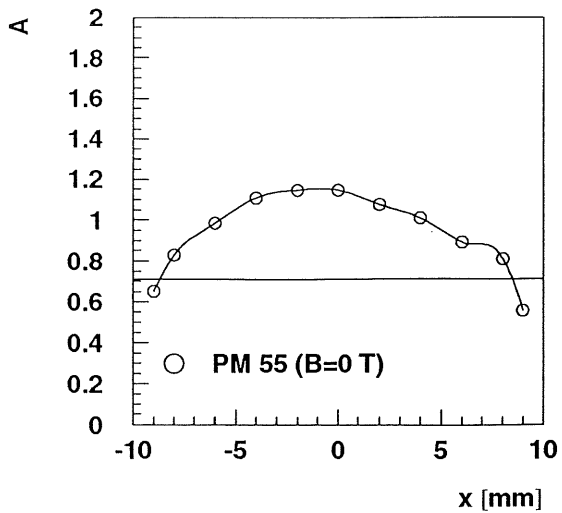


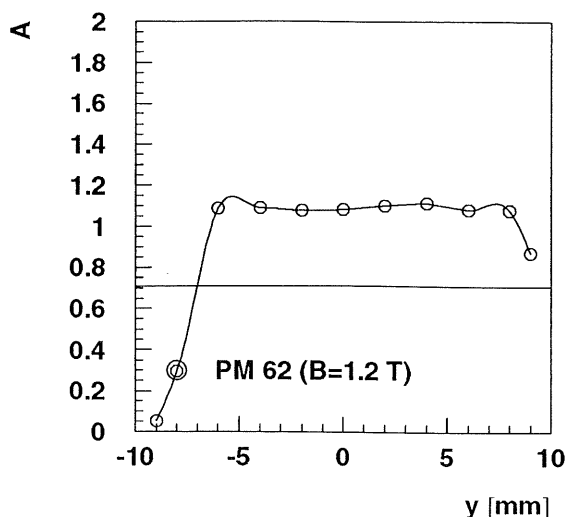
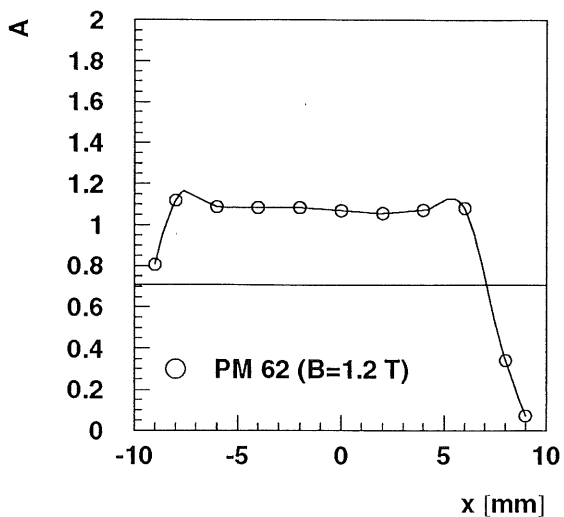
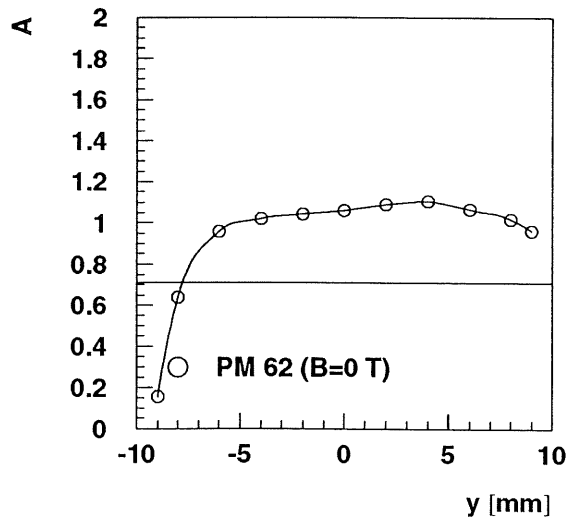
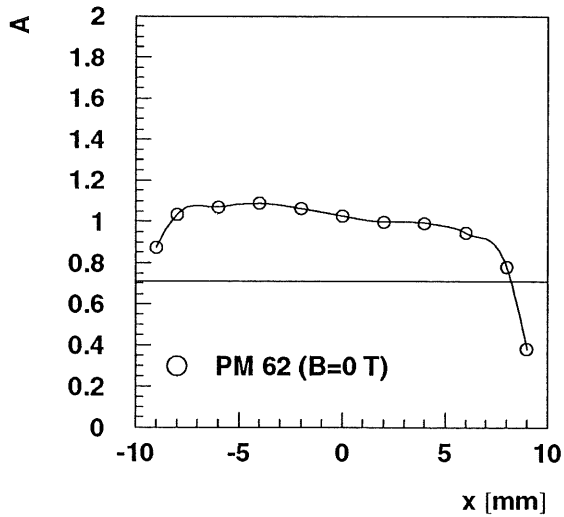
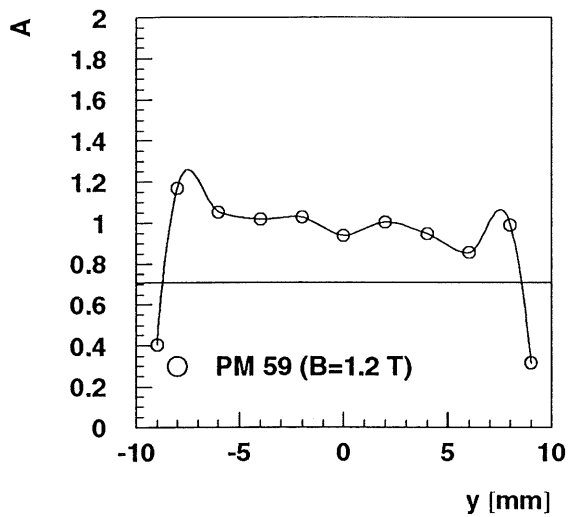
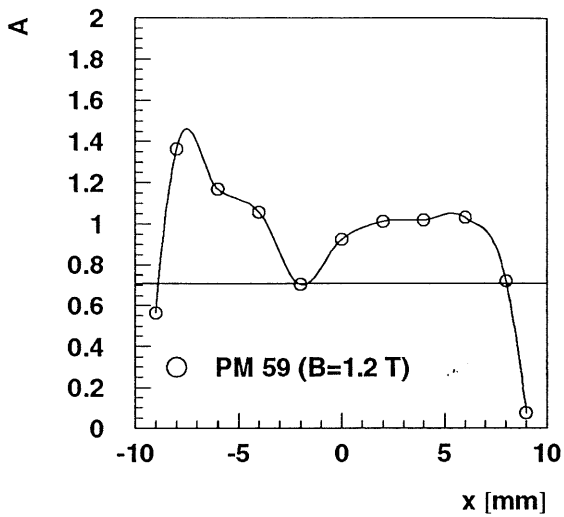
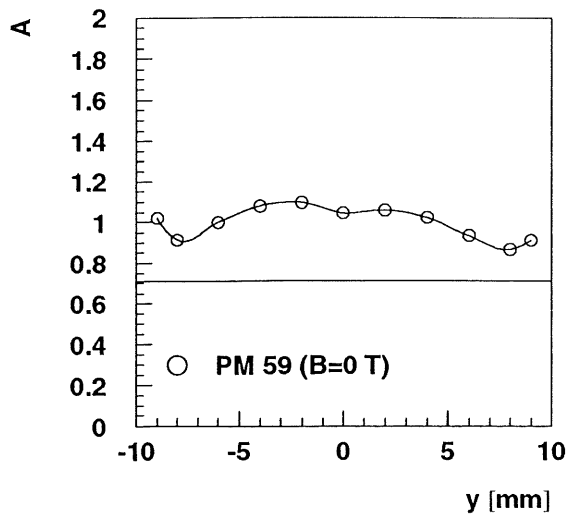
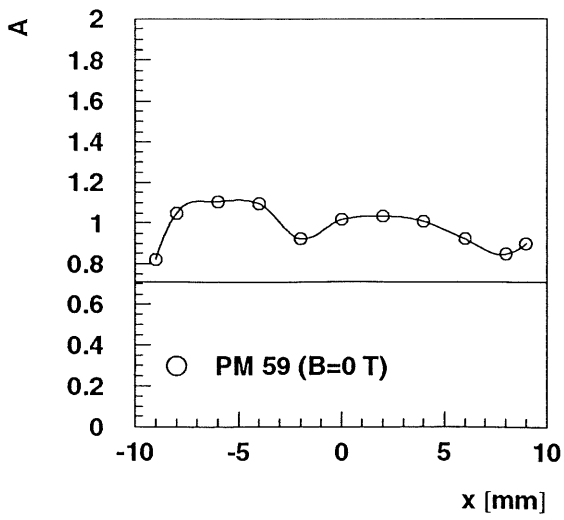


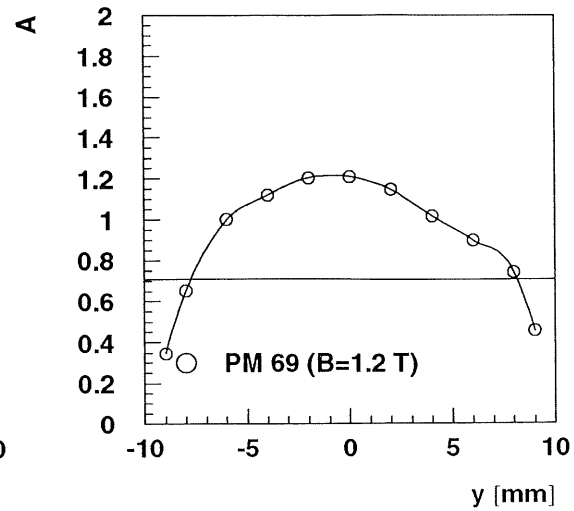
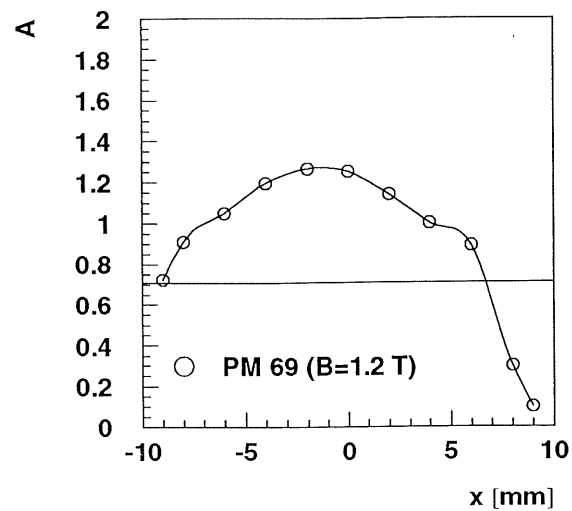
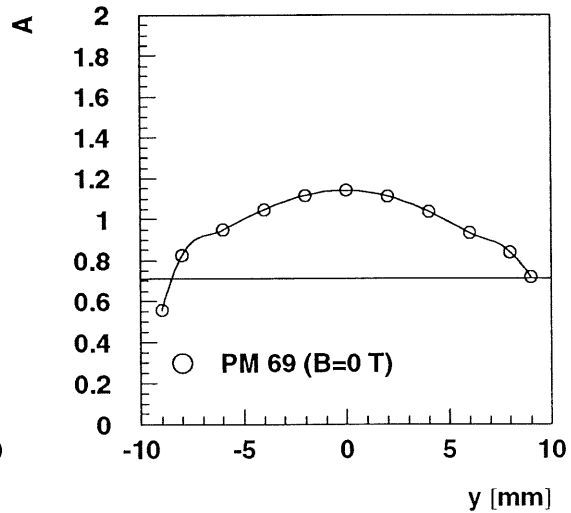
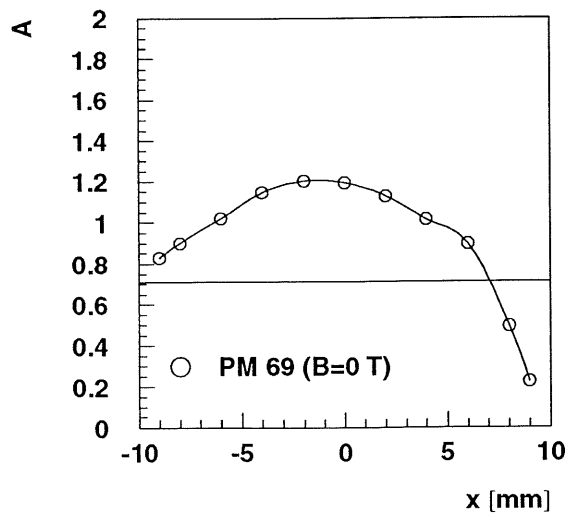
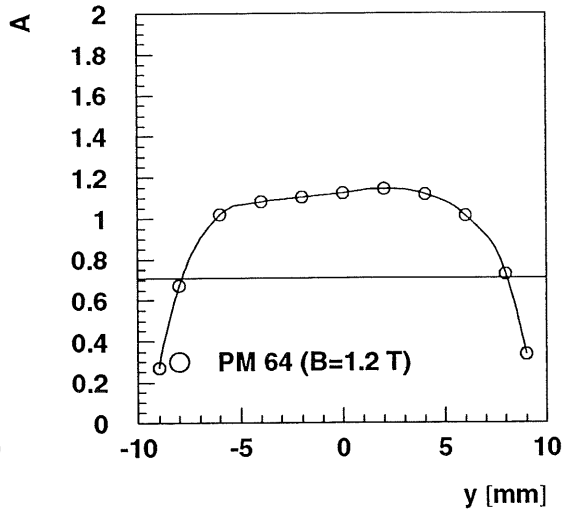
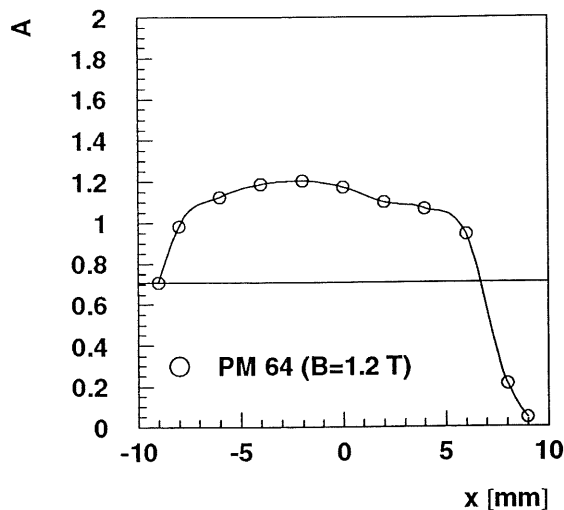
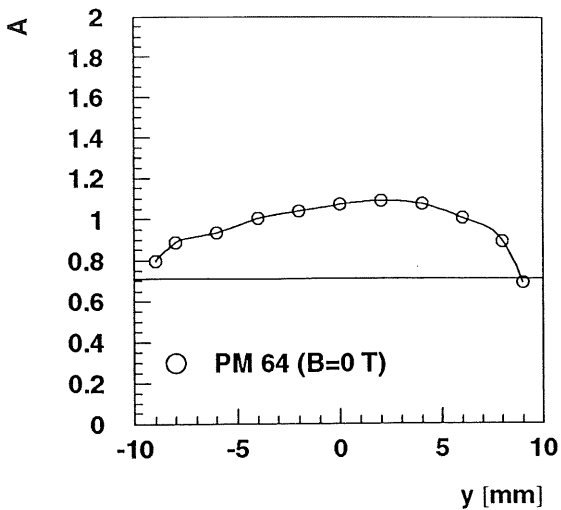
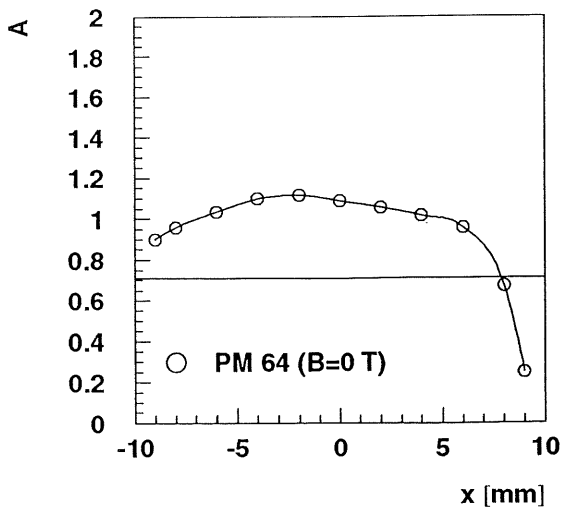


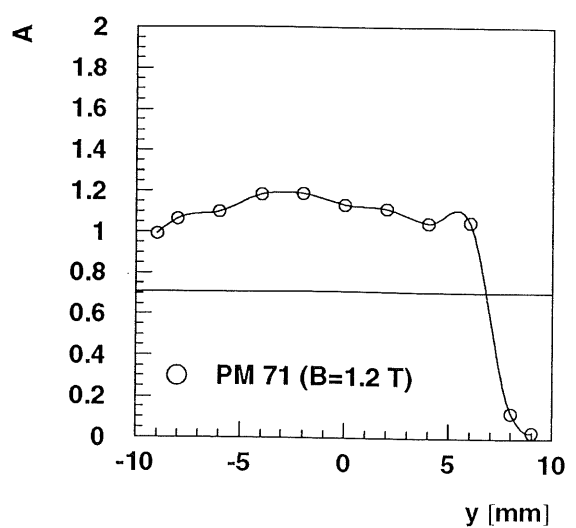
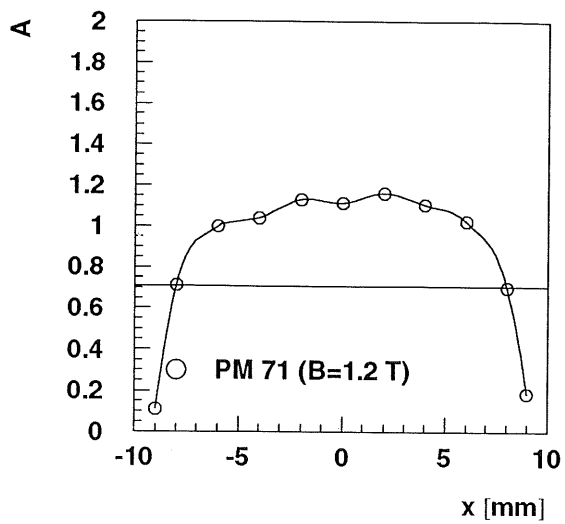
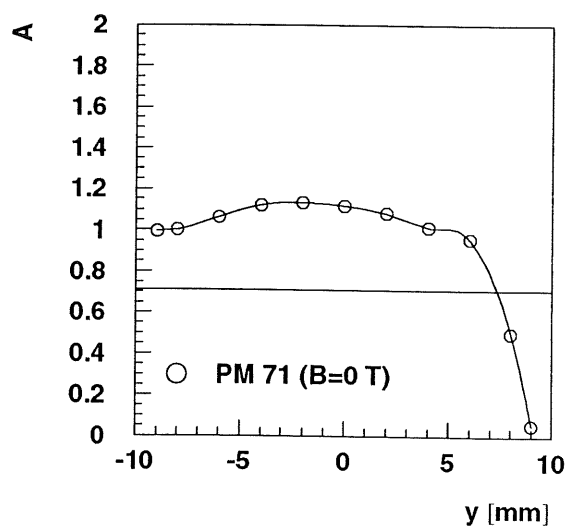
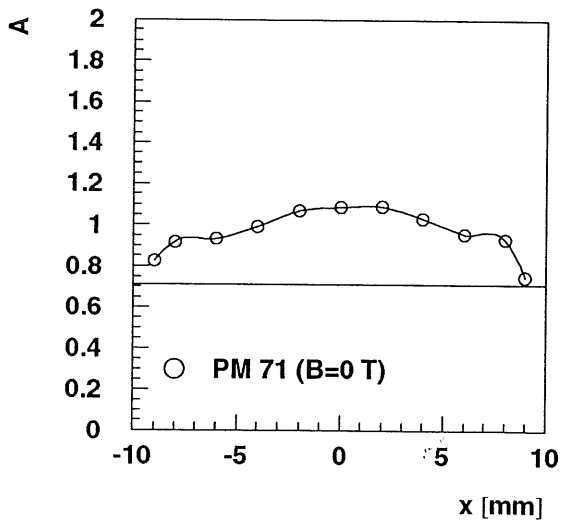
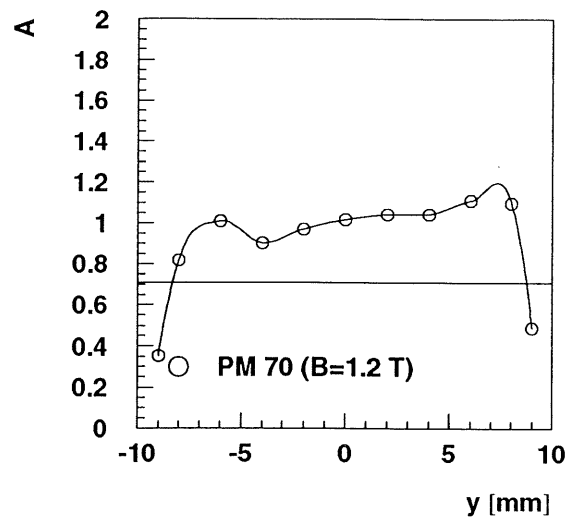
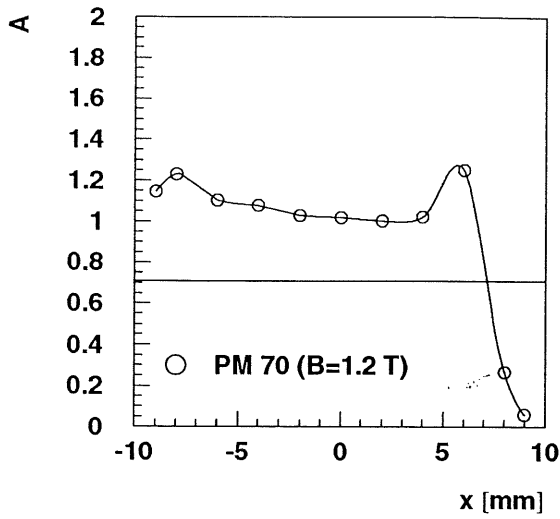
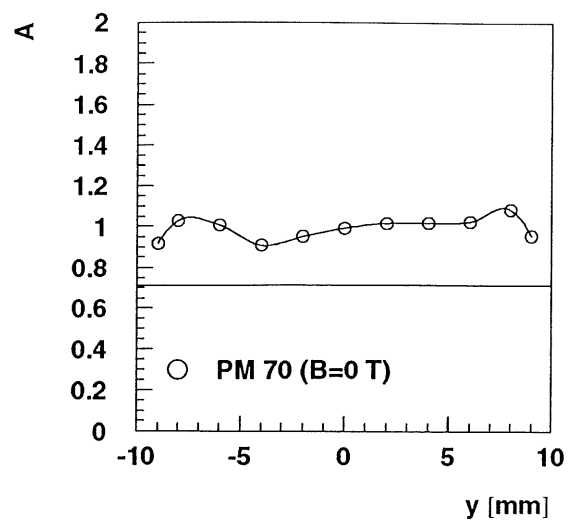
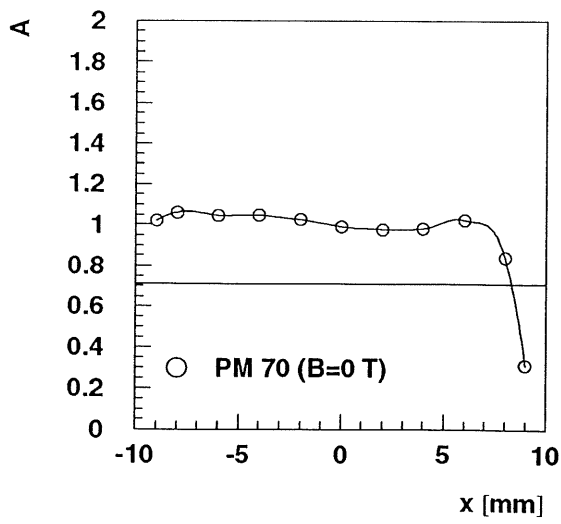


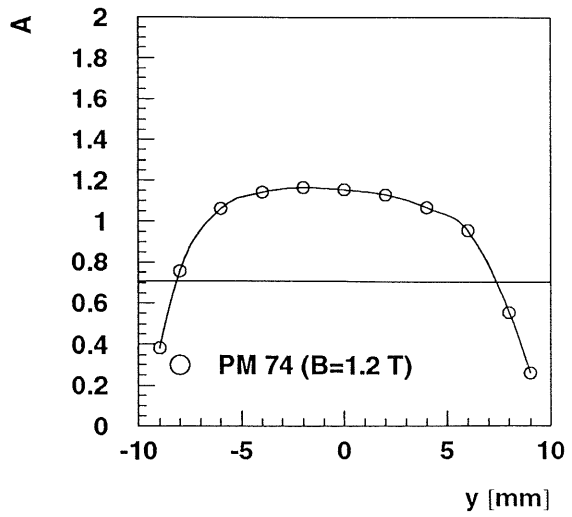
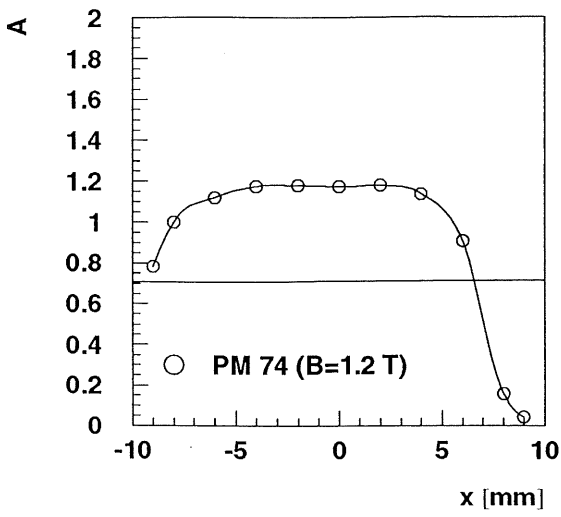
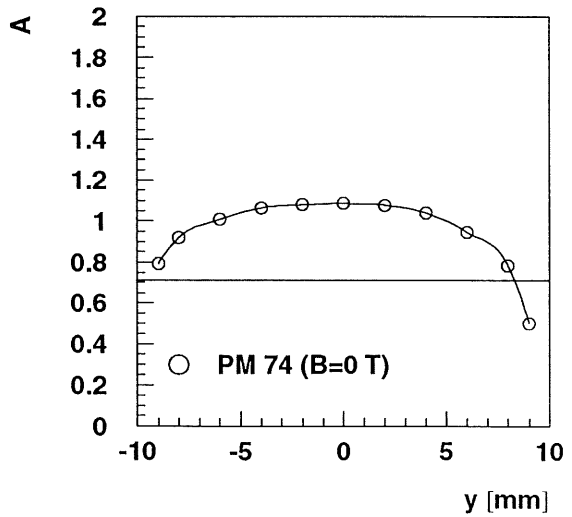
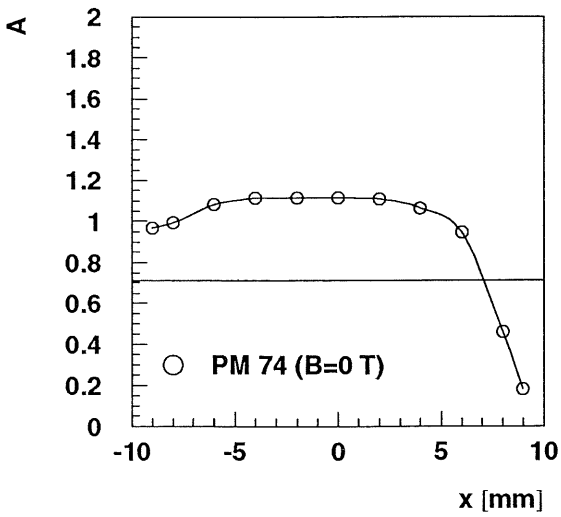
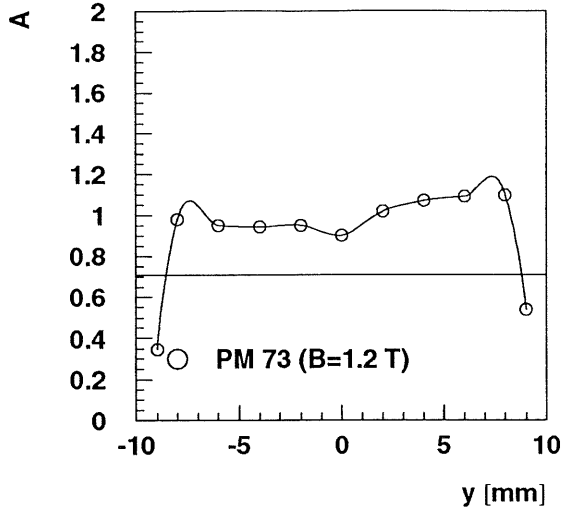
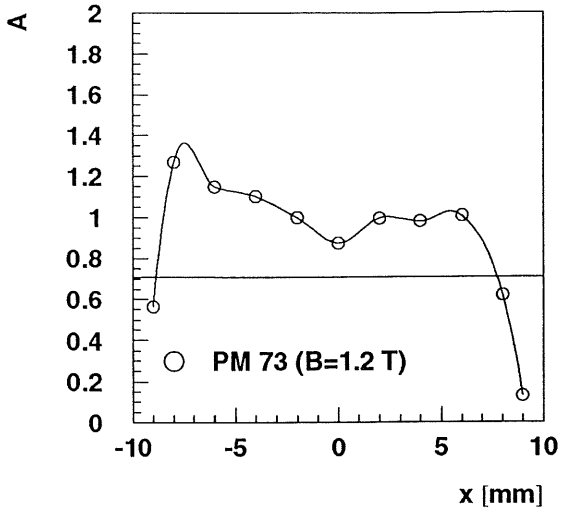
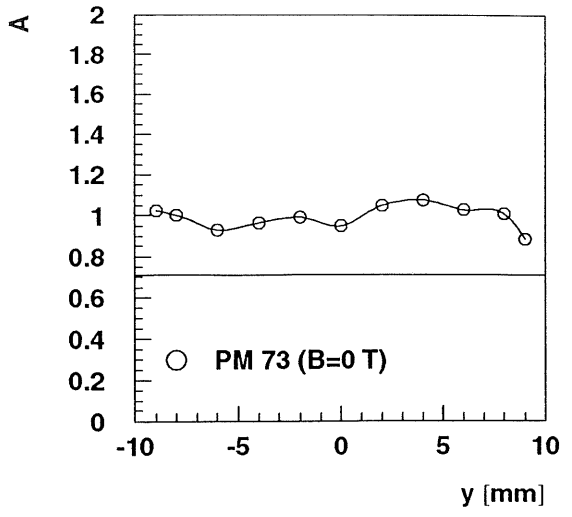
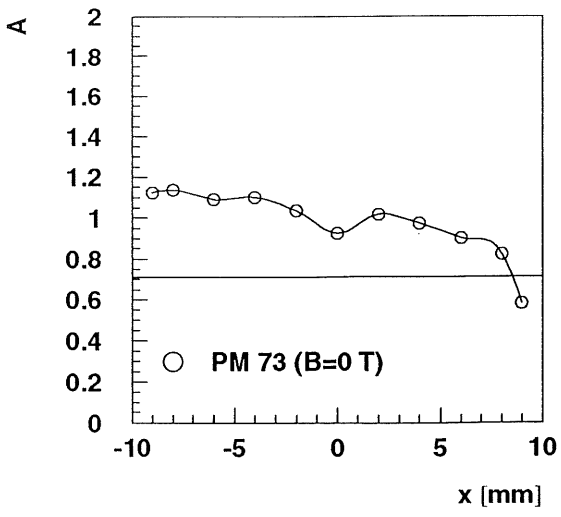


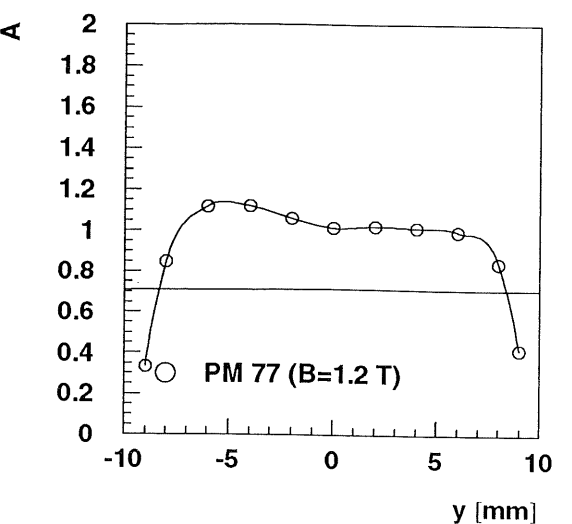
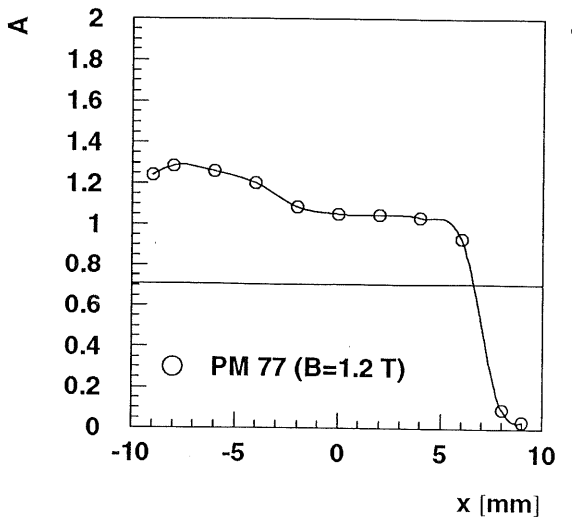
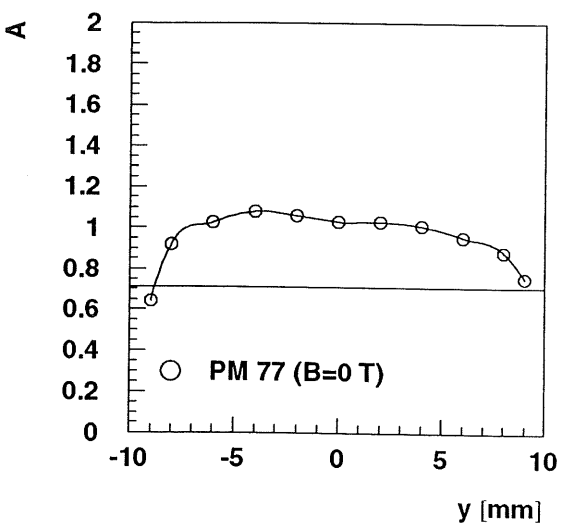
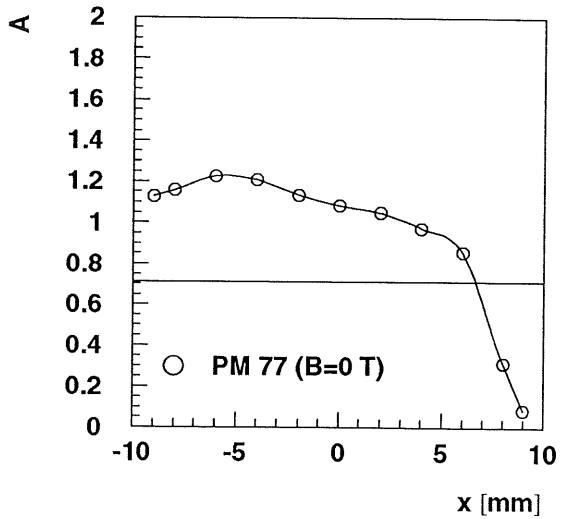
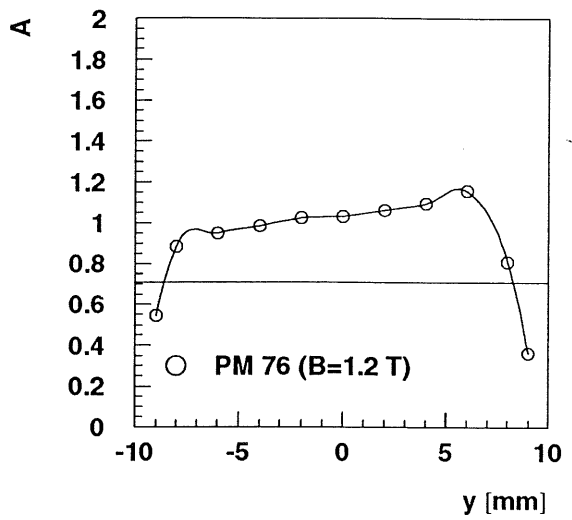
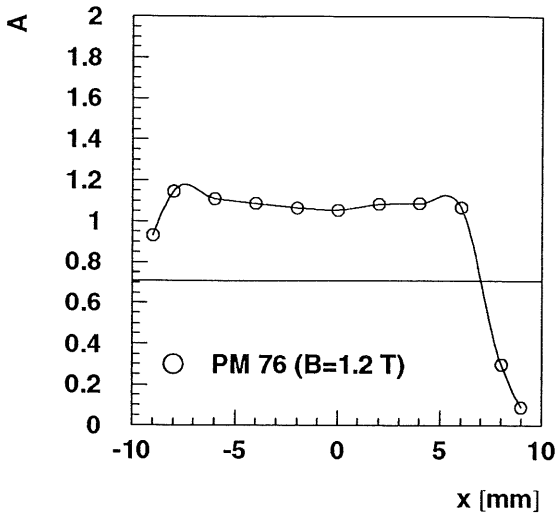
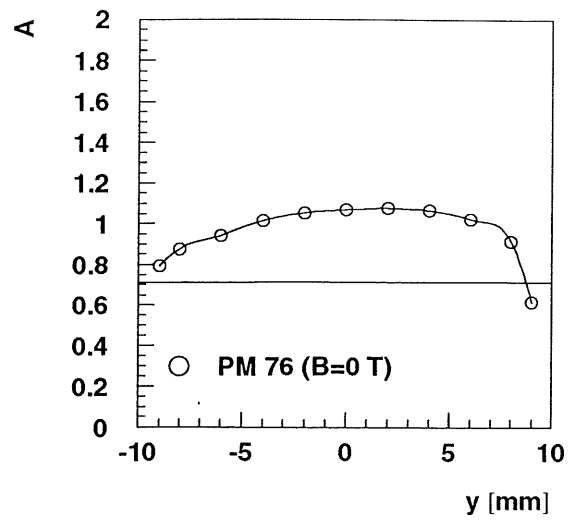
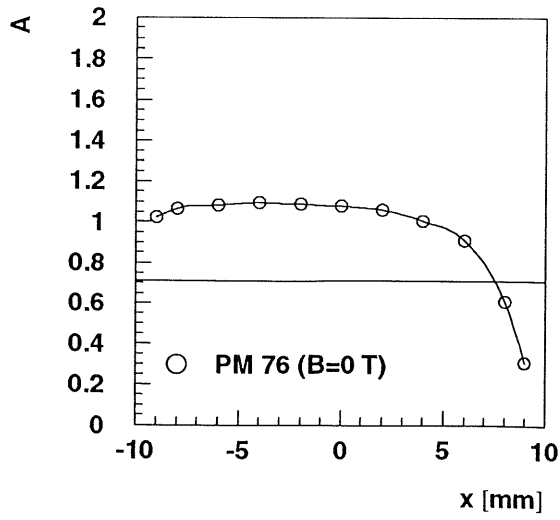


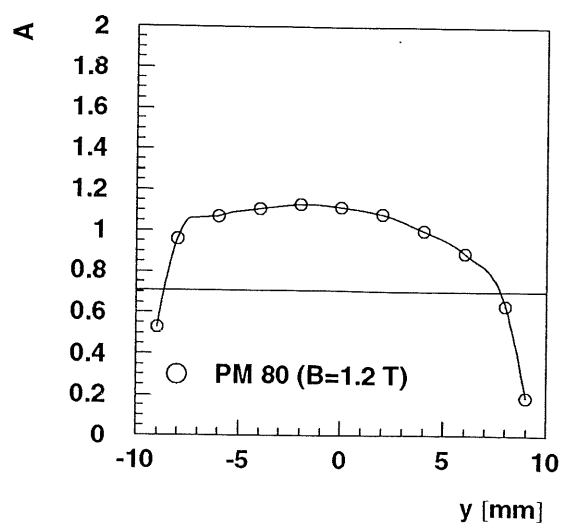
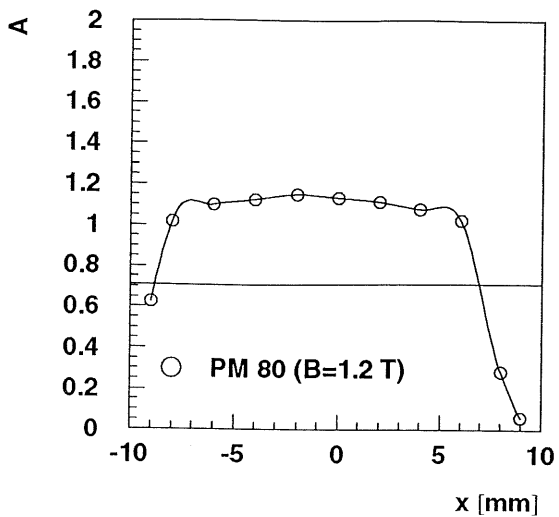
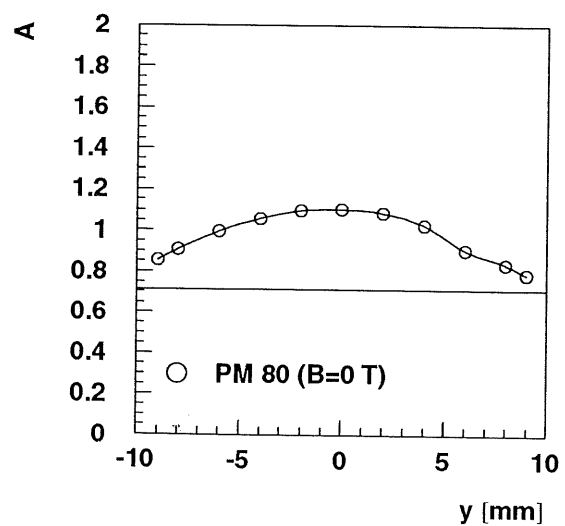
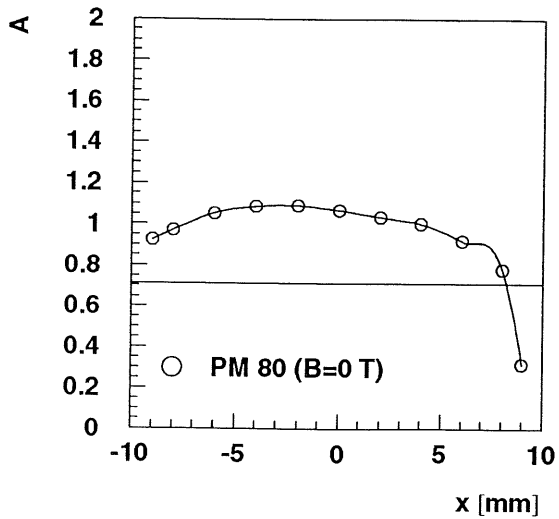
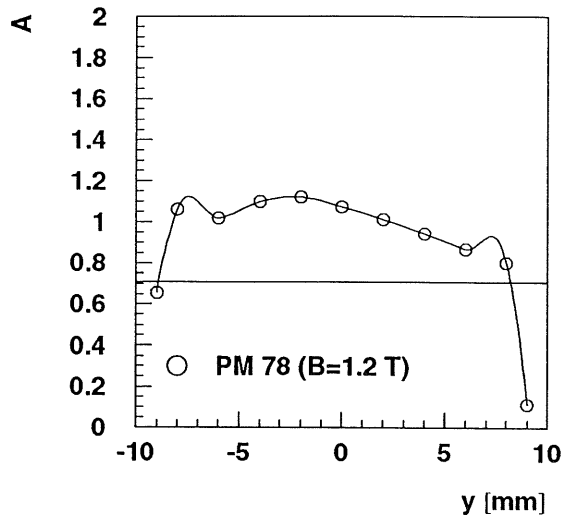
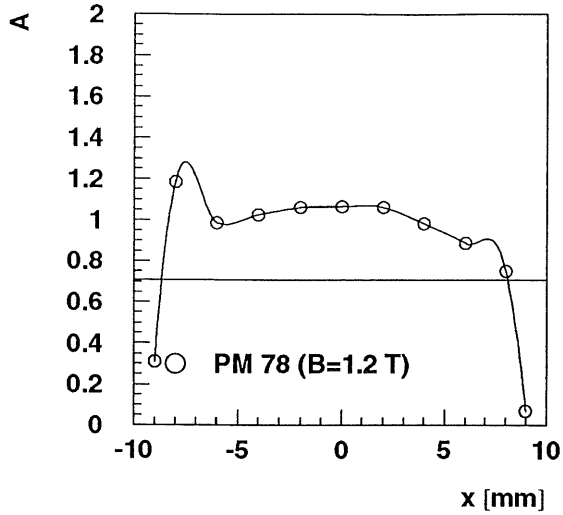
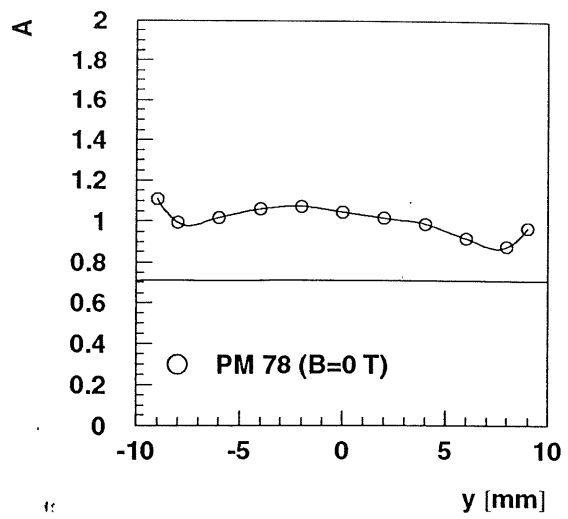
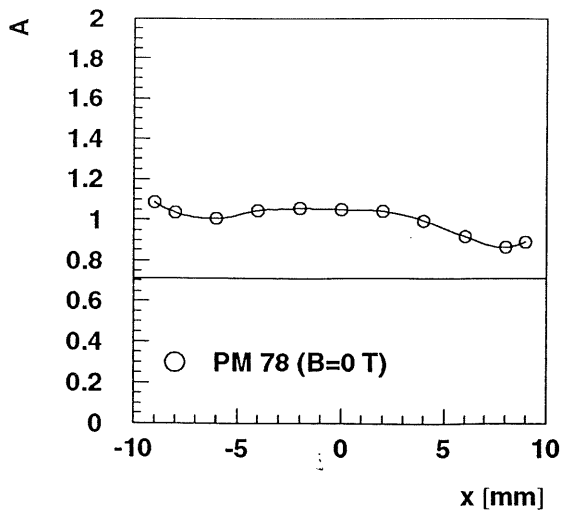




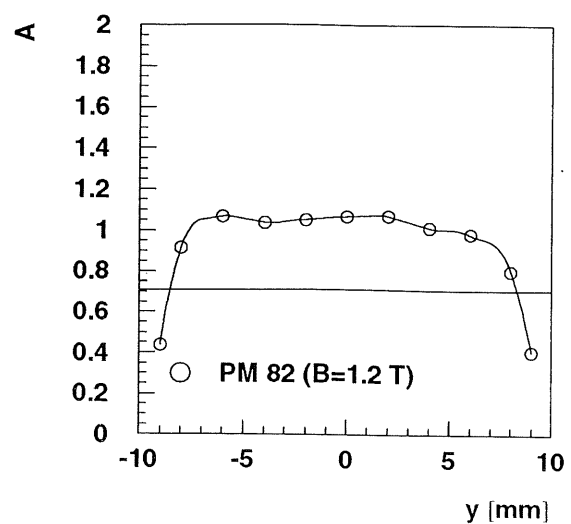
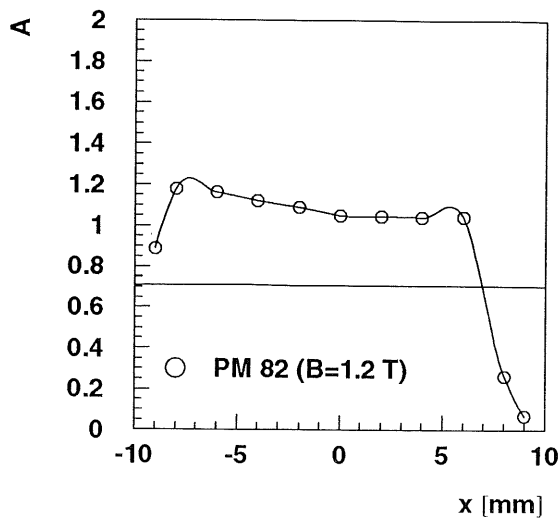
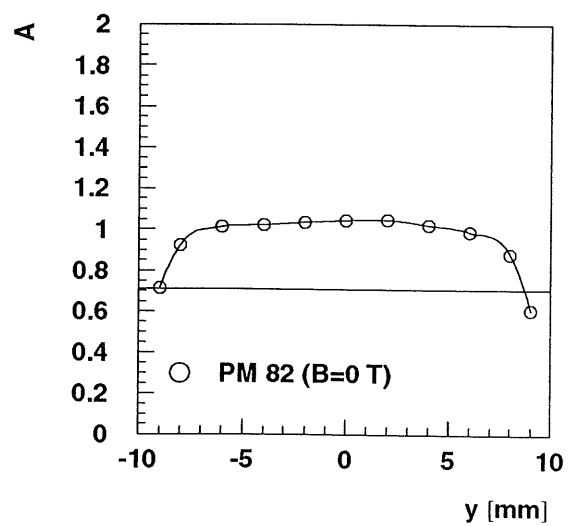
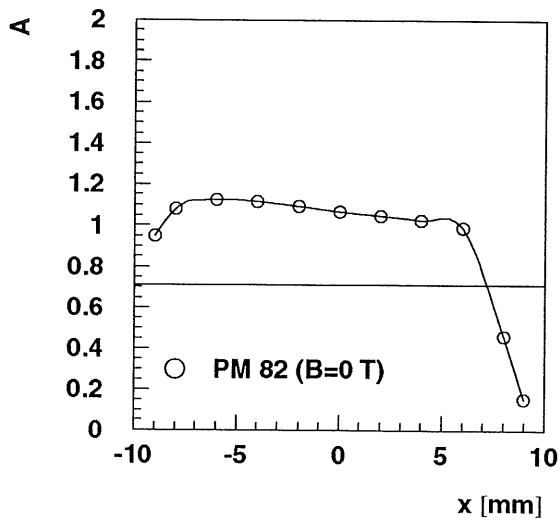
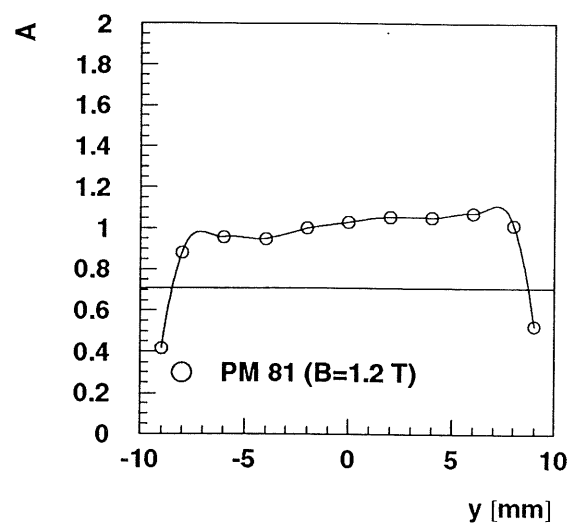
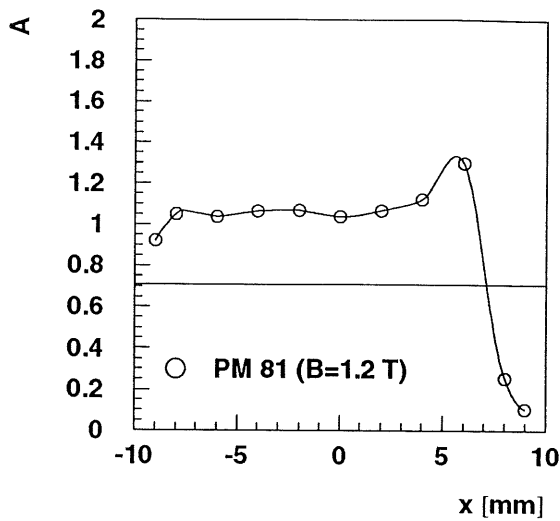
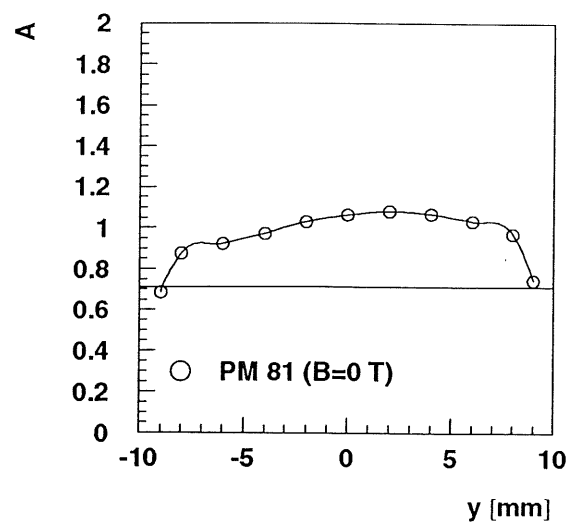
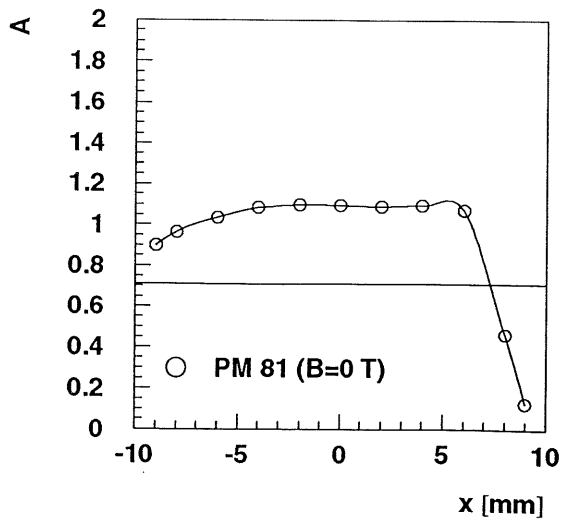


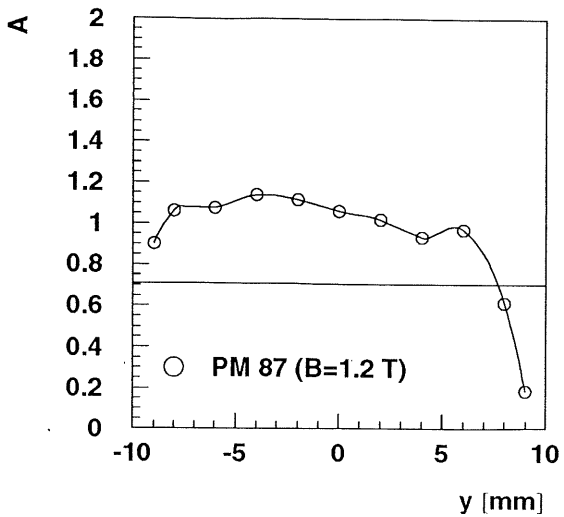
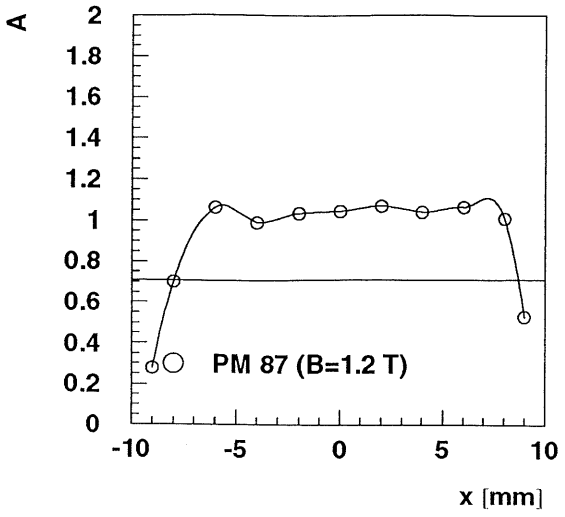
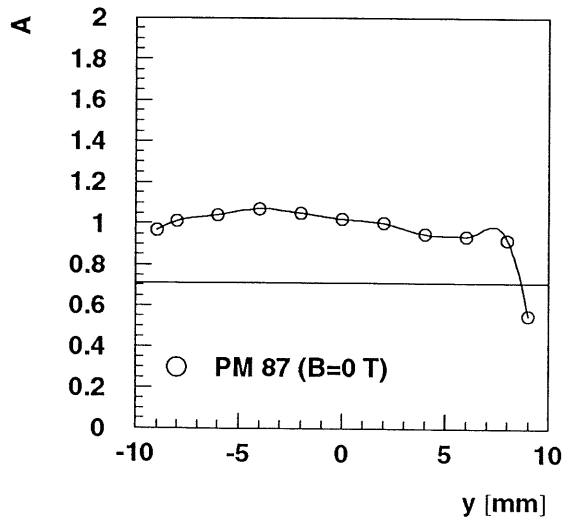
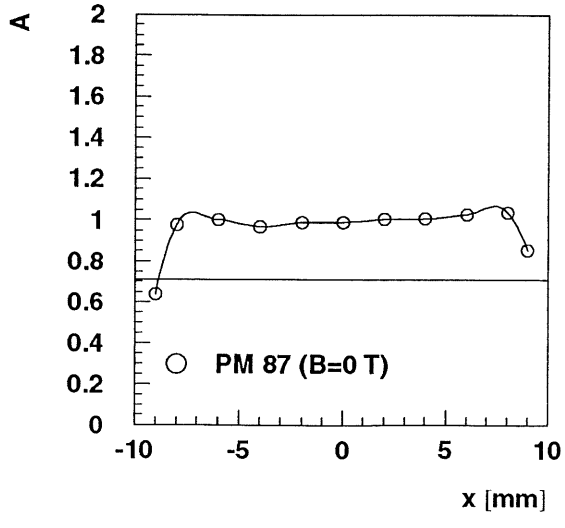
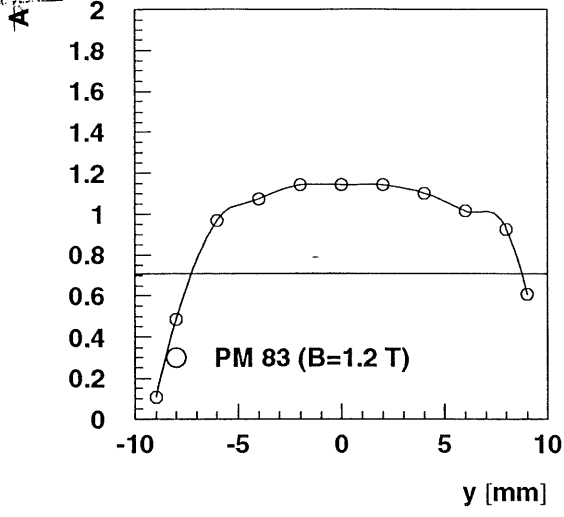
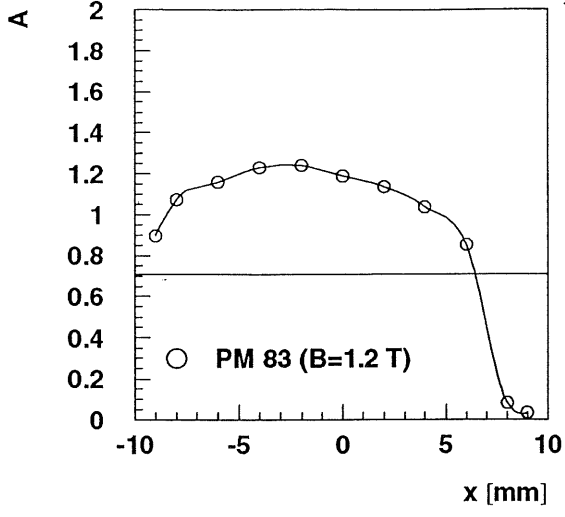
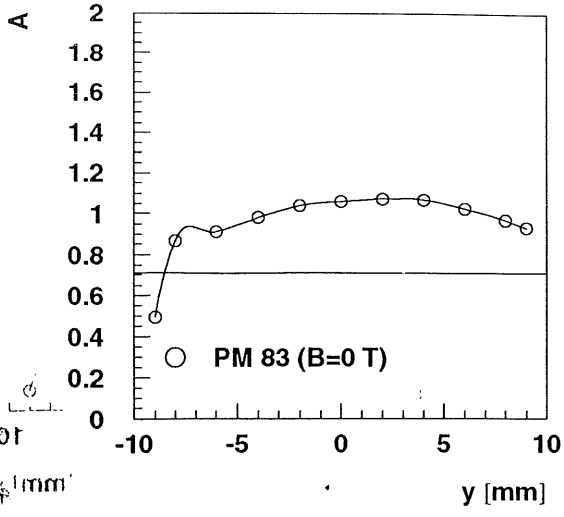
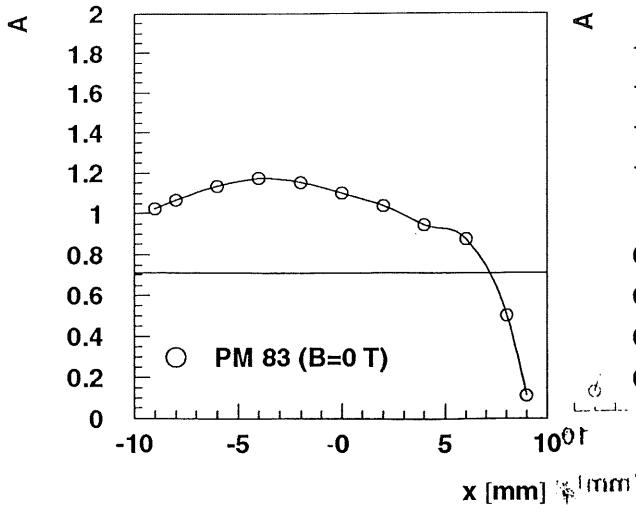


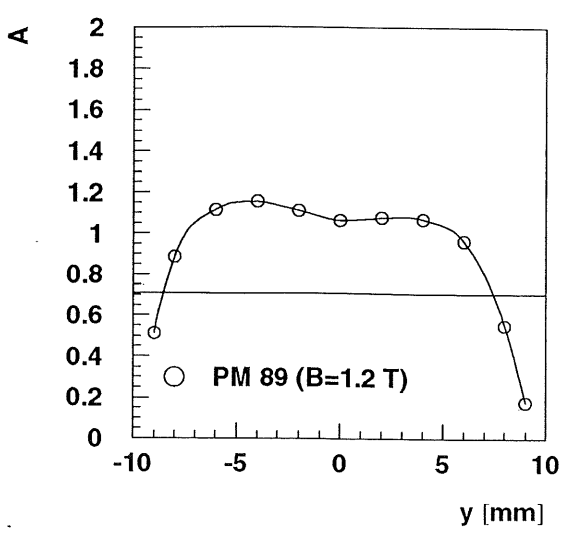
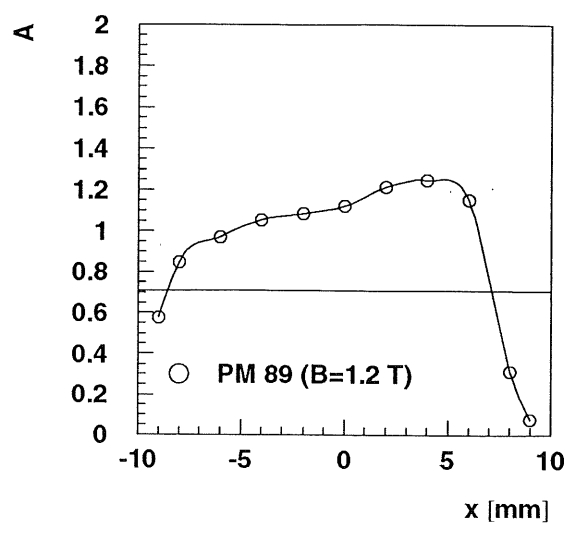
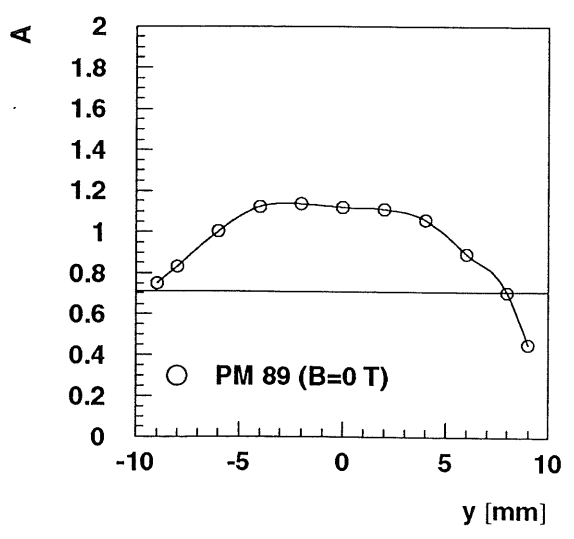
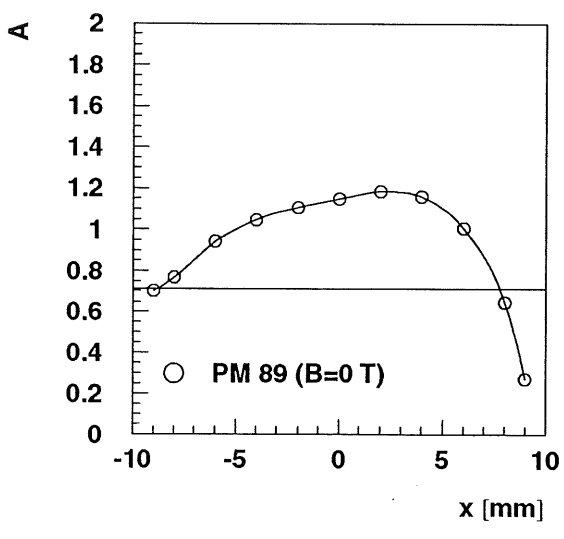
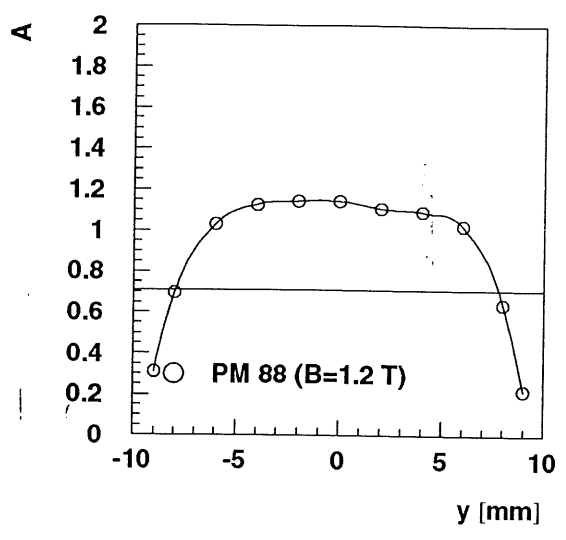
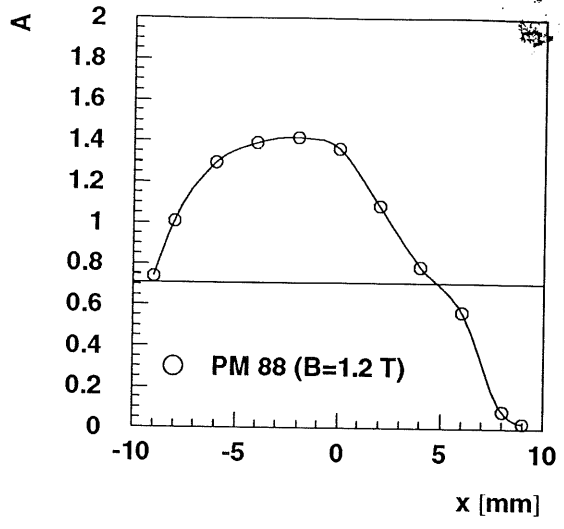
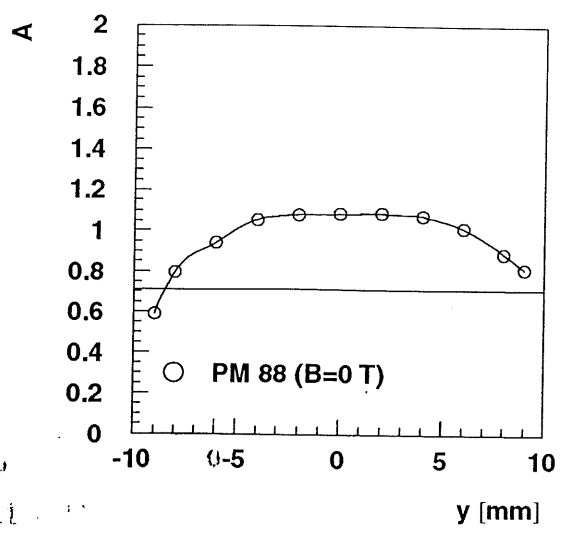
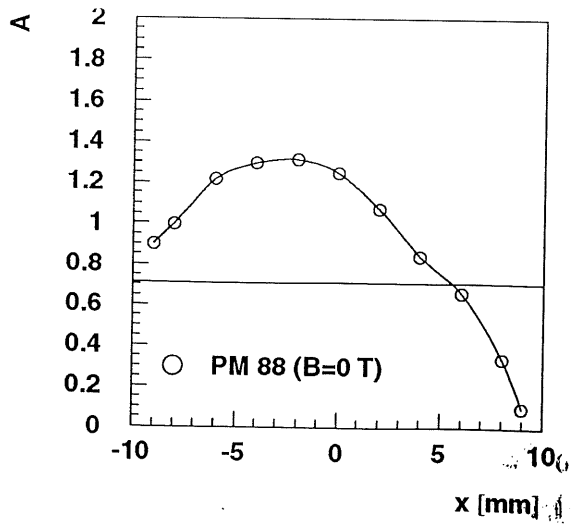


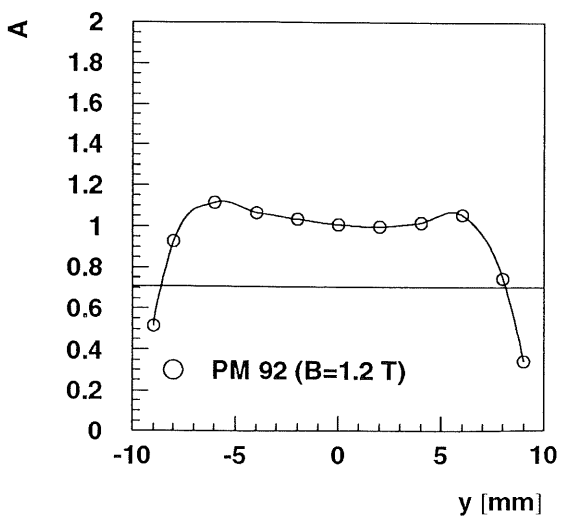
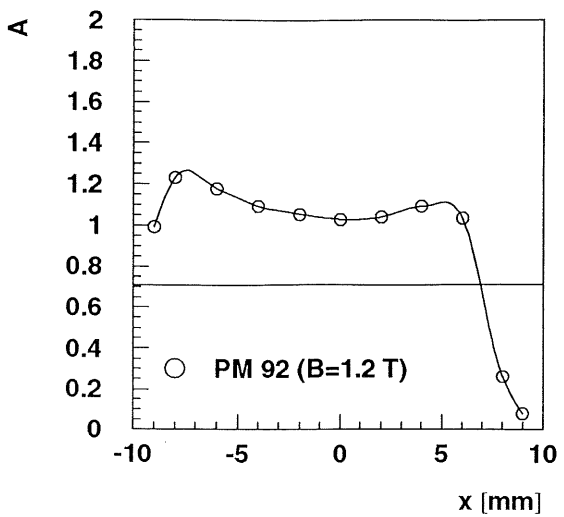
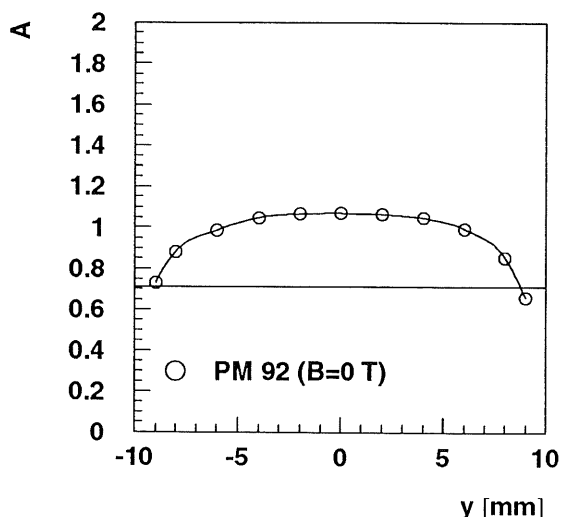
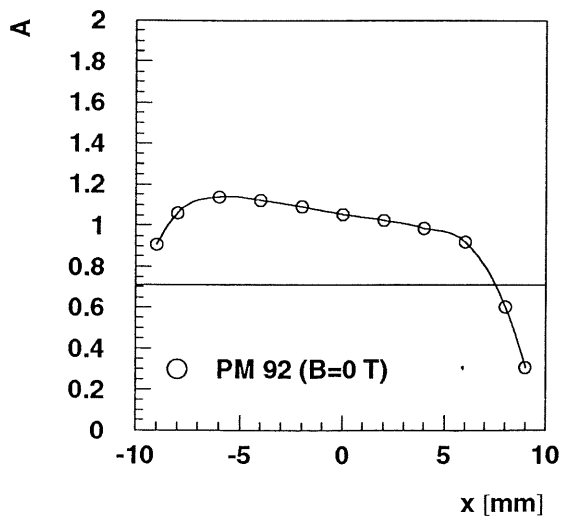
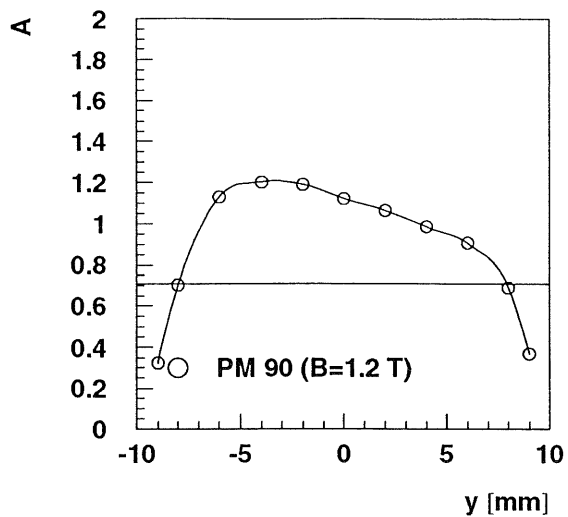
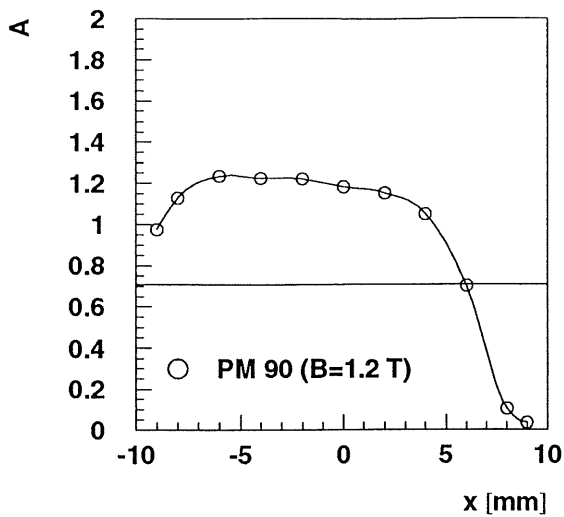
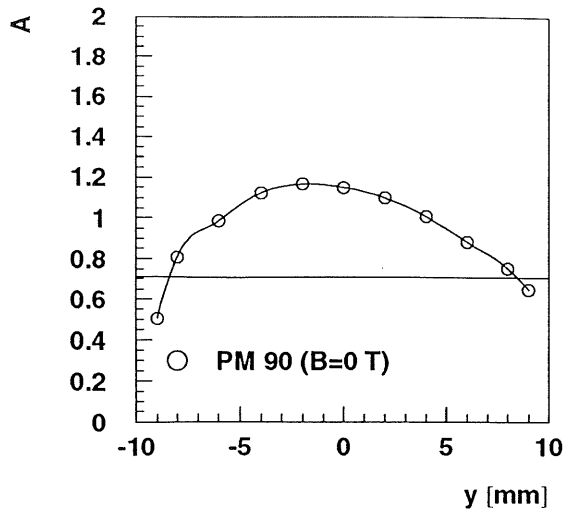
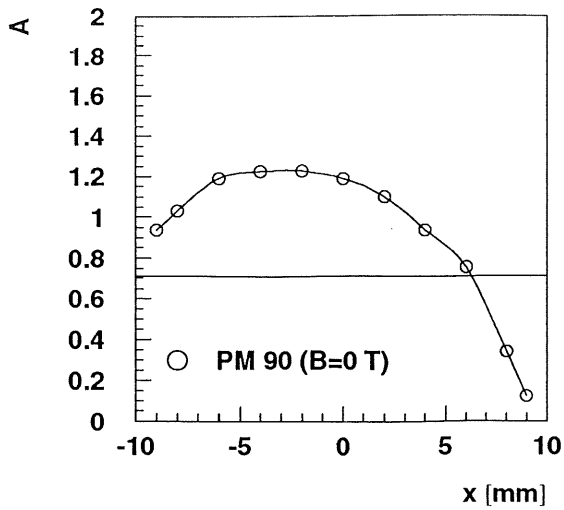


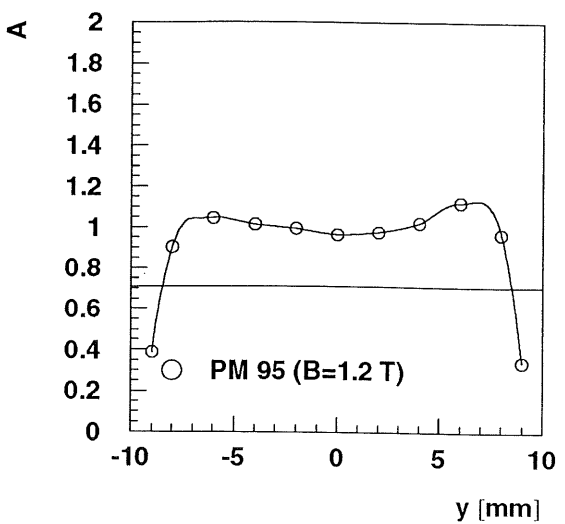
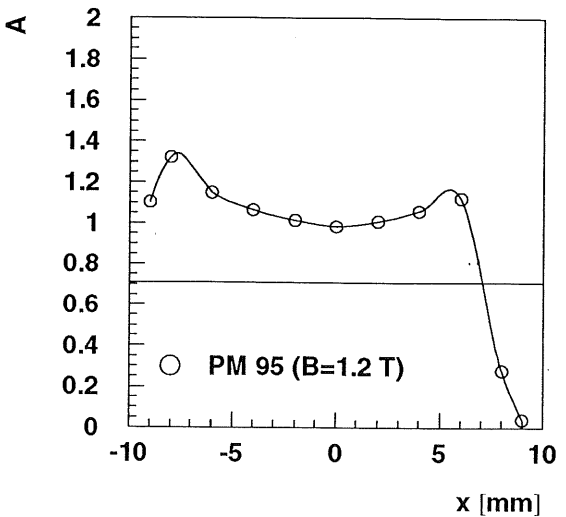
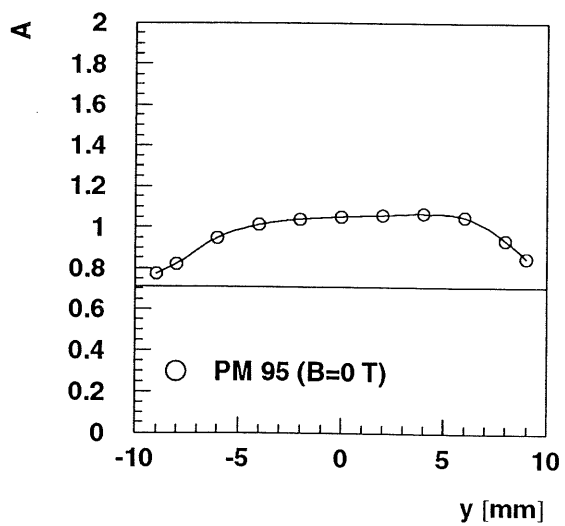
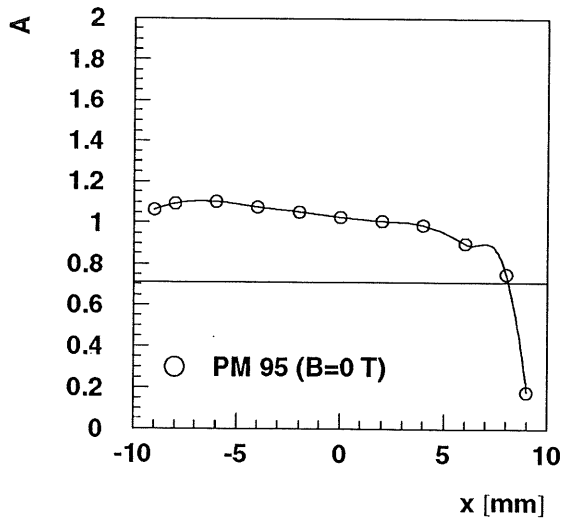
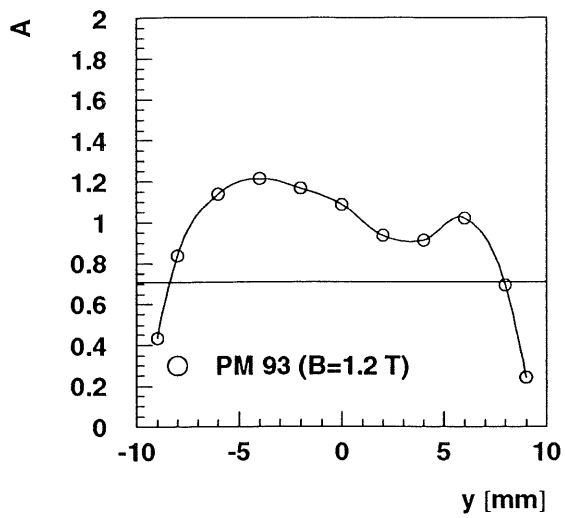
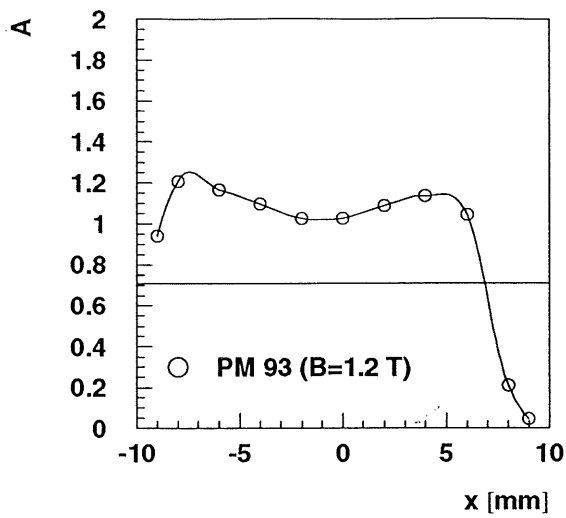
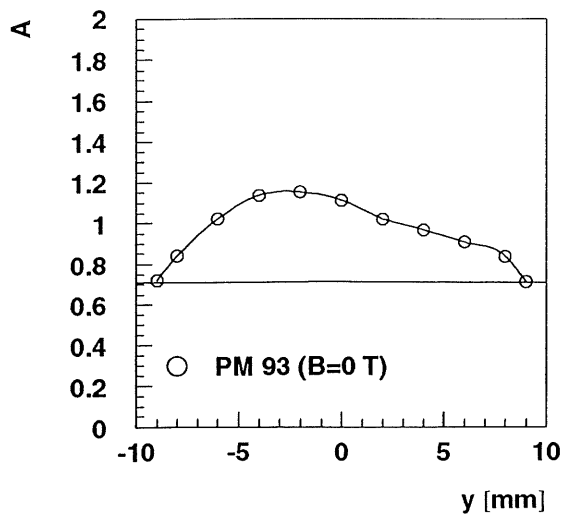
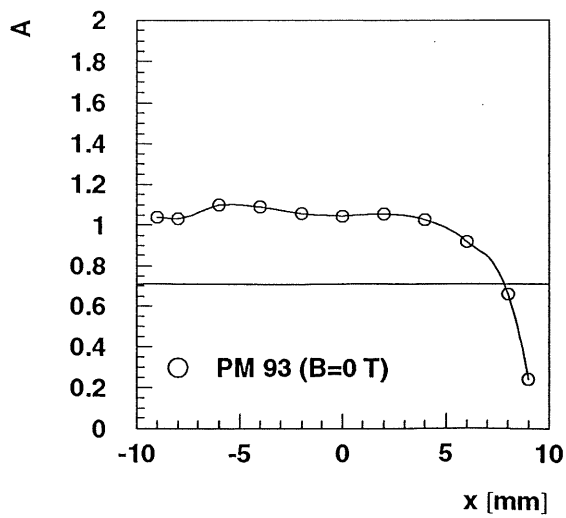


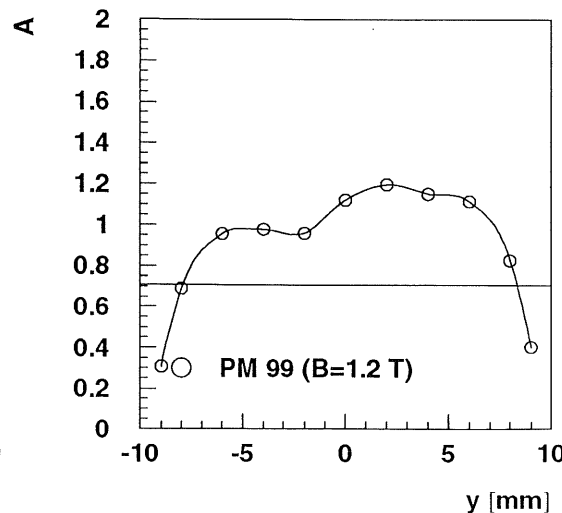
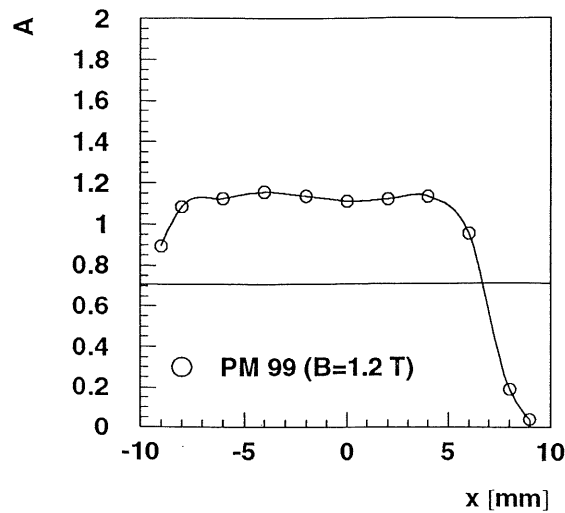
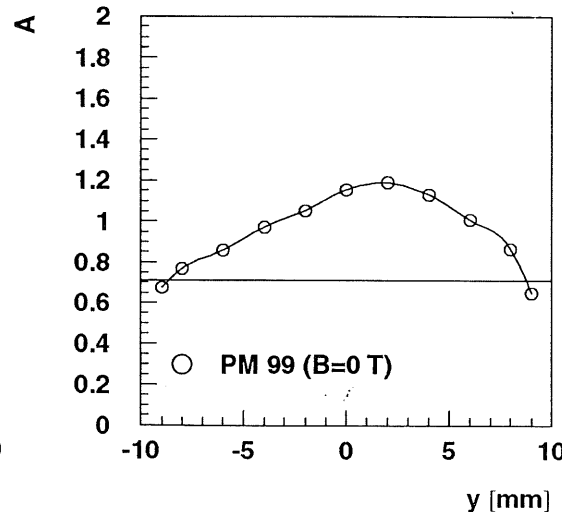
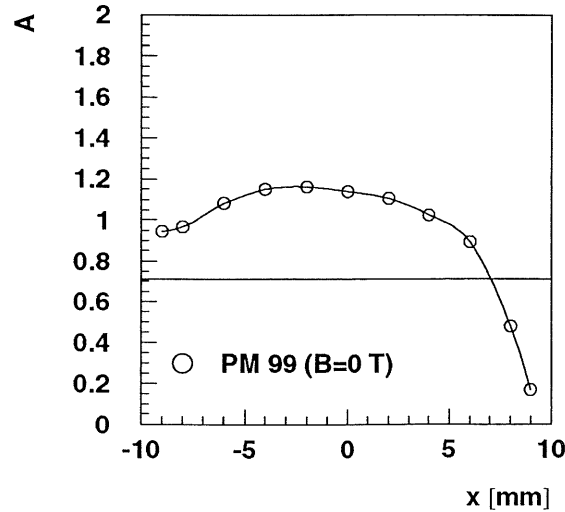
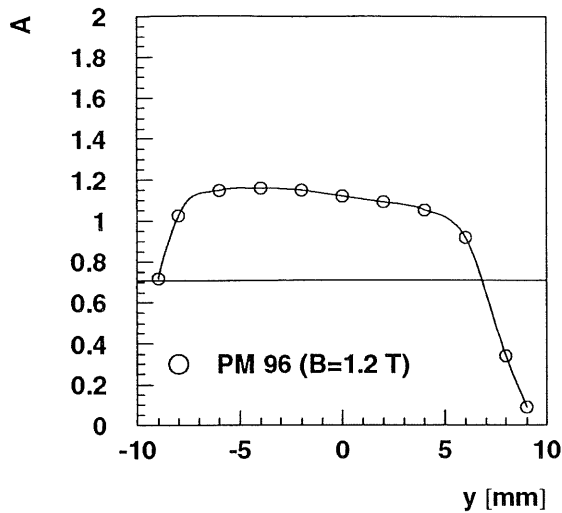
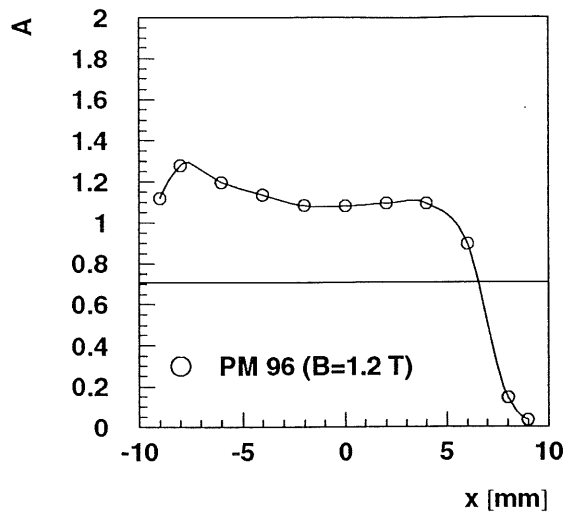
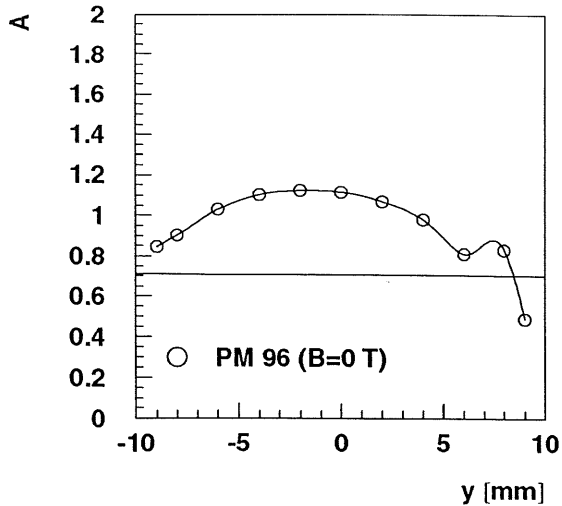
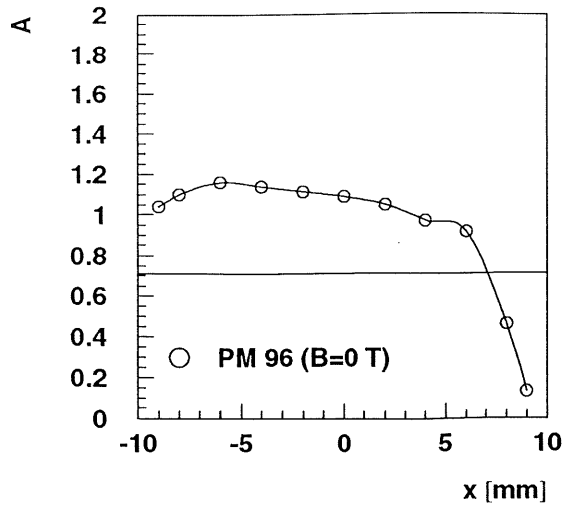












# Literaturverzeichnis

- [Ard 62] **Manfred von Ardenne**, *Tabellen zur angewandten Physik*, VEB, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1962
- [Ard 88] **v. Ardenne, M; Musiol, G.; Reball, S.**, *Effekte der Physik*, VEB, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1988
- [Bar 94] **Rainer Barschke**, *Untersuchungen von Szintillationsfasern für ein Spaghettikalorimeter*, Diplomarbeit, Univ. Hamburg, 1994
- [Bic 91] **Bicron**, *Scintillating Optical Fibers*, Katalog, 1991
- [Bra 81] **Siegmond Brandt**, *Datenanalyse*, Bibliographisches Institut Mannheim, 1981
- [Bru 91] **Bruker Analytische Meßtechnik GmbH**, *Produktinformation ER-DD 91*, 1991
- [Des 66] **DESY**, *Handbuch September 1966*, Hamburg, 1966
- [Don 86] **Jan-Peter Donker**, *Untersuchungen an szintillierenden Lichtleitfasern und Halbleiterphotodioden für das Ausbauprogramm des ARGUS-Detektors*, Diplomarbeit, Univ. Dortmund, 1985
- [Fin 89] **G. Finsel et. al.**, *Nucl. Instr. Meth. A290*, 1990, 450
- [Fla 92] **Konrad Flamm**, *Messungen von Strahluntergrund bei HERA für den Betrieb von H1*, Diplomarbeit, Univ. Hamburg, 1992
- [Flu 85] **John Fluke Mfg. Co., Inc.**, *Operators Manual*, 1985
- [H1 92/245] **F.W. Brasse**, *The H1 Detektor at HERA*, Hamburg, 1992
- [H1 92/252] **G. Cozzika**, *The H1 Detektor*, France, 1992
- [H1 93] **H1 Collaboration**, *Technical Proposal to Upgrade the Backward Scattering Region of the H1 Detector*, Hamburg, 1993
- [H1 93/103] **H1 Collaboration**, *The H1 Detector at HERA*, Hamburg, 1993

- [H1 93] **H1 Collaboration**, *Technical Proposal to Upgrade the Backward Scattering Region of the H1 Detector*, Hamburg, 1993
- [Ham 90] **Hamamatsu**, *Photomultiplier Tubes Catalog*, Japan, 1990
- [Her 90] **D. W. Herzog et. al.**, Nucl. Instr. Meth. A294, 1990 446-458
- [Jan 93] **J. Janoth et. al.**, DESY 93-119, 1993, zur Veröffentlichung eingereicht an Nucl. Instr. Meth.
- [Kei 91] **Keithley Instruments, Inc.**, *Catalog and Reference Guide*, 1991
- [Kur 93] **Kuraray Co., Ltd.**, *private Mitteilung*, 1993
- [Leo 89] **W. R. Leo**, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, Berlin, 1989
- [Lev 91] **Christian Leverenz**, *Aufbau und Test eines Szintillationszählensystems zur Bestimmung des Strahluntergrundes am H1-Experiment sowie erste Strahlstudien an HERA*, Diplomarbeit, Univ. Hamburg, 1991
- [Mor 89] **Silke Mordhorst**, *Untersuchungen von Photomultipliern in Magnetfeldern*, Diplomarbeit, Univ. Hamburg, 1989
- [Per 81] **D. Perrin and P. Sonderegger**, CERN OM ISPS 181-7, Cern, 1981
- [Phi 90] **Philips Components**, *Data Handbook Photomultipliers PC04*, 1990
- [Rd 91] **The RD1 Collaboration**, *Status report to the DRDC*, CERN/DRDC 91-50, Cern, 1991
- [Rei 85] **Reimers, L.**, *Scanning Electron Microscopy*, Springer Series in Optical Science, Berlin, 1985
- [Sch 70] **Schonkeren, J.M.**, *Photomultipliers*, Philips Application Book, 1970
- [Sze 81] **S. M. Sze**, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley, New York, 1981
- [Val 69] **Valvo**, *Technische Informationen*, Philips Technische Rundschau, Jahrgang 29, Nr. 7/8, 1969
- [Val 86] **Valvo Elektronik**, *Datenbuch LED*, 1986



# Danksagung

Auch an dieser Stelle übermittle ich meinen Dank an alle Menschen, die mir während des Diplompraktikums mit Rat und Tat zur Seite standen. Insbesondere an:

**Friedhelm Brasse** übernahm die Aufgabenstellung.

**Beate Naroska** gab mir den Hinweis für diesen Praktikumsplatz, und sie übernahm auch das Korreferat.

**Volker Korb** betreute mich und ließ mir viel Freiraum zur selbständigen Arbeit.

**Rolf-Dieter Apphun** hatte immer ein offenes Ohr für meine Probleme und lehrte mich vieles.

**Axel Lindner, Gerhard Müller, Marc Weber, Robert Buchholz** und **Rainer Barschke** gaben mir viele wertvolle Tips.

**Klaus Thiele** und **Gerd Falley** standen mir mit Rat und Tat nicht nur bei technischen Problemen zur Seite.

Zusammen mit **Peter Smirnow** (Moskau), **Herbert Steiner** (Berkeley), **Stefan Valkar** (Prag) und **Viktor Tchernycho** (Moskau) habe ich die Unzahl von Messungen bewältigt.

*REALLY,  
NOT A DREAM  
OF BUTTERFLIES?*

*UNKNOWN TAOIST*