

INAUGURAL-DISSERTATION  
zur  
Erlangung der Doktorwürde  
der  
Naturwissenschaftlich-Mathematischen  
Gesamtfakultät  
der Ruprecht-Karls-Universität  
Heidelberg

vorgelegt von  
Dipl.-Phys. Sonja E. I. Gradl geb. Wunderlich  
aus Böblingen

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 2003



Qualitätssicherung beim Bau des  
inneren Spurkammersystems von HERA-*B*  
und  
Studien zu einem  
Open-Charm-Trigger

Gutachter: Prof. Dr. Franz Eisele  
Prof. Dr. Jürgen von Krogh



## Zusammenfassung

Das innere Spurkammersystem des HERA-*B* -Detektors wurde unter Beteiligung des Physikalischen Instituts Heidelberg entwickelt und gebaut. Für dieses hochauflösende Spurkammersystem, das in einer hadronischen Umgebung unter LHC-ähnlichen Bedingungen betrieben wird, wurde die GEM-MSGC als Detektortechnologie gewählt. Im ersten Teil dieser Arbeit wurden für den Kammerbau Testprozeduren definiert und optimiert, die es ermöglichen, fehlerhafte Komponenten vor dem Bau auszusortieren. Dadurch konnten Ausfälle der bei HERA-*B* eingebauten Detektoren im voraus weitgehend verhindert werden. Vor dem Einbau des Spurkammersystems wurden alle Superlagen ausführlichen Tests bei betriebsnahen Bedingungen unterzogen. Für die Datennahme wurde ein Datenqualitätsprogramm entwickelt, mit dem die Qualität der Daten online überwacht wurde. Nach der ersten Datennahmeperiode 1999/2000 wurden alle Superlagen ausgebaut, repariert und für die Datennahme 2002/2003 vorbereitet. Der Arbeitsplan für diese Umbaumaßnahmen wurde unter Verwendung der Ergebnisse des Monitorprogramms erstellt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird anhand einer Monte-Carlo-Simulation ein Triggeralgorithmus entwickelt, der Open-Charm-Mesonen anreichern soll. Die Triggerstrategie, mit einem getriggerten Lepton aus einem semileptonischen Zerfall einen vom Draht abgesetzten Sekundärvertex zu finden, erweist sich als ungeeignet. Ein vom Lepton unabhängiger Trigger, der nur Ereignisse mit abgesetzten Dreiteilchenvertices akzeptiert, ist dagegen geeignet, Open-Charm-Ereignisse anzureichern. Anhand von Daten der Datennahmeperiode 2002 wird gezeigt, daß mit dem entwickelten Algorithmus ein Open-Charm-Signal gefunden werden kann.

## Abstract

The inner tracker of the HERA-*B* experiment was designed and built with participation of the Institute of Physics, Heidelberg. It provides high-resolution tracking in an LHC like hadronic environment. The chosen detector technology is the GEM-MSGC. In the first part of this thesis the test procedures observed during the assembly of detectors and tracking stations were defined and optimized with the goal to sort out defective components before using them in the construction of chambers or tracking stations. An online monitoring program was developed which was routinely used to assess the status and the data quality of the system. After the completion of the data taking period 1999/2000, the complete inner tracker was repaired and upgraded for the data taking period 2003, using the results of the monitoring program to identify problematic detectors.

In the second part of this thesis, a trigger algorithm to enrich open charm events was developed using a Monte Carlo simulation. It was found that an algorithm using a triggered lepton track and requiring a detached two- or three-prong vertex with this track has not enough signal efficiency if the rejection power is high enough to cope with the event rate. An alternative strategy to search for a detached three-prong vertex which does not contain the trigger track was found to have a sufficient efficiency while providing enough rejection power for background events. Using data taken during the run period of 2002, it is shown that this algorithm can be used to select an open charm signal.

Diese Arbeit ist im WWW unter folgender URL zu finden:

<http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/publications/sgradl03.pdf>



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Das Physikprogramm von HERA-B</b>	<b>3</b>
2.1	Der Produktionswirkungsquerschnitt $\sigma_{b\bar{b}}$ . . . . .	3
2.2	Charmoniumproduktion und nukleare Unterdrückung . . . . .	4
2.3	Abhängigkeit der $J/\psi$ -Unterdrückung von der Zentralität des Stoßes des Protons mit dem Nukleon . . . . .	6
2.4	Untersuchung von Open-Charm-Prozessen . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Das HERA-B-Experiment</b>	<b>9</b>
3.1	Der Speicherring HERA . . . . .	9
3.2	Der HERA-B-Detektor . . . . .	10
3.2.1	Die wichtigsten Detektorkomponenten . . . . .	11
3.2.2	Das Triggersystem . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Das innere Spurkammersystem</b>	<b>17</b>
4.1	Anforderungen an das innere Spurkammersystem . . . . .	17
4.2	Detektortechnologie . . . . .	18
4.2.1	Die GEM-MSGC des inneren Spurkammersystems von HERA-B . . . . .	19
4.3	Aufbau der Spurkammersuperlagen . . . . .	20
4.4	Der Auslesechip HELIX128S . . . . .	24
4.4.1	Die verwendeten HELIX-Versionen . . . . .	25
4.5	Das Hochspannungssystem . . . . .	26
4.6	Das Gassystem . . . . .	27
<b>I</b>	<b>Qualitätssicherung beim Bau des inneren Spurkammersystems von HERA-B</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Tests und Kontrollen parallel zum Bau des inneren Spurkammersystems</b>	<b>31</b>
5.1	Test der Detektorkomponenten . . . . .	32
5.1.1	Aufbau der GEM-MSGC . . . . .	32
5.1.2	MSGC-Substrattest . . . . .	33
5.1.3	GEM-Folientest . . . . .	35
5.1.4	Kontrolle der Driftdeckel . . . . .	38
5.1.5	Kontrolle der Hohlrahmen . . . . .	38
5.2	Ausheizen der einzelnen Detektorkomponenten . . . . .	39
5.3	Fertigstellung der GEM-MSGC aus getesteten Komponenten . . . . .	40
5.4	Erster Kammertest unter Betriebsbedingungen . . . . .	40

5.4.1	Gasdichtigkeit der GEM-MSGC . . . . .	41
5.4.2	Hochspannungstest . . . . .	41
5.4.3	Bonden der Elektronik . . . . .	41
5.5	Zusammenbau der Halbsuperlage . . . . .	42
5.6	Kompletttest der Superlagen vor dem Einbau im Experiment . . . . .	46
5.6.1	Letzte Vorbereitungen an den Halbsuperlagen . . . . .	46
5.6.2	Gasdichtigkeitstest in der Testhalle . . . . .	46
5.6.3	Hochspannungstest in der Testhalle mit Zählgas . . . . .	47
5.6.4	HELIX-Chiptest in der Testhalle . . . . .	48
5.6.5	Zusammenfassung des Superlagentests des inneren Spurkammersystems in der Testhalle . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Online Monitoring bei HERA-B</b>	<b>53</b>
6.1	Rohdaten . . . . .	53
6.1.1	Korrekturen an die Rohdaten . . . . .	53
6.1.2	Bestimmung des Rauschens . . . . .	55
6.1.3	Treffersuchalgorithmus . . . . .	55
6.1.4	Komprimierung der Rohdaten . . . . .	55
6.2	Das Monitorprogramm . . . . .	56
6.2.1	L2-Monitorprogramm . . . . .	57
6.2.2	L4-Monitorprogramm . . . . .	60
6.3	Zusammenfassung der Datenqualität des inneren Spurkammersystems . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Umbau im Shutdown 2000/2001</b>	<b>65</b>
7.1	Erfahrungen aus dem Betrieb bei HERA-B 1999/2000 . . . . .	65
7.2	Bestandsaufnahme aller aufgetretenen Defekte an den GEM-MSGCs . . . . .	67
7.2.1	Kammerströme . . . . .	67
7.2.2	Trefferverteilungs- und Rauschhistogramm . . . . .	68
7.3	Umbau der Superlagen . . . . .	69
7.4	Aufbau der Halbsuperlage mit neuem Erdungsschema . . . . .	71
7.4.1	Tests der Halbsuperlagen . . . . .	72
7.4.2	Zusammenfassung des Umbaus der Superlagen im Shutdown 2001 . . . . .	74
7.5	Das innere Spurkammersystem 2002/2003 . . . . .	74
<b>II</b>	<b>Studien zu einem Open-Charm-Trigger</b>	<b>79</b>
<b>8</b>	<b>Studien zu einem Open-Charm-Meson-Trigger</b>	<b>81</b>
8.1	Benötigte FLT- und SLT-Triggerraten . . . . .	82
8.2	Zerfallslängen der betrachteten $D$ -Mesonen . . . . .	84
8.2.1	Das $D^+$ -Meson . . . . .	85
8.2.2	Das $D^0$ -Meson . . . . .	86
8.3	Verwendete Simulationen . . . . .	86
8.4	Der Sekundärvertex . . . . .	88
8.4.1	Sekundärvertex beim $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall, Dreiteilchenvertex . . . . .	88
8.4.2	Sekundärvertex beim $D^0 \rightarrow e^+ \nu_e X$ -Zerfall . . . . .	90
8.4.3	Abstand des Sekundärvertex zum Draht . . . . .	90
8.4.4	Zusammenfassung der Suche nach Sekundärvertices . . . . .	91



8.5	Triggerszenario: Leptontrigger mit abgesetztem Lepton-Sekundärvertex . . . . .	92
8.5.1	Leptonvertex mit einer weiteren Spur . . . . .	92
8.5.2	Leptonvertex mit zwei weiteren Spuren . . . . .	93
8.5.3	Open-Charm-Meson-Ratenabschätzung für den Lepton-Sekundärvertex . . . . .	94
8.5.4	Triggereffizienz des Elektron-Dreiteilchenvertex-Triggers . . . . .	96
8.5.5	Zusammenfassung: Leptontrigger mit abgesetztem Lepton-Sekundärvertex . . . . .	97
8.6	Triggerszenario: abgesetzter $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfallstrigger . . . . .	98
8.6.1	Impuls und Transversalimpuls . . . . .	99
8.7	Abschätzmethode des Transversalimpulses . . . . .	100
8.8	Transversalimpulstrigger . . . . .	102
8.8.1	Suche nach einer Spur mit großem Transversalimpuls . . . . .	102
8.8.2	Effizienz der Suchmethode für einen perfekten Detektor . . . . .	105
8.8.3	Effizienz der Suchmethode für einen realen Detektor . . . . .	106
8.8.4	Zusammenfassung Transversalimpulstrigger . . . . .	108
8.9	Öffnungswinkeltrigger . . . . .	109
8.9.1	Zusammenfassung des Sekundärvertex-Triggers auf den $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall . . . . .	111
8.10	Vergleich von Simulation und Daten . . . . .	112
8.10.1	Vertexdetektorspuren und Vertexdetektormultiplizität . . . . .	113
8.10.2	FLT-Triggerstrategie . . . . .	116
8.10.3	Überprüfung der Vertexauflösung des Vertexdetektors . . . . .	117
8.10.4	Die Verteilung des Sekundärvertex . . . . .	118
8.11	Datenreduktion durch verschiedene Schnitte . . . . .	119
8.12	Ratenabschätzung für einen FLT-Leptontrigger mit zusätzlichen $D \rightarrow K \pi \pi$ -SLT-Trigger . . . . .	123
8.13	Zusammenfassung des Triggerszenarios für den Zerfall $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ im SLT- Trigger . . . . .	124
8.14	Test des $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Triggers an Daten . . . . .	125
8.14.1	Minimum-Bias-Datennahme 2002/2003 . . . . .	125
8.15	$D^\pm$ -Produktionswirkungsquerschnitt . . . . .	127
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Bauprozedur der im Jahr 2002 eingesetzten GEM-MSGC-Detektoren</b>	<b>133</b>
<b>B</b>	<b>Reduktion der Ereignisse durch verschiedene Schnitte</b>	<b>139</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>149</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Elementarteilchenphysik beschäftigt sich mit der Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie und der Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Mit der Entwicklung neuer Technologien und dem Bau neuer Beschleuniger mit höheren Energien und den daran angesiedelten Experimenten ist es möglich geworden, eine Theorie zu überprüfen, die viele Phänomene aus der Welt der Elementarteilchen beschreibt, das sogenannte Standardmodell. Das Standardmodell hat in vielen Bereichen spektakuläre Erfolge erzielt, es hat aber auch zwei Probleme: zum einen beschreibt es eine fundamentale Wechselwirkung, die Gravitation, nicht, zum anderen besitzt es viele freie Parameter (19 verschiedene Parameter). Die Werte der verschiedenen Parameter können nicht theoretisch abgeleitet werden, sondern müssen experimentell vermessen werden.

Es werden eine Vielzahl an Experimenten durchgeführt, um Abweichungen vom Standardmodell zu finden. Eines dieser Experimente ist HERA-*B*, das dafür konstruiert wurde, die CP-Verletzung im System der  $B^0/\bar{B}^0$ -Mesonen zu messen. Die CP-Symmetrie ist eine diskrete Symmetrie im Standardmodell, die aussagt, daß sich Teilchen und Antiteilchen unter einer Raumspiegelung gleich verhalten. 1964 wurde die Verletzung der CP-Symmetrie im System der  $K^0/\bar{K}^0$ -Mesonen nachgewiesen [CCFT64]. Im System der  $K^0$ -Mesonen ist die CP-Verletzung ein kleiner Effekt in der Größenordnung von  $10^{-3}$ . Im System der  $B^0$ -Mesonen sagt der zur Erklärung der CP-Verletzung konstruierte Mechanismus [KM73, Cab63] einen deutlich größeren Effekt voraus.

Um die CP-Verletzung im System der  $B$ -Mesonen zu messen, wurden in den letzten 10 Jahren sowohl an Elektron-Positron-Beschleunigern als auch an Protonbeschleunigern eine Reihe von Experimenten geplant und gebaut. Die Experimente an Elektron-Positron-Beschleunigern sind BABAR am PEP-II Beschleuniger, USA [A<sup>+</sup>02b], und BELLE am KEK-Beschleuniger, Japan [SM<sup>+</sup>02]. BELLE und BABAR haben auf der Sommerkonferenz ICHEP 2000 in Osaka, Japan, erste Ergebnisse der CP-Verletzung im System der  $B$ -Mesonen vorgestellt [A<sup>+</sup>00b, A<sup>+</sup>00a]. Mittlerweile wurden verschiedene Zerfallskanäle mit großer Statistik vermessen und die CP-Verletzung im System der  $B^0$ -Mesonen eindeutig nachgewiesen [Rah02, A<sup>+</sup>03c, A<sup>+</sup>02a]. An einem Protonbeschleuniger wurde das Experiment HERA-*B* gebaut. Der Start der Datennahme von HERA-*B* hat sich wegen verschiedener Detektorprobleme um mehrere Jahre verzögert. Die ersten Testdaten mit einem nicht vollständig installierten Detektor wurden im Jahr 1999/2000 genommen. Im Jahr 2001 wurde der Beschleuniger HERA umgebaut, was eine neun Monate lange Unterbrechung der Datennahme zur Folge hatte („Lumi Upgrade Shutdown“). Durch diese Zeitverzögerung hat HERA-*B* keine Möglichkeit mehr, signifikant zur Physik der CP-Verletzung beizutragen. Es wurde daraufhin ein neues Physikprogramm ausgearbeitet, das sich mit Aspekten der QCD beschäftigt [HER00].

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil behandelt den Aufbau des inneren

Spurkammersystems von HERA-*B*, im zweiten Teil wird anhand einer Detektorsimulation die Möglichkeit geprüft, Open-Charm-Ereignisse anzureichern.

Im Verlauf dieser Arbeit wurden die GEM-MSGC-Detektoren des inneren Spurkammersystems in Heidelberg gebaut. Vor dem Zusammenbau wurde jede einzelne Komponente der GEM-MSGC gründlich getestet, um spätere Ausfälle bei HERA-*B* zu vermeiden. Während des Zusammenbaus wurden die verwendeten Komponenten ständigen Funktionalitätstests unterzogen, um sicherzustellen, daß keine weiteren Defekte auftraten. Zeitgleich zur Produktion der GEM-MSGC-Detektoren wurden Prototypen der GEM-MSGC in Strahltests auf ihr Alterungsverhalten überprüft [Ric00, Wer00]. Erkenntnisse aus diesen Strahltests wurden in der Bauprozedur berücksichtigt, was zu mehreren Umstellungen führte. Nach dem Bau der GEM-MSGC wurden die Detektoren in Siegen einem ersten Funktionalitätstest unterzogen und mit Ausleseelektronik versehen. Die getesteten und mit Elektronik ausgerüsteten GEM-MSGC-Detektoren wurden in Heidelberg zu Halbsuperlagen des inneren Spurkammersystems zusammengebaut. Diese Halbsuperlagen wurden in Hamburg, vor dem Einbau bei HERA-*B*, ausführlichen Hochspannungs- und Auslesetests unterzogen. Das innere Spurkammersystem wurde an Zugangstagen während der Jahre 1999/2000 bei HERA-*B* eingebaut und in die Datennahme integriert [Gra01]. Die Daten des inneren Spurkammersystems wurden während der Datennahme ständig mit einem Qualitätsprogramm kontrolliert.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird ein Teil eines möglichen zukünftigen Physikprogramms des HERA-*B*-Detektors, der Open-Charm-Physik, bearbeitet. Bei HERA-*B* werden sehr viele  $c\bar{c}$ -Quark-Paare produziert. Die  $c$ -Quarks können in einem gebundenen Endzustand mit einem  $\bar{c}$ -Quark, als „Charmonium“, vorkommen (Hidden-Charm). Das  $c$ -Quark kann aber auch mit anderen Quarks zusammen ein Meson bilden, in dem nur ein  $c$ -Quark enthalten ist (Open-Charm). Der HERA-*B*-Trigger ist so aufgebaut, daß  $J/\psi$ -Zerfälle in ein Leptonpaar angereichert werden. Die Open-Charm-Mesonen werden bisher nicht durch den HERA-*B*-Trigger angereichert. Die Anreicherung verschiedener Open-Charm-Mesonen durch einen Leptontrigger wird betrachtet. Für die semileptonischen Zerfälle  $D^0 \rightarrow \ell + X$  und  $D^+ \rightarrow \ell + X$  wird eine Triggerstrategie betrachtet, in der auf einen abgesetzten Zweiteilchenvertex getriggert wird. Für den Dreiteilchenzerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  wird eine Triggerstrategie ausgearbeitet, die auf die drei geladenen Spuren triggert. Das Triggerszenario für den Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  wird an Hand existierender Daten überprüft.

## Kapitel 2

# Das Physikprogramm von HERA-*B*

HERA-*B* wurde aufgebaut, um die CP-Verletzung im *B*-Mesonensystem nachzuweisen. Durch den Einsatz in einer hadronischen Hochratenumgebung werden an Detektoren und Trigger extreme Anforderungen gestellt, die ähnlich den beim Beschleuniger der nächsten Generation (LHC) erwarteten sind. Da bei der Inbetriebnahme des Detektors sehr viele Detektorprobleme auftraten, hat sich die Datennahme um mehrere Jahre verzögert. Die ersten Testdaten mit einem nicht vollständig installierten Detektor und einem nicht vollständig in Betrieb genommenen Trigger zum Anreichern der interessanten Ereignisse wurden im Jahr 1999/2000 genommen. Während eines langen Shutdowns im Jahr 2001, in dem der Beschleuniger HERA umgebaut wurde, wurde der Detektor repariert und zum Teil modifiziert. Durch die Zeitverzögerung hat HERA-*B* keine Möglichkeit mehr, signifikant zur Physik der CP-Verletzung beizutragen. Ein mit einem funktionierenden Detektor und einem Datennahmezeitraum von 8 Monaten erreichbares Physikprogramm wurde im Dezember 2000 ausgearbeitet [HER00]. Das neue Physikprogramm für HERA-*B* soll die Stärken des Experiments ausnutzen und mit dem bestehenden Detektor durchgeführt werden können. Der HERA-*B*-Detektor ist ein Vorwärtsspektrometer mit hervorragender Auflösung, er hat eine sehr gute Vertexrekonstruktion, eine sehr gute Teilchenidentifikation und deckt einen großen kinematischen Bereich ab, z. B. für  $J/\psi$ -Zerfälle ( $-0,4 < x_F < 0,3$ ), der zum Teil bisher noch nicht gemessen wurde. Der neuentwickelte HERA-*B*-Trigger ist darauf ausgelegt, Ereignisse anzureichern, die ein Leptonpaar mit großer Masse im Endzustand enthalten. Da HERA-*B* Hadronstreuungsprozesse untersucht, werden im weiteren Physikprogramm hauptsächlich Prozesse der Proton-Kern-Wechselwirkung im Bereich der Quantenchromodynamik (QCD) untersucht. Das HERA-*B*-Physikprogramm wurde unterteilt in zwei Teile, die auf jeden Fall gemessen werden sollen: 1. der Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{b\bar{b}}$  für die Produktion von *b*-Quarks und 2. die nukleare Unterdrückung der Charmoniumproduktion. Diese zwei Meßziele bekommen bei der Datennahme Priorität. Mit einem verlängerten Datenzeitraum können weitere Physikprozesse vermessen werden, z. B. die Abhängigkeit der Charmonium-Produktion von der Zentralität des Stoßes, oder die Untersuchung von Open-Charm-Prozessen.

### 2.1 Der Produktionswirkungsquerschnitt $\sigma_{b\bar{b}}$

Für den Produktionswirkungsquerschnitt  $\sigma_{b\bar{b}}$  wurden bisher von zwei Experimenten Ergebnisse in Proton-Nukleon-Streuung bei einem Protonstrahlimpuls von 800 GeV/*c* veröffentlicht, den Experimenten E789 [J<sup>+</sup>95] und E771 [A<sup>+</sup>97]:

$$\sigma_{b\bar{b}} = (5,7 \pm 1,5(\text{stat.}) \pm 1,3(\text{syst.})) \text{ nb/Nukleon} \quad (\text{E789})$$

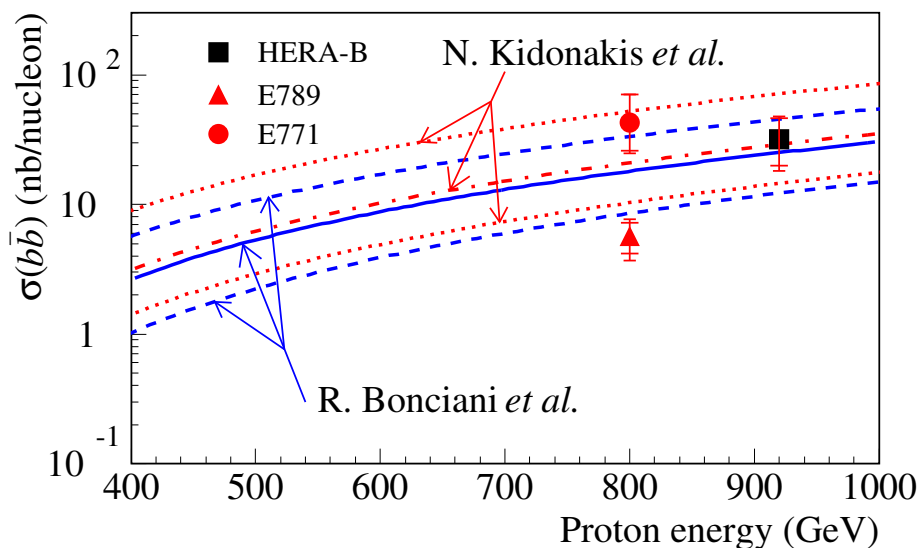
$$\sigma_{b\bar{b}} = (43_{-17}^{+27}(\text{stat.}) \pm 7(\text{syst.})) \text{ nb/Nukleon} \quad (\text{E771})$$

Die Ergebnisse der beiden Experimente sind mit großen Unsicherheiten behaftet und weichen stark voneinander ab (siehe Abb. 2.1). Sie stimmen aber innerhalb ihrer großen Fehler mit neuesten theoretischen Vorhersagen von R. Bonciani et al. [BCMN98], in die die neuesten Berechnungen der NNLO-Partonverteilungsfunktionen [MRST02] eingehen, und Vorhersagen von N. Kidonakis et al. [KLMV01], die selbst wieder leicht voneinander abweichen, überein.

Eine erste Messung des Produktionswirkungsquerschnitts  $\sigma_{b\bar{b}}$  mit dem HERA-B-Detektor bei einer Protonstrahlenergie von 920 GeV wurde mit Daten durchgeführt, die im Jahre 2000 aufgenommen wurden. Die Analyse liefert folgenden Wert für den Produktionswirkungsquerschnitt  $\sigma_{b\bar{b}}$  [A<sup>+</sup>03a]:

$$\sigma_{b\bar{b}} = (32^{+14}_{-12}(\text{stat.}) \pm_7^6(\text{syst.})) \text{ nb/Nukleon.}$$

Das HERA-B-Ergebnis stimmt gut mit den neuesten QCD-Berechnungen überein. Die Ergebnisse über der Protonstrahlenergie aller drei Experimente zusammen mit den aktuellen theoretischen Vorhersagen sind in Abb. 2.1 aufgetragen.



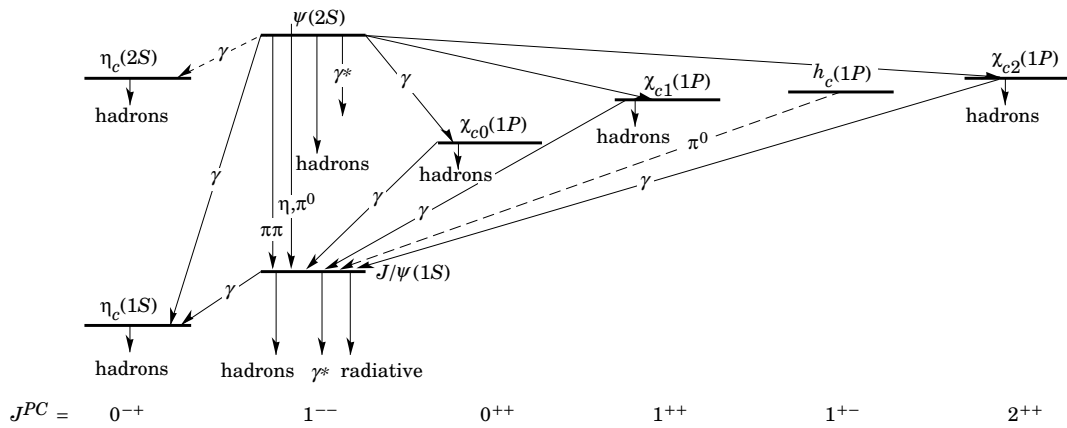
**Abbildung 2.1:** Vergleich der  $\sigma_{b\bar{b}}$ -Ergebnisse der drei Experimente mit neuesten theoretischen Vorhersagen von [BCMN98, KLMV01] (aus [A<sup>+</sup>03a]).

Mit Daten, die bei HERA-B 2002/2003 aufgenommen werden, wird es möglich sein, die Fehler erheblich zu verringern.

## 2.2 Charmoniumproduktion und nukleare Unterdrückung

Bei der Kollision des Protonstrahls mit dem Drahttarget werden durch Quarkvernichtung und durch Gluonfusion häufig Paare von Charm-Quarks produziert. Ein Teil der so entstandenen  $c\bar{c}$ -Paare bildet ein gebundenes Charmoniumsystem im Endzustand (sogenannte „Hidden-Charm“). In Abb. 2.2 ist das Termschema des Charmoniumsystems dargestellt.

Der HERA-B-Trigger ist darauf ausgelegt, Ereignisse anzureichern, die ein Leptonpaar mit hoher Masse enthalten. Fast alle Charmoniumzustände können in Endzustände mit einem Leptonpaar  $\ell\bar{\ell}$  oder einem  $J/\psi$ , das wieder in ein Leptonpaar zerfällt, zerfallen (siehe Tab. 2.1). Daher werden bei der Datennahme mit dem Standardtrigger auf natürliche Weise mehrere verschiedene Charmoniumzustände aufgezeichnet.

Abbildung 2.2: Das Charmonium-Termschema (aus [H<sup>+</sup>02]).

Charmonium	Zerfall	Wahrscheinlichkeit
$J/\psi(1S)$	$\rightarrow e^+e^-$	$(5,93 \pm 0,10)\%$
	$\rightarrow \mu^+\mu^-$	$(5,88 \pm 0,10)\%$
$\psi(2S)$	$\rightarrow e^+e^-$	$(7,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$
	$\rightarrow \mu^+\mu^-$	$(7,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-3}$
	$\rightarrow J/\psi(1S) + X$	$(55,7 \pm 2,6)\%$
$\chi_{c0}(1P)$	$\rightarrow J/\psi(1S) + \gamma$	$(1,02 \pm 0,17)\%$
$\chi_{c1}(1P)$	$\rightarrow J/\psi(1S) + \gamma$	$(31,6 \pm 3,2)\%$
$\chi_{c2}(1P)$	$\rightarrow J/\psi(1S) + \gamma$	$(18,7 \pm 2,0)\%$

Tabelle 2.1: Charmoniumzerfälle mit einem Leptonpaar oder  $J/\psi$  im Endzustand [H<sup>+</sup>02].

Die Produktion schwerer Charmoniumzustände (z. B.  $J/\psi(1S)$ ,  $\psi(2S)$  und  $\chi_{c1,2}(1P)$ ) ist in Proton-Kern-Wechselwirkungen gegenüber der Produktion in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen unterdrückt. Dieser Effekt wird nukleare Unterdrückung genannt. Die nukleare Unterdrückung wird wie folgt parametrisiert:

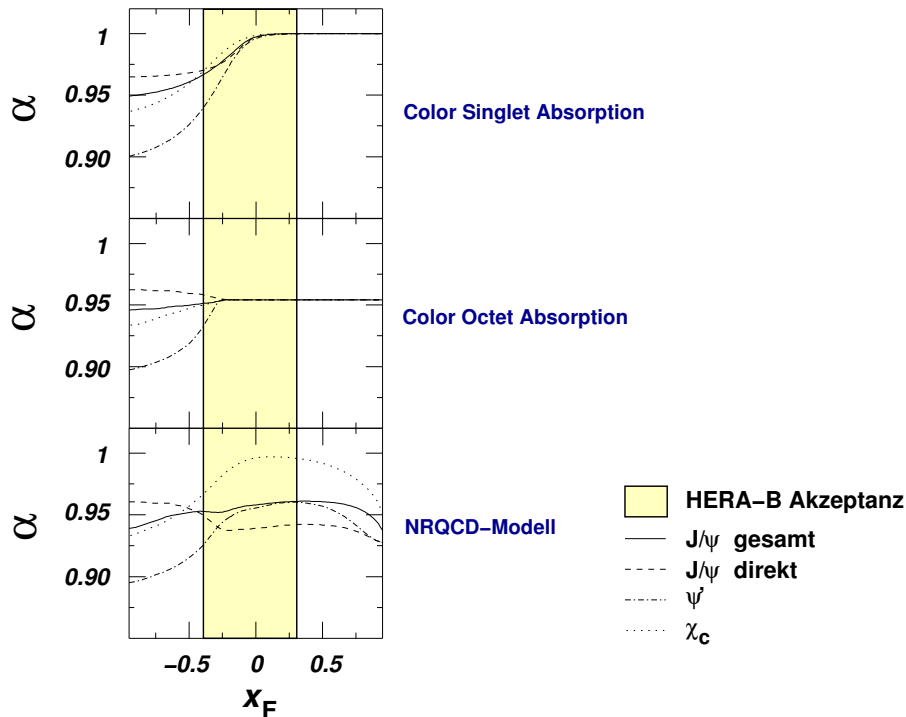
$$\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \cdot A^\alpha \quad \alpha = \alpha(x_F, p_T)$$

$\sigma_{pA}$  ist der Produktionswirkungsquerschnitt in der Proton-Kern-Wechselwirkung,  $\sigma_{pN}$  derjenige in Proton-Nukleon-Wechselwirkung.  $A$  ist die Massenzahl des Targetkerns. Der Parameter  $\alpha$ , der von den kinematischen Größen  $x_F$  und  $p_T$  abhängt, beschreibt die nukleare Unterdrückung. Die Feynman-Variable  $x_F$  ist ein Maß für den longitudinalen Impuls eines Teilchens,  $p_T$  ist der Transversalimpuls des Teilchens.  $x_F$  und  $p_T$  sind folgendermaßen definiert:

$$x_F = \frac{p'_z}{p_z^{max}} \approx \frac{2p_z}{\sqrt{s}} \quad p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} = p'_T \quad (2.1)$$

$p'_x$ ,  $p'_y$  und  $p'_z$  sind die Impulskomponenten des Teilchens im Laborsystem,  $p_z^{max}$  ist der maximale Impuls in z-Richtung im Laborsystem und  $p_z$  ist die z-Komponente des Impulses im Schwerpunktsystem.  $\sqrt{s}$  ist die Schwerpunktsenergie des Experimentes und ist bei HERA-B  $\sqrt{s} = 41,6$  GeV. Bei früheren Experimenten konnte der Produktionswirkungsquerschnitt nur für positives  $x_F$  gemessen werden; HERA-B hat die Möglichkeit, die Messung in den negativen  $x_F$ -Bereich zu erweitern. Es wurden verschiedene Modelle zur nuklearen Unterdrückung entwickelt, die unterschiedliche Vorhersagen für den Verlauf des Parameters  $\alpha$  in Abhängigkeit von  $x_F$

liefern. Die Vorhersagen verschiedener Modelle sind für die HERA-B-Energie in Abb. 2.3 dargestellt [Vog02]. Durch eine Messung der  $x_F$ -Abhängigkeit von  $\alpha$  kann HERA-B dazu beitragen,



**Abbildung 2.3:** Vorhersagen verschiedener Modelle für  $\alpha(x_F)$ . Der markierte Bereich zeigt den Bereich  $-0,4 < x_F < 0,3$ , der von HERA-B abgedeckt wird (nach [Vog02]).

die experimentelle Basis für das Verständnis der  $c\bar{c}$ -Produktion in Proton-Nukleon-Stößen erheblich zu verbessern. Durch den Überlapp mit anderen Experimenten bei  $x_F > 0$  kann die Messung von HERA-B direkt mit anderen Experimenten verglichen werden.

Die Unterdrückung der Charmonium-Produktion ist von sehr großem Interesse, da die  $J/\psi$ -Unterdrückung in Schwerionen-Kollisionen als Signatur für den Phasenübergang von normaler Nukleonmaterie zum Quark-Gluon-Plasma angesehen wird. Die Interpretation ist sehr schwierig, da ein sehr gutes Verständnis der Charmonium-Produktion vorausgesetzt wird. HERA-B kann dazu beitragen, das Verständnis der Charmonium-Produktion und die Produktionsverhältnisse der  $J/\psi$ ,  $\psi'$  und  $\chi_c$  besser zu verstehen.

### 2.3 Abhängigkeit der $J/\psi$ -Unterdrückung von der Zentralität des Stoßes des Protons mit dem Nukleon

Die  $J/\psi$ -Mesonabsorption in Kernmaterie hängt von der Weglänge des  $J/\psi$ -Mesons durch den Kern [CG99] ab. Die Weglänge des  $J/\psi$ -Mesons durch den Kern hängt von dem Kernmaterial und der Zentralität des Stoßes ab. Die Zentralität des Stoßes ist keine direkt beobachtbare Meßgröße, sie muß aus beobachteten Größen mit Hilfe von Modellen abgeleitet werden. Geeignet hierfür sind z. B. die totale Transversalenergie  $E_T$  des Ereignisses oder die Spurmultiplicität. In Experimenten der Schwerionenphysik wird die Produktion von Charmonium als Funktion der Transversalenergie  $E_T$  und damit der Zentralität gemessen. Bei Fixed-Target-Experimenten wurde die Zentralität bisher noch nie vermessen. Eine erste Abschätzung der Abhängigkeit von der Zentralität des Strahlprotons mit dem Targetkern ist Thema einer aktuellen Untersuchung



und ist in [Wol03] beschrieben.

## 2.4 Untersuchung von Open-Charm-Prozessen

Bei der Hadronisierung des  $c\bar{c}$ -Paares können sowohl gebundene  $c\bar{c}$ -Paare (Hidden-Charm), als auch Paare von  $D$ -Mesonen entstehen, die jeweils ein  $c$ - bzw.  $\bar{c}$ -Quark einzeln enthalten (Open-Charm). Die Charmonium-Wirkungsquerschnitte müssen auf die Gesamtzahl der primär erzeugten  $c\bar{c}$ -Paare normiert werden. Das Verständnis der Open-Charm-Produktion ist daher für das Physikprogramm von HERA- $B$  unerlässlich. Eine Messung von Open-Charm-Ereignissen würde eine natürliche Normierung der Hidden-Charm-Ereignisse liefern. Durch die verschiedenen Drahtmaterialien des HERA- $B$ -Targets kann die  $A$ -Abhängigkeit der Open-Charm-Produktion vermessen werden.

Besonders dazu geeignet sind Zerfälle, die komplett im Detektor rekonstruiert werden können, wie z. B.  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  und  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ . Das  $D^0/\bar{D}^0$ -Meson hat eine Lebensdauer von  $\tau_{D^0} = 0,48$  ps, das  $D^\pm$ -Meson hat eine Lebensdauer von  $\tau_{D^\pm} = 1,05$  ps. Diese „relativ große“ Lebensdauer führt zu einem vom HERA- $B$ -Target abgesetzten Sekundärvertex, der genutzt werden kann, um ein Open-Charm-Signal anzureichern.

Der Zerfall  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$  ist im Vergleich zu inelastischen Proton-Nukleon-Wechselwirkungen sehr selten. Im Analyseteil dieser Arbeit wird mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation ein Triggeralgorithmus entwickelt, um diesen Zerfall anzureichern.



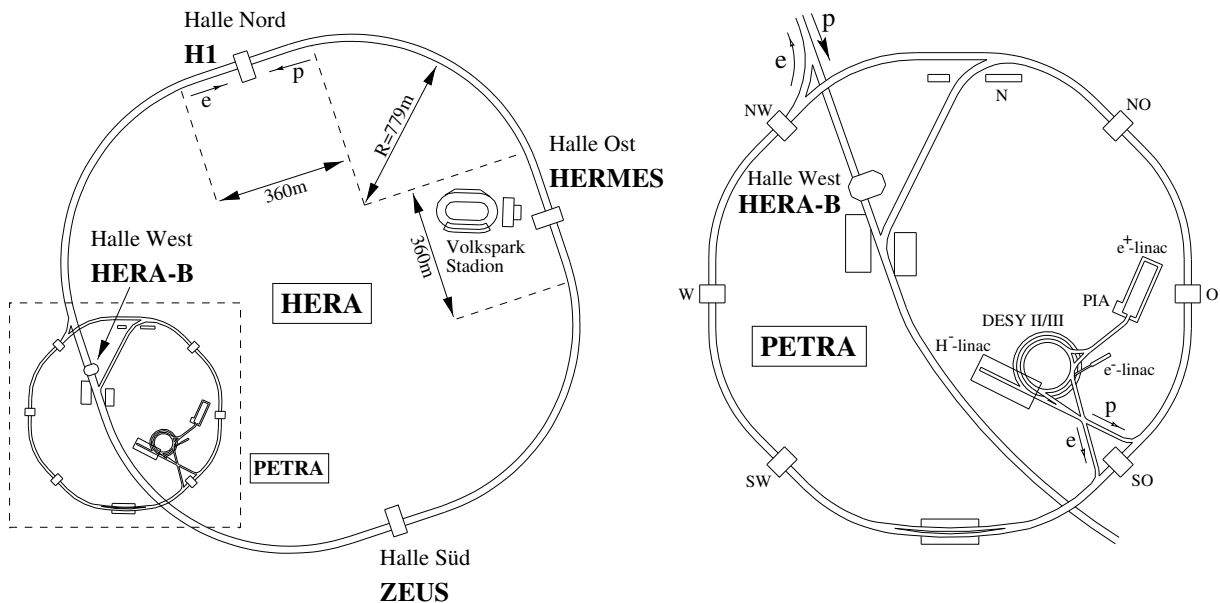
## Kapitel 3

# Das HERA-*B*-Experiment

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den HERA-*B*-Detektor an der **H**adron-**E**lektron-**R**ing-Anlage (HERA) in Hamburg gegeben. Der HERA-*B*-Detektor wurde ursprünglich konstruiert, um die CP-Verletzung im *B*-Mesonen-System nachzuweisen. Das Design des Detektors und des Triggers spiegelt das ursprüngliche Physikziel wider.

### 3.1 Der Speicherring HERA

In Hamburg wird der Speicherring HERA am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) betrieben. Bei HERA werden vorbeschleunigte Protonen und Elektronen in zwei Speicherringen in entgegengesetzte Richtungen beschleunigt. Die maximale Protonenenergie ist 920 GeV, die maximale Energie der Elektronen ist 27,5 GeV. Der Ring, der einen Umfang von 6,3 km hat, ist in Abb. 3.1 mit den benötigten Vorbeschleunigern dargestellt.



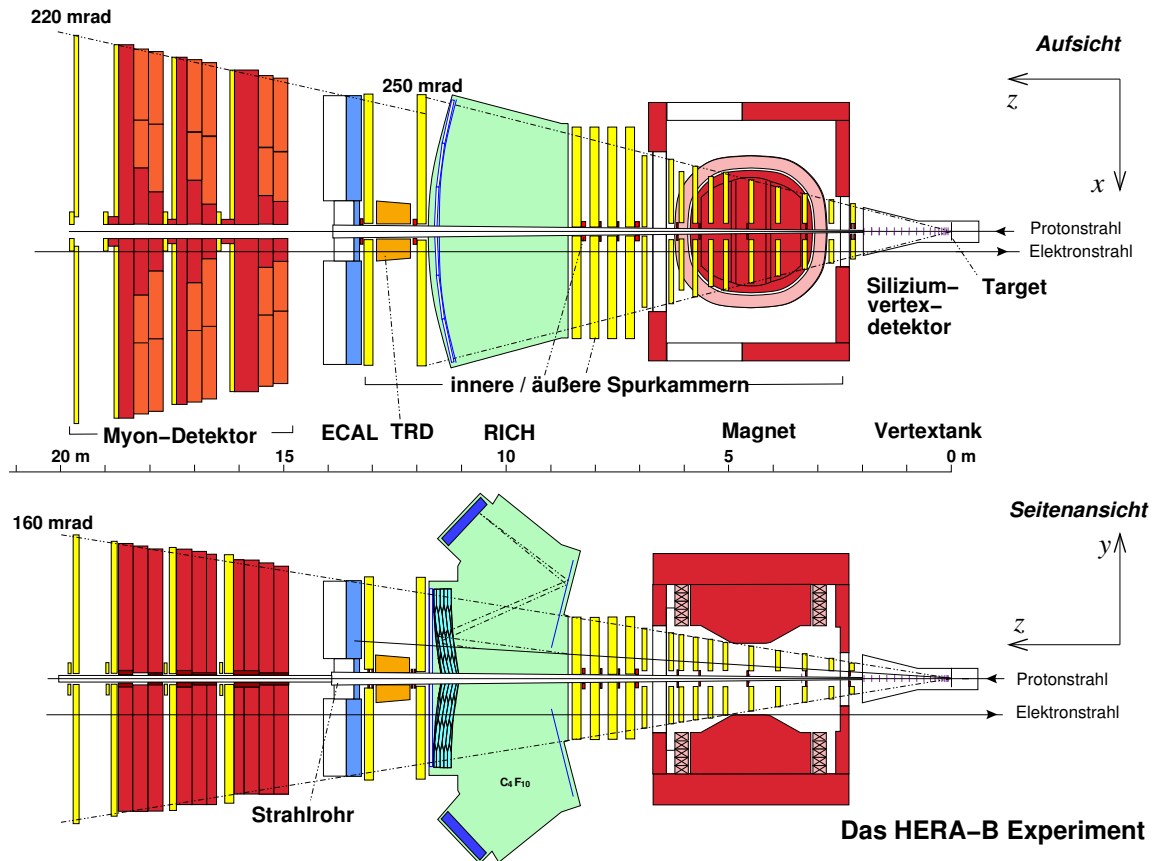
**Abbildung 3.1:** Links ist der HERA-Speicherring in Hamburg und rechts die Vorbeschleuniger PETRA und DESY vergrößert dargestellt. Das Experiment HERA-*B* wurde in der Halle West installiert [DES00].

Vier Groß-Experimente sind am Speicherring HERA angesiedelt, die alle gleichzeitig die gespeicherten Teilchenstrahlen verwenden. Bei ZEUS und H1 werden die beiden Strahlen zur Kollision gebracht und damit unter anderem die Struktur des Protons untersucht. Das Experiment

HERMES verwendet nur den Elektronstrahl, der, bevor er das HERMES-Experiment erreicht, longitudinal polarisiert wird und auf ein polarisiertes Gastarget gelenkt wird. HERMES mißt damit die Spinverteilung der Quarks in den Nukleonen. Das vierte und neueste Großexperiment ist HERA-*B*, das nur den Protonenstrahl verwendet. In den äußeren Strahlbereich, den Halo, werden dünne Targetdrähte gefahren, mit denen die Protonen des Strahlhalos inelastisch wechselwirken.

### 3.2 Der HERA-*B*-Detektor

Der HERA-*B*-Detektor ist ein typisches Vorwärtsspektrometer. Der Detektor ist in Abb. 3.2 schematisch dargestellt (Abgebildet ist der Detektor in der Konfiguration der Jahre 1999/2000). Auf der Zeichnung kommt der Protonenstrahl von rechts. Das Target ist im Tank des Vertexdetektors montiert. Dem Vertexdetektor folgt ein Dipolmagnet mit einer maximalen Feldstärke von 0,85 T. Die Ablenkebene des Magneten verläuft horizontal. Vor und hinter dem Magneten befindet sich ein Spurkammersystem. Bis zum Jahreswechsel 2000/2001 waren Detektoren zur Spurfindung auch im Magneten eingebaut. Teilchen werden mit einem ringabbildenden Čerenkov-Zähler (Ring Imaging Čerenkov Counter (RICH)), einem elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL) und einem Myondetektor-System identifiziert. Der gesamte Detektor hat eine Länge von ungefähr 20 m. Der Elektronenstrahl wird in etwa 1 m Abstand vom Protonenstrahl durch den Detektor geführt.



**Abbildung 3.2:** Schematische Zeichnung des HERA-*B*-Detektors im Jahr 2000 in Aufsicht (oben) und von der Seite (unten). Die Protonen laufen von rechts ein. Bei  $z = 0$  m wird das Target an den Strahl herangefahren. Hinter dem Target kommt das Vertex-System, gefolgt von dem Spektrometern. Vor, in und nach dem Magneten befinden sich Spurfindungssuperlagen. Teilchenidentifikation wird mit dem Ring Imaging Čerenkov Counter (RICH), dem elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL) und dem Myonsystem bewerkstelligt.

Das HERA-*B*-Koordinatensystem hat seinen Nullpunkt beim Target. In Protonstrahlrichtung verläuft die positive  $z$ -Achse. Die  $x$ -Achse verläuft parallel zur Erdoberfläche, wobei die positive  $x$ -Achse auf den Ringmittelpunkt zeigt. Die  $y$ -Achse vervollständigt das Koordinatensystem zu einem rechtshändigen System. Der HERA-*B*-Detektor weist Teilchen nach die in  $x$ -Richtung einen Winkel von 10–220 mrad zur Strahlachse und in  $y$ -Richtung einen Winkel von 10–160 mrad haben. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die wichtigsten Komponenten des HERA-*B*-Experiments.

### 3.2.1 Die wichtigsten Detektorkomponenten

#### Das Draht-Target

Das Target [V<sup>+</sup>00] besteht aus zwei Stationen, in denen jeweils vier Drähte einzeln auf Keramikgabeln gespannt sind. Die Targetstationen sind in 4 cm Abstand voneinander im Vakuumtank des Vertexdetektors montiert. Sie sind so angeordnet, daß sie den Strahl rechteckig umschließen. Die Drähte bestehen aus unterschiedlichen Materialien; damit können materialabhängige Messungen durchgeführt werden, beispielsweise die Messung von Produktionswirkungsquerschnitten in Abhängigkeit von der Nukleonenzahl  $A$  des Targets. In Tab. 3.1 sind die Materialien und Dimensionen der verschiedenen Drähte der Datennahmeperioden 1999/2000 und 2002/2003 aufgeführt. Es werden in beiden Datennahmeperioden sowohl rechteckige als auch runde Drähte verwendet. Während der Datennahme 1999/2000 wurde die Targetkonfiguration nicht verändert. Während der Datennahme 2002/2003 wurde die Targetkonfiguration teilweise verändert. In Tab. 3.1 ist die Targetbestückung vor dem Weihnachtsshutdown 2002/2003 aufgelistet.

Jahr	Target	Material (Massenzahl)	Querschnitt	Ausdehnung Breite $b$ in $z$ , Dicke $d$ , in [ $\mu\text{m}$ ] oder Durchmesser $\phi$ in [ $\mu\text{m}$ ]
bis Aug. 2002	Oben 1	Titan (48)	rechteckig	$b, d$ : 500, 50
	Innen 1	Titan (48)	rechteckig	$b, d$ : 500, 50
	Unten 1	Titan (48)	rechteckig	$b, d$ : 500, 50
	Außen 1	Titan (48)	rechteckig	$b, d$ : 500, 50
	Oben 2	Aluminium (27)	rechteckig	$b, d$ : 500, 50
	Innen 2	Kohlenstoff (12)	rechteckig	$b, d$ : 1000, 100
	Unten 2	Wolfram (142)	rechteckig	$b, d$ : 500, 50
	Außen 2	Titan (48)	rund	$\phi$ : 50
bis Jan. 2003	Oben 1	Aluminium (27)	rechteckig	$b, d$ : 500, 50
	Innen 1	Wolfram (184)	rund	$\phi$ : 50
	Unten 1	Kohlenstoff (12)	rechteckig	$b, d$ : 500, 100
	Außen 1	Titan (48)	rund	$\phi$ : 50
	Oben 2	Palladium (106)	rund	$\phi$ : 50
	Innen 2	Kohlenstoff (12)	rechteckig	$b, d$ : 500, 100
	Unten 2	Titan (48)	rund	$\phi$ : 50
	Außen 2	Kohlenstoff (12)	rechteckig	$b, d$ : 500,100

**Tabelle 3.1:** Die verwendeten Targetmaterialien der Datennahme bis Aug. 2000 und bis Jan. 2003; die Massenzahl und die Maße der Targets sind ebenfalls angegeben.

Jeder einzelne Draht kann unabhängig von den anderen Drähten an den Strahlhalo herangefahren werden. Der Draht wird so weit in den Strahlhalo gefahren, bis die gewünschte Wechselwirkungsrate erreicht ist. Szintillationszähler überwachen ständig die Wechselwirkungsrate.

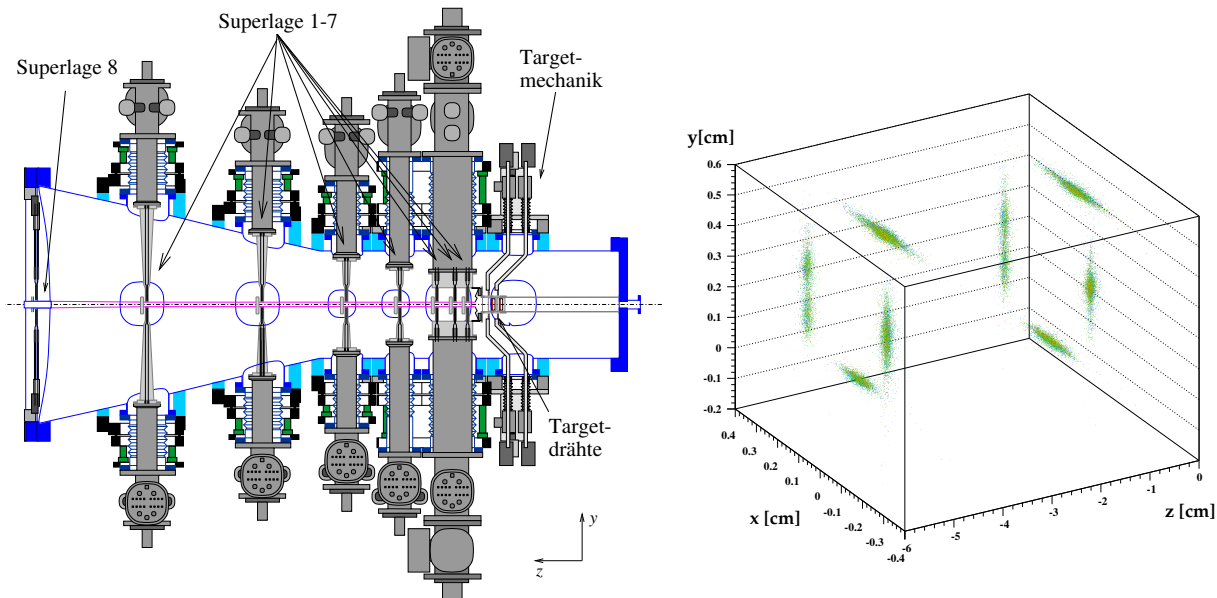
Verändert sich die Strahlposition, folgt das Target automatisch dem Strahl, so daß die Wechselwirkungsrate konstant gehalten wird. Je nachdem, wie weit der Draht in den Strahlhalo gefahren wird, werden unterschiedliche Wechselwirkungsraten erreicht. Es können alle 8 Drähte gleichzeitig verwendet werden. Die gleichmäßige Aufteilung der gewünschten Wechselwirkungsrate auf die einzelnen Drähte wird durch sogenannte Ladungsintegratoren erreicht, die die Rate der von den Protonen aus den einzelnen Drähten herausgeschlagenen Elektronen messen.

### Der Vertexdetektor (VDS)

Der Vertexdetektor [Brä01b] dient sowohl der Bestimmung der Primär- und Sekundärvertices, als auch als Spurfindungssystem. Er besteht aus 64 zumeist doppelseitigen Siliziumstreifenzählermodulen, die in 8 Superlagen angeordnet sind. Eine Superlage besteht meistens aus zwei Doppellagen. Die zwei Detektoren einer Doppellage sind um einen Winkel von  $90^\circ$  zueinander verdreht.

Der Ausleseabstand  $d$  der Detektoren ist  $50 \mu\text{m}$ . Daher ergibt sich für die Trefferauflösung nach der Formel  $\sigma = d/\sqrt{12}$  eine theoretische Auflösung von  $14 \mu\text{m}$ . Unter Berücksichtigung der Signalhöhe ist eine Auflösung von  $3\text{--}5 \mu\text{m}$  möglich. Die Vertexauflösung für Primärvertices ist  $\sigma_{x,y} \approx 50 \mu\text{m}$  und  $\sigma_z \approx 400 \mu\text{m}$  [Mas02]. Mit dem Vertexdetektor können Spuren in einem Winkel zur Strahlachse zwischen  $10$  und  $250 \text{ mrad}$  nachgewiesen werden.

Zur Minimierung des von den produzierten Teilchen zu durchquerenden Materials befinden sich die Superlagen 1 bis 7 in einem „Roman-Pot-System“ innerhalb eines  $2,6 \text{ m}$  langen Ultrahochvakuumtanks aus Edelstahl (siehe Abb. 3.3 links). Der Vakuumtank ist integraler Bestandteil des HERA-Proton-Speicherrings. Um übermäßige Strahlenschäden an den Detektoren zu vermeiden, besitzt der Vertexdetektor feinmotorische Schrittmotoren, die die Zähler während der Protoninjektion zurückziehen. Die Detektoren werden erst bei stabilem Targetbetrieb an den Strahl herangeführt. Rechts in Abb. 3.3 sind die vom VDS rekonstruierten Vertices bei einer Datennahme mit allen 8 Drähten am Strahl gezeigt. Die 8 Drähte sind durch die rekonstruierten Vertices deutlich zu sehen.



**Abbildung 3.3:** Links: Schematische Zeichnung des Vertexdetektor-Tanks (nach [Brä01a]). Rechts: rekonstruierte Vertices des Vertexdetektors während einer Datennahme mit allen 8 Drähten am Strahl [Mas00].

### Der Spektrometermagnet

Der Spektrometermagnet ist ein wassergekühlter normalleitender Dipolmagnet mit einer integrierten Feldstärke von  $\int Bdl = 2.2 \text{ Tm}$ . Die Ablenkebene des Magneten ist die  $xz$ -Ebene (parallel zur Erdoberfläche).

### Das Spurkammersystem (ITR und OTR)

Die Teilchendichte fällt mit dem Abstand  $r$  vom Strahlrohr ungefähr wie  $1/r^2$  ab. Aus diesem Grund ist das HERA-*B*-Spurkammersystem in zwei Komponenten mit unterschiedlicher Granularität unterteilt. Die Streifen- und Drahtabstände sowie die Detektormodulgrößen der zwei Komponenten sind so gewählt, daß die Trefferhäufigkeit pro Modul bei einer maximalen HERA-*B*-Wechselwirkungsrate von 40 MHz kleiner als 5–10% ist. Dadurch ist die benötigte Rechenzeit des Triggers und der Rekonstruktion klein. Das innere Spurkammersystem [B<sup>+</sup>02b] („Inner Tracker“, ITR) deckt einen Bereich von 6–30 cm um die Protonstrahlachse ab. Es besteht aus GEM-MSGCs (Mikrostreifen-Gaskammern mit Gas-Elektronenvervielfacher). Es wird in Kap. 4 genauer beschrieben. Das äußere Spurkammersystem [Hoh01] („Outer Tracker“, OTR) besteht aus Waben-Driftkammern und deckt einen Bereich in der  $x$ -Richtung von ca. 0,25–4 m und in der  $y$ -Richtung von ca. 0,25–3 m ab (dies entspricht in der  $x$ -Richtung einem Winkel von 260 mrad und in der  $y$ -Richtung einem Winkel von 160 mrad). Bei der Waben-Driftkammer ist jeder einzelne Draht in einer wabenförmigen Röhre montiert. Die Waben-Driftkammern haben gegenüber den normalen Driftkammern den Vorteil, daß jeder einzelne Draht sein eigenes Gasvolumen hat und dadurch die Totzeit des Detektors reduziert wird. Ein weiterer Vorteil der Waben-Technologie ist die einfache Produktion.

Die erste Superlage des Spurkammersystem befindet sich zwischen dem Vertexdetektor und dem Magneten. Ein größerer Block des Spurkammersystems ist zwischen dem Magneten und dem RICH installiert; dieser Block besteht aus vier Superlagen, wovon die erste und letzte Superlage zum Spurtrigger der ersten Stufe (FLT-Trigger) beitragen. Zwischen dem RICH und dem elektromagnetischen Kalorimeter befinden sich nochmal zwei Superlagen, die ebenfalls zum Spurtrigger der ersten Stufe beitragen. Bis zum Shutdown 2001 waren im Magneten vier Superlagen eingebaut, die aber entfernt wurden, um das Material vor dem elektromagnetischen Kalorimeter zu reduzieren.

### Der ringabbildende Čerenkov-Zähler (RICH)

Der RICH [A<sup>+</sup>03b] dient zur Teilchenidentifikation über einen großen Impulsbereich. Das Prinzip des Čerenkovzählers beruht darauf, daß Teilchen, die sich schneller als die Lichtgeschwindigkeit  $c_{\text{Medium}}$  durch ein Medium bewegen, Photonen aussenden. Die Photonen werden in einem Kegel um die Spur des Teilchens emittiert. Der Öffnungswinkel des Kegels  $\theta_K$  hängt vom Brechungsindex  $n$  des Mediums und von der Geschwindigkeit des Teilchens ab

$$\cos\theta_K = 1/\beta n.$$

Als Radiator, in dem Čerenkovphotonen produziert werden, wird im HERA-*B*-RICH das Gas  $C_4F_{10}$  verwendet. Die produzierten Photonen werden von einem Spiegelsystem auf eine Fläche außerhalb des sensitiven Detektorbereichs projiziert und dort mit Photomultipliern ausgelesen. Die Photonen einer Spur werden durch die Optik auf einen Ring in der Ausleseebene abgebildet. Der Ringdurchmesser zusammen mit dem im Spurkammersystem gemessenen Impuls erlaubt eine Teilchenhypothese.

Der HERA-*B*-RICH wurde konstruiert, um Pionen, Kaonen und Protonen voneinander zu trennen. Pionen emittieren ab einem Impuls von 2,6 GeV/ $c$  Čerenkov-Strahlung, Kaonen ab einem Impuls von 9 GeV/ $c$  und Protonen ab einem Impuls von 17,2 GeV/ $c$ .

## Das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL)

Das elektromagnetische Kalorimeter [A<sup>+</sup>01] dient der Unterscheidung von Elektronen und Photonen von den übrigen produzierten Teilchen. Es gibt zusätzlich, bei einem detektierten Elektron, ein Vortriggersignal an den Trigger der ersten Stufe ab. Das Kalorimeter ist in drei Teile unterschiedlicher Granularität unterteilt. Alle drei Teile sind nach dem Absorber-Szintillator-Schema aufgebaut. Das innere Kalorimeter hat einen Wolframabsorber und eine Zellgröße von  $2,2 \times 2,2 \text{ cm}^2$ . Das mittlere Kalorimeter besteht wie das äußere Kalorimeter aus einem Bleiabsorber und hat eine Zellgröße von  $5,5 \times 5,5 \text{ cm}^2$ . Das äußere ECAL besitzt Zellgrößen von  $11,0 \times 11,0 \text{ cm}^2$ . Die Dicke des Kalorimeters beträgt  $\sim 23$  Strahlungslängen im inneren und  $\sim 20$  Strahlungslängen im mittleren und äußeren Bereich. Die Auslese geschieht durch Lichtleiter, die die einzelnen Zellen parallel zur Strahlrichtung durchsetzen („Schaschlik-Kalorimeter“). Auf der Rückseite des elektromagnetischen Kalorimeters werden die Signale aller drei Teile mit Photomultipliern ausgelesen.

## Das Myonsystem

Das Myonsystem [E<sup>+</sup>01] weist Myonen in einem Impulsbereich von  $5 - 200 \text{ GeV}/c$  nach und ist wie das Spurrückensystem wegen der starken  $1/r^2$  Abhängigkeit der Teilchendichte in einen inneren und einen äußeren Bereich unterteilt. Es besteht aus 4 Stationen. Vor diesen Stationen sind Stahl- und Betonabsorber positioniert, um Hadronen zu absorbieren. Die inneren Bereiche um die Strahlröhre sind aus Gas-Pixeldetektoren aufgebaut, die eine Zellgröße von  $9 \times 9 \text{ mm}^2$  haben. Der innere Bereich weist Myonen in einem Bereich von  $10 - 40 \text{ cm}$  vom Strahlrohr nach. Die ersten zwei Lagen der äußeren Module sind aus Proportionalitätszähl-Detektoren mit 3 unterschiedlichen Orientierungen ( $0^\circ, \pm 20^\circ$ ) aufgebaut. Die letzten beiden Stationen sind Driftkammern mit nur einer Orientierung ( $0^\circ$ ) mit integrierter Kathoden-Zellauslese. Die Zellgröße in diesen Lagen ist  $12 \times 10 \text{ cm}^2$ . Da zwischen den letzten beiden Myonlagen nur sehr wenig Absorbermaterial positioniert ist, wird bei einer Signalkoinzidenz in diesen Lagen ein Myon-Vortriggersignal an den Trigger der ersten Stufe (FLT-Trigger) weitergegeben.

### 3.2.2 Das Triggersystem

Bei einer Kollision der Protonen aus dem Strahl mit dem Target werden sehr viele Teilchen erzeugt, die durch die hohe Strahlenergie zum Großteil den Detektor durchlaufen. Für HERA-*B* wurde ein mehrstufiger Trigger entwickelt, der einzelne Physikereignisse anreichert. Da sowohl für die *B*-Mesonen-Physik, als auch für die *c*-Mesonen-Physik Ereignisse interessant sind, in denen im Endzustand ein Leptonpaar vorkommt, triggert der HERA-*B*-Trigger auf Leptonen.

#### Myon- und Elektron-Vortrigger (Pretrigger)

Der Vortrigger wird vom ECAL oder vom äußeren Bereich des Myonsystem [B<sup>+</sup>01] ausgelöst. Beim elektromagnetische Kalorimeter dient das ganze Kalorimeter als Vortrigger, im Myonsystem nur die beiden letzten Stationen. Die Position des nachgewiesenen Teilchens wird dem Trigger der ersten Stufe (FLT-Trigger) übergeben.

#### Trigger der ersten Stufe („First Level Trigger“, FLT)

Der FLT-Trigger [B<sup>+</sup>02c] ist ein schneller Spurtrigger. Ausgehend von den Signalen des Myon- und Elektron-Vortriggers wird ein Spurkandidat in Richtung Target bis zum Ende des Magneten in den TFUs („Track Finding Units“) verfolgt. Mit jedem Detektormodul (in Richtung Target) werden die Regionen, in denen nach einem Treffernachweis („Regions of Interest“, RoI) gesucht



wird, verkleinert und die Spurparameter aktualisiert. Werden in einer RoI mehrere Treffer gefunden, wird ausgehend von jedem dieser Treffer in einer weiteren RoI Richtung Target nach einem Treffernachweis gesucht. Spurkandidaten, die nicht ins nächste Detektormodul verfolgt werden können, werden verworfen.

Von Spuren, die durch den ganzen Detektor bis zum Magneten verfolgt werden können, werden in den TPUs („Track Parameter Units“) die Impulse berechnet. Die Informationen der Impulse der Spuren werden an die TDU („Trigger Decision Unit“) weitergeleitet, die entscheidet, ob ein Ereignis verworfen oder behalten werden soll. Bei einem positiven Triggerentscheid werden die Vortriggersignale und die gefundenen Spurparameter an den Trigger der zweiten Stufe (SLT-Trigger) weitergegeben.

Das Triggerschema der ersten Stufe ist in Abb. 3.4 dargestellt. Der Myon-Trigger verwendet außer den vier Spurrkammersuperlagen, die zum FLT-Trigger betragen, noch Myonnachweise der ersten und zweiten Myonlage.

Die Zeit bis zu einer Entscheidung des FLT-Triggers ist auf  $12 \mu\text{s}$  begrenzt. Durch den FLT-Trigger wird die ursprüngliche Ereignisrate um einen Faktor von bis zu 200 reduziert.

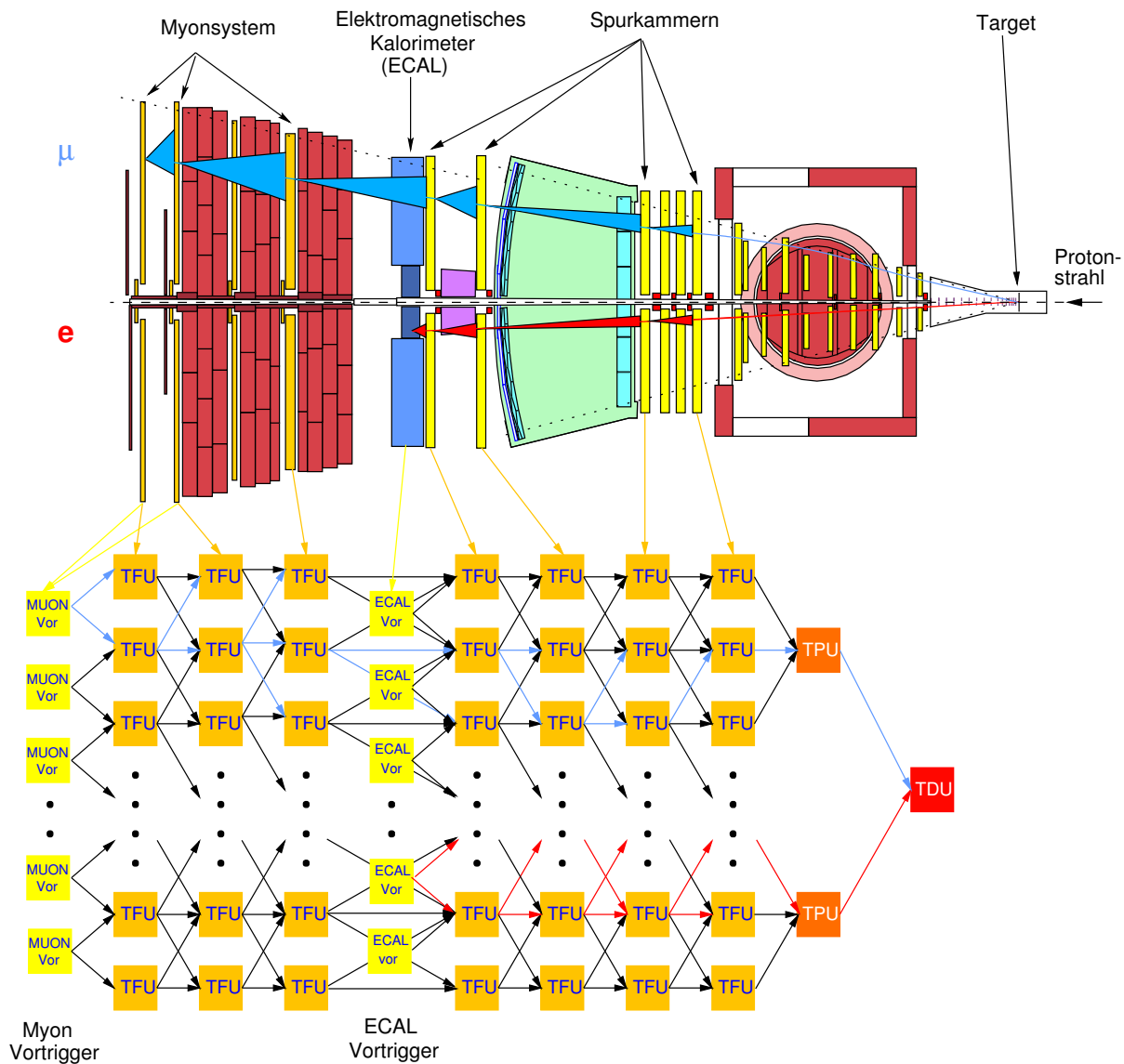
### Trigger der zweiten Stufe („Second Level Trigger“, SLT)

Der SLT-Trigger [Pet02] ist ein Softwaretrigger. Er läuft auf einer „Farm“ von 240 PCs. Der SLT-Trigger rekonstruiert die vom FLT-Trigger akzeptierten Spuren unter Verwendung der noch nicht verwendeten Spurrkammersuperlagen mit höherer Präzision. Diese neu rekonstruierten Spuren werden durch ein ähnliches Prinzip, wie es der FLT-Trigger verwendet, durch den Magneten in den Vertexdetektor extrapoliert und dort weiter in Richtung Target verfolgt. Es kann so überprüft werden, ob Spurkandidaten einen gemeinsamen Vertex besitzen. Die Triggerentscheidung des SLT-Algorithmus muß innerhalb von 7 ms fallen. Wird die Anforderung des SLT-Trigger erfüllt, wird das ganze Ereignis auf Band geschrieben. Durch den SLT-Trigger wird die Datenmenge, die auf Band geschrieben wird, weiter um einen Faktor 100 reduziert.

Durch den Trigger der ersten und zweiten Stufe kann z.B. der Zerfall  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  stark angereichert werden. Ohne die Trigger ist das Verhältnis dieses Kanals zu allen inelastischen Ereignissen ungefähr

$$\frac{\sigma_{J/\psi} \cdot Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)}{\sigma_{MB}} \approx 10^{-6}.$$

Durch einen Trigger, der auf zwei Myonen triggert, kann dieses Verhältnis um einen Faktor 1000 verbessert werden.



**Abbildung 3.4:** Das Triggerschema des FLT-Triggers. Ausgehend von einem Vortrigger des Myon- oder des Elektronsystems wird in TFUs („Track Finding Units“) nach Treffernachweisen im Spurrkammersystem gesucht. Von jedem Treffer ausgehend wird in der nächsten Spurrkammersuperlage eine RoI („Region of Interest“) definiert, in der nach einem Treffer gesucht wird. Von Spuren, die durch den ganzen Detektor bis durch den Magneten verfolgt werden konnten, wird in den TPUs („Track Parameter Units“) der Impuls der Teilchen berechnet. Mit diesen Informationen wird in der TDU („Track Decision Unit“) entschieden, ob ein Ereignis von Interesse ist (nach [Sch00]).

# Kapitel 4

## Das innere Spurkammersystem

Wie in der Beschreibung des HERA-*B*-Detektors (Kap. 3) erwähnt wurde, ist das Spurkammersystem von HERA-*B* in zwei unterschiedliche Teile mit verschiedenen Technologien unterteilt. Durch den unterschiedlichen Streifen- oder Drahtabstand ist gewährleistet, daß die zu detektierende Teilchenzahl pro Ereignis und Detektormodul kleiner als 5% ist. Am Strahlrohr, wo die meisten Teilchen pro Fläche und Zeiteinheit den Detektor durchlaufen, wird eine Technologie verwendet, die es erlaubt, Auslestreifen mit sehr kleinem Abstand zu verwenden: die MSGC (Micro Strip Gas Chamber). Sie kann industriell mit einem Streifenabstand  $d$  von bis zu  $d \geq 100 \mu\text{m}$  hergestellt werden.

Das innere Spurkammersystem von HERA-*B* deckt einen Bereich von 6 – 30 cm um die Protonenstrahlröhre ab. Das System wurde von Gruppen der Universitäten Heidelberg, Siegen und Zürich entwickelt und gebaut. In diesem Kapitel wird der entwickelte Detektor für das innere Spurkammersystem vorgestellt; in Kap. 5 wird der Aufbau des inneren Spurkammersystems bei HERA-*B* und die dazu benötigten Tests beschrieben.

### 4.1 Anforderungen an das innere Spurkammersystem

Das ursprüngliche Physik-Programm, für das HERA-*B* entworfen wurde, stellt folgende Anforderungen an das innere Spurkammersystem:

- **Strahlenhärte**

Durch die hohe Strahlungsdichte beträgt die Strahlenbelastung der Detektoren bis zu 1 Mrad/a. Da das Spurkammersystem über die ganze Betriebszeit von HERA-*B* nicht ausgewechselt werden soll, müssen die Detektoren eine große Strahlenhärte aufweisen. Der HERA-*B*-Detektor sollte ursprünglich über etwa 5 Jahre Daten nehmen.

- **Granularität**

Die geforderte Auflösung in der Ablenkebene des Magneten soll kleiner als  $100 \mu\text{m}$  sein, in vertikaler Richtung ( $y$ -Richtung), senkrecht zur Ablenkung des Magneten, reicht eine Auflösung von etwa 1 mm aus. Parallel zum Strahlrohr ist eine Auflösung von 3 mm ausreichend.

- **Schnelle Signale**

Da die Proton-Pakete von HERA mit einer Frequenz von 10 MHz die Drähte von HERA-*B* passieren, müssen der Detektor wie auch seine Auslese schnelle Signale liefern, um die einzelnen Ereignisse voneinander trennen zu können.

- **Effizienz**

In einer Einzellage sollen Teilchendurchgänge mit einer Effizienz von 95% nachgewiesen werden können.

- **Strahlungslänge**

Da durch Vielfachstreuung und durch Teilchenkollisionen die Spuren von ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt werden, soll das Spurkammersystem aus möglichst wenig Material mit möglichst leichten Atomen bestehen.

- **Magnetfeld**

Ursprünglich waren Spurkammersuperlagen im Magnetfeld installiert. Deswegen sollten die Detektoren in einem Magnetfeld von 0,85 T betrieben werden können, ohne daß sich die Auflösung oder die Signalgeschwindigkeit wesentlich verschlechtern.

- **Trigger**

Das Spurkammersystem soll Spurdaten zum FLT-Trigger liefern. Die Ausleseelektronik muß daher einen schnellen Signalpfad enthalten.

Eine Technologie, die alle aufgeführten Anforderungen erfüllt, ist die GEM-MSGC-Technologie.

Die Entwicklung des GEM-MSGC-Detektors für HERA-B kann in einer Reihe von Doktorarbeiten nachgelesen werden ([Hot97, Zeu98, Hau99, Hil99, Ric00, Wal01]). In den Jahren 1999 und 2000 wurde das innere Spurkammersystem in Betrieb genommen, was ausführlich in [Gra01, Kra02] beschrieben ist. Im Jahr 2001 wurde eine Testsuperlage, die die Funktionalität der Triggerelektronik mißt, eingebaut. Die Resultate dieses Tests sind in [Kel01] dokumentiert.

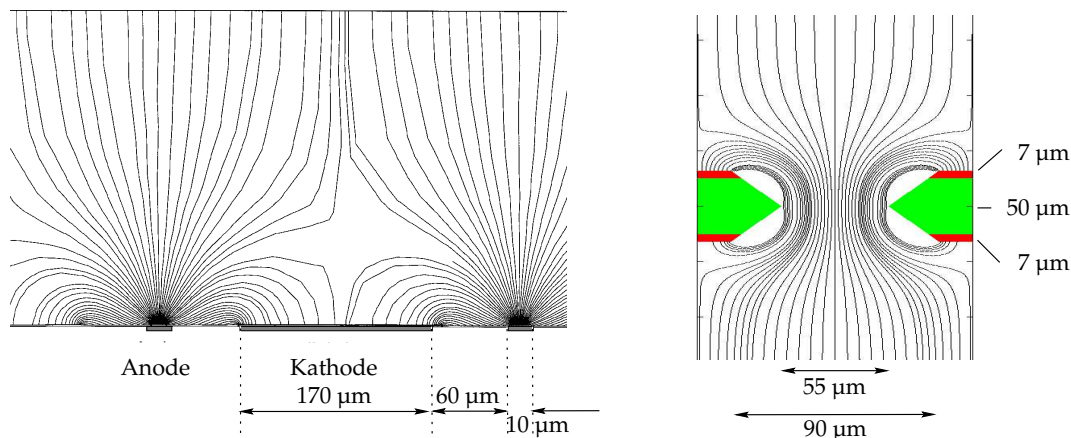
## 4.2 Detektortechnologie

Bei der GEM-MSGC wird ein herkömmliches MSGC-Substrat [Oed88] mit einer Gas-Elektronvervielfacher-Folie (GEM) [Sau97] kombiniert. Dadurch ergibt sich eine zweifache Gasverstärkung, zum einem im GEM und zum anderen am MSGC-Substrat. Um die für den effizienten Betrieb nötige Gesamtverstärkung zu erreichen, braucht jedes der beiden Elemente nur eine relativ kleine Verstärkung zu haben. Dies erhöht die Betriebssicherheit und ermöglicht einen Betrieb in hadronischer Strahlung.

### MSGC-Substrat

Die MSGC ist im Prinzip eine Weiterentwicklung der Vieldraht-Proportionalkammer. Die Drähte der Vieldraht-Proportionalkammer werden bei der MSGC durch feine Leiterbahnen auf einem geeigneten Trägersubstrat ersetzt. Dadurch treten keine elektrostatischen Instabilitäten auf. Die Leiterbahnen können in einem kleineren Abstand zueinander aufgebracht werden, was eine höhere Granularität ermöglicht als bei der herkömmlichen Vieldraht-Proportionalkammer.

Auf dem MSGC-Substrat wechseln sich dünne Anodenstreifen, die auf neutralem Potential gehalten werden, und breite Kathodenstreifen, die auf negativem Potential gehalten werden, ab. Gegenüber der MSGC-Struktur befindet sich eine Driftelektrode, die auf hohem negativem Potential gehalten wird. Das elektrische Feld ist durch die negativen Potentiale der Driftelektrode und der Kathodenstreifen gegenüber den Anodenstreifen gegeben. Eine Simulation des elektrischen Feldes der bei HERA-B verwendeten MSGCs ist links in Abb. 4.1 dargestellt. In der Nähe der Anoden, wo das elektrische Feld sehr stark ist, hat man die größte Gasverstärkung. Die Gasverstärkung kann abhängig vom Gas und der MSGC-Geometrie mehrere 1000 erreichen.



**Abbildung 4.1:** Simulation des elektrischen Feldes der MSGC mit der bei HERA-*B* verwendeten MSGC-Geometrie (links). Rechts die Simulation der Einschränkung des elektrischen Feldes durch die verwendete GEM-Folie.

### GEM-Folie

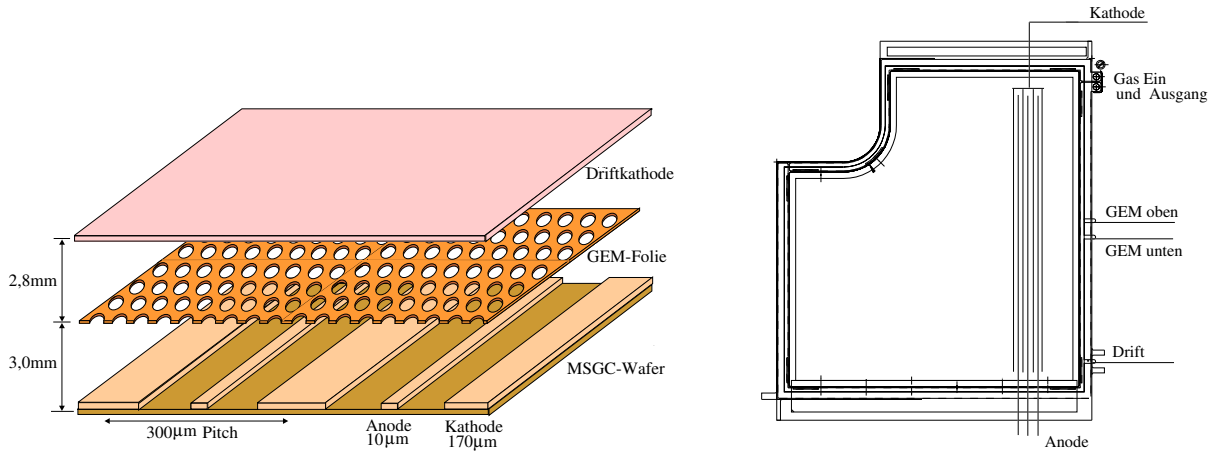
Die GEM-Folie (**G**as-**E**lektron-**M**ultiplier) ist eine isolierende Folie mit einer dünnen Kupferschicht auf beiden Seiten. In die Folie werden über die ganze Fläche in regelmäßigen Abständen Löcher geätzt. Die GEM-Folie ist in der GEM-MSGC zwischen der Driftelektrode und dem MSGC-Substrat montiert und unterteilt den Driftraum in zwei Teile. Zwischen den beiden Kupferflächen kann eine Potentialdifferenz angelegt werden. Das elektrische Feld der GEM-Folie ist rechts in Abb. 4.1 dargestellt. Durch die GEM-Folie werden die elektrischen Feldlinien zusammengedrängt. In den Löchern ergibt sich so eine hohe Feldstärke, in der Gasverstärkung stattfinden kann. Die Gasverstärkung der GEM-Folie hängt von der Geometrie der GEM-Löcher und der Dicke der Isolierschicht ab. Mit den GEM-Folien, die bei HERA-*B* eingesetzt werden, kann eine Gasverstärkung zwischen 20 und 100 erreicht werden. Die hohe Gasverstärkung kann nur durch einen großen Potentialunterschied an den zwei Kupferflächen erreicht werden. Dieser liegt bei den bei HERA-*B* eingesetzten Detektoren typischerweise bei  $\Delta U_{GEM} = 400 - 430$  V. Ein Funkenüberschlag zwischen den zwei Potentialflächen kann zu einer dauerhaften Verbindung der Kupferflächen führen und damit die Folie unbrauchbar machen; aus diesem Grund wird bei HERA-*B* die Folie nur mit einer Gasverstärkung von ca. 20–50 betrieben.

### GEM-MSGC

Durch die Kombination von GEM-Folie und MSGC ergibt sich eine zweistufige Gasverstärkung. Mit diesen zwei unabhängigen Verstärkungsstufen erhält man einen Detektor, der insgesamt eine sehr hohe Gasverstärkung hat und der den hohen Anforderungen von HERA-*B* entspricht. Die beiden einzelnen Gasverstärkungen und die Spannungen, die an den einzelnen Komponenten angelegt werden, können so gewählt werden, daß damit Überschläge und dadurch Defekte am Detektor weitgehend vermieden werden können. Die beiden einzelnen Gasverstärkungen ergeben miteinander multipliziert die Gesamtgasverstärkung der GEM-MSGC von ca. 5000.

#### 4.2.1 Die GEM-MSGC des inneren Spurkammersystems von HERA-*B*

Ein schematischer Querschnitt und eine Aufsicht einer HERA-*B*-GEM-MSGC Typ II (siehe unten) sind in Abb. 4.2 dargestellt. Die HERA-*B*-Detektoren haben eine L-Form. Ein Detektor umschließt so teilweise die Protonenstrahlröhre.



**Abbildung 4.2:** Links: Querschnitt eines GEM-MSGC-Detektors (nach [Zie98]). Unten ist das MSGC-Substrat mit der Kathoden-Anoden-Struktur zu sehen, oberhalb des MSGC-Substrats in einem Abstand von 3 mm befindet sich die GEM-Folie; den Abschluß bildet die Driftelektrode, 2,8 mm über der GEM-Folie. Rechts: Aufsicht eines HERA-B GEM-MSGC-Detektors Typ II (siehe Text)(nach [Gra01]).

Das MSGC-Substrat besteht aus 0,4 mm dickem alkalifreiem Glas<sup>1</sup>. Das MSGC-Substrat ist mit einer etwa 0,08 µm dünnen diamantähnlichen Schicht überzogen, um elektrisches Aufladen zu verhindern. Die Schicht hat einen Oberflächenwiderstand von  $10^{14} - 10^{15} \Omega/\square$ . Auf der Diamantschicht ist die MSGC-Struktur aus Gold in einem lithographischen Verfahren aufgebracht. Die Kathoden haben eine Breite von 170 µm und die Anoden eine Breite von 10 µm. 3 mm über dem MSGC-Substrat ist die GEM-Folie angebracht. Sie wird nur am Rand des Detektors von den Kammerrahmen gehalten. 2,8 mm über der GEM-Folie ist der Driftdeckel angebracht. Der Driftdeckel besteht aus einer 0,3 mm dicken G10-Platte<sup>2</sup>, die auf der zur MSGC zugewandten Seite mit einer mit 18 µm Kupfer beschichteten Kaptonfolie beklebt ist. Die Rahmen, die auch der Gaszuführung dienen und den Abstand der einzelnen Teile der GEM-MSGC sicherstellen, sind ebenfalls aus G10 gefräst. G10 wurde für die Rahmen und den Driftdeckel verwendet, um die Kammern, die verhältnismäßig groß und sehr dünn sind, mechanisch stabil zu erhalten, obwohl die GEM-Folie nur von den Rahmen gehalten wird. Jede GEM-MSGC hat 752 Auslesekanäle.

Bei HERA-B werden drei GEM-MSGCs verschiedener Größe verwendet. Die Detektortypen I und II sind  $25 \times 23 \text{ cm}^2$  groß. Die Typ I-Kammern haben einen Strahlrohrausschnitt von 5,5 cm, die Typ II-Kammern haben einen Strahlrohrausschnitt von 8 cm. Die Typ III-Kammern, die in größerer Entfernung vom Target eingesetzt werden, haben einen Strahlrohrausschnitt von 12,5 cm und Außenmaße von  $27,5 \times 27 \text{ cm}^2$ . Der Streifenabstand der Typ I- und Typ II-Detektoren ist 300 µm, der Streifenabstand der Typ III-Detektoren beträgt 350 µm. Bei den GEM-MSGC-Detektoren von HERA-B wird als Zählgas Ar:CO<sub>2</sub> im Verhältnis 70:30 verwendet.

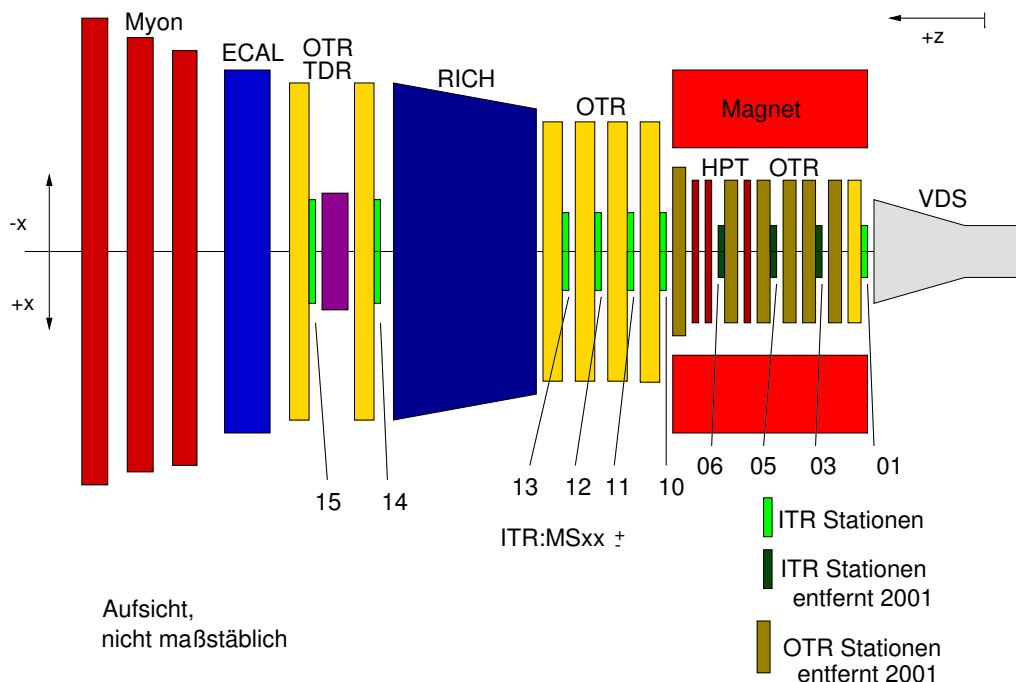
### 4.3 Aufbau der Spurkammersuperlagen

Das innere Spurkammersystem bestand ursprünglich aus zehn Superlagen. Im Shutdown 2001 wurden die drei Superlagen, die im Magneten montiert waren, ausgebaut. Der Vollständigkeit halber wird hier der Detektoraufbau vor dem Shutdown 2001 beschrieben. Die Spurkammersuperlagen sind vom Target ausgehend durchnummeriert. Die Superlagennumerierung beginnt immer mit MS (für MSGC-Station). Zwischen dem Vertexdetektor und dem Magneten ist die Super-

<sup>1</sup>AF45 von DESAG

<sup>2</sup>G10 ist ein mit Glasfasern verstärkter Kunststoff

lage MS01 installiert; im Magnet die Superlagen MS03, MS05 und MS06; zwischen Magnet und RICH die Superlagen MS10, MS11, MS12, MS13; und zwischen RICH und ECAL befinden sich die Superlagen MS14 und MS15. Die Superlagen MS10, MS13, MS14 und MS15 tragen zum FLT-Trigger bei und benötigen deswegen zusätzliche Triggerelektronik. In Abb. 4.3 ist der HERA-*B*-Detektor (nicht maßstäblich) gezeigt. In der Zeichnung ist die bei HERA-*B* verwendete Numerierung des inneren Spurkammersystems dargestellt; diejenigen Superlagen, die während des Shutdowns 2001 entfernt wurden, sind farblich hervorgehoben. Der Bereich im Magneten wird Magnetbereich (MC), der Bereich zwischen Magnet und RICH wird PC-Bereich („pattern recognition“) und der Bereich zwischen dem RICH und dem ECAL TC-Bereich (Triggerbereich) genannt.



**Abbildung 4.3:** Der HERA-*B*-Detektor, nicht maßstäblich. Die dunkel gehaltenen Detektorkomponenten des Spurkammersystems im Magneten wurden im Shutdown 2001 entfernt.

Die Anzahl der Kammern pro Superlage variiert von 8 – 32 (siehe Tab. 4.1). Die Kammernumerierung beinhaltet die Superlage, in der die Kammer eingebaut ist, die Position im Experiment, unterteilt in den  $x$ - und  $y$ -Quadranten, und die Lage innerhalb der Superlage, „MSXX $\pm$ (x) $\pm$ (y)Lage“. Ein Beispiel für eine Kammer ist die MS10++1, diese Kammer befindet sich in der ersten Lage im Quadranten  $+x$ ,  $+y$  der Superlage MS10.

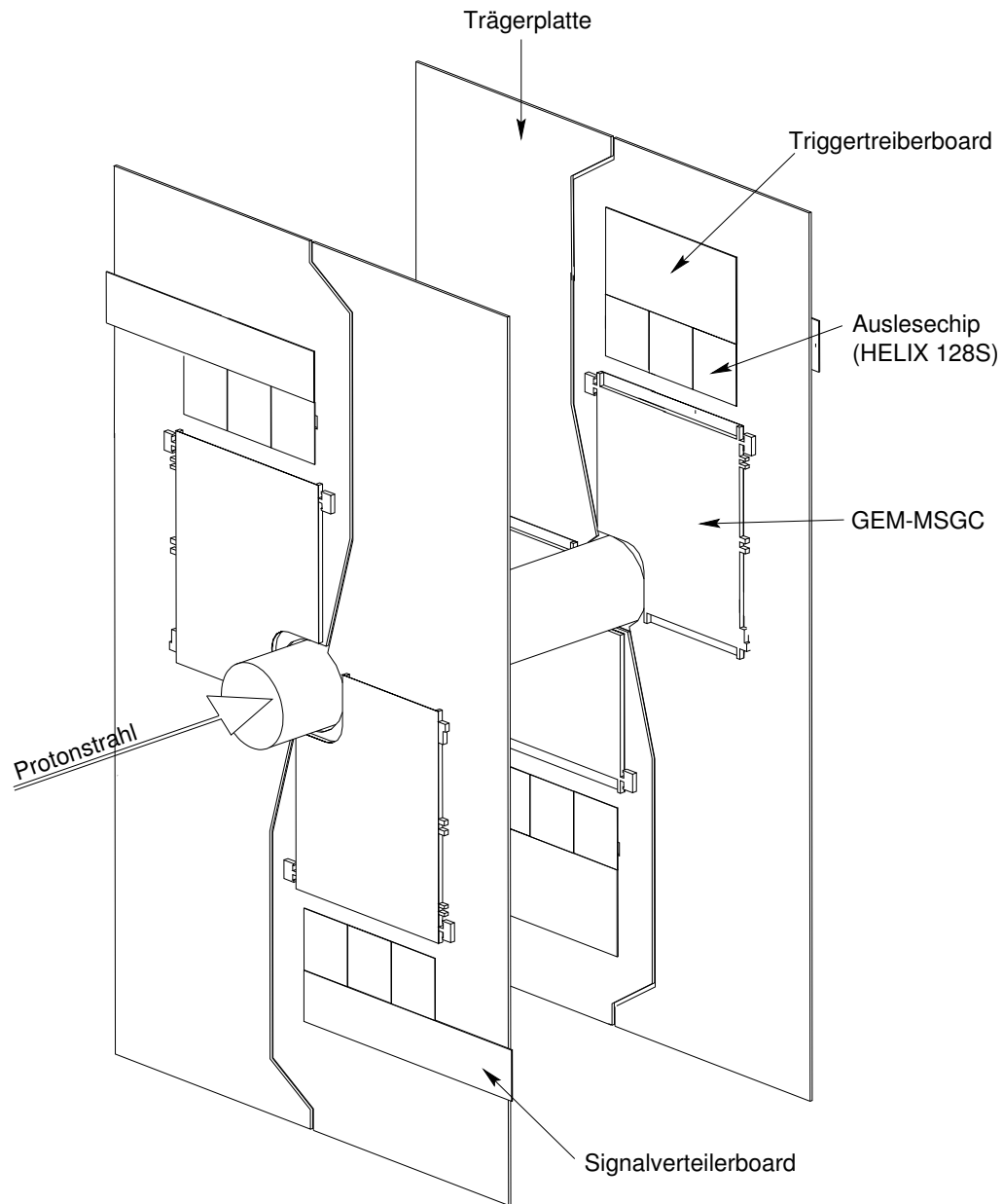
Eine Detektorebene wird aus vier GEM-MSGC-Detektoren gebildet, die um die Strahlröhre angeordnet sind. Die Kammern sind überlappend eingebaut, damit kein insensitiver Bereich entsteht. Jeder Detektor liefert für eine Teilchenspur nur Informationen über die Koordinate senkrecht zu den Auslestreifen. Um eine vollständige Rekonstruktion der Teilchenspuren zu ermöglichen, werden mehrere Kammern mit gegeneinander verdrehten Auslestreifen hintereinander angebracht. Der Winkel zwischen einzelnen Detektoren („Stereowinkel“) beträgt für das innere Spurkammersystem von HERA-*B*  $5^\circ$ ; der Winkel ist ein Kompromiß zwischen Auflösung in der  $y$ -Koordinate und der Zahl der zufälligen Kombinationen von getroffenen Streifen beim Durchgang mehrerer Teilchen durch die Kammern. Um Ineffizienzen und Totalausfälle der GEM-MSGC zu kompensieren, werden mehrere Kammern gleicher Orientierung in einer Superlage

verwendet (siehe Tab. 4.1). Eine Detektorsuperlage wird aus zwei Halbsuperlagen zusammengesetzt, die rechts und links vom Strahlrohr auf das äußere Spurkammersystem montiert sind. Die zwei Halbsuperlagen überlappen sich wieder, so daß die Detektorebene vollständig überdeckt ist. Der Aufbau der zwei Halbsuperlagen ist rotiert um die Strahlachse gleich.

Die einzelnen Detektoren sind auf Trägerplatten aus einem Kohlefaser-Verbundwerkstoff montiert. Die Trägerplatten sind dünne beschichtete wellpapp-ähnliche Platten, die sehr stabil sind und nicht viel zum Material des inneren Spurkammersystems beitragen. Da sich die Kammern überlappen und die Kammern in jeder Orientierung mehrmals vorhanden sein sollen, sind auf jeder Trägerplatte zwei Kammern direkt hintereinander montiert. In den Superlagen MS01, MS03, MS05, MS06, MS11 und MS12, die nicht zum FLT-Trigger beitragen, besitzen die Kammern direkt hintereinander unterschiedliche Orientierungen. In den Superlagen MS10, MS13, MS14 und MS15, die zum FLT-Trigger beitragen, werden immer zwei Detektoren mit gleicher Orientierung auf eine Trägerplatte montiert. Eine weitere Trägerplatte, auf der wieder zwei Detektoren direkt hintereinander, aber im anderen Quadranten montiert sind, vervollständigt eine Detektorebene. Da sich die einzelnen Detektoren überlappen, werden für eine Detektorebene mindestens zwei Trägerplatten in einer Halbsuperlage benötigt. In den Superlagen werden immer Kammern unterschiedlicher Orientierung benötigt, deshalb besteht eine Superlage aus mehreren Trägerplatten. Der Aufbau einer Doppellage, die in einer Triggersuperlage eingesetzt wird, ist in Abb. 4.4 schematisch dargestellt. Da beide Seiten der Trägerplatte mit Detektoren bestückt sind, werden von diesen zwei Trägerplatten zwei Ebenen abgedeckt. Neben den Detektoren ist auch die zur Auslese benötigte Elektronik auf den Trägerplatten montiert: an jeder Kammer sind drei Platinen mit je zwei Auslesechips (HELIX-PCB) angeschlossen. Ein Signalverteilerboard versorgt die Chips einer Kammer mit den benötigten Spannungen und Signalen.

In den Superlagen, die zum FLT-Trigger beitragen, besitzt die zweite Kammer auf der zweiten Seite der Trägerplatte anstatt eines Signalverteilerboards ein Trigger-Treiber-Board, das die gefundenen Treffer der zwei Detektoren an den FLT-Trigger weiterleitet. Bei diesen Superlagen sind Detektoren mit gleicher Orientierung direkt hintereinander auf eine Trägerplatte montiert, um Detektordefekte oder -ausfälle zu kompensieren. In Tab. 4.1 ist für alle  $-x$ -Seiten der Superlagen angegeben, aus welchem Kammertyp die Superlage besteht, wieviele Kammern in einer Superlage zusammengefaßt sind, und aus welchen Orientierungen die Kammerlagen aufgebaut sind. Die Detektoren aufeinander folgender Lagen liegen abwechselnd im  $+y$ - und  $-y$ -Quadranten. Der Aufbau der  $+x$ -Seiten ist von den Orientierungen gleich wie der der  $-x$ -Seiten, nur die  $y$ -Quadranten sind jeweils vertauscht.





**Abbildung 4.4:** Anordnung der GEM-MSGC-Detektoren auf den Trägerplatten. Der Übersichtlichkeit halber werden hier nur zwei der bis zu 8 Trägerplatten dargestellt. Dargestellt ist ein Teilbereich einer Triggersuperlage. Diese zwei Trägerplatten mit den vier abgebildeten Detektoren bilden zusammen eine Ebene des Detektors (nach [Gra01]).

Superlage	Detektor-typ	Anzahl Kammern	Aufbau der Superlagen	FLT?
MS01	I	16	$[0,-5]^{-y} [-5,0]^{+y} [0,+5]^{-y} [+5,0]^{-y}$	nein
MS03	I	8	$[0,-5]^{-y} [-5,0]^{+y}$	nein
MS05	I	8	$[0,+5]^{+y} [+5,0]^{-y}$	nein
MS06	II	8	$[0,-5]^{-y} [-5,0]^{+y}$	nein
MS10	II	32	$[0,0]^{-y} [0,0]^{+y} [-5,-5]^{-y} [-5,-5]^{+y} [0]^{-y}$ $[0]^{+y} [+5,+5]^{-y} [+5,+5]^{+y} [0]^{-y} [0]^{+y}$	ja
MS11	II	16	$[0,-5]^{-y} [-5,0]^{+y} [0,+5]^{-y} [+5,0]^{-y}$	nein
MS12	II	16	$[0,-5]^{-y} [-5,0]^{+y} [0,+5]^{-y} [+5,0]^{-y}$	nein
MS13	II	32	$[0,0]^{-y} [0,0]^{+y} [-5,-5]^{-y} [-5,-5]^{+y} [0]^{-y}$ $[0]^{+y} [+5,+5]^{-y} [+5,+5]^{+y} [0]^{-y} [0]^{+y}$	ja
MS14	III	12	$[0,0]^{-y} [0,0]^{+y} [-5,-5]^{-y}$ $[-5,-5]^{+y} [+5,+5]^{-y} [+5,+5]^{+y}$	ja
MS15	III	12	$[0,0]^{-y} [0,0]^{+y} [-5,-5]^{-y}$ $[-5,-5]^{+y} [+5,+5]^{-y} [+5,+5]^{+y}$	ja

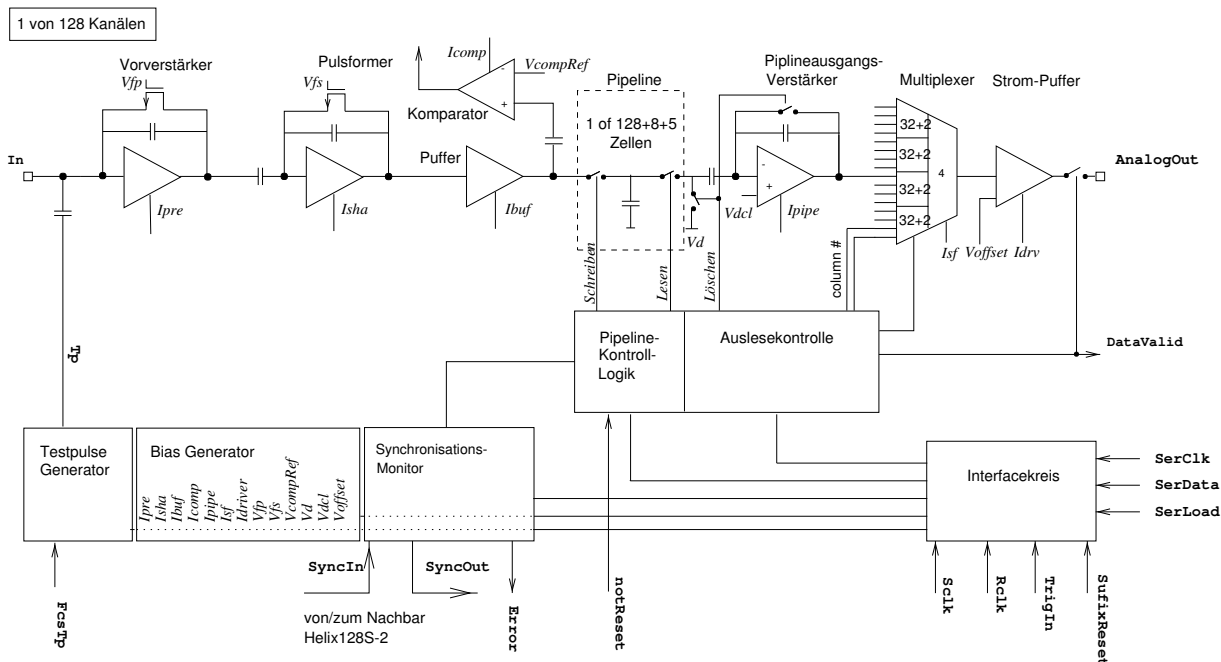
**Tabelle 4.1:** Aufbau der  $+x$ -Seiten der Superlagen des inneren Spurkammersystems. Die auf einer Trägerplatte gemeinsam montierten Kammern sind mit [Stereowinkel,Stereowinkel] zusammengefaßt. Der Aufbau der  $-x$ -Seiten entspricht dem der  $+x$ -Seite nach Drehung um  $180^\circ$  um die Strahlachse.

## 4.4 Der Auslesechip HELIX128S

Das innere Spurkammersystem benützt den strahlenharten ASIC (Application Specific Integrated Circuit<sup>3</sup>) HELIX128S [Tru00] zur Auslese der Detektoren. Der Auslesechip wurde vom ASIC-Labor der Universität Heidelberg zur Auslese des Vertexdetektors und des inneren Spurkammersystems von HERA-*B* entwickelt. Er wurde in einem  $0,8 \mu\text{m}$ -CMOS Verfahren von Austria Micro Systems (AMS, Unterpremstätten, Österreich) hergestellt. Auf dem Auslesechip werden 128 analoge Detektorkanäle gleichzeitig ausgelesen. Jeder der Detektorkanäle ist an einen ladungsempfindlichen Vorverstärker angeschlossen. Die Pulsform nach dem Vorverstärker und dem Signalformer wird pro HERA-Bunchcrossing einmal abgetastet und in einer analogen Pipeline zwischengespeichert. Diese Pipeline hat eine Latenz von bis zu 128 Bunchcrossings und kann die Daten von bis zu acht getriggerten Ereignissen zwischenspeichern. Ein Blockschaltbild des HELIX128S ist in Abb. 4.5 dargestellt.

Zur Auslese eines GEM-MSGC-Detektors werden sechs HELIX-Chips benötigt. Zwei HELIX-Chips zusammen sind auf einem PCB (Printed Circuit Board) zusammengefaßt. Die PCBs sind über ein Auslesefanin, auf dem der Auslestreifenabstand reduziert wird, mit dem MSGC-Substrat verbunden. Die HELIX-Chips auf diesem PCB versenden ihre Daten in einem sogenannten Daisy-Chain-Mode, in dem die Daten der zwei Chips über einen Ausgang nacheinander versendet werden. Auf dem PCB wird über Lötbrücken jedem Chip eine eindeutige Adresse zugeordnet. Dadurch ist eine eindeutige Zuordnung und unterschiedliche Einstellung der einzelnen Chips möglich. Die drei PCBs an einer GEM-MSGC werden von einem Signalverteilerboard ausgelesen, das die Analogdaten über drei Aderpaare in einem Twisted-Pair-Kabel zu einem optischen Umwandler übermittelt, der außerhalb des sensitiven Bereichs des HERA-*B*-Detektors angebracht ist. Vom optischen Umwandler werden die Kammersignale über eine Strecke von 40 m in die Elektronikhütte versendet und dort in elektrische Signale zurückgewandelt, digitalisiert und dem Datennahmesystem zur Verfügung gestellt. Die Implementierung und Inbetriebnahme des Auslesesystems ist in [Hau99, Gra01] beschrieben.

<sup>3</sup>Anwendungsspezifische integrierte Schaltung



**Abbildung 4.5:** Blockschaltbild eines Analogkanals des HELIX-Auslesechips (oben). Im unteren Bereich ist der Digitalbereich, der zum Einstellen des Chips benötigt wird, gezeigt (nach [Tru00]).

#### 4.4.1 Die verwendeten HELIX-Versionen

Der HELIX-Chip wurde zeitgleich zu den GEM-MSGC-Detektoren entwickelt. Dabei wurde das innere Spurkammersystem mit verschiedenen Versionen, die jeweils unterschiedliche Fehler haben, bestückt. In der folgenden Aufzählung sind die beim inneren Spurkammersystem verwendeten HELIX-Chipversionen aufgelistet.

- **HELIX 2.2**

Diese Chipversion hat zwei Probleme: 1. der Chip schaltet nach dem Einschalten der Stromversorgung manchmal nicht ein, und 2. die chipinterne Referenzstromquelle neigt zur Oszillation. Das Einschaltproblem konnte durch eine Leuchtdiode, die auf den HELIX-Chip geklebt wurde, und die mit der RESET-Leitung des HELIX-Chip verbunden ist, behoben werden. Beim Einschalten des Chips ist das RESET aktiv, wodurch die Leuchtdiode auf dem HELIX-Chip betrieben wird; das emittierte Licht der Diode reicht aus, um die Stromquelle zu starten. Das Problem der oszillierenden Stromquelle konnte nicht behoben werden, wodurch das allgemeine Rauschen des Chips erhöht ist und dadurch verhindert wird, daß die Ausleseschwelle für den Triggerausgang ausreichend niedrig eingestellt werden kann. Ein Designfehler des Chips sorgt zusätzlich für ein Übersprechen des digitalen Triggerausgangssignals auf die empfindlichen Vorverstärker. Dadurch konnte dieser Chip nicht für Detektoren verwendet werden, die ein Signal an den FLT-Trigger geben sollen.

- **HELIX 3.0**

Bei dieser Chipversion wurden Triggerausgang und der restliche Chip mit unterschiedlichen Versorgungsspannungen verbunden. Dadurch kann die Komparatorschwelle des Triggerausgangs weit genug herabgesetzt werden und der Trigger mit dieser HELIX-Chipversion betrieben werden. Die chipinterne Referenzstromquelle tendiert aber immer noch zum Oszillieren. Allerdings hat diese Chipversion durch einen Fehler in der Entwicklungssoftware nur eine Pipelinelänge von 136 Zellen. Diese kürzere Pipeline bewirkt, daß die Zeit, die der

FLT-Trigger zur Triggerentscheidung zur Verfügung hat, verkürzt ist. Dadurch können Detektoren mit dieser Chipversion nicht für eine Datennahme mit hohen Triggerraten verwendet werden. Um das innere Spurkammersystem für die Datennahmepériode 1999/2000 überhaupt verwenden zu können, wurde dennoch beschlossen, alle Doppellagen der Triggersuperlagen mit dem HELIX 3.0 auszustatten und diese Chipversion im Shutdown 2001 durch einen Chipversion mit größerer Pipelinelänge zu ersetzen. Die Einzellagen der Triggersuperlagen wurden mit dem HELIX 2.2 ausgestattet, um die Arbeit im Shutdown so gering wie möglich zu halten. Der Einbau der Triggersuperlagen mit der Chipversion HELIX 3.0 sollte es auch ermöglichen, die Funktionalität des Triggerausgangs zu testen. Alle Detektoren, die mit einem HELIX 3.0 ausgestattet waren, mußten im Shutdown 2001 deswegen umgebaut werden (siehe Kap. 7.1).

- HELIX 3.1a

Diese Chipversion hat keine oszillierende Referenzstromquelle und eine Pipelinelänge von 142 Zellen. Genau wie bei der Chipversion HELIX 3.0 kann die Komparatorschwelle des Triggerausgangs niedrig eingestellt werden, um einen Triggerbetrieb des inneren Spurkammersystems zu ermöglichen.

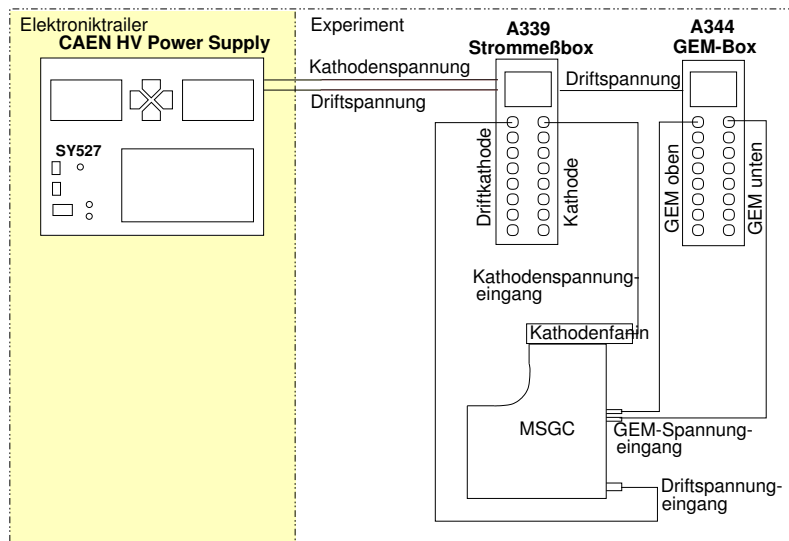
Alle diese HELIX-Versionen werden beim inneren Spurkammersystem zum Teil zeitweise verwendet. In Tab. 4.2 ist gezeigt, wo und wann die verschiedenen HELIX-Versionen verwendet wurden.

HELIX-Chip Version	Pipeline-zellen	Trigger möglich	Verwendungszweck	Verwendungsjahr
HELIX 2.2	141	nein	Nicht-Triggersuperlagen Triggersuperlage: Einzellagen	1999–2003 1999–2000
HELIX 3.0	135	eingeschränkt	Triggersuperlage: Doppellagen	1999–2000
HELIX 3.1a	142	ja	Triggersuperlage	2002–2003

**Tabelle 4.2:** Die HELIX-Versionen, die beim inneren Spurkammersystem verwendet werden. Aufgelistet ist die Länge der Pipeline und ob ein Triggerbetrieb mit der jeweiligen Chipversion möglich ist.

## 4.5 Das Hochspannungssystem

Die GEM-MSGC benötigt vier verschiedene Spannungen. Die Hochspannungsversorgung der GEM-MSGC-Detektoren ist schematisch in Abb. 4.6 dargestellt. Die Kathoden- und Driftspannung werden von einem Spannungsgerät, das im Elektroniktrailer steht, versorgt. Die zwei Spannungen der GEM-Folie werden im Experiment aus der Driftspannung generiert. Die Kathoden- und Driftspannung werden über 40 m zu den Strommeßboxen im Experiment geführt. Diese Strommeßboxen sind so aufgebaut, daß sie die vom Spannungsgerät kommende Spannung auf acht Detektoren verteilen und für jedem Detektor separat den Strom messen. Neben den Strommeßboxen (A339), die acht Kammern mit der Drift- und Kathodenspannung versorgen, werden GEM-Boxen (A344) verwendet, die die acht Kammern mit den Spannungen versorgt, die an der GEM-Folie anliegen. Die GEM-Box erhält als Eingangsspannung die Driftspannung, die dem Strommesser abgezweigt wird. In jedem der acht Detektorausgänge der GEM-Box ist ein aktiver Spannungsteiler eingebaut, der ausgehend von der angelegten Driftspannung die Spannung an der GEM-Folie regelt. Die GEM-Differenzspannung kann in einem gewissen Bereich variiert werden, um Unterschiede in der Gasverstärkung der GEM-MSGCs auszugleichen. Durch den



**Abbildung 4.6:** Schematische Zeichnung der Hochspannungsversorgung der GEM-MSGCs. Von einem Hochspannungsgerät werden die Spannungen von Kathode und Drift zur Strommeßbox (A339) geliefert. Die Strommeßbox versorgt acht Detektoren mit Drift- und Kathodenspannung. Von der Strommeßbox wird die Driftspannung zur GEM-Box (A344) abgeleitet, von der wieder die acht Detektoren mit den zwei Spannungen für die GEM-Folie versorgt werden (nach [Wil00]).

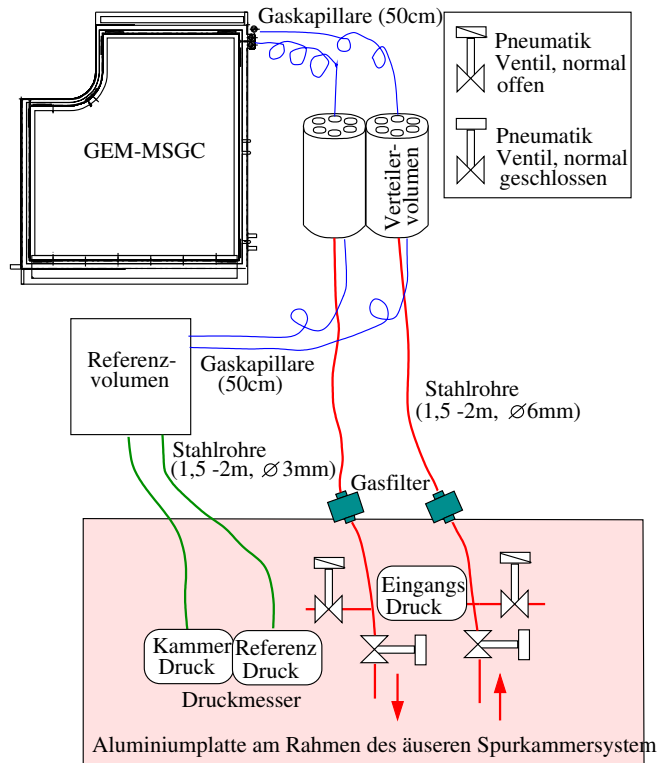
Spannungsteiler in der GEM-Box, der die Driftspannung der Strommeßbox als Eingangsspannung erhält, ist es nicht möglich, die volle Driftspannung an der Driftelektrode anzulegen, ohne daß die Spannung an der GEM-Folie mitgeregelt wird.

## 4.6 Das Gassystem

Beim Betrieb der GEM-MSGCs muß ein konstanter Gasaustausch in den Detektoren sichergestellt werden. Für den sicheren Betrieb der Detektoren ist die richtige Gasmischung und der richtige Gasdruck unerlässlich. Da die GEM-MSGC aus einem 0,4 mm dicken MSGC-Substrat aus Glas besteht, darf der Überdruck in den Detektoren gegenüber dem Außendruck nicht größer als 3 mbar sein. Das richtige Zählgasgemisch wird von einer Gasmischanlage geliefert, die eigens für das innere Spurkammersystem entworfen und gebaut wurde [Hei99]. Die Komponenten des Gasversorgungssystems, die direkt an den Stationen angebracht sind, sind schematisch in Abb. 4.7 gezeigt.

Da die GEM-MSGCs sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen sind, wurde beim Gassystem des inneren Spurkammersystems darauf geachtet, nur Materialien zu verwenden, die nicht ausgasen. Der Teil des Gassystems außerhalb des sensitiven Bereichs des HERA-B-Detektors ist aus hochreinen Stahlkomponenten aufgebaut. Im sensitiven Detektorbereich werden nur sehr dünnwandige Stahlrohre/Kapillare oder Kunststoffkomponenten aus Peek verwendet. Peek ist ein Kunststoff, der keine Ausgasung verursacht. Verschraubungen innerhalb des sensitiven Detektorbereichs wurden ebenfalls aus Peek mit Kalrez-O-Ringen bewerkstelligt. Die Detektoren und das ganze Gaszuführungssystem müssen gasdicht sein, damit sichergestellt ist, daß in den Detektoren die richtige Gasmischung Ar:CO<sub>2</sub> (70:30) vorliegt und Verunreinigungen z. B. durch O<sub>2</sub> aus der Luft oder H<sub>2</sub>O gering gehalten werden.

Ursprünglich war geplant, die GEM-MSGC-Detektoren mit dem Gas Ar:DME (50:50) zu betreiben. Dimethylether (DME) ist ein sehr gutes Quenchgas, das in Verbindung mit Ar zu einem schnellen Zählverhalten der Detektoren führt. Ein weiterer Vorteil des Gases DME wäre seine



**Abbildung 4.7:** Schematische Zeichnung der Gasversorgung der GEM-MSGCs.

sehr gute Überschlagsfestigkeit in der GEM-Folie gewesen. Leider stellte sich heraus, daß DME unter großflächiger Teilchenbestrahlung zu starker Alterung der Detektoren führt [B<sup>+</sup>02b], was es für den Einsatz bei HERA-B unbrauchbar macht. Nach einer Reihe von Zählgastests stellte sich nur die Gasmischung Ar:CO<sub>2</sub> (70:30) als brauchbar heraus. Ar:CO<sub>2</sub> hat gegenüber Ar:DME eine geringere Primärionisation und führt beim Durchgang eines Teilchens zu einer größeren Diffusionswolke, was zu einer Ladungsverteilung über mehrere Streifen führt. Allerdings hat CO<sub>2</sub> als Gas den Vorteil, daß es nicht wie DME leicht entzündlich ist, und deswegen keine besonderen Schutzvorkehrungen gegen austretendes Gas bei den Detektorstationen benötigt werden.

Teil I

Qualitätssicherung beim Bau des  
inneren Spurkammersystems von  
**HERA-*B***





## Kapitel 5

# Tests und Kontrollen parallel zum Bau des inneren Spurkammersystems

Im Laufe der Entwicklungs- und Testphase der MSGC-GEM-Detektoren stellte sich immer mehr heraus, daß diese Detektoren unter den Betriebsbedingungen bei HERA-*B* nicht robust sind. Zwei Probleme stechen dabei hauptsächlich heraus:

1. Um hinreichend große Gasverstärkung zu erreichen, müssen die Detektoren mit Hochspannungen nahe an ihrer Durchbruchsschwelle betrieben werden. Da zudem in intensiven Hadronstrahlen neben den minimal ionisierenden Teilchen auch immer stark ionisierende Teilchen z. B. aus Spallation auftreten, die bis zu 50000 Mal stärker ionisieren, neigen die Detektoren zu Gasentladungen. Dies kann, sobald Anoden mitbetroffen sind, zu im allgemeinen irreversiblen Schäden an der Elektrodenstruktur führen. Die GEM-Folien sind robuster, aber auch bei ihnen können Entladungen zu Kurzschlüssen führen. Entladungen treten bevorzugt dort auf, wo die elektrischen Felder durch Herstellungsfehler der Elektroden, der Diamantschicht oder auch Fehler bei den Klebungen verzerrt sind.
2. Das MSGC-Substrat neigt stark zu Gasalterung, die zu Belägen auf den Anoden führt. Ursache hierfür können selbst sehr geringe Konzentrationen organischer Verunreinigungen im Gas oder Ausgasung aus den benützten Baumaterialien sein. Als Zählgas erwies sich schließlich nur Ar:CO<sub>2</sub> als geeignet, das sehr rein geliefert wird, so daß das Problem auf die Wahl geeigneter Baumaterialien und eines extrem sauberen Gassystem reduziert wurde. Erschwerend kommt hinzu, daß die Detektoren im eingebauten Zustand kaum zugänglich sind und eventuell notwendige Reparaturen sehr zeitaufwendig wären.

Als Konsequenz daraus wurde ein ausgeklügeltes Testprogramm für die verschiedenen Bauphasen der Detektoren entwickelt, das es ermöglichen sollte, Fehler in den Detektorkomponenten und Baufehler möglichst frühzeitig zu entdecken und somit möglichst fehlerfreie Detektoren bei HERA-*B* einzubauen und dadurch die Risiken für den Betrieb der Detektoren zu minimieren. Der Bau der Detektoren wurde gemeinsam von den Gruppen in Heidelberg, Siegen und Zürich durchgeführt.

Im Laufe dieser Arbeit wurden insbesondere die Tests, die in Heidelberg durchgeführt wurden, entwickelt und durchgeführt, sowie die Tests während des Zusammenbaus und vor der Installation der Detektorsuperlagen bei HERA-*B* in Hamburg ausgearbeitet und durchgeführt. Folgende Tests wurden durchgeführt, die im folgenden inklusive der Ergebnisse genauer beschrieben werden:

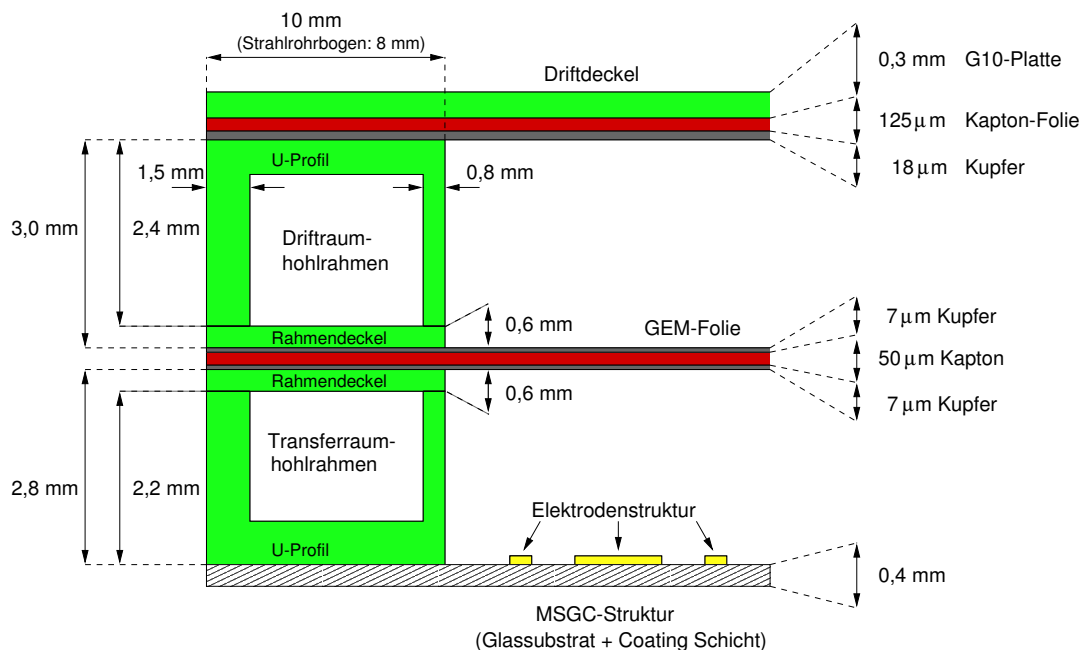
- Test der verschiedenen Detektorkomponenten:
  - Test des MSGC-Substrats auf Kurzschlüsse und Anodenunterbrüche (Zürich)
  - Hochspannungstest der GEM-Folien (CERN, Heidelberg)
  - Reduktion der Ausgasung von Rahmen und Deckel (Heidelberg)
- Tests während des Baus der Detektoren
  - Hochspannungstest der geklebten Driftbox (Heidelberg)
  - Test der Gasdichtigkeit der Detektoren (Siegen)
  - Hochspannungstest der Detektoren mit Zählgas (Siegen)
  - Test der Ausleseelektronik der Detektoren (Heidelberg)
- Test während des Baus einer Detektorsuperlage (Heidelberg)
  - elektronische Tests währen des Zusammenbaus der Halbsuperlagen  
Erdung, Stecker, Kabel
  - GEM-Folien Hochspannungsstabilitätstest
  - Test der gebondeten Ausleseelektronik
- Test der Halbsuperlagen vor der Installation bei HERA-*B* (Hamburg)
  - Test der kompletten Gasversorgung
  - Test der kompletten Ausleseelektronik
  - Langzeit Hochspannungstest mit Zählgas unter betriebsnahen Bedingungen

## 5.1 Test der Detektorkomponenten

### 5.1.1 Aufbau der GEM-MSGC

Die GEM-MSGC besteht aus fünf Teilen: dem MSGC-Substrat, der GEM-Folie, der Driftelektrode, den zwei Rahmen zwischen Driftelektrode und GEM-Folie und zwischen der GEM-Folie und dem MSGC-Substrat (siehe die bemaßte Abb. 5.1). Das MSGC-Substrat besteht aus alkalifreiem Glas und einer Gold-MSGC-Struktur. Die GEM-Folie ist eine beidseitig mit Kupfer beschichtete Kaptonfolie, in die eine regelmäßige Lochstruktur geätzt wurde. Die Driftelektrode ist eine mit G10 verstärkte kupferbeschichtete Kaptonfolie. Die Driftelektrode wurde mit G10 verstärkt, um der GEM-MSGC Stabilität zu geben. Die Rahmen sind aus G10 gefräste Hohlrahmen und dienen zum einen dazu, die GEM-Folie an ihrer Position in der Mitte der GEM-MSGC zu halten, und zum anderen dazu, den Detektor mit Zählgas zu versorgen. Der Detektorteil, der sich aus dem Driftdeckel, der GEM-Folie sowie dem Rahmen zwischen ihnen zusammensetzt, wird Driftbox genannt. Der Teil, der sich aus einem Rahmen und dem MSGC-Substrat zusammensetzt, wird MSGC-Teil genannt.

Die Mikrostreifenstruktur darf nicht zu viele Fehlstellen haben, da unterbrochene Anoden- oder Kathodenstreifen zu einer geringeren Kammereffizienz führen. GEM-MSGCs mit Kurzschlüssen auf der Mikrostreifenstruktur führen zum Verlust eines Teils der GEM-MSGCs. Bei einem Kurzschluß zwischen Kathode und Anode tragen durch den Ausfall einer ganzen Kathodengruppe 2% des sensitiven Bereichs der Kammer nicht zum Teilchennachweis bei. Die GEM-Folie darf keine leitende Verbindung zwischen den zwei Kupferflächen haben, da sonst die benötigte Spannung nicht aufrecht gehalten werden kann. Die Lochgeometrie der GEM-Folie darf nicht zu stark variieren, da dadurch die Gasverstärkung in der GEM-MSGC zu sehr variiert.



**Abbildung 5.1:** Bemaßte Zeichnung des Querschnitts einer HERA-B-GEM-MSGC. Die GEM-MSGC besteht aus fünf Teilen, die wiederum selbst aus mehreren Teilen bestehen; dem MSGC-Substrat, den zwei Rahmen, der GEM-Folie und der Driftelektrode [Hil99].

Die GEM-Folie ist die empfindlichste Komponente der GEM-MSGC und im Vergleich zum MSGC-Substrat kostengünstig. Ein Kurzschluß in der GEM-Folie führt im Gegensatz zu einem Kurzschluß auf dem MSGC-Substrat zum vollständigen Verlust der GEM-MSGC. Deswegen wurde die Hochspannungsstabilität der GEM-Folie direkt nach der Produktion, kurz vor dem Zusammenbau der Driftbox sowie vor der Klebung der Driftbox mit dem MSGC-Teil getestet, um vor der Verklebung der kostengünstigen GEM-Folie mit dem teuren MSGC-Substrat sicherzustellen, daß nur GEM-Folien, die hochspannungsstabil sind, beim Kammerbau verwendet werden, und um damit Ausfälle der GEM-MSGCs durch Kurzschlüsse in der GEM-Folie so weit wie möglich zu vermeiden.

### 5.1.2 MSGC-Substrattest

Das MSGC-Substrat ist der wichtigste Bestandteil der GEM-MSGC. Das HERA-B-MSGC-Substrat ist eine mit einer dünnen amorphen Kohlenstoffschicht („diamond-like coating“) überzogene Platte aus alkalifreiem Glas. Bei der Firma IMT<sup>1</sup> wurde auf dem MSGC-Substrat in einem lithographischen Verfahren die Elektrodenstruktur aus Gold aufgebracht. Es ist produktionsbedingt nicht möglich, ein MSGC-Substrat mit der bei HERA-B verwendeten Größe ganz ohne Fehlstellen herzustellen. Durch die Arbeitsgruppe der Universität Zürich wurden die MSGC-Substrate auf Produktionsfehler getestet, um die Produktion zu überwachen und zu entscheiden, welche MSGC-Substrate für den Kammerbau verwendbar sind. Dieser Test ist in [Wal01] beschrieben.

Bei der Produktion des MSGC-Substrats können folgende Defekte auftreten:

- Kurzschluß zwischen Anode und Kathode  
Durch einen Kurzschluß kann die nötige Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode

<sup>1</sup>IMT Masken und Teilungen AG, CH-8606 Greifensee

nicht aufrechterhalten werden. Dadurch kann an diesem entsprechenden Anodenstreifen keine Gasverstärkung stattfinden. Auf dem MSGC-Substrat sind 16 Kathoden zu einer Gruppe zusammengefaßt; da ein HERA-*B*-MSGC-Substrat aus 768 Kathodenstreifen besteht, gibt es insgesamt 48 Kathodengruppen. Daher fallen durch einen Kathoden-Anoden-Kurzschluß 16 Auslestreifen aus, das entspricht 2 % des gesamten MSGC-Substrats.

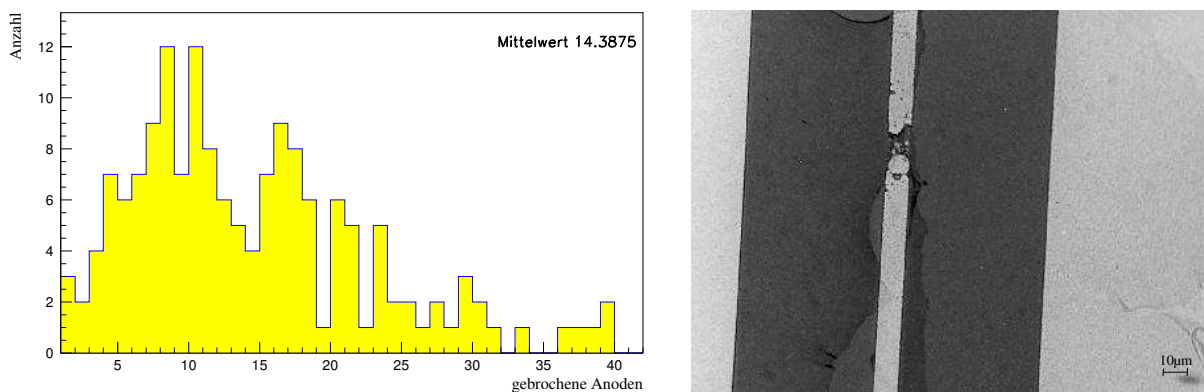
- Anodenunterbruch

Die 10  $\mu\text{m}$  dünne Anode kann durch Fertigungsprobleme im Lift-Off-Verfahren unterbrochen sein. Dadurch liefert nur der Teil der Anode Signale, der mit der Ausleseelektronik verbunden ist.

- Kathodenunterbruch

Durch einen Unterbruch der Kathode entspricht das elektrische Feld an der Anode nicht mehr dem vorgegebenen Feld. Daher kann die benötigte Gasverstärkung an dieser Stelle nicht aufgebracht werden, die Anodenstreifen um die defekte Kathode liefern daher nur schwache Signale.

Bei dem MSGC-Substrattest wurden die Kathodengruppen und die Anodenstreifen maschinell einzeln kontaktiert. Die Anodenstreifen wurden geerdet und an die Kathodengruppen eine Spannung von 300 V angelegt, und der Widerstand zwischen den Anodenstreifen und der Kathodengruppe wurde gemessen. MSGC-Substrate, die Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse hatten, wurden durch Unterbrechen des Anodenstreifens repariert. MSGC-Substrate mit mehr als 50 Anodenunterbrüchen wurden aussortiert. In Abb. 5.2 ist für die bei HERA-*B* 2002/2003 eingesetzten GEM-MSGCs die Zahl der produktionsbedingten Anodenunterbrüche abgebildet.



**Abbildung 5.2:** Links: Zahl der Anodenunterbrüche pro MSGC-Substrat der bei HERA-*B* 2002/2003 eingesetzten GEM-MSGCs. Rechts: Abbildung eines typischen Anodenunterbruchs. Dunkel ist die Glasplatte zu sehen, die helleren Flächen sind die aufgetragenen MSGC-Strukturen. Der 10  $\mu\text{m}$  breite Streifen ist eine Anode, die breiteren Streifen sind Teilbereiche der 170  $\mu\text{m}$  breiten Kathodenstreifen. (nach [Wal01].)

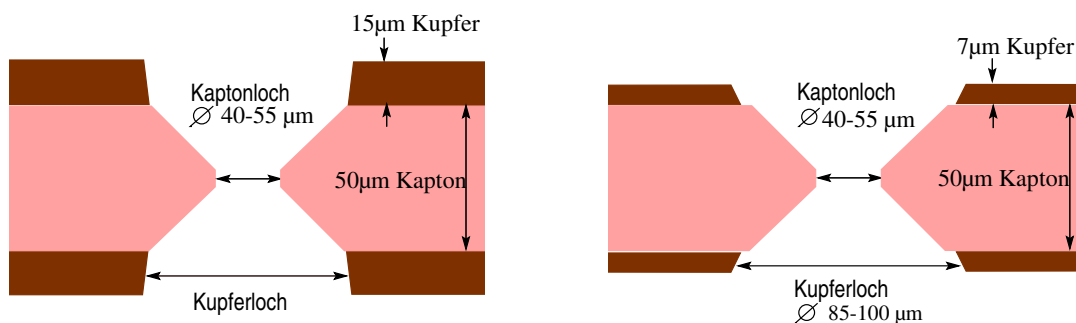
Die MSGC-Substrate, die bei HERA-*B* im Jahr 2002 eingesetzt werden, hatten im Durchschnitt 14 produktionsbedingte Anodenunterbrüche, das entspricht 1,8% der aktiven Fläche des MSGC-Substrats. Einzelne Anodenunterbrüche führen nicht zu einer Reduktion der Kammereffizienz, da die beim Durchgang geladener Teilchen erzeugten Elektronen durch die Nachbarstreifen der unterbrochenen Anoden nachgewiesen werden können. Die Ortsauflösung in der Auslesekoordinate wird aber durch unterbrochene Anoden schlechter. Erst mehrere defekte Anodenstreifen nebeneinander führen zu einer geringeren Nachweiseffizienz des Detektors.

Nach dem MSGC-Substrattest wurde automatisch ein Protokoll zu jedem MSGC-Substrat erstellt, in dem die unterbrochenen Anoden aufgeführt sind. Da sich während des Betriebs bei

HERA-*B* herausstellte, daß diese produktionsbedingt unterbrochenen Anodenstreifen häufiger zu Kathoden-Anoden-Kurzschlüssen führen als perfekte Anoden, wurden im Shutdown 2001 alle beim MSGC-Substrattest gefundenen unterbrochenen Anodenstreifen vollständig von der Auslese getrennt (siehe Kap. 7.1).

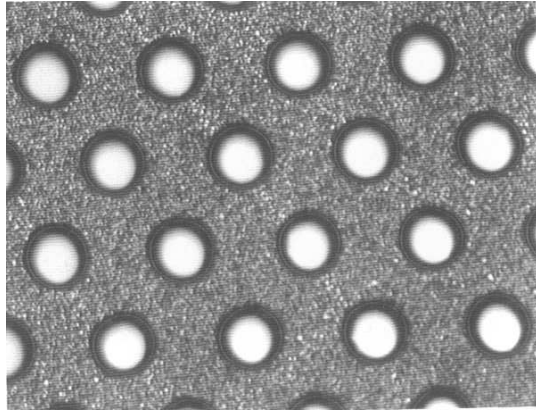
### 5.1.3 GEM-Folientest

Die GEM-Folie wurde in der galvanischen Werkstatt des CERN produziert. Sie ist eine beidseitig beschichtete Polyimidfolie (Kapton), in die mittels eines photolithographischen Verfahrens eine regelmäßige Lochgeometrie geätzt wurde. Ausgangsmaterial ist dabei eine  $50\ \mu\text{m}$  dicke Kaptonfolie, die auf beiden Seiten mit  $15\ \mu\text{m}$  Kupfer beschichtet ist. Im ersten Schritt wurde die Lochstruktur in beide Kupferflächen geätzt. Bei diesem Schritt kam es auf eine genaue Ausrichtung der beiden Masken von Ober- und Unterseite an, damit die Löcher gerade und nicht verzerrt durch die Kaptonfolie verliefen. Verzerrte Löcher weisen eine vom Design abweichende Geometrie auf, wodurch sich die Feldverteilung und damit auch die Gasverstärkung ändert. In einem zweiten Schritt wurden mit einer Ätzlösung, die nur die Kaptonfolie ätzt, die Löcher in der Kaptonfolie geätzt. Hierzu diente die Kupferlochstruktur als Maske. Nach diesem Verfahren hatten die Löcher die in Abb. 5.3 links abgebildete Geometrie.



**Abbildung 5.3:** Querschnitt durch die HERA-*B*-GEM-Folie. Links: nach dem ersten Kupfer- und dem Kapton-Ätzschritt. Rechts: nach einem zweiten Kupferätzschritt. Der Kupferrand beginnt nach dem zweiten Ätzschritt nicht genau am Rand des Kaptonloches, und die Dicke der Kupferfläche ist auf  $7\ \mu\text{m}$  reduziert worden.

Durch das Ätzen nach diesem Verfahren begann das Kaptonloch direkt am Rand des Kupferloches. Dadurch kann es vorkommen, daß kleine Kupferspitzen in das Kaptonloch hineinragen. An ihnen bildet sich ein höheres elektrisches Feld, und es kann zu Überschlägen zwischen den Seiten der GEM-Folie kommen. Überschläge in der GEM-Folie sind meistens nicht schädlich, sie können auch nicht vollständig vermieden werden, aber es kann dabei ein Kurzschluß in der GEM-Folie ausgebildet werden, der zu einem vollständigen Verlust der benötigten Gasverstärkung an der GEM-Folie führt. Eine GEM-MSGC, deren GEM-Folie einen Kurzschluß entwickelt hat, hat nicht mehr genügend Effizienz und ist somit für das innere Spurkammersystem unbrauchbar. Diese Überschläge wurde durch ein weiteres Kupferätzen (double copper etching) weitgehend verhindert. Dadurch beginnt der Rand des Kupferloches nicht direkt am Rand des Kaptonloches, und gleichzeitig wird die Dicke des Kupfers von  $15\ \mu\text{m}$  auf  $7\ \mu\text{m}$  reduziert. Rechts in Abb. 5.3 ist die endgültige Lochgeometrie dargestellt. Durch dieses zweifache Kupferätzen wurden die GEM-Folien sicherer gegen Hochspannungsüberschläge zwischen den beiden Seiten. Ein Mikroskopbild einer GEM-Folie ist in Abb. 5.4 gezeigt. Der Lochdurchmesser der HERA-*B*-GEM-Folien ist im Kupfer  $90 \pm 3\ \mu\text{m}$  und im Kapton  $49 \pm 4\ \mu\text{m}$ . Zur Kontrolle wurden die Lochdurchmesser in Kapton und Kupfer in der galvanischen Werkstatt am CERN an fünf Stellen der GEM-Folie



**Abbildung 5.4:** Mikroskopabbildung einer doppeltgeätzten GEM-Folie. Die Kupferoberfläche (grau), die Kaptonoberfläche im Lochkegel (dunkler Rand) und das Kaptonloch (heller Bereich) sind deutlich zu erkennen. Die begrenzte Tiefenschärfe des Mikroskops erlaubt nicht die gleichzeitige Fokussierung auf alle Bereiche der GEM-Folie, deswegen erscheint der helle Bereich des Kaptonlochs zu groß gegenüber dem Durchmesser des Kupferloches. Der Abstand zwischen den Lochmittelpunkten beträgt  $140\ \mu\text{m}$ .

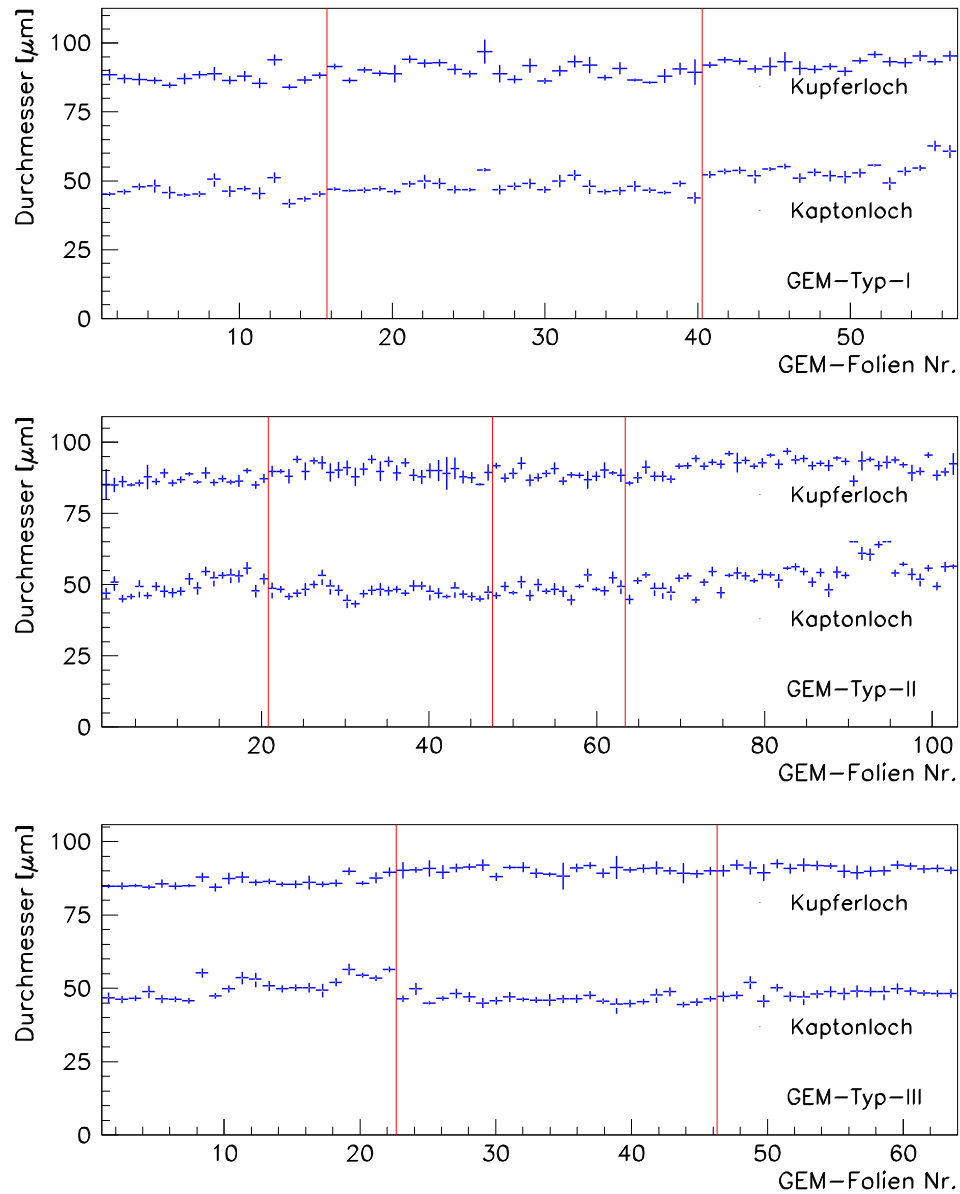
vermessen. Für verschiedene Produktionslieferungen<sup>2</sup> (einzelne Lieferungen sind mit senkrechten Linien dargestellt) sind der Mittelwert und die Streuung der fünf Messungen der Lochdurchmesser jeder einzelnen GEM-Folie in Abb. 5.5 dargestellt. Die Durchmesser der einzelnen Löcher sind bis auf einzelne Ausnahmen konstant über die verschiedenen GEM-Folien.

Auch nach dem zweiten Ätzschritt können Kupferspitzen in das Kaptonloch ragen und zu einer Verringerung der Spannungsfestigkeit führen. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein mehrstufiges Testverfahren entwickelt und angewendet, bei dem die GEM-Folien direkt nach der Produktion und unmittelbar vor dem Einbau intensiv getestet wurden. Als erstes wurde die Spannungsfestigkeit der GEM-Folie in einem Reinraum der galvanischen Werkstatt in einer Luftatmosphäre getestet. Der Strom, der bei einer Spannungsdifferenz von 500 V durch die GEM-Folie fließt, darf in einer solchen Umgebung nicht größer als 10 nA sein. Nur GEM-Folien, bei denen diese Spannungsdifferenz für mindestens 30 Sekunden ohne Überslag zwischen den zwei Seiten aufrecht erhalten werden konnte, wurden verwendet. GEM-Folien, deren Lochdurchmesser die in Abb. 5.3 gezeigten Maße hatten, und die keinen Kurzschluß ausbildeten, wurden zur weiteren Verarbeitung nach Heidelberg gesendet.

In Heidelberg wurden alle GEM-Folien in einem staubfreien Raum einer optischen Kontrolle unterzogen. GEM-Folien mit starken Knicken, Resten von Photoresist, der benötigt wird um die Lochstruktur auf die GEM-Folie abzubilden, oder sonstigen Auffälligkeiten wurden aussortiert. Aus diesem Grund wurden 12% der vom CERN gesendeten GEM-Folien aussortiert. Am Tag vor dem Kammerbau wurde jede GEM-Folie in einem Langzeittest nochmal auf ihre Hochspannungsfestigkeit untersucht. Dazu wurden die GEM-Folien auf einem Aluminiumrahmen befestigt, der in eine Stickstoffatmosphäre gestellt wurde. Für diesen GEM-Folientest wurde Stickstoff verwendet, da Stickstoff ein gutes Quenchgas ist, das in hochreinem Zustand kommerziell erhältlich ist. Durch die Stickstoffatmosphäre können Verbrennungsrückstände bei einem Überslag zwischen den zwei GEM-Seiten vermieden werden. Da dieser Test auch der Konditionierung der GEM-Folien dienen sollte, wurde die Spannungsdifferenz langsam in mehreren Schritten erhöht. Die Spannungsdifferenz der Folie wurde innerhalb von 30 Sekunden auf 300 V gesetzt, diese Spannung mußte für mindestens 12 h angelegt bleiben, danach wurde alle 30 min die Spannung um

<sup>2</sup>Produktion und Lieferung der GEM-Folien erfolgte in mehreren Chargen, zwischen denen mehrere Wochen lagen. Eine Überwachung der GEM-Folien war daher essentiell, um sicherzustellen, daß die Prozeßparameter in der Zwischenzeit unverändert geblieben waren.

50 V erhöht, bis an der GEM-Folie eine Spannungsdifferenz von 500 V anlag. Der Strom, der bei 500 V durch die GEM-Folie fließt, darf in der Stickstoffatmosphäre nicht größer als 10 nA sein. 2% der GEM-Folien bildeten bei diesem Langzeittest einen Kurzschluß aus, diese Folien wurden aussortiert. GEM-Folien, die häufiger Entladungen zeigten, wurden über 2 1/2 Tage langsam konditioniert. Es stellte sich heraus, daß GEM-Folien, die über längere Zeit konditioniert wurden, die Spannungsdifferenz von 500 V aufrecht halten konnten. Insgesamt wurden 14% der von



**Abbildung 5.5:** Kupfer- und Kaptonlochdurchmesser der in der CERN-Werkstatt produzierten GEM-Folien. Im oberen Bild sind die Durchmesser der Typ I-GEM-Folien, im mittleren Bild die der Typ II-GEM-Folien und im unteren Bild die der Typ III-GEM-Folien dargestellt. Mit senkrechten Linien sind die verschiedenen Lieferungen gekennzeichnet.

der CERN-Werkstatt nach Heidelberg gesendeten GEM-Folien wegen optischer Auffälligkeiten oder Kurzschlüssen aussortiert, die übrigen GEM-Folien wurden zu GEM-MSGCs verarbeitet.

### 5.1.4 Kontrolle der Driftdeckel

Der Driftdeckel besteht aus einer mit  $18\ \mu\text{m}$  Kupfer beschichteten,  $125\ \mu\text{m}$  dicken Kaptonfolie und aus einer  $0,3\ \text{mm}$  dicken G10-Platte. Die beschichtete Kaptonfolie wurde von der Firma GTS<sup>3</sup> produziert. Die Driftfolien wurden in Heidelberg zur Verstärkung mit der  $0,3\ \text{mm}$  dicken G10-Platte verklebt. Da der Driftdeckel aus gasundurchlässigem Kapton und dem gasdichten Glasfasermaterial G10 besteht, wird der Driftdeckel nicht auf Gasdichtigkeit überprüft, sondern nur optisch auf vollständige Beschichtung mit Kupfer und gute Verklebung der zwei Materialien kontrolliert.

### 5.1.5 Kontrolle der Hohlrahmen

Die bei der HERA-*B*-GEM-MSGC verwendeten Rahmen sind Hohlrahmen. Sie dienen zum einen dazu, die GEM-Folie mechanisch an ihrer Sollposition zu halten, und zum anderen der Gaszuführung der GEM-MSGC. Alle Rahmen wurden an der Universität Heidelberg aus G10-Platten gefräst. Für die HERA-*B*-GEM-MSGC werden zwei unterschiedlich hohe Rahmen verwendet. Die Rahmen bestehen aus zwei Teilen, einem U-Profil und einem dazu passenden Deckelteil (siehe Abb. 5.1). Da Drift- und Transferraum unterschiedlich hoch sind, wurde jeweils aus einer  $2,2\ \text{mm}$  und aus einer  $2,4\ \text{mm}$  dicken G10-Platte ein U-Profil und aus zwei  $0,6\ \text{mm}$  dicken G10-Platten jeweils ein Deckelteil gefräst. Die gefrästen Rahmenteile wurden mit Schleifpapier abgeschliffen und die Maße der Rahmen mit einer Mikrometerschraube an fünf Stellen vermessen. In Tab. 5.1 sind die Sollmaße und die erlaubten Abweichungen der Rahmenteile gezeigt. Nur Rahmen, bei denen die Maße nicht weiter als erlaubt abwichen, wurden weiter verarbeitet.

Sollmaß des U-Profiles des Transferraumhohlrahmen [mm]				
Höhe innen	Höhe außen	Wand innen	Wand außen	Breite
$2,2 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,25$	$1,5 \pm 0,3$	$10/8 \pm 1,5$

Sollmaß des U-Profiles des Driftraumhohlrahmen [mm]				
Höhe innen	Höhe außen	Wand innen	Wand außen	Breite
$2,4 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,25$	$1,5 \pm 0,3$	$10/8 \pm 1,5$

Sollmaß der Deckelteile [mm]	
Höhe	Breite
$0,6 \pm 0,1$	$10/8 \pm 1,5$

**Tabelle 5.1:** Sollmaße und erlaubte Abweichungen der Rahmen. In der ersten Tabelle sind die Maße für den Transferraumhohlrahmen, in der mittleren Tabelle die des Driftraumhohlrahmen und in der unteren Tabelle die Maße der Deckelprofile aufgelistet. Die Breite aller Rahmen soll im Strahlrohrbereich  $8\ \text{mm}$  statt der sonstigen  $10\ \text{mm}$  sein.

Das U-Profil und der Deckel wurden mit einem gut sichtbaren füllenden Klebstoff (ECCOBOND 285) miteinander verklebt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zu Beginn der Serienfertigung der Kammern Gasdichtigkeitstests durchgeführt. Dazu wurde Heliumgas und ein auf Helium empfindliches Gaslecksuchgerät verwendet. Helium ist ein einatomiges Gas, das im Gegensatz zu Gasen, die aus größeren Molekülen bestehen, durch die kleinsten Löcher austritt. Dadurch können mit einem auf Helium empfindlichen Gaslecksuchgerät kleinste gasundichte Stellen nachgewiesen werden. Alle Rahmenteile, bei denen der Kleber gut sichtbar überall aufgetragen war, waren heliumgasdicht. Daraufhin wurden die Rahmen nicht einzeln auf Gasdichtigkeit überprüft, sondern

<sup>3</sup>GTS, D-57072 Siegen



nur einer optischen Kontrolle unterzogen, die die Verklebung der Rahmenteile überprüfte. Da die GEM-MSGCs sich im eingebauten System überlappen und der Raum zwischen den überlappenden Kammern nur  $\approx 1$  mm beträgt, wurde vor dem Kammerbau darauf geachtet, daß kleinere Bauhöhenabweichungen der Rahmen möglichst durch Rahmen mit entgegengesetzten Bauhöhenabweichungen ausgeglichen wurden, damit die Höhe der GEM-MSGC nicht zu stark von ihrem Sollmaß abweicht.

## 5.2 Ausheizen der einzelnen Detektorkomponenten

Im Frühjahr 1999, als die Serienfertigung der GEM-MSGCs bereits angelaufen war, wurde am 300 MeV  $\pi/p$ -Strahl am PSI (Villigen, Schweiz) ein abschließender Alterungstest durchgeführt. Hierzu wurde das ursprünglich vorgesehene Zählgasgemisch Ar:DME<sup>4</sup> (50:50) verwendet. Es stellte sich heraus, daß die Detektoren bei großflächiger Hochratenbestrahlung schon nach wenigen Tagen Alterungserscheinungen zeigen. Im bestrahlten Bereich zeigten die Detektoren ausreichende Gasverstärkung, im Gegensatz dazu zeigten sie im Bereich der Kammer, der wenig Strahlung gesehen hatte, keine Gasverstärkung mehr. Eine Oberflächenanalyse des Fraunhofer-Instituts<sup>5</sup> zeigte, daß sich im bestrahlten Bereich eine amorphe Kohlenstoffschicht auf der Elektrodenstruktur abgelagert hatte, während der Bereich der Kammer, der wenig Strahlung gesehen hatten, mit einer isolierenden Schicht aus Kohlenwasserstoffverbindungen überzogen war. Wie sich bei späteren Alterungstests mit großflächiger Röntgenbestrahlung herausstellte, ließ sich Alterung bei der Verwendung von DME nicht vollständig vermeiden [B<sup>+</sup>02b]. Alterungserscheinungen können von Verunreinigungen des Zählgases ausgelöst werden, oder durch Ausgasen der beim Detektorbau verwendeten Komponenten. Diese Ergebnisse widersprachen den vorherigen, erfolgreichen Alterungstests. Verunreinigungen des Zählgases sind nie ganz auszuschließen, allerdings wurden für die Tests immer dieselben Gasflaschen wiederbefüllt, um dadurch die Verunreinigung des Zählgases zu minimieren. Der Verdacht lag nahe, daß die Alterung durch Ausgasungen der verwendeten Materialien hervorgerufen wurde. Deshalb wurde zu Testzwecken eine GEM-MSGC gebaut, deren Komponenten vor dem Bau bei hohen Temperaturen mehrere Stunden lang ausgeheizt worden waren. Diese Kammer zeigte bei einem Alterungstest mit einer großflächigen Gamma-Bestrahlung keine erkennbaren Alterungserscheinungen. Daraufhin wurden im Rahmen dieser Arbeit Vorbereitungen getroffen, die GEM-Folien, Rahmenteile und Driftdeckel für einige Stunden auf hohe Temperatur zu erhitzen, um späteres Ausgasen zu vermeiden. Die GEM-Folien und die Driftdeckel wurden frei hängend für 12 h in einem Ofen auf 100° C erhitzt. Die Hohlrahmen wurden ebenfalls für 12 h in einem Ofen auf 100° C erhitzt, wobei sie die ganze Zeit mit hochreinem Stickstoff durchspült wurden, um ausgegaste Verbindungen aus dem Inneren der Hohlrahmen zu spülen.

Beim Erhitzen des MSGC-Substrats ändert die Diamantschicht ihre Struktur und damit ihren Flächenwiderstand. Ein Test, bei dem ein Substrat für zehn Stunden auf 200° C erhitzt wurde, zeigte, daß danach der Flächenwiderstand um einen Faktor 10 kleiner war. Da es bei produzierten MSGC-Substraten als zu kritisch erachtet wurde, den Flächenwiderstand der Diamantschicht aller MSGC-Substrat gleich einzustellen, wurden sie nicht nachträglich ausgeheizt. Bei dem Teil der MSGC-Substrate, die bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht mit Elektroden bestückt waren, wurde das Substrat für einige Stunden bei der Herstellung der Diamantschicht auf dem Substrat beim Fraunhofer-Institut erhitzt. Durch dieses Erhitzen des Substrats wurde der Flächenwiderstand der Diamantschicht um einen Faktor zehn größer, der Strom, der bei den Betriebsspannungen

---

<sup>4</sup>DME: Dimethylether  $H_3C-O-CH_3$ . Eine mit DME als Quencher betriebene GEM-MSGC zeigt bei gleichem Gasgain eine geringere Wahrscheinlichkeit, Überschläge zwischen Kathode und Anode zu produzieren, als eine MSGC, die mit  $CO_2$  betrieben wird.

<sup>5</sup>Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Braunschweig

fließt, entsprechend um einen Faktor zehn geringer. Fertig gebaute Detektoren, die noch nicht mit Elektronik versehen waren, wurden für 24 h auf 45° C erhitzt, um eventuellem Ausgasen der verwendeten Kleber vorzubeugen. Bei diesem letzten Erhitzungsvorgang wurde die GEM-MSGC wieder mit hochreinem Stickstoff durchspült, um Ausgasungsrückstände aus der GEM-MSGC zu spülen. Im Anhang A befindet sich eine Tabelle, in der für alle 2002/2003 verwendeten Detektoren aufgelistet ist, mit welchen Bauverfahren sie produziert wurden.

Alterungstests im Röntgenstrahl in Heidelberg ergaben, daß mit dem Gas Ar:CO<sub>2</sub> und den ausgeheizten Detektormaterialien keine Alterung mehr beobachtet wurde.

### 5.3 Fertigstellung der GEM-MSGC aus getesteten Komponenten

Aus den getesteten und für gut befundenen Komponenten wurden die Detektoren in Heidelberg von zwei Technikern und zwei Physikern zusammengebaut. Pro Tag konnten zwei GEM-MSGC-Detektoren gebaut werden. Die Driftbox besteht aus dem Driftdeckel, dem Driftraumhohlrahmen und der GEM-Folie. Zur Driftboxklebung wurde der Zweikomponenten-Epoxidharz-Klebstoff EPO-TEK H72 verwendet, der bei 75° C in 2-3 h vollständig aushärtet. Hierzu wurde die Driftbox zum Aushärten für drei Stunden in einen Industriebackofen gestellt. Während der Zeit, die der Kleber zum Aushärten benötigt, wurde nach der Umstellung der Kammerbauprozedur die Driftbox ständig mit hochreinem Stickstoff durchspült, um Ausgasrückstände aus der Driftbox zu spülen. Da die GEM-Folie den empfindlichsten Teil der GEM-MSGC darstellt, wurde im Rahmen dieser Arbeit nach dem Bau der Driftbox die GEM-Folie erneut auf ihre Spannungsstabilität getestet. Der Test der Driftbox unterscheidet sich nicht wesentlich vom Test der GEM-Folie auf dem Aluminiumrahmen, nur daß beim Driftboxtest die GEM-Folie direkt ohne den Aluminiumrahmen getestet werden kann. Die Driftbox wird genau wie die GEM-Folie beim GEM-Folientest in einer Stickstoffatmosphäre getestet. Die angelegten Spannungen und Zeiten sind die gleichen wie in Kap. 5.1.3 beschrieben. Der Strom, der bei Nominalspannung durch die GEM-Folie fließt, beträgt nach dem Erhitzen der GEM-Folie nur noch etwa 1 nA.

Die getestete und hochspannungsstabile Driftbox wurde mit den weiteren Komponenten der Kammer zusammengeklebt. Da die Rahmen und das MSGC-Substrat unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten haben, mußte hierfür ein Klebstoff verwendet werden, der zum Abbinden nicht erhitzt werden muß. Deswegen wurde für Klebungen mit dem MSGC-Substrat der Klebstoff STYCAST 1266, der bei Zimmertemperatur in 12 h vollständig aushärtet, verwendet. Während dieser 12 h wurden die Detektoren ständig mit Stickstoff durchspült, um Ausgasrückstände auszuspülen. In die fertige GEM-MSGC wurden die Gaskapillaren mit STYCAST 1266 eingeklebt und die Seitenflächen, die nicht aus dem MSGC-Substrat oder dem Driftdeckel bestehen, nochmal mit STYCAST 1266 versiegelt.

Eine Überprüfung der ersten 22 gebauten Detektoren ergab, daß die Höhe der Detektoren im Mittel 7,1 mm mit einer Schwankung von 0,1 mm ist. Alle Detektoren waren dünn genug, um im HERA-B -Experiment beim Zusammenfahren der beiden Hälften einer Superlage nicht zerstört zu werden.

### 5.4 Erster Kammertest unter Betriebsbedingungen

Von der Arbeitsgruppe in Siegen wurden alle Kammern einem Gasdichtigkeitstest und einem Hochspannungstest unterzogen. Die Tests, denen die GEM-MSGCs in Siegen unterzogen wurden, sind in [Ger00] beschrieben.

### 5.4.1 Gasdichtigkeit der GEM-MSGC

Dazu wurden die Kammern mehrere Stunden mit dem bei HERA-*B* verwendeten Gas Ar:CO<sub>2</sub> gespült; mit einem Gaslecksuchgerät, das auf Argon bis zu einem Fluß von 10<sup>-4</sup> ml/s empfindlich ist, wurde nach gasundichten Stellen gesucht. Detektoren, die nicht gasdicht waren, wurden mit STYCAST 1266 abgedichtet und nochmals untersucht. Nach diesem Schritt waren alle Detektoren gasdicht.

### 5.4.2 Hochspannungstest

Gasdichte Detektoren wurden unter Ar:CO<sub>2</sub>-Durchfluß auf ihre Hochspannungsstabilität getestet. Dazu wurden die Anoden geerdet und die Kathodengruppen einzeln kontaktiert. Mit dieser Anordnung ist es möglich, einzelne Kathodengruppen, die einen Kurzschluß haben, zu identifizieren und vom weiteren Test auszuschließen. Jede der Kathodengruppen wurde in Reihe mit einem 10 MΩ-Widerstand angeschlossen. Die zwei Seiten der GEM-Folie und die Driftelektrode wurden jeweils über einen 10 MΩ-Widerstand angeschlossen. Die gewünschten Spannungen wurden unterstützt von einem Computer an die GEM-MSGCs angelegt. Die Kammern wurden über 48 h schrittweise auf die damals bei HERA-*B* vorgesehenen Spannungen gebracht. Die Spannungsschritte und die Zeitdauer, für die die Spannungen angelegt waren, sind in Tab. 5.2 gezeigt. Die Spannungen, die an der GEM-Folie angelegt wurden, wurden über einen Spannungsteiler aus der Driftspannung generiert. Die Spannungen der GEM-Folie wurden so gewählt, daß die Feldaufteilung in der Kammer immer gleich bleibt.

Zeit [h]	$U_{\text{Drift}}$ [V]	$\Delta U_{\text{GEM}}$ [V]	$U_{\text{Kathode}}$ [V]
2	1000	140	200
2	1500	210	300
4	2000	280	350
4	2500	350	400
6	3000	410	450
6	3200	410	500
24	3200	410	520

**Tabelle 5.2:** Angelegte Spannungen und Zeiten, für die die Spannungen an den GEM-MSGCs beim Kammertest in Siegen angelegt waren.

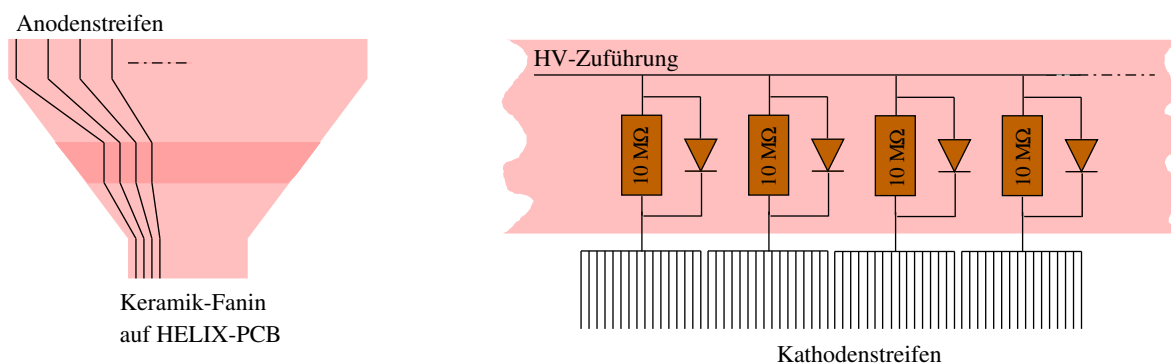
Bildete sich zwischen Kathoden und Anoden ein Kurzschluß aus, wurde die Anode mit dem Kurzschluß mit einem Multimeter identifiziert; beim Anbringen der Ausleseelektronik wurde sie dann von der Auslese auf dem Auslesefanin (links in Abb. 5.6) zwischen HELIX-Chip und MSGC-Substrat getrennt. Durch das Abtrennen von defekten Anoden ging so nur eine einzelne Anode verloren und nicht eine ganze Kathodengruppe, die 16 Anodenstreifen entspricht. Bildete sich während des Tests ein GEM-Kurzschluß aus, wurde versucht, den GEM-Kurzschluß mit einem 500 V-Spannungspuls wegzubrennen. Mit dieser Methode konnten etwa 1/3 der GEM-Kurzschlüsse weggebrannt werden und die Kammern konnten ganz normal weiter betrieben werden.

### 5.4.3 Bonden der Elektronik

An die getesteten Kammern wurden in einem staubfreien Raum die Anoden mit der Ausleseelektronik über ein Auslesefanin kontaktiert und die Kathoden über ein Fanin mit der Hochspannungszuführung verbunden. Das Auslesefanin ist eine Kaptonfolie mit aufgetragenen Kupfer-

Leiterbahnen. Auf dem Auslesefanin wird der Auslestreifenabstand des MSGC-Substrats<sup>6</sup> auf  $200\ \mu\text{m}$  reduziert. Außer an den Kontaktierungsstellen gibt es in der Mitte des Auslesefanins einen Streifen von ca. 1 cm Breite, an dem die Streifen parallel und nicht unter einer Schutzschicht verlaufen. Dieser 1 cm breite Streifen auf dem Auslesefanin wurde kontaktierbar gehalten, um Anodenstreifen mit einem Kurzschluß zu einer Kathode auf dem Auslesefanin von der Auslese zu trennen. Dieser nicht isolierte Bereich ermöglichte es später, Detektoren mit neuer Elektronik auszurüsten (siehe Kap. 7.1).

An der Kathodenseite wird ein Fanin („Kathodenfanin“) angebondet, durch das allen 48 Kathodengruppen eines MSGC-Substrats jeweils über einen  $10\ \text{M}\Omega$ -Schutzwiderstand Spannung zugeführt wird. Parallel zu jedem Schutzwiderstand ist eine Diode in Sperrichtung geschaltet aufgebracht, über die überschüssige Ladung, die bei einem Überschlag zwischen Anode und Kathode frei wird, schnell abfließen kann, so daß die Kathodengruppen immer auf gleichem Spannungsniveau bleiben. In der rechten Abbildung in Abb. 5.6 ist ein Teilbereich des Kathodenfanins schematisch dargestellt. Diese Dioden stellten sich während des Betriebs als problematisch heraus, da es mehrfach vorkam, daß die Diode in Sperrichtung leitend wurde und der Detektor deswegen nicht mehr betrieben werden konnte (siehe Kap. 7.1).



**Abbildung 5.6:** Schematische Zeichnung der Fanins. Links ist das Auslesefanin zwischen GEM-MSGC und Auslese dargestellt. An dem dunkleren Streifen verlaufen die Auslestreifen parallel zueinander und liegen nicht unter einer Schutzschicht. Rechts ist das Kathodenfanin dargestellt, bei dem über eine Spannungszuführung alle 48 Kathodengruppen mit Spannung versorgt werden.

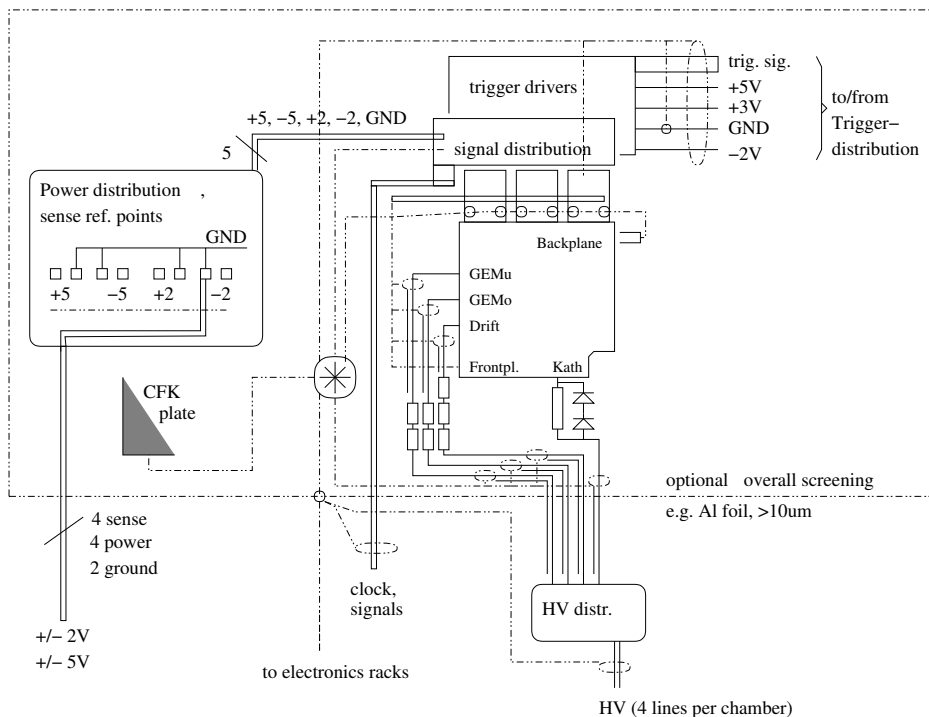
Zum Kontaktieren der MSGC-Streifen mit den Fanins wird ein anisotroper Kleber (*Z-Bond-Kleber*: Ella TeXR008), der Kupferteilchen einer Größe von  $3 - 5\ \mu\text{m}$  enthält, verwendet. Durch hohen Druck an der Bondstelle ergibt sich eine leitende Verbindung zwischen den MSGC-Streifen und den Faninstreifen. Die Detektoren wurden mit den endgültigen Hochspannungskabeln, in die Schutzwiderstände eingelassen sind, versehen. Die Schutzwiderstände sind 50 cm entfernt vom Kammeranschluß eingelassen, um eventuell defekte Widerstände an Zugangstagen ersetzen zu können. Die Driftelektrode hat einen Schutzwiderstand von  $3\ \text{M}\Omega$ , die zwei Seiten des GEMs haben jeweils einen Schutzwiderstand von  $2\ \text{M}\Omega$ .

## 5.5 Zusammenbau der Halbsuperlage

Die fertig gebondeten GEM-MSGCs wurden in Heidelberg auf beiden Seiten mit einer Aluminiumfolie beklebt. Die Folie wurde aufgebracht, um die Kammer von Störsignalen abzuschirmen und um den Kammer signalen ein eindeutiges Referenzpotential zu geben, zu dem die Signale gemessen werden. Die Aluminiumfolie auf dem MSGC-Substrat ist  $9\ \mu\text{m}$  dick, die auf der Driftseite  $50\ \mu\text{m}$ .

<sup>6</sup>Kammern Typ I- und II haben einen Auslestreifenabstand von  $300\ \mu\text{m}$ , Kammern des Typ III haben einen Streifenabstand von  $350\ \mu\text{m}$ .

Die Halbsuperlagen wurden sukzessive Lage für Lage aufgebaut. Bevor die Kammer auf die Trägerplatte montiert wurde, wurde den HELIX-Chips über Lötbrücken auf dem PCB eine innerhalb der Halbsuperlagen eindeutige Adresse zugeordnet. Die Kammer wurde auf die eine Seite der Trägerplatte montiert, und anschließend die Erdung des MSGC-Substrats, des Driftdeckels, der Kabel und der Elektronik nach dem in Abb. 5.7 abgebildeten Erdungsschema verlötet. Das Erdungsschema wurde während eines Strahltests 1998 am Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Villigen, Schweiz ausgearbeitet. Alle Erdverbindungen wurden auf kleine Übergangswiderstände überprüft. Nachdem eine Kammer auf einer Seite der Trägerplatte montiert war, wurde eine zweite Kammer auf der anderen Seite der Platte montiert. Während des Zusammenbaus ei-

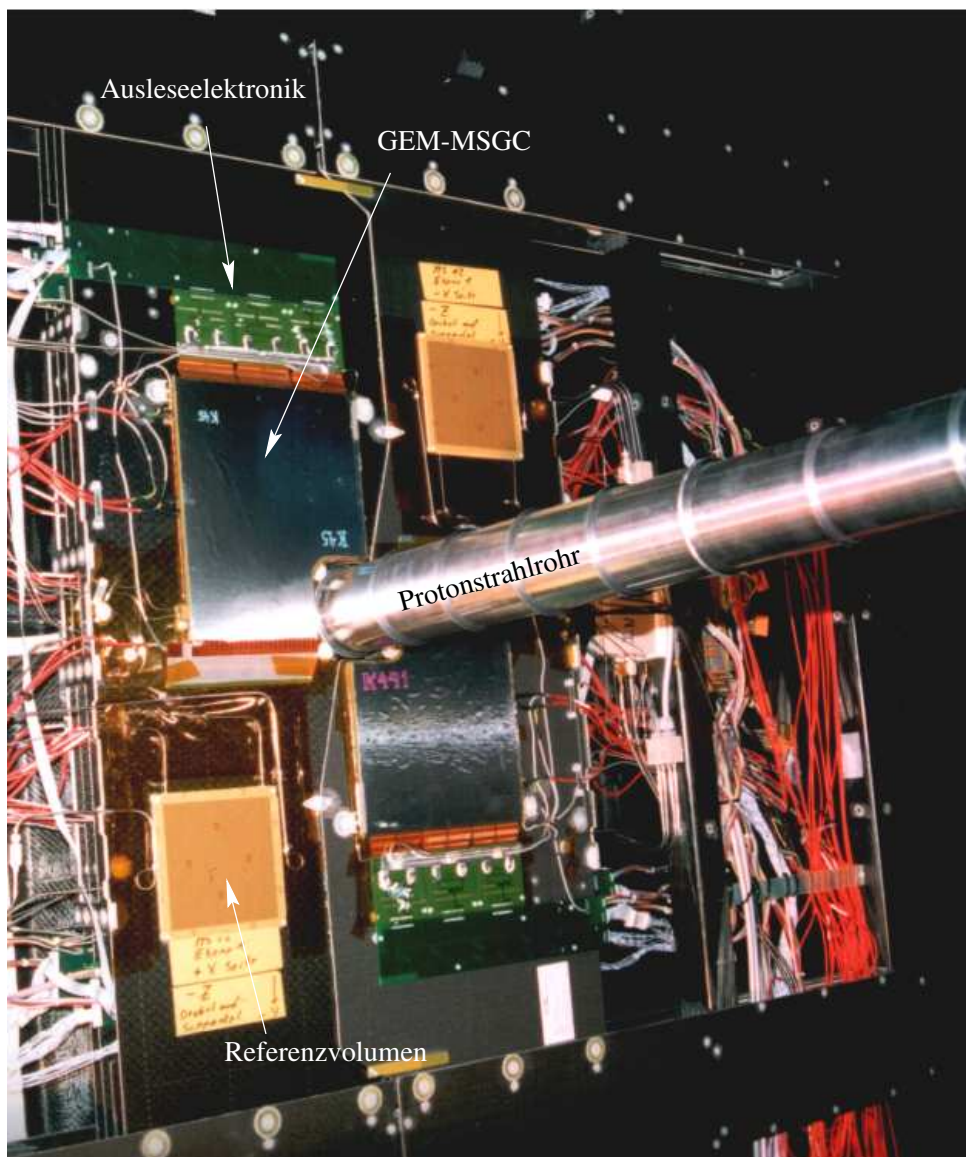


**Abbildung 5.7:** Erdungsschema der Detektoren im Jahr 2000. Abbildung von U. Straumann.

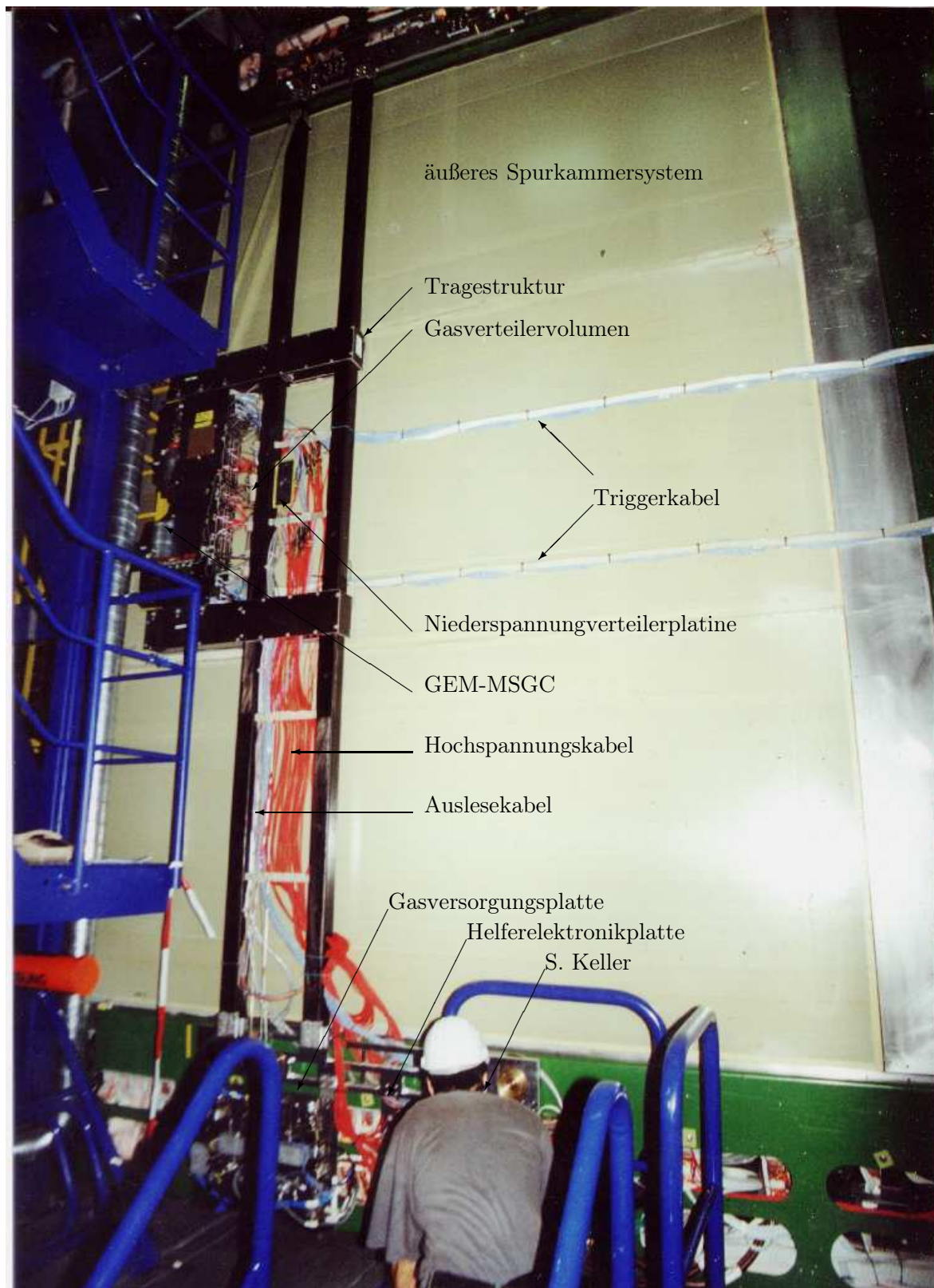
ner Testtriggersuperlage stellte sich heraus, daß der Triggenergang der GEM-MSGC mit dem verwendeten Erdungsschema nicht stabil funktionierte. Deswegen wurde ein neues Erdungsschema ausgearbeitet und die Erdverbindungen aller Superlagen im Shutdown 2001 erneuert (siehe Kap. 7.1).

Die Ausleseelektronik jeder einzelnen geerdeten Detektorlage wurde sofort nach der Montage der Detektoren getestet. Dazu wurde die Elektronik zur Spannungsversorgung an Labornetzteile angeschlossen, die Standardeinstellungen der Auslesechips geladen und das Auslesemuster der Auslesechips auf einem Oszilloskop überprüft. Das von der Elektronik gesendete Signal soll bei einem gut geerdeten Detektor keine großen Schwankungen aufweisen. Bei jeder einzelnen Kammer wurde an die GEM-Folie eine Spannungsdifferenz von 100 V angelegt, um die GEM-Folie kurz vor der Montage der nächsten Detektorlage nochmals auf Hochspannungstabilität zu testen. Hatten beide Kammern auf der Trägerplatte den Elektroniktest und den GEM-Folientest bestanden, wurde die nächste Trägerlage vorbereitet. Bei dem fertig montierten Kammerpaket wurde nochmals die gesamte Ausleseelektronik getestet, um das Zusammenspiel der verschiedenen Detektoren zu testen.

Das fertig montierte Kammerpaket wurde in eine Tragestruktur aus kohlefaserverstärktem Kunststoff eingehängt. Durch sie ist im Experiment das innere Spurkammersystem am Rahmen des äußeren Spurkammersystems befestigt. In Abb. 5.8 ist die Superlage MS12 an der Meßposition gezeigt. Die GEM-MSGCs umschließen das Strahlrohr von allen vier Seiten. Zu sehen sind nur die ersten beiden Detektoren auf der ersten Lage. In Abb. 5.9 ist die Halbsuperlage MS14- $x$  in ihrer Tragestruktur eingehängt und am äußeren Spurkammersystem montiert gezeigt. Neben den Hochspannungskabeln sind die Auslekabel und die Triggerkabel, die quer über das äußere Spurkammersystem verlaufen, zu sehen. Zu jeder einzelnen Superlage wurde eine Textdatei erstellt, in der der Aufbau der Halbsuperlage festgehalten ist. In dieser Textdatei ist dokumentiert, welche Kammer auf welche Lage montiert ist, welche HELIX-Chips aus welcher Produktionsreihe an die Detektoren gebondet wurden und welche Chipadressen den HELIX-Chips zugeordnet wurden.



**Abbildung 5.8:** Die Superlage MS12 in Meßposition. Die Detektoren der zwei Halbsuperlagen umschließen die Protonstrahlröhre. Zu sehen sind nur die ersten zwei Detektoren, die auf der ersten Lage vorne montiert sind. Unterhalb bzw. oberhalb der GEM-MSGCs befindet sich auf der ersten Lage je ein Gasreferenzvolumen, das zur Gasdruckregulierung benötigt wird.



**Abbildung 5.9:** Kammerhalbsuperlage MS14- $x$  montiert auf dem äußeren Spurkammersystem. Die aufgefächerten Hochspannungskabel, die Triggerkabel und die Gas- und Niederspannungsversorgung sind zu sehen.

## 5.6 Komplettest der Superlagen vor dem Einbau im Experiment

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in einer Testhalle in Hamburg ein kompletter Systemtest, dem alle Superlagen unterzogen wurden, aufgebaut und durchgeführt. In diesem Test sollte jede Halbsuperlage vor ihrem Einbau unter möglichst einsatznahen Bedingungen, allerdings ohne Teilchenstrahl, für eine längere Zeit betrieben werden. Gleichzeitig sollte das Zusammenspiel der Superlage mit den übrigen Komponenten, die im Experiment zum Einsatz kommen sollten, getestet werden, nämlich mit der restlichen Ausleseelektronik, der Hoch- und Niederspannungsversorgung und der Versorgung mit Zählgas. Dieser Langzeittest sollte sicherstellen, daß das gesamte System zuverlässig funktioniert, bevor es im Experiment eingebaut wurde. Die einzelnen Schritte dieser Testprozedur werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 5.6.1 Letzte Vorbereitungen an den Halbsuperlagen

Die Halbsuperlage MS14–, die auf Superlage TC1– des äußeren Spurkammersystems montiert ist, ist in Abb. 5.9 gezeigt. In dieser Abbildung sind alle im weiteren besprochenen Gegenstände zu sehen. Bevor der Test der Halbsuperlagen beginnen konnte, wurde die Gasversorgung der Detektoren montiert. Ein Großteil der zur Gasversorgung benötigten Baugruppen ist auf einer Aluminiumplatte am unteren Ende der Tragestruktur außerhalb des sensitiven Bereichs des HERA-*B*-Detektors angebracht. Von dieser Aluminiumplatte wurden dünnwandige Gasrohre zu zwei Verteilervolumina verlegt, die am seitlichen Rand des Kammerpaketes montiert sind. Von diesen Verteilervolumina werden alle Detektoren mit Zählgas versorgt. Nachdem die Detektoren an die Gasversorgung angeschlossen waren, wurden die Detektoren für mindestens 24 h mit Ar:CO<sub>2</sub> gespült. Während die Halbsuperlage mit Gas durchspült wurde, wurden die Hochspannungs- und Auslekabel verlegt. Neben der Aluminiumplatte des Gassystems ist eine weitere Aluminiumplatte angebracht, auf der die Helferelektronik für die Auslese sowie eine Platte mit Steckverbindungen zur Hochspannungszuführung montiert sind. Die Hochspannungskabel der verschiedenen Kammern wurden aufgefächert verlegt, um nichtsensitives Material im inneren Bereich des HERA-*B*-Detektors möglichst dünn zu verteilen. Durch unnötiges Material im sensitiven Bereich des Detektors können die produzierten Teilchen durch Vielfachstreuung von ihrem ursprünglichen Weg abgelenkt werden. Daher müssen nichtsensitive Bereiche soweit wie möglich vermieden werden. Die Auslekabel bestehen aus dünnen zweiadrigen Kabeln. Da die Auslekabel gegen Beschädigungen empfindlich sind und wenig Material darstellen, wurden sie als ein Strang verlegt.

Die Niederspannungsversorgung wird an einen zentralen Verteiler angeschlossen, von dem aus die einzelnen Kammern über dünne Kabel mit Spannung versorgt werden. Die Regelung der Niederspannung hält die Spannung auf der Verteilerplatine konstant. Alle Kabel mußten sehr sorgfältig verlegt werden, da zwischen den einzelnen Superlagen des äußeren Spurkammersystems genau soviel Platz gelassen ist, daß die Detektoren der inneren Spurkammersuperlagen dazwischen passen. Deswegen mußte darauf geachtet werden, daß die Kabel nicht über die Außenmaße des Kammerpakets hervorragen. Da während Zugangstagen die Halbsuperlagen des Spurkammersystems aus der Meßposition herausbewegt werden können, wurde darauf geachtet, daß die Kabel beim Bewegen der Halbsuperlagen nicht abgerissen werden können.

### 5.6.2 Gasdichtigkeitstest in der Testhalle

Wie schon im Kap. 5.1 erläutert, müssen die GEM-MSGCs für einen effizienten Betrieb mit dem vorgesehenen Zählgas versorgt werden, wobei Verunreinigungen und der Zutritt von Luftsauerstoff und Wasserdampf so weit wie möglich ausgeschlossen werden müssen. Nachdem die Halbstation 24 Stunden mit Ar:CO<sub>2</sub> gespült wurde, wurden die zugänglichen Detektoren sowie



die gesamte Gasinstallation der Halbsuperlage mit ihren vielen Verschraubungen und Steckverbindungen deshalb mit einem auf Argon empfindlichen Lecksuchgerät nach undichten Stellen abgesucht. Undichte Verschraubungen wurden nachgezogen oder erneuert. Während des Zusammenbaus und des Transports der Superlagen wurden keine Detektoren undicht.

### 5.6.3 Hochspannungstest in der Testhalle mit Zählgas

Nachdem die Verkabelung und der Dichtigkeitstest der Halbsuperlage abgeschlossen war, wurden die Kammern erneut auf ihre Hochspannungsstabilität untersucht. Die Spannungen an den Detektoren wurden wieder in mehreren Schritten erhöht, um die Detektoren weiter zu konditionieren. Während dieses Hochspannungstests wurden die Detektoren ständig mit Ar:CO<sub>2</sub> durchflutet, und es wurden die für HERA-B entwickelten Strommeßboxen verwendet (siehe Kap. 4.5).

Die in der Testhalle an die Detektoren angelegten Spannungen sind in Tab. 5.3 gezeigt. Die Spannungen, auf die die Detektoren beim Test in der Testhalle gesetzt wurden, entsprachen etwa den Spannungsschritten, die sich bei einem PSI-Test 1998 als betriebssicher herausgestellt hatten. Die Ströme der Detektoren wurden genau beobachtet. Die Drift- und GEM-Ströme mußten während des Erhörens der Spannung ansteigen und danach in wenigen Sekunden auf wenige nA zurückgehen. Die Kathodenströme hängen von der angelegten Spannung und dem Flächenwiderstand der Diamantschicht des MSGC-Substrats ab. Substrate, die bei der Produktion erhitzt wurden, zeigten einen um einen Faktor 10 kleineren Kathodenstrom als die nicht erhitzten Substrate. Detektoren mit einem Kathoden-Anoden-Kurzschluß zeigen einen Kathodenstrom, der um den Faktor  $U_K/10 \text{ M}\Omega$  höher ist. Es können Kammern mit bis zu drei Kathoden-Anoden-Kurzschlüssen betrieben werden, danach ist der Strom zu hoch und kann von den Strommeßboxen nicht mehr gemessen werden. Bildete sich ein Kathoden-Anoden-Kurzschluß an einem zugänglichen Detektor aus, wurde der vor der Kathodengruppe angebrachte  $10 \text{ M}\Omega$ -Widerstand ausgelötet. Dadurch konnte zwar der Verlust der Anodenstreifen in dieser Kathodengruppe nicht rückgängig gemacht werden, aber die Kammer konnte im laufenden Betrieb einen Kathoden-Anoden-Kurzschluß mehr ausbilden, bevor sie nicht mehr betrieben werden konnte. Die Zeiten,

$U_{\text{Drift}}$ [V]	$\Delta U_{\text{GEM}}$ [V]	$U_{\text{Kathode}}$ [V]
1200	140	0
1200	140	50
2500	240	100
2500	240	200
3200	360	300
3200	380	420
3200	380	490
3200	400	490

**Tabelle 5.3:** Angelegte Spannungen an den GEM-MSGCs beim Kammertest in der Testhalle. Die Spannungsschritte, mit denen die Detektoren konditioniert wurden, stellten sich bei einem PSI-Test 1998 als betriebssicher heraus.

für die die einzelnen Spannungen an die Superlagen angelegt waren, unterschieden sich sehr voneinander, da die Spannungen immer nur dann erhöht wurden, wenn die Ströme der Kammern stabil waren. Die einzelnen Spannungen waren aber mindestens für drei Stunden an den Kammern angelegt, bevor sie weiter erhöht wurden. Weil die Spannungen an den einzelnen Superlagen immer nur erhöht wurden, wenn alle Detektoren ruhige Kammerströme zeigten, variierte die Testzeit der einzelnen Superlagen von 2-3 Tagen bis zu 5-6 Tagen. Detektoren, die bei einer bestimmten Kathodenspannung unruhige Kathodenströme zeigten, zeigten nach einer längeren Konditionierung bei niedrigeren Spannungen anschließend auch bei höheren Spannungen ruhige

Ströme. Nur zwei Detektoren zeigten auch nach einer tagelangen Konditionierung immer noch unruhige Ströme.

Von den 136 getesteten Detektoren hatten 10 Detektoren von Beginn an einen Kathoden-Anoden-Kurzschluß, bei weiteren neun Detektoren bildete sich während des Tests ein Kathoden-Anoden-Kurzschluß aus. Bei fünf dieser 19 Detektoren mit Kathoden-Anoden-Kurzschluß konnte, da die Detektoren zugänglich waren, der Schutzwiderstand vor der Kathodengruppe ausgelötet werden, dadurch wurde der Strom, der über die Kathode des MSGC-Substrats floß, wieder geringer. Zwei Detektoren fielen von Beginn an wegen Problemen mit der GEM-Folie aus: Bei einem Detektor war ein Hochspannungsanschluß der GEM-Folie mechanisch defekt, die GEM-Folie konnte deswegen nicht angeschlossen werden, bei dem anderen Detektor bildete sich, nachdem die Detektoren vier Tage langsam an die Spannungen gewöhnt worden waren, ein GEM-Kurzschluß aus. Dieser GEM-Kurzschluß trat auf, nachdem an dem Detektor schon für zwei Stunden die maximale GEM-Spannung angelegt war. Der GEM-Kurzschluß konnte nicht weggebrannt werden. Bei allen bis auf zwei Detektoren konnten in der Testhalle die erwünschten Kathodenspannungen angelegt werden, und die Detektoren zeigten ruhige Kammerströme.

#### 5.6.4 HELIX-Chiptest in der Testhalle

Während des Hochspannungstests wurde die Auslese der ganzen Halbsuperlagen getestet. Die Ausleseelektronik wurde an die Niederspannungszuführung angeschlossen und mit den optoelektrischen Wandlern, die später bei HERA-*B* verwendet wurden, getestet. Bis auf die Lichtleiter, die die Signale vom Experiment zum Elektroniktrailer weiterleiten, wurde so die gesamte Ausleseketten, die später für die jeweilige Superlage bei HERA-*B* verwendet wurde, für diesen Test benutzt. So wurde überprüft, daß das Zusammenspiel aller Komponenten funktioniert.

Der HELIX-Chip hat eine Testpulsfunktion, bei der den Vorverstärkern ein bestimmtes Ladungsmuster injiziert wird. Die einzelnen Kanäle erhalten dabei folgende Ladung:

Kanal	:	$4n$	:	$+2$ MIPs <sup>1</sup>
Kanal	:	$4n + 1$	:	$+1$ MIP
Kanal	:	$4n + 2$	:	$-1$ MIP
Kanal	:	$4n + 3$	:	$-2$ MIPs

Das Auslesemuster sieht auf dem Oszilloskop treppenförmig aus. Es ist im rechten Bild in Abb. 5.10 für ein PCB dargestellt ist. Die Testpulsfunktion stellte sich während des Chiptests als sehr nützlich heraus, da durch sie die Chipadressen, die Ausleseelektronik und die Verbindung zwischen Auslesestreifen und Anodenstreifen getestet werden konnte.

Die Ausgabe der zwei auf dem PCB montierten Chips ist in Abb. 5.10 für ein PCB dargestellt, links die Ausgabe ohne Testpuls und rechts die Ausgabe mit Testpuls. Das HELIX-Chip-PCB versendet die Ausgabe der HELIX-Chips im Daisychain-Mode, dabei werden zuerst die Daten des ersten Chips übermittelt, dann die Spaltennummer dieses Chips, danach die Ausgabe des zweiten Chips und dessen Spaltennummer. Die Spaltennummer gibt an, aus welcher Spalte der Pipeline die gerade versendeten Daten stammen. Wenn kein Defekt vorliegt, müssen die Spaltennummern für die beiden Chips eines PCBs gleich sein.

---

<sup>1</sup>Ein MIP entspricht der Ladung von 25000 Elektronen. Dies ist das Signal, das ein minimal ionisierendes Teilchen im HERA-*B* Silizium-Streifen-Detektor hinterlassen würde.

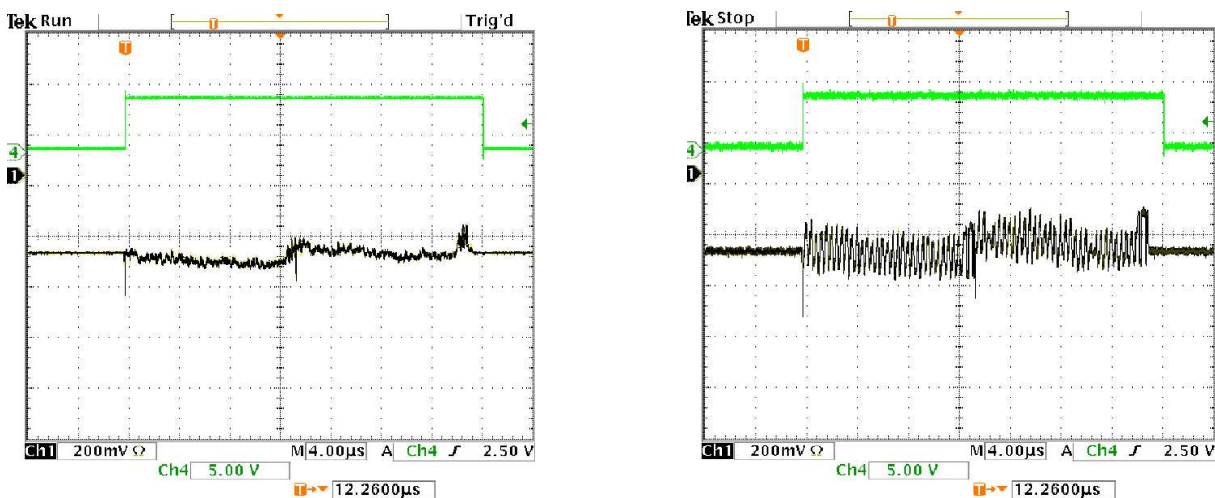


Abbildung 5.10: Auslesemuster der Chips eines PCBs. Links ohne Testpulse, rechts mit Testpulsen.

### Gesamtverstärkung der ganzen Auslekette

Die Verstärkung der Auslekette soll für alle HELIX-Chips etwa gleich sein. Beim Test der Auslese wurde außer den Glasfaserkabeln die gesamte Elektronik, die später bei HERA-B verwendet wurde, benutzt, deswegen wurde zur Kontrolle der Verstärkung der Auslekette die Höhe des Testpulssignals überprüft. Hatte ein Chip ein geringeres Testpulssignal, wurde der optoelektrische Wandler ausgetauscht. Die Höhe der Testpulse aller Chips liegt zwischen 180 – 260 mV.

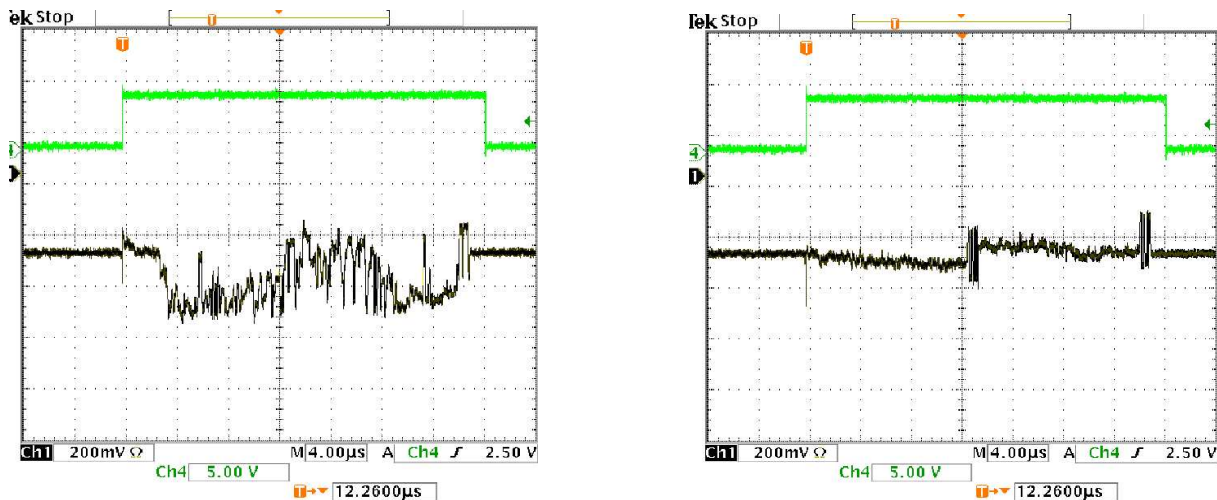
### Test: HELIX-Chipadresse

Da innerhalb einer Halbsuperlage alle HELIX-Chips eine eigene Adresse haben, ist es möglich, die Einstellungen jedes einzelnen Chips separat zu ändern. Eine Änderung der Chipeinstellungen kann notwendig werden, wenn der Chip etwa durch die hohe Strahlenbelastung bei HERA-B beschädigt wird, daher sollen einzelne Chips individuell einstellbar sein. Die Chipadresse wurde beim Aufbau der Halbsuperlage durch Lötbrücken auf dem PCB festgelegt. Bei dem Test der Chipadressen wird die Latenzzeit der Chips verschoben, bis die Auslese des Chips kein Testpulsmuster mehr enthält. Kann der richtige Chip über seine Adresse angesprochen werden, kann die Auslese der Testpulse dieses Chips so gezielt „aus- und eingeschaltet“ werden. Konnte der Testpuls durch die angegebene Chipadresse nicht zum Verschwinden gebracht werden, wurde die für den Chip vergebene Adresse durch Testen aller möglichen Adressen ermittelt. Bei 10 von den insgesamt eingesetzten 816 HELIX-Chips war die Chipadresse in einer Halbsuperlage versehentlich doppelt vergeben. Die HELIX-Chipeinstellungen können dadurch nicht für nur einen Chip geändert werden, sondern nur für beide Chips mit der gleichen Adresse gemeinsam.

### Test: Verbindung der Kammer mit der Ausleseelektronik

Über das Chipregister  $V_{fp}$  kann der Chip sehr empfindlich gegenüber dem in den Vorverstärker fließenden Strom eingestellt werden. Wird der Registerwert für  $V_{fp}$  verkleinert, so geht der Vorverstärker bei deutlich kleineren Blindströmen in Sättigung und das Testpulsmuster verschwindet.

Mit einer Chipeinstellung  $V_{fp} = 125$  wurden bei allen Kammern die Verbindungen von HELIX-Chip und MSGC-Substrat getestet. Dazu wurde der Testpuls der HELIX-Chips betrach-



**Abbildung 5.11:** Auslesemuster der HELIX-Chips eines PCBs mit verringerter Chipeinstellung von  $V_{fp} = 125$ . Links wurde eine Spannung von 40 V an die Kathoden angelegt, rechts eine Spannung von 60 V.

tet. Ohne angelegte Spannung sieht das Oszilloskopbild aus wie das normale Testpulsmuster (links in Abb. 5.10). Wird die Spannung langsam erhöht, verschwindet das Testpulsmuster, wenn Strom in den Vorverstärker fließt. In Abb. 5.11 sind zwei Oszilloskopbilder der schon in Abb. 5.10 gezeigten Chips dargestellt. Im linken Bild ist eine Spannung von 40 V an den Kathoden angelegt, das Testpulsmuster ist nicht mehr so klar zu sehen. Im rechten Bild ist eine Spannung von 60 V angelegt, das Testpulsmuster ist vollständig verschwunden. Bei diesem dargestellten PCB ist die Verbindung des MSGC-Substrats mit dem HELIX-Chip sehr gut. Durch diese Methode konnten Auslesestreifen, die unterbrochen wurden oder keine Verbindung zum Substrat hatten, eindeutig nachgewiesen werden. Bis auf einzelne Anoden, die auf dem Auslesefanin unterbrochen sind oder bei denen das Substrat einen Riß hatte, wurde bei den meisten Kammern eine gute Verbindung zwischen Kammer und Ausleseelektronik festgestellt. Bei zwei einzelnen HELIX-Chips und bei einem ganzen PCB wurde keine Verbindung zwischen der Auslese und den Anodenstreifen festgestellt. Die Testpulse verschwanden hier auch nicht bei einer Kathodenspannung von 250 V.

### Kontrolle des Grundlinienspringens

Um bei HERA-B bei der Datenauslese Signale von Teilchendurchgängen gut und schnell zu finden, muß die Auslese sehr ruhig sein. Wie in Kap. 6 erklärt, führt die Einstreuung von niederfrequenten Störsignalen zu einer Verschiebung und Verzerrung der Grundlinie. Bei Detektoren mit sehr guter Erdung ist das Grundlinienspringen geringer. Ein zu großes Grundlinienspringen führt dazu, daß eine Grundlinienkorrektur notwendig ist, es kann sogar dazu führen, daß die Auslese der Chips bei manchen Ereignissen den dynamischen Bereich der Auslekette verläßt. Dadurch kann bei solchen Ereignissen kein Teilchendurchgang detektiert werden. Zur Kontrolle der Erdung wird daher das Grundlinienspringen betrachtet. Die Grundlinie der Chipausgabe ohne Testpuls gemittelt über 100 Auslesezyklen bewegte sich im Mittel zwischen 30 – 60 mV. Bei einem einzelnen Chip, bei 8 Chippaaren auf PCBs und bei neun ganzen Kammern (54 Chips) war das Grundlinienspringen der Auslese größer als 100 mV. Aus Zeitgründen wurde auch bei schlechterem Grundlinienverhalten die Halbsuperlage nicht mehr demontiert und die Erdung der HELIX-Chips mit zu großem Grundlinienspringen nicht verbessert.

## Kontrolle der Grundlinie der Auslese

Die Grundlinie der Ausgabe der HELIX-Chips soll sich in der Mitte des möglichen Ausgabebereichs befinden, um bei möglichem Grundlinienspringen Signale immer noch sicher detektieren zu können. Die Grundlinie kann mit dem Chipeinstellungswert  $V_d$  verschoben werden. Daher wurden alle Chipsignale auch in Hinblick auf die Höhe der Grundlinie betrachtet, und bei Bedarf in der Registerwert-Konfigurationsdatei der Wert für  $V_d$  angepaßt.

### 5.6.5 Zusammenfassung des Superlagentests des inneren Spurkammersystems in der Testhalle

In der Testhalle wurden alle Halbsuperlagen, die im Jahr 2000 bei HERA-*B* verwendet wurden, für den endgültigen Einbau vorbereitet und alle für den Betrieb bei HERA-*B* relevanten Eigenschaften der Detektoren getestet. Alle Detektoren jeder Halbsuperlage wurden auf ihre Hochspannungsstabilität bei HERA-*B*-Nominalspannungen getestet; der Zeitraum, während dem die Kammern auf ihre Spannungsstabilität getestet wurden, variierte je nach Verlauf des Tests zwischen 2 und 6 Tagen.

In der Testhalle wurden alle *MC*- und *PC*-Superlagen getestet. Dies entspricht 136 GEM-MSGC-Detektoren, die in Halbsuperlagen von 4 bis 16 Detektoren zusammengefaßt sind. In diesen 136 Detektoren wurden 10 Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse von Beginn an detektiert, neun weitere bildeten sich während des Hochspannungstests aus. Bei fünf dieser Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse konnte der Widerstand vor der Kathodengruppe ausgelötet werden. Hier werden nur Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse aufgeführt, die am Strom, der bei einer gewissen Spannung fließt, detektiert werden können. Wurden Widerstände wegen Kathoden-Anoden-Kurzschlüssen beim Zusammenbau der Halbsuperlage entfernt, konnte dieser Kathoden-Anoden-Kurzschluß in der Testhalle nicht detektiert werden. Insgesamt hatten 14 Detektoren, die bei HERA-*B* eingebaut wurden, von Beginn an einen Kathoden-Anoden-Kurzschluß. Zwei der GEM-MSGCs zeigten sehr instabile Kathodenströme aufgrund von Entladungen zwischen Kathode und Anode.

Bei einer Kammer war der Spannungsanschluß an einer Seite der GEM-Folie defekt, die Kammer konnte deswegen nicht betrieben werden. Eine der 136 GEM-MSGCs produzierte während des Tests einen GEM-Kurzschluß, der nicht weggebrannt werden konnte. Daher konnten zwei Detektoren wegen Problemen mit der GEM-Folie nicht betrieben werden. Alle in der Testhalle gefundenen Hochspannungsdefekte der GEM-MSGCs sind in Tab. 5.4 aufgeführt. Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse, die am Strom nicht detektierbar sind, da der Widerstand vor der Kathodengruppe entfernt wurde, sind nicht in der Liste enthalten, ebensowenig einzelne unterbrochene Anodenstreifen.

Die Ausleseelektronik und die Helferelektronik wurden komplett getestet. Von den 816 getesteten Chips zeigten ein Chip und ein PCB keine Auslesesignale. Bei jeweils einem Chip und einem PCB wurde eine schlechte Verbindung zwischen den Anodenstreifen und den Auslestreifen der HELIX-Auslese festgestellt. Das Grundlinienspringen der Superlagen war in der Testhalle bis auf vereinzelte Ausnahmen gut. In der Superlage MS03 zeigten nach dem Einbau im Experiment überproportional viele Detektoren ein größeres Grundlinienspringen, deswegen wurde diese Superlage später während eines 3-tägigen Zugangs bei HERA-*B* demontiert und die Erdung der Superlage in der Testhalle erneuert. In Tab. 5.5 sind die Defekte, die in der Testhalle an der Ausleseelektronik festgestellt wurden, aufgelistet.

Nach den Tests in der Testhalle konnte davon ausgegangen werden, daß die GEM-MSGC-Detektoren sicher betrieben werden können und Daten zur Spurfinding liefern würden.

Superlage	Anzahl MSGCs	Kathoden-Anoden-Kurzschluß	unruhige Kathodenströme	GEM-Kurzschluß
MS01	16	2(vA), 1(-200 V)		(1)
MS03	8	1(-420 V)		
MS05	8	3 (vA)		
MS06	8			
MS10	32	1(-200 V), 1(-420 V)	1	
MS11	16			
MS12	16	1(-200 V), 1(-420 V)	1	1
MS13	32	3(vA), 1(-490 V)		
	136	8(vA), 6(V)	2	1+(1)

**Tabelle 5.4:** Hochspannungsdefekte, die in der Testhalle detektiert wurden. Es sind jeweils die Anzahl der MSGCs pro Superlage, die Probleme zeigten, dargestellt. Bei den Kathoden-Anoden-Kurzschlüssen ist die Spannung, bei der der Kurzschluß entstanden ist, gezeigt; vA steht für „von Anfang an“. Hier sind nur Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse gezeigt, die am Strom detektierbar waren.

Superlage	Anzahl MSGCs	kein Signal	Schlechte Ausleseverbindung	Grundlinienspringen > 100 mV
MS01	16			1 PCB
MS03	8			1 PCB, 3 MSGC
MS05	8			
MS06	8	1 PCB		
MS10	32	1 HELIX	1 HELIX	1 HELIX, 4 PCB, 6 MSGC
MS11	16			1 PCB
MS12	16		1 PCB	1 PCB
MS13	32			
	136	1 PCB, 1 HELIX	1 PCB, 1 HELIX	1 HELIX, 8 PCB, 9 MSGC

**Tabelle 5.5:** Auslesedefekte, die in der Testhalle detektiert wurden. Es ist jeweils die Anzahl der MSGCs, Chips oder PCBs angegeben, die in einer Superlage einen Defekt aufwiesen.

# Kapitel 6

## Online Monitoring bei HERA-*B*

Die laufende Überwachung des Detektorzustands und der Qualität der auf Band geschriebenen Daten ist für einen effektiven und effizienten Detektorbetrieb von großer Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür ein Online Monitoring für das innere Spurkammersystem für den laufenden Betrieb entwickelt und in Betrieb genommen.

Die Rohdaten des inneren Spurkammersystems werden direkt bei der Datennahme so komprimiert, daß Information aus denjenigen Kanälen, die kein Signal eines Teilchendurchgangs zeigen, verworfen werden. Daher ist es für das innere Spurkammersystem von besonderer Bedeutung, auch die Funktion dieser Software genau zu überwachen, da eine Fehlfunktion an dieser Stelle die gesamten Daten unbrauchbar machen kann.

In diesem Kapitel wird zunächst der allgemeine Rahmen vorgestellt, in dem das Online Monitoring stattfindet. Die Methode zur Datenreduktion, die für die Daten des inneren Spurkammersystems angewendet wird, wird kurz erläutert und das für den Online-Betrieb eingesetzte Monitoring für das innere Spurkammersystem beschrieben.

### 6.1 Rohdaten

Die vom Auslesesystem digitalisierten Analogsignale eines HELIX-Chips-PCB vor jeglicher Korrektur und vor der Komprimierung sind in Abb. 6.1 dargestellt. Der ADC digitalisiert insgesamt 288 Werte, in denen die  $2 \times (128 + 8)$  Werte<sup>1</sup> des Auslesemusters liegen. Zunächst enthalten die Daten also einige Bytes lang die Nulllinie der Datenübertragung. Danach kommen die Analogsignale des ersten Chips und dessen Spaltennummer, danach kommen die Daten des zweiten Chips und dessen Spaltennummer. Sie gibt die Spalte an, in der das Ereignis in der Pipeline zwischengespeichert ist. Die Spaltennummer wird als eine acht Bit lange Binärzahl versendet und ist eine Zahl zwischen 0–140<sup>2</sup>. Nach der Komprimierung der Daten stehen die Grundlinie sowie die Spaltennummer der Chips nicht mehr zur Verfügung.

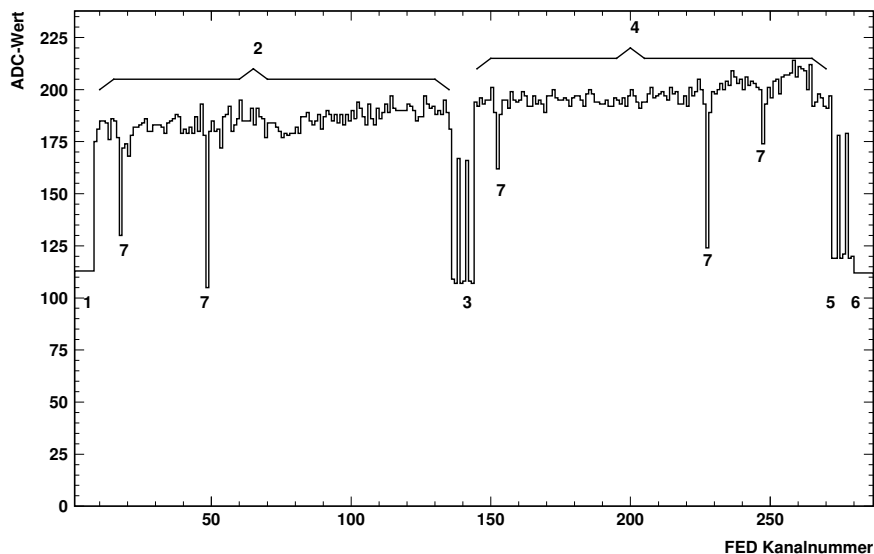
#### 6.1.1 Korrekturen an die Rohdaten

Bevor auf einem Auslesestreifen ein Teilchen detektiert werden kann, müssen die ausgelesenen Daten korrigiert werden. In Abb. 6.2 sind die Rohdaten und die angewandten Korrekturen für die Daten eines HELIX-Chips dargestellt. Die Rohdaten müssen auf zwei Effekte korrigiert wer-

---

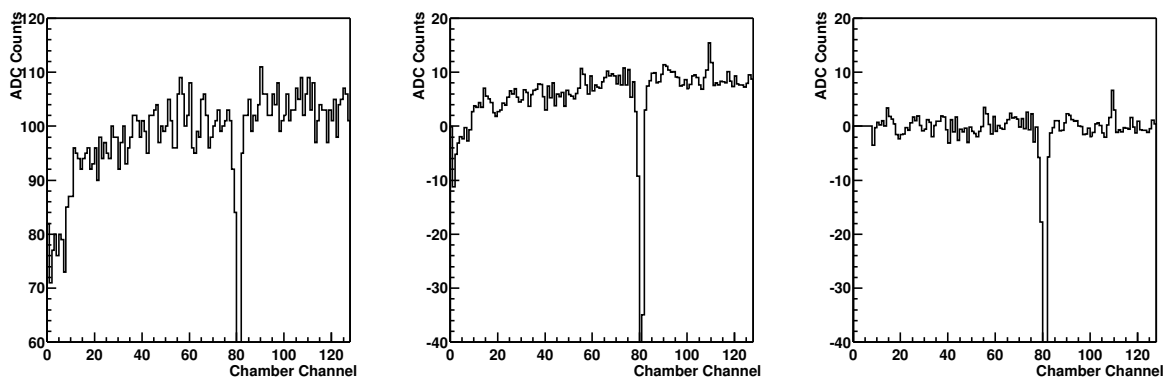
<sup>1</sup>Jeder Chip hat 128 Auslesekanäle und eine 8 Byte Spaltenzahl.

<sup>2</sup>Chips der Version HELIX 2.2 haben eine Pipelinelänge von 141. Daher variiert ihre Spaltennummer von 0–140. Chips der Version HELIX 3.0 haben eine Pipelinelänge von 136. Der Chip HELIX 3.1a hat eine Pipelinelänge von 142 Zellen.



**Abbildung 6.1:** Rohdaten eines HELIX-Chip-PCBs. Zu sehen sind die Grundlinie (1, 6), die Daten des ersten Chips (2), die Spaltennummer des ersten Chips (3), die Daten (4) und die Spaltennummer (5) des zweiten Chips. Teilchennachweise in den Daten sind mit 7 markiert. ([Buc00])

den: Zum einen muß eine vom jeweiligen Chip abhängige Kanal-zu-Kanal-Variation abgezogen werden, zum anderen muß eine mögliche Verzerrung der Grundlinien korrigiert werden.



**Abbildung 6.2:** Rohdaten und korrigierte Daten eines HELIX-Chips der Kammer MS01--1. Links sind die Rohdaten des Chips ohne jegliche Korrektur gezeigt. In der Mitte sind die Daten des Chips nach dem Abzug der Kanal-zu-Kanal-Variation gezeigt. Rechts sind die Rohdaten nach der Grundlinienkorrektur gezeigt. Der Teilchennachweis in Kanal 80 ist auch nach der Korrektur klar zu sehen [Gra01].

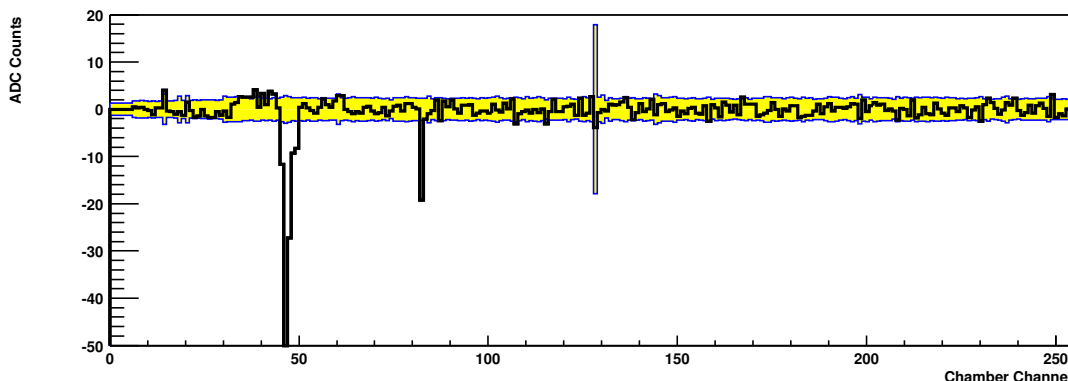
Die Rohdaten des Chips zeigen eine für jeden Chip charakteristische Kanal-zu-Kanal-Variation. Die Variation der Auslesekanäle kommt von leicht unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren der einzelnen Verstärker. Die Kanal-zu-Kanal-Variation wird zu Beginn der Datennahme für jeden Chip bestimmt und für die weiteren Ereignisse von den Rohdaten abgezogen.

Einstreuung von niederfrequenten Störsignalen verbiegt und verschiebt die Grundlinie. Um diese Verzerrung zu korrigieren, wird eine stückweise lineare Funktion mit fünf Stützpunkten an die Daten angepaßt, wobei Kanäle, die große Abweichungen zeigen, nicht berücksichtigt werden, da sie potentiell Trefferinformationen enthalten. Die so erhaltene Funktion wird von den schon auf die Kanal-zu-Kanal-Variation korrigierten Daten abgezogen. Eine gute Erdung des Detektors führt zu geringerem Grundlinienspringen, und kann dazu führen, daß die zweite Korrektur nicht durchgeführt werden muß.



### 6.1.2 Bestimmung des Rauschens

Zu Beginn der Datennahme wird die Schwankung der korrigierten Signale jedes Kanals berechnet. Sie dient als Abschätzung für das Rauschen dieses Kanals und wird auch während der Datennahme laufend aktualisiert. Streifen, die in einem Ereignis eine Abweichung von mehr als 10 ADC-Counts zeigen, werden hierbei übersprungen, um durch mögliche Treffer keine Verzerrung der Rauschwerte zu erhalten. Abb. 6.3 zeigt die auf Kanal-zu-Kanal-Variationen und Grundlinienspringen korrigierten Daten eines HELIX-PCBs zusammen mit dem  $\sqrt{2}$ -fachen Rauschwert für jeden Kanal.



**Abbildung 6.3:** Auf Kanal-zu-Kanal-Variationen und Grundlinienspringen korrigierte Daten eines PCBs (Linie), mit dem  $\sqrt{2}$ -fachen Streifenrauschen (Band) der Kanäle. Streifen, die negativer als das Rauschen sind, werden als Trefferkeim bezeichnet, Gruppen von Trefferkeimen, deren Signal zu Rauschen über einer bestimmten Schwelle liegt, werden als Treffer akzeptiert. Das Maximum beim Streifen 128 im Rauschband deutet den Start des zweiten Chips an. Um die Streifen 48 und 82 können zwei Treffer gesehen werden ([Gra01]).

### 6.1.3 Treffersuchalgorithmus

Die Ladung, die nach dem Durchgang eines Teilchens auf der MSGC-Struktur deponiert wird, teilt sich im Mittel auf zwei bis drei Auslestestreifen auf. Um einen Treffer zu rekonstruieren, werden benachbarte Streifen, die ein Signal zeigen, das größer als ein einstellbares Vielfaches des jeweiligen Kanalrauschens ist, zu einem Cluster kombiniert. Übersteigt das totale Verhältnis von Signal zu Rauschen in diesem Cluster eine weitere Schwelle, wird der Ladungsschwerpunkt dieses Clusters berechnet und als Trefferort gespeichert. Typische Werte für die beiden Schwellen während der Datennahme sind  $\sqrt{2} \cdot \sigma_i$  für Trefferkeime und  $\sqrt{6 \cdot \sum \sigma_i^2}$  für Cluster.

### 6.1.4 Komprimierung der Rohdaten

Die Rohdatenmenge des inneren Spurkammersystems ist pro Ereignis etwa so groß wie die Datenmenge des übrigen Detektors ohne Vertexdetektor, und zwar etwa 140 kB pro Ereignis. Bei der maximalen erwarteten Wechselwirkungsrate von 40 MHz weisen pro Ereignis etwa 5% der Kanäle in einer GEM-MSGC einen Treffer nach. Daher ist es sinnvoll, die Datenmenge des inneren Spurkammersystems auf das nötigste zu komprimieren (siehe [Gra01]). Die Idee der Komprimierung ist dabei, nur die Streifen der gefundenen Treffer und ein paar Eigenschaften dieser Treffer zu speichern. Das verwendete Trefferformat beinhaltet deswegen den Ladungsschwerpunkt des Clusters, die Clusterladung, das Verhältnis von Signal zu Rauschen und die Zahl der Streifen, die zu einem Cluster gehören. Durch dieses Komprimieren der Daten werden pro Treffer 10 Byte

benötigt. Der Komprimierungsfaktor hängt von der Wechselwirkungsrate und vom verwendeten Trigger ab. Die Daten des inneren Spurkammersystems sind nach der Komprimierung zwischen 2–14 kB groß. Durch das Komprimieren der Daten gehen einige wichtige Informationen, wie z.B. Informationen über das Rauschen der einzelnen Streifen, verloren. Dem L2-Monitorprogramm werden die unbehandelten Rohdaten vor der Komprimierung zugeführt, daher können einige Eigenschaften mit dem L2-Monitorprogramm überwacht werden.

## 6.2 Das Monitorprogramm

Die Überwachung der Daten findet auf mehreren Ebenen statt: parallel zur SLT-Farm („L2-Monitoring“) und innerhalb der allgemeinen Online-Rekonstruktion der Daten („L4-Monitoring“).

Auf L2 stehen dem Monitorprogramm Rohdaten zur Verfügung. Dafür werden dem Datenstrom mit 50 Hz vom Detektor aufgenommene Daten abgezweigt. Diese Ereignisse werden danach verworfen. Mit den Rohdaten können auf der untersten Stufe die Daten jeder einzelnen GEM-MSGC analysiert werden. Beim L2-Monitorprogramm konnte als Gerüst das Monitorprogramm des Vertexdetektors, der den gleichen Auslesechip benutzt, verwendet werden. Dieses Programmpaket wurde an die Bedürfnisse des inneren Spurkammersystems angepaßt. Eine Beschreibung der ersten Version des L2-Monitorprogramms ist in [Buc00] gegeben.

Auf L4 läuft das Monitorprogramm innerhalb des HERA-*B*-Rekonstruktionsprogramms ARTE [hbs]. Hier stehen Informationen über rekonstruierte Teilchenspuren zur Verfügung. Mit dieser Information kann das Zusammenspiel der verschiedenen Detektorkomponenten und die Datenrekonstruktion selbst überprüft werden.

Jede einzelne Detektorkomponente hat speziell auf ihre Anforderungen abgestimmte Monitorprogramme. Diese Monitorprogramme der einzelnen Detektorkomponenten sind in einem übergeordneten Programmpaket eingebettet, das beim Start der Datennahme gestartet wird. Während der Datennahme füllen die Monitorprogramme vordefinierte Histogramme. Anhand dieser Histogramme kann durch ein weiteres Monitorprogramm die Funktionalität der Detektoren und die Qualität der Daten der einzelnen Komponenten überprüft werden. Bei einem Fehlverhalten einer Detektorkomponente kann ein Alarm an die Schichtbesatzung ausgegeben werden. Die Schichtbesatzung hat die Möglichkeit, die Histogramme darzustellen und mit Referenzhistogrammen zu vergleichen, um den dargestellten Status der Komponente mit dem nominellen Status zu vergleichen. Periodisch werden alle Histogramme gespeichert, ihr Inhalt gelöscht und von Beginn an aufgefüllt, um Fehlverhalten der Detektorkomponenten, die während der Datennahme auftreten, zu detektieren. Am Ende der Datennahme werden die Histogramme gespeichert und können so später zur schnellen Kontrolle des Detektors herangezogen werden.

Die Monitorprogramme sollten online wie offline betrieben werden können, wobei offline für das L2-Monitorprogramm im Normalfall nicht mehr alle Informationen zur Verfügung stehen, da die Rohdaten vor dem Abspeichern komprimiert werden (siehe 6.1). Das L4-Monitorprogramm wird nicht nur dazu verwendet, die Daten online zu überwachen, sondern es wird auch beim späteren Reprozessieren zur Kontrolle der Daten verwendet.

Um die Anzahl der Histogramme so gering wie möglich zu halten und um schnell einen Überblick über den ganzen Detektor zu erhalten, werden vom inneren Spurkammersystem häufig zweidimensionale Histogramme verwendet, in die auf der  $x$ -Achse alle Kammern oder Halbsuperlagen des inneren Spurkammersystems eingetragen sind, auf der  $y$ -Achse die einzelnen Streifen, oder Gruppen von Detektoren, und auf der  $z$ -Achse der zu betrachtende Wert dargestellt ist. Diese Histogramme sind recht groß, haben aber den Vorteil, daß der ganze Detektor auf einen Blick überprüft werden kann und dennoch bei Bedarf jede einzelne GEM-MSGC detailliert betrachtet werden kann.

### 6.2.1 L2-Monitorprogramm

Das L2-Monitorprogramm greift auf Rohdaten zu und überprüft Eigenschaften des inneren Spurkammersystems, die nach der Komprimierung der Daten nicht mehr zur Verfügung stehen. Daher ist die wichtigste Aufgabe des L2-Monitorprogramms die Überwachung des Rauschverhaltens der Detektoren, der Synchronisierung der Chips untereinander und die Kontrolle, daß alle Detektoren synchron mit der HERA-*B*-Clock ausgelesen werden. Im weiteren werden Histogramme, die bei einer Datennahme am 11. Februar 2003 aufgenommen wurden, gezeigt. Es handelt sich dabei um den Run 21166, der bei einer Targetrate von 5 MHz aufgenommen wurde. Der Run enthält 387000 ausgelesene Ereignisse, dem L2-Monitoring wurden 51000 Ereignisse abgezweigt.

Alle gezeigten Histogramme könnten auch für einen Run aus der Datennahme 1999/2000 gezeigt werden. Da der Zugriff auf die neueren Daten einfacher ist, werden hier Histogramme der zweiten Datennahmeperiode von HERA-*B* gezeigt. Der Status der Datennahme 1999/2000 wird im Text beschrieben.

#### Asynchrone/defekte HELIX-Chips

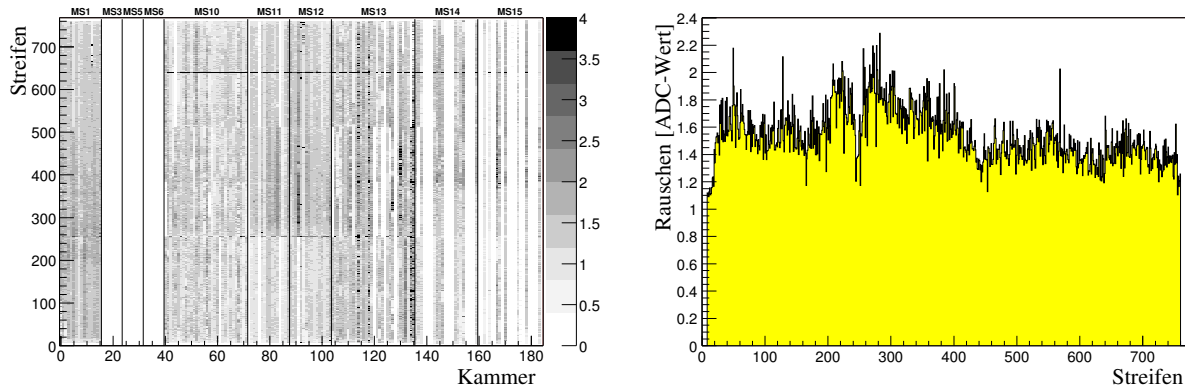
In einem Ereignis sollten die Spaltennummern aller Chips gleich sein da bei einer positiven Triggerentscheidung alle Chips synchron das Triggersignal erhalten. Bei Chips, die falsche Spaltennummern haben, wird folglich ein falsches Ereignis ausgelesen. Aus diesem Grund wird im L2-Monitorprogramm die Spaltennummer aller Chips überprüft. Chips, die ständig eine Spaltennummer Null haben, liefern überhaupt keine Daten, entweder weil der Chip oder ein anderer Teil der Auslekette defekt ist, oder weil keine Niederspannung angelegt ist. Fallen alle Chips einer Halbsuperlage aus, ist dies immer mit einem Ausfall der Niederspannung korreliert. Im L2-Monitorprogramm wird die Zahl der asynchronen und defekten Chips überwacht, und bei einer zu großen Zahl an asynchronen oder defekten Chips wird ein Alarm an die Schichtbesatzung ausgegeben.

Während der Datennahmeperiode 1999/2000 zeigten drei ganze GEM-MSGC-Detektoren, drei PCBs und vier einzelne Chips keine Auslese (siehe Tab. 7.1) und es gab 13 ständig asynchrone Chips. Nach dem Umbau wurden in der Datennahmeperiode 2002/2003 zwei defekte Chips und neun ständig asynchrone Chips gefunden.

#### Das Streifenrauschen des inneren Spurkammersystem

Rauscht die Auslese eines Detektors zu stark, werden Rauschereignisse sehr häufig als Treffer eines Teilchendurchganges erkannt. Dadurch würde die gespeicherte Datenmenge anwachsen und das Rekonstruktionsprogramm zu viele Treffer angeboten bekommen, die nicht von Teilchendurchgängen stammen. Deswegen wird das Rauschen jedes einzelnen Auslesestreifens während der Datennahme kontrolliert. In Abb. 6.4 ist links ein zweidimensionales Rauschhistogramm dargestellt, in dem auf der  $x$ -Achse alle Kammern, auf der  $y$ -Achse jeder Auslesestreifen und auf der  $z$ -Achse der Wert des Rauschens der Streifen in ADC-Werten dargestellt sind. Die Magnet-Kammern (MS03, MS05 und MS06) wurden im Shutdown 2001 ausgebaut, daher stammt die Lücke bei Kammernummer 16–32. Im TC-Bereich (MS14 und MS15) wird nur jede zweite Kammer analog ausgelesen, dies erklärt die Lücken ab Kammer 136. Rechts in Abb. 6.4 ist das Rauschen der Auslesestreifen der Kammer MS11++3, das aus dem linken Histogramm erhalten wird, dargestellt.

In dem zweidimensionalen Histogramm ist das Rauschen von allen Detektoren des inneren Spurkammersystem dargestellt; da alle Detektoren dargestellt sind, scheint diese Darstellung auf den ersten Blick etwas unübersichtlich, ein Experte kann an der Farbgebung der einzelnen Streifen aber sehr schnell erkennen, ob einzelne Auslesechips, Auslese-PCBs oder ganze Detektoren



**Abbildung 6.4:** L2-Monitorprogramm: Streifenrauschen des inneren Spurkammersystems. Links für alle ausgelesenen Detektoren in einem zweidimensionalen Histogramm. Die waagrechten Linien kommen vom übersprechen der Chipspaltennummer auf den ersten Kanal. Die Detektoren sind in diesem Histogramm so eingetragen, daß eine ganze Detektorlage nach der anderen folgt, wobei die Quadranten der Detektorlagen folgendermaßen eingetragen sind: ++, +-, -- und -+. Rechts ist das Rauschen des Detektors MS11++3 dargestellt.

ein zu großes Rauschen haben. Für jede Superlage werden die Quadranten jeder einzelnen Detektorlage nacheinander eingetragen, wobei die Quadranten im Uhrzeigersinn durchlaufen werden: ++, +-, -- und -+. Die waagrechten Linien in der linken Abbildung kommen vom übersprechen der Chipspaltennummer auf den ersten Kanal (zwischen den zwei Chips auf einem PCB), hier werden keine Treffer detektiert.

Die Detektoren haben typischerweise ein Rauschen von 1–2 ADC-Werten. Detektoren, die keine Digitaleinstellungen erhielten, haben typischerweise ein Rauschen von 0,0–0,5 ADC-Werten.

Wie in der zweidimensionalen Abbildung zu sehen ist, haben im Jahr 2002/2003 vereinzelte Kanäle ein höheres Rauschen von mehr als 4 ADC-Werten, und vier ganze Detektoren in der Superlage MS13 zeigen ein leicht höheres Rauschen von 3–4 ADC-Werten.

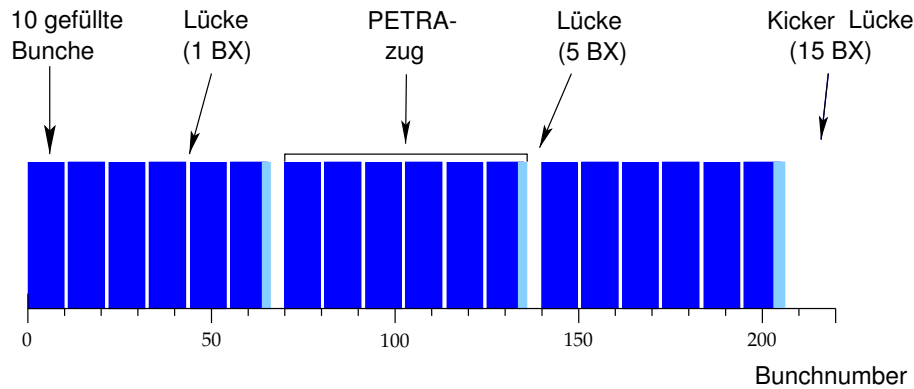
Während der Datennahme 1999/2000 gab es zwei GEM-MSGCs und ein einzelnes HELIX-Chip-PCB, die ein Rauschen von etwa 10 ADC-Werten zeigten (siehe Tab. 7.1).

## Die Synchronisierung des inneren Spurkammersystems mit HERA

Das innere Spurkammersystem muß synchron zu den anderen Detektoren ausgelesen werden. Um die Synchronität der Detektoren zu überprüfen, werden alle gefundenen Treffer zufällig getriggert Ereignisse gegenüber der HERA-Bunchnummer eingetragen.

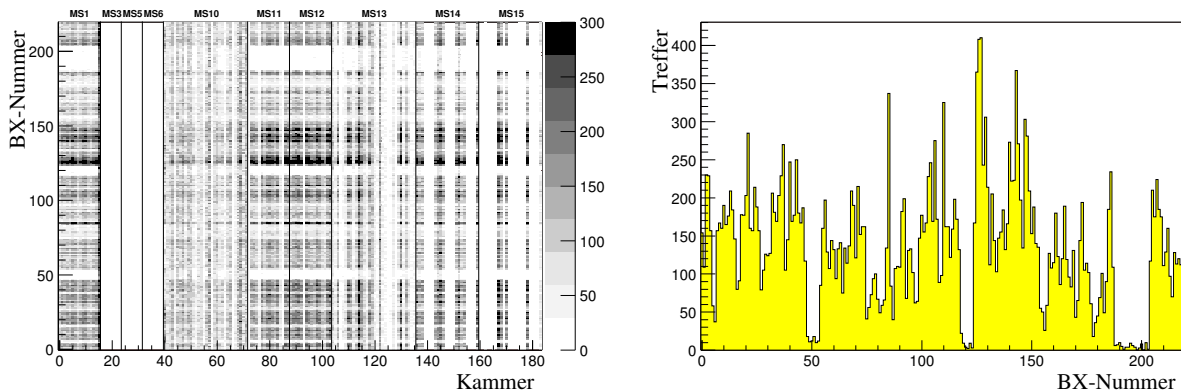
Das HERA-Bunchspektrum hat durch den Füllmodus Bunchbereiche, die nicht mit Protonen gefüllt sind. In diesen Bereichen sollte die Aktivität im Detektor gegenüber den gefüllten Bunchen sehr gering sein. Das Füllschema des HERA-Speicherring ist in Abb. 6.5 dargestellt. Die Struktur des Bunchspektrums kommt daher, daß sechs in DESY3 vorbeschleunigte Bunch-Züge zu 10 Protonpaketen jeweils mit einer Lücke von einem Bunch in den PETRA-Ring gespeist werden. Im PETRA-Ring werden die Protonen auf 39 GeV beschleunigt. Diese PETRA-Züge werden insgesamt dreimal mit jeweils einer Lücke von fünf Bunchen in den HERA-Ring injiziert. Am Ende des dritten PETRA-Zuges ist eine größere Lücke von 15 Bunchen, die verwendet wird, um den Protonstrahl am Ende einer Füllung sicher zu entsorgen. Im HERA-Ring werden die Protonen dann auf 920 GeV beschleunigt. Das Bunchspektrum von HERA hat seine große Lücke von 15 Bunchen zwischen den Bunchen 190–205.

Das HERA-Füllspektrum sollte beim Auftragen der Treffer gegenüber der Bunchzahl bei zufallsgetriggerten Ereignissen zu sehen sein. Links in Abb. 6.6 ist in einer zweidimensionalen Dar-



**Abbildung 6.5:** Schematische Zeichnung des HERA-Bunchcrossingspektrums. Sechs Züge à 10 Bunches der von DESY3 vorbeschleunigten Protonen werden in PETRA injiziert, wo sie auf 39 GeV beschleunigt werden. Drei dieser PETRA-Züge werden in HERA injiziert, wo sie weiter auf 920 GeV beschleunigt werden. Zwischen den DESY3-Zügen ist jeweils ein leerer Bunch und zwischen den einzelnen PETRA-Zügen jeweils fünf leere Bunches. Nach dem 3. PETRA-Zug folgt eine Lücke von 15 Bunchen, in der der Protonstrahl sicher entsorgt werden kann.

stellung die Anzahl der gefundenen Treffer jeder einzelnen Kammer aufgetragen gegenüber der HERA-Bunchzahl (BX). An der gut sichtbaren Absatzlinie bei der Bunchzahl 205 ist zu sehen, daß alle Detektoren des inneren Spurkammersystems synchron zueinander ausgelesen werden. Detektoren, die nicht synchron zu den anderen ausgelesen werden, haben die Lücke an einer verschobenen Stelle. Die meisten Detektoren der Superlagen MS10 und MS13 zeigen nicht das Füllspektrum von HERA, da die in diesen Kammern detektierten Treffer hauptsächlich Rauschereignisse sind (siehe Kap. 7.5). In der rechten Abbildung ist die Trefferverteilung gegenüber der HERA-Bunchzahl für die Kammer MS11++3 dargestellt. Die 5 und 15 Bunches großen Lücken sind bei dieser Kammer deutlich zu sehen. Die einen Bunch großen Lücken können nur teilweise erkannt werden, da es vorkommen kann, daß ein Treffer von der vorherigen Bunchzahl im nächsten Bunch detektiert wird. Das kann bei besonders großen Signalen vorkommen, die nach 100 ns (einer Periode der HERA-Bunchclock) noch nicht vollständig abgeklungen sind.



**Abbildung 6.6:** L2-Monitorprogramm: Treffer aus zufallsgetriggerten Ereignissen gegenüber der HERA-Bunchzahl. Links für alle ausgelesenen Detektoren. Rechts ist das Bunchzahlenspektrum für den Detektor MS11++3 dargestellt. Die Lücken im Bunchspektrum, die nicht mit Protonen gefüllt sind, sind eindeutig zu sehen.

Dieses zweidimensionale Bunchhistogramm wird für jede Datennahme kontrolliert, um eine zeitlich verschobene Auslese der Daten einzelner Kammern sofort zu erkennen. Ein Detektor, der zu

einer falschen Bunchzahl ausgelesen wird, liefert keine brauchbaren Daten.

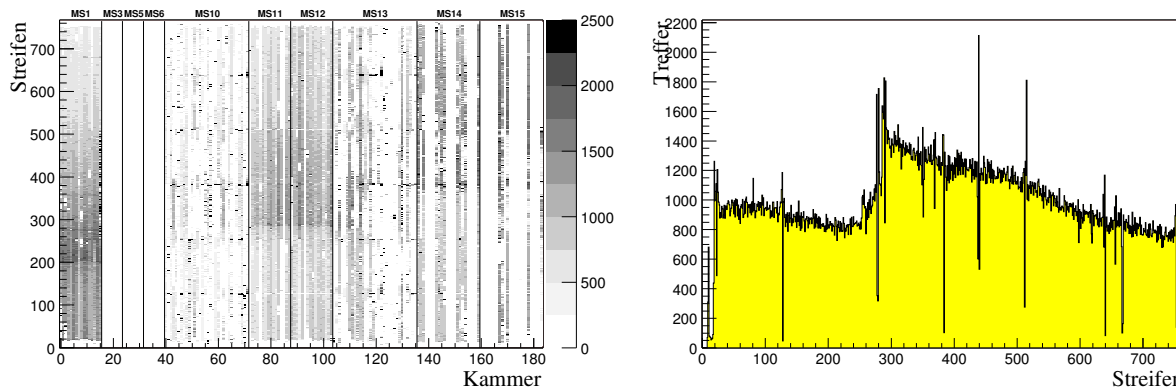
### 6.2.2 L4-Monitorprogramm

Das L4-Monitorprogramm beruht auf Spursegmenten und Spuren, die vom Rekonstruktionsprogramm ARTE gefunden wurden. Zu diesen Spuren sind in ARTE-Tabellen verschiedene Werte, wie z.B. die Anzahl der Treffer jeder Detektorkomponente auf der Spur, und die Spurparameter selbst, gespeichert. Daher kann im L4-Monitorprogramm das Zusammenspiel der verschiedenen Detektoren und sogar das Zusammenspiel der verschiedenen Detektorkomponenten überprüft werden. Im weiteren werden Histogramme wieder für den Run 21166 dargestellt. Die Histogramme des L4-Monitorprogramms werden von allen Knoten der L4-Farm gemeinsam gefüllt, so daß ein großer Teil der aufgenommenen Daten online im L4-Monitorprogramm überwacht werden kann. Von den 387000 ausgelesenen Ereignissen wurden 196110 online rekonstruiert.

#### Die Trefferverteilung über die Kammer

Als ein sehr nützliches Histogramm hat sich die Trefferverteilung über die Detektorstreifen erwiesen. In diesem Histogramm läßt sich auf einen Blick sehen, ob die Detektoren richtig funktionieren. Fallen einzelne Chips, einzelne PCBs oder ganze Kammern aus, fehlen in diesem Bereich die Treffer. Ein Zählen der Treffer ermöglicht es, präzise zu diagnostizieren, ob manche Bereiche des inneren Spurkammersystems ausgefallen sind; gegebenenfalls wird der Schichtbesatzung ein Alarm ausgegeben.

Links in Abb. 6.7 sind die Trefferverteilungen jeder einzelnen Kammer in einem zweidimensionalen Histogramm dargestellt. In diesem Histogramm ist klar die unterschiedliche Trefferverteilung der verschiedenen GEM-MSGC-Typen mit unterschiedlich großem Strahlrohrausschnitt zu sehen. Die Superlage MS01 hat GEM-MSGCs der Typen I, die Superlagen MS10–MS13 haben GEM-MSGCs Typ II und in den Superlagen MS14 und MS15 werden GEM-MSGC des Typs III verwendet. Auch in diesem Histogramm ist die schlechte Performance der meisten Kammern der Superlagen MS10 und MS13 deutlich zu sehen. Rechts in Abb. 6.7 ist die Trefferverteilung für die GEM-MSGC MS11++3 (Kammer-Typ II) dargestellt.



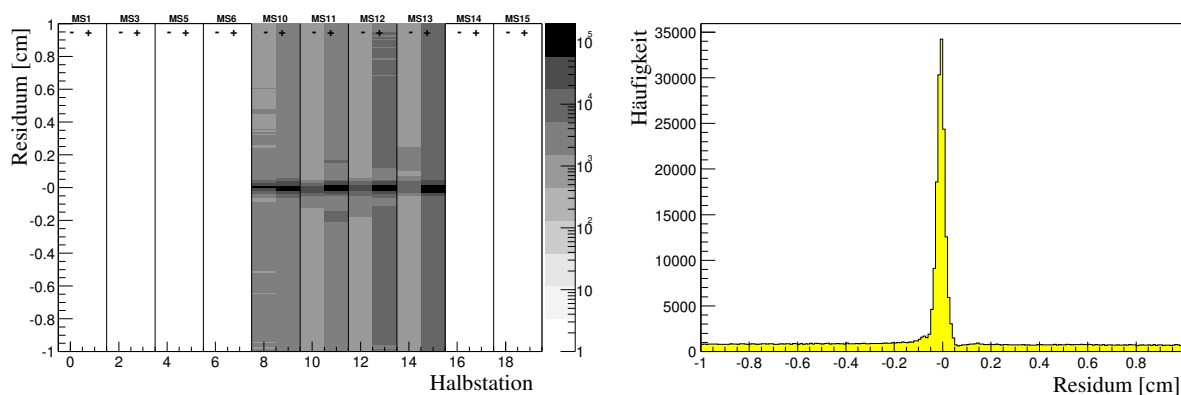
**Abbildung 6.7:** L4-Monitorprogramm: Trefferverteilung über die MSGC-Streifen: Links die zweidimensionale Trefferverteilung für alle Detektoren. Die Quadranten werden wieder folgendermaßen durchlaufen: ++, +-, -- und -+. Rechts ist die Trefferverteilung der Kammer MS11++3 dargestellt.

Nur GEM-MSGC-Detektoren, an denen alle vier Spannungen vollständig anliegen, liefern das zu erwartende Trefferverteilungshistogramm. Detektoren, bei denen die Differenzspannung an der GEM-Folie ausgefallen ist, detektieren immer noch Treffer, so daß die Form der Trefferverteilung

über den Streifen korrekt aussieht, aber solche Detektoren detektieren viel zuwenig Treffer. Fällt die Spannung an der Driftelektrode oder den Kathodenstreifen aus, können keine Treffer detektiert werden. Fallen Gruppen von ganzen Detektoren aus, kann an der Zusammenstellung der betroffenen Kammern erkannt werden, ob z. B. nur eine der Strommeß- oder GEM-Boxen, oder die ganze Niederspannungsversorgung der Halbsuperlage ausgefallen sind. Fallen einzelne Hochspannungsboxen aus, sind immer acht Detektoren betroffen; und zwar gleich viele von beiden Halbsuperlagen einer Superlage. Fällt die Niederspannung einer Halbsuperlage aus, zeigen alle Detektoren dieser Halbsuperlage keine Treffer. Fallen einzelne Detektoren aus, kann es sein, daß bei der Auslese des Detektors ein Fehler aufgetreten ist. Je nachdem wieviele Detektoren ausgefallen sind, kann ein Alarm an die Schichtbesatzung ausgegeben werden.

## Residuenhistogramme

Der Abstand des nächsten Treffers zu einer rekonstruierten Spur (Residuum) zeigt an, wie gut die Detektoren in sich und zum restlichen Detektor positioniert sind. Wäre das Spurkammersystem 100% effizient, würde also jedes Teilchen, das durch das innere Spurkammersystem hindurchgeht, durch einen Treffernachweis nachgewiesen, würde bei der Differenz des Durchstoßpunktes der Spur mit dem nächsten Treffer ein scharfes Maximum entstehen. Da die Detektoren des inneren Spurkammersystems nur zu etwa 90% effizient sind, kann es sein, daß ein durchgegangenes Teilchen nicht nachgewiesen wird. Dadurch wird im Histogramm dann der Abstand zwischen dem Durchstoßpunkt der Spur und dem nächsten Teilchennachweis im Detektor eingetragen. Dies führt zu einem Untergrund. Ist das innere Spurkammersystem gut positioniert, liegt dieses scharfe Maximum um 0. Ist das innere Spurkammersystem etwas verschoben gegenüber seiner nominellen Position, würde das scharfe Maximum nicht bei Null, sondern um den verschobenen Abstand liegen. Links in Abb. 6.8 ist das Residuum jeder Halbsuperlage gegenüber allen Halbsuperlagen aufgetragen. Für die Superlagen MS01, MS14 und MS15 wurden wegen eines Fehlers im L4-Monitorprogramm keine Residuenhistogramme online überwacht. Die Halbsuperlagen MS10–MS13 haben ein scharfes Maximum bei 0 und sind daher im Experiment an ihrer Sollposition positioniert. Rechts in Abb. 6.8 ist das Residuum der Superlage MS11– dargestellt. Der Maximum des Residuums liegt korrekt bei 0.



**Abbildung 6.8:** L4-Monitorprogramm: Residuum pro Halbsuperlage. Links ist das Residuum im zweidimensionalen Histogramm, bei dem auf der  $x$ -Achse alle Halbsuperlagen dargestellt sind und auf der  $y$ -Achse der Abstand des nächsten Treffers zu der rekonstruierten Spur. Rechts ist das Residuum der Superlage MS11– dargestellt.

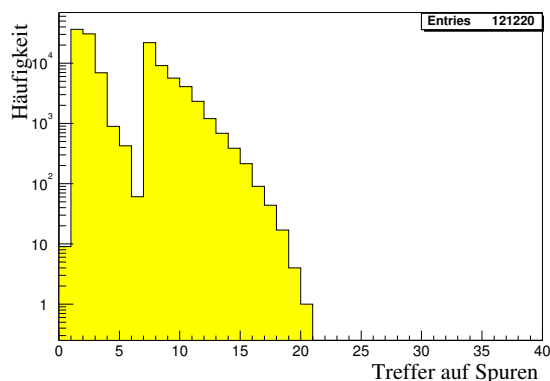
Diese Residuums-histogramme werden auch für jeden einzelnen Detektor betrachtet. Da das innere Spurkammersystem so aufgebaut ist, daß sich die einzelnen Detektoren zueinander nicht verschieben können, sondern sich nur die ganze Halbsuperlage in der  $x$ -Richtung verschieben

kann, reicht es für die Datenkontrolle, das Residuum der Halbsuperlage zu betrachten. Nach Zugangstagen kam es vor, daß das Spurkammersystem aus seiner Sollposition entfernt worden war, und danach nicht wieder an seiner Sollposition positioniert worden war. In diesem Fall konnte schnell an Hand des Residuenhistogramms festgestellt werden, daß die Sollposition des Spurkammersystems nicht erreicht wurde.

Ist eine Superlage nicht auf ihrer nominellen Position, kann durch Software dem ausgelesenen Streifen eine andere Position zugeordnet werden und so die Superlage nachträglich aligniert werden. Im Residuumhistogramm müssen nach einer Alignierung der Superlagen alle Maxima um Null liegen.

### Anzahl der Treffer auf der rekonstruierten Spur

Bei gut funktionierenden Kammern, gut aligniertem inneren Spurkammersystem und einer gut funktionierenden Rekonstruktion der Spuren werden Teilchenspuren mit Treffern im inneren Spurkammersystem gefunden. Für alle Spuren, die durch das innere Spurkammersystem verlaufen, ist die Anzahl der Treffer pro Spur in Abb. 6.9 dargestellt.



**Abbildung 6.9:** L4-Monitorprogramm: Anzahl der Treffer auf rekonstruierten Spuren.

Es wurden insgesamt 121220 Spuren, die durch das innere Spurkammersystem verlaufen, gefunden. Dieses Histogramm zeigt zwei Maxima, und zwar ein Maximum bei Spuren, die nur sehr wenige Treffer haben und eines bei Spuren, bei denen mehr als 8 Treffer gefunden werden. Das erste Maximum kommt von Spuren, die nur durch die erste Superlage des inneren Spurkammersystems MS01 verlaufen und anschließend nur noch durch das äußere Spurkammersystem verlaufen. Spuren, die ganz durch die erste Spurkammersuperlage MS01 verlaufen, können acht Treffer auf der Spur haben. Acht Treffer auf der Spur können in der Superlage MS01 nur gefunden werden, wenn die Spur durch alle Lagen durch den kleinen Überlapp der Detektoren verläuft. Da der Überlapp der Detektoren sehr klein ist, werden solche Spuren sehr selten sein. Viel häufiger sollten Spuren mit vier Treffern in der MS01 gefunden werden. Das zweite Maximum rührt von Spuren her, die zum großen Teil im inneren Spurkammersystem verlaufen und dort rekonstruiert werden. In der für die Datennahme 2002/2003 verwendeten Konfiguration können – unter Vernachlässigung des Überlapps – bis zu 34 Treffer im inneren Spurkammersystem auf einer Spur liegen<sup>3</sup>. Durch die großen ineffizienten Bereiche in den Superlagen MS10 und MS13 und durch die nicht perfekte Detektoreffizienz werden nicht so viele Treffer auf den Spuren gefunden wie geometrisch möglich wären.

<sup>3</sup>In der Datennahmepriode 1999/2000 waren theoretisch 40 Treffer auf einer Spur, die ganz durch das innere Spurkammersystem verlaufen, möglich.



## 6.3 Zusammenfassung der Datenqualität des inneren Spurkammersystems

Die Überwachung und Sicherung der Datenqualität der Daten des inneren Spurkammersystems ist in zwei Stufen implementiert. Auf der unteren Stufe wird kontrolliert, daß die Daten der HELIX-Chips alle aus der gleichen Spaltennummer ausgelesen wurden und damit die Daten alle aus dem selben Ereignis stammen. Die Anzahl der asynchronen und defekten Chips wird gezählt, und bei einer zu großen Zahl ein Alarm an die Schichtbesatzung ausgegeben. Auf niedrigster Stufe kann auch das Rauschverhalten jedes einzelnen Auslestreifen ständig überwacht werden. Zeigen zu viele Detektoren oder Chips ein zu hohes Rauschen, kann durch ein neues Laden der HELIX-Einstellungen versucht werden, das Rauschen zu vermindern. Anhand von zufallsgetriggerten Ereignissen kann die Synchronisierung der ganzen Auslese überprüft werden, denn bei zufallsgetriggerten Ereignissen muß das HERA-Füllspektrum in den Daten zu sehen sein. Das HERA-Füllspektrum hat gefüllte und leere Bunche, bei den gefüllten Bunchen sollte die Aktivität im Detektor höher sein als in nicht gefüllten Bunchen. Dieses Muster muß in allen Komponenten von HERA-B identisch zu finden sein.

Auf der höheren Stufe wird, da hier die Statistik höher ist als auf der tieferen Stufe, die Trefferverteilung über jeden einzelnen Detektor überprüft. An der Trefferverteilung über die Detektoren kann sehr schnell gesehen werden, ob alle Hochspannungen wie auch Niederspannungen an den Detektoren richtig anlagen. Ist z.B. eine Niederspannung ausgefallen, zeigen alle Detektoren einer Halbsuperlage keine Daten. Zeigen von beiden Halbsuperlagen je vier Detektoren keine Daten, ist eine der Hochspannungsboxen, die die Detektoren mit den benötigten Spannungen versorgen, ausgefallen.

Generell wird auf der höheren Stufe die Funktionalität des inneren Spurkammersystems mit Hilfe von rekonstruierten Spuren überprüft. Es wird mit externen Spuren die Alignierung des inneren Spurkammersystems relativ zum übrigen Detektor überprüft. Bei einem gut alignierten Detektor ergibt sich, wenn der Abstand des nächsten Treffers zu der rekonstruierten Spur in ein Histogramm eingetragen wird, ein scharfes Maximum um Null. Ist die Halbstation des inneren Spurkammersystems nicht an der Nominalposition positioniert, ergibt sich ein scharfes Maximum um den Abstand, um den der Detektor aus seiner Position verschoben ist. Die Zahl der Treffer, die auf rekonstruierten Spuren gefunden werden, wird kontrolliert, da nur Treffer mit dem inneren Spurkammersystem auf rekonstruierten Spuren gefunden werden können, wenn das ganze Zusammenspiel aller Komponenten richtig funktioniert.

Die Daten des inneren Spurkammersystems waren leider bei beiden Datennahmeperioden zum Teil nicht für die Datenanalyse zu gebrauchen. Zwei Probleme führten zu der schlechten Datenqualität des inneren Spurkammersystems: 1. Durch Probleme mit den Niederspannungsgeräten konnten sehr häufig ganze Superlagen des inneren Spurkammersystems nicht ausgelesen werden, was zu Ausfällen von bis zu 16 Detektoren führte. 2. Durch die Hochspannungsversorgung der Detektoren fielen bei Defekten eines Detektors sieben weitere Detektoren bei der Datennahme aus. Beide Probleme konnten zumeist bei einem zeitweiligen Zugang zum Experiment behoben werden. Abgesehen von diesen zwei Problemen, die leider sehr häufig auftraten, waren vereinzelt Detektoren oder Auslesechips defekt, die dadurch dauerhaft keine Daten lieferten. Die Datenqualität der übrigen Detektoren war gut.

Die Rausch- und Trefferverteilungshistogramme wurden beim Umbau des inneren Spurkammersystems, während eines 8-monatigen Shutdowns, herangezogen, um Aussagen über das Rauschverhalten der Detektoren und über den Status der Auslese zu geben. Anhand der Treffervertei-

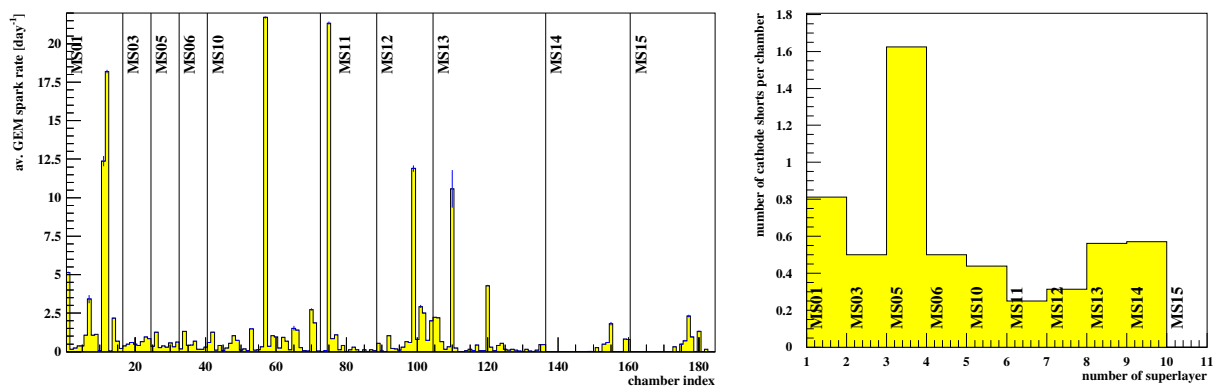
lungshistogramme konnten Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse auf dem MSGC-Substrat lokalisiert werden und gezielt einzelne Anodenstreifen von der Auslese getrennt werden. Der Umbau des inneren Spurkammersystem ist im folgenden Kapitel beschrieben.

# Kapitel 7

## Umbau im Shutdown 2000/2001

### 7.1 Erfahrungen aus dem Betrieb bei HERA-B 1999/2000

Das innere Spurkammersystem von HERA-B ist das einzige Spurkammersystem in einer hadronischen Umgebung, das GEM-MSGC-Detektoren verwendet. Es stellte sich heraus, daß die GEM-MSGCs sehr empfindliche Detektoren sind, die sehr behutsam betrieben werden müssen. Die Inbetriebnahme des inneren Spurkammersystems war trotz der langen Konditionierungszeiten während des Baus und der Tests nicht so problemlos wie erhofft. Zu Beginn der Inbetriebnahme wurde die GEM-Folie häufig durch Überschläge entladen, und es bildeten sich sehr viele Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse aus. Deswegen wurden die GEM-MSGC-Detektoren bei HERA-B bei moderatem Strahlbetrieb von 5 – 10 MHz Targetrate langsam an die Nominalspannungen gewöhnt. Diese Konditionierungszeit betrug etwa 400 Stunden Betriebszeit und konnte bei den Strahleffizienzen von HERA bis zu zwei Monate in Anspruch nehmen [Kra02]. Nach der Konditionierungsphase der Detektoren hat das innere Spurkammersystem zur Datennahme beigetragen.



**Abbildung 7.1:** GEM-Überschläge und Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse der 1999/2000 betriebenen GEM-MSGCs. Links ist für jeden Detektor der Mittelwert der GEM-Überschläge pro Betriebstag dargestellt. Rechts ist die Anzahl der Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse pro Detektor und Superlage dargestellt ([Kra02]).

Für die bis Januar 2000 eingebauten Detektoren ist in Abb. 7.1 die mittlere Anzahl von GEM-Folien-Überschlägen pro Betriebstag und die Anzahl der Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse pro Superlage dargestellt. Bei den detektierten GEM-Folien-Überschlägen pro Betriebstag ist zu se-

hen, daß bei einem Großteil der Detektoren weniger als ein Überschlag pro Tag in der GEM-Folie detektiert wurde, nur bei einzelnen Detektoren wurden sehr viel mehr Überschläge detektiert. Bei den detektierten Kathoden-Anoden-Kurzschlüssen pro Detektor und Superlage ist zu sehen, daß die Kurzschlüsse auf der MSGC über alle Superlagen verteilt sind; in der Superlage MS05 werden die meisten Kurzschlüsse pro Detektor gefunden.

Die Hoch- und Niederspannungsversorgung der GEM-MSGC-Detektoren stellte sich während des Betriebs als problematisch heraus. Da die Hochspannungsversorgung für jeweils acht Detektoren über ein gemeinsames Paar von Strommeß- und GEMboxen erfolgt (siehe Kap. 4.5), kann ein Defekt in einem Detektor den Betrieb von bis zu sieben weiteren Detektoren beeinträchtigen.

Die Halbsuperlagen erhalten ihre Niederspannung durch Spannungsgeräte, die unterhalb des Experiments eingebaut sind. Während die Spannungsversorgungsgeräte im Labor und auch während des langen Shutdowns 2000/2001 zuverlässig funktionierten, verhielten sie sich deutlich instabiler bei Beschleunigerbetrieb und fielen häufig mit einem dauernden Schaden aus. In fast allen Fällen betraf der Schaden die Eingangsstufe des Versorgungsgerätes, dies deutet auf eine große Einkoppelung hochfrequenter Störstrahlung in das 230 V-Netz der Experimentierhalle hin. Durch den Ausfall können alle Detektoren einer Halbsuperlage keine Signale mehr liefern, bis bei einem Zugang zum Experiment das Netzteil ausgetauscht wird.

Die Datenqualität des inneren Spurkammersystems wurde mit dem in Kap. 6 beschriebenen Monitorprogramm ständig überwacht. Es stellte sich heraus, daß abgesehen von den Hoch- wie Niederspannungsproblemen und einzelnen Detektorausfällen die Detektoren gute Daten lieferten.

Während des langen Shutdowns 2000/2001 wurden sämtliche Superlagen ausgebaut, repariert und verbessert. Die Gründe für den Ausbau aller Superlagen waren die folgenden:

- Die HELIX-Chips der Triggersuperlagen, die bei HERA-*B* im Jahr 2000 eingebaut waren, hatten wegen eines Designfehlers auf dem HELIX 3.0 nicht die richtige Pipelinelänge (136 statt 141). Die zu kurze Pipeline hätte zur Folge gehabt, daß der Trigger der ersten Stufe nicht genügend Zeit für seine Triggerentscheidung gehabt hätte. Deswegen mußten alle HELIX 3.0 durch Chips der Version HELIX 3.1a mit einer Pipelinelänge von 142 und einer verbesserten Beschaltung der Triggerausgänge (siehe Kap. 4.4) ersetzt werden.
- Beim Aufbau der Testtriggersuperlage im Jahr 1999 wurde ein neues, besseres Erdungsschema entwickelt, mit dem das Baselinespringen der Auslese sehr viel kleiner ist.
- Die im Jahr 2000 verwendete Kombination von HELIX 2.2 und 3.0 innerhalb derselben Superlage (MS10 & MS13) erwies sich als schwierig handhabbar, insbesondere was die Einstellung der Auslesesteuersignale anging. Deshalb sollte innerhalb einer Superlage nur noch eine Version des Auslesechips verwendet werden.
- Während des Betriebs bei HERA-*B* stellte sich heraus, daß bei produktionsbedingt unterbrochenen Anoden mehr Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse auftraten als bei perfekten Anoden. Die Häufigkeit, mit der ein Kathoden-Anoden-Kurzschluß bei einer intakten Anode ausgebildet wurde, ist 0,23%, die Häufigkeit, mit der ein Kathoden-Anoden-Kurzschluß sich an einer produktionsbedingt defekten Anode ausbildete, ist 2,42%. Aus diesem Grund wurde es als sinnvoll erachtet, Anodenstreifen, die von der Zürcher Arbeitsgruppe als unterbrochen detektiert wurden, auf dem Auslesefanin zwischen MSGC-Substrat und HELIX-Chip-PCB zu unterbrechen. Dadurch wird nur ein einzelner Anodenstreifen verloren und nicht wie bei einem Kathoden-Anoden-Kurzschluß 16 Anodenstreifen.
- Wie schon in Kap. 5.4.2 erwähnt, ist auf dem Kathodenfanin parallel zu dem vor die Kathodengruppe geschalteten 10 M $\Omega$ -Widerstand eine Diode in Sperrichtung geschaltet (siehe

Abb. 5.6). Während des Betriebs bei HERA-B kam es vor, daß die Diode zerstört wurde und in Sperrichtung stromdurchlässig wurde. Die betroffene Kammer konnte dann nicht mehr betrieben werden. Da einige Kammern Effekte zeigten, die auf stromdurchlässige Dioden hinwiesen, wurde beschlossen, alle Dioden im Shutdown 2001 zu entfernen.

- Einige Detektoren erzeugten während des Betriebs bei HERA-B einen GEM-Kurzschluß, der nicht durch einen hohen Strompuls beseitigt werden konnte. Solche Detektoren mußten ersetzt werden.
- An einige Detektoren konnte aus ungeklärten Gründen keine stabile Driftspannung angelegt werden, solche Detektoren mußten ebenfalls ersetzt werden.

Es wurden im Shutdown 2001 aus diesen Gründen nicht nur die Superlagen, die einen neuen Auslesechip benötigten, umgebaut, sondern auch alle anderen Superlagen, die nicht zum FLT-Trigger beitragen sollten. Für die komplette Reparatur des inneren Spurkammersystem standen nach den Zeitplänen acht Monate zur Verfügung.

## 7.2 Bestandsaufnahme aller aufgetretenen Defekte an den GEM-MSGCs

Gegen Ende der Datennahme 2000 wurden im Rahmen dieser Arbeit alle verfügbaren Informationen über die Superlagen zusammengefaßt und ein Arbeitsplan für den Umbau im Shutdown 2001 ausgearbeitet. In Tab. 7.1 sind die detektierten Probleme, die während der Datennahmeperiode auftraten, aufgeführt.

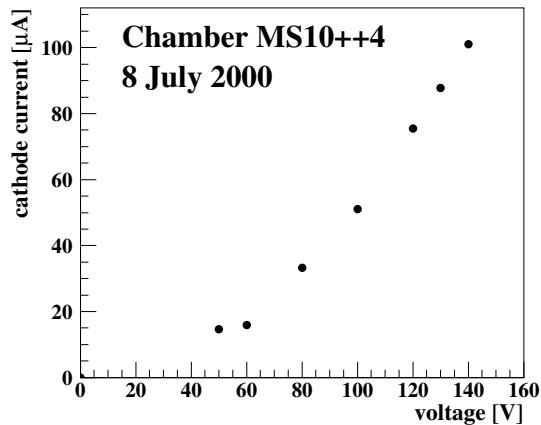
- Um in der Testhalle die zu messenden Ströme der GEM-MSGC bei bestimmten Spannungen mit denen aus dem Experiment vergleichen zu können, wurde der Strom, der bei bestimmten Spannungen über die MSGC floß, für alle MSGCs gemessen. Dazu wurde während einer Pause im HERA-Betrieb der Strom, der bei 50 V über die Kathoden floß, gemessen. Die Ströme, die über die Driftelektrode fließen, wurden bei Nominalspannungen gemessen. Weiterhin wurde überprüft, daß an jede GEM-Folie die maximale Spannung von 450 V angelegt werden kann.
- Informationen über die Häufigkeit von auftretenden GEM-Folien-Überschlägen wurden vermerkt, um Detektoren, die häufig Überschläge aufweisen, gegebenenfalls zu ersetzen.
- Die Trefferverteilungs- und Rauschhistogramme wurden herangezogen, um die Auslekette und das Rauschverhalten der Detektoren zu kontrollieren.
- Informationen über den zeitlichen Verlauf des Betriebs der GEM-MSGC-Detektoren.

Aus den Spannungen und den dabei fließenden Strömen, den Trefferverteilungs- und Rauschhistogrammen der MSGC konnte folgendes abgeleitet werden:

### 7.2.1 Kammerströme

Wie schon erwähnt, kann am Strom, der bei einer Spannung über das MSGC-Substrat fließt, die Zahl der Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse ermittelt werden (Tab. 7.1, zweite Spalte). Da während des Aufbaus und des Testens Widerstände von Gruppen mit Kathoden-Anoden-Kurzschlüssen entfernt wurden, ergibt diese Berechnung der Zahl der Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse nur eine untere Grenze.

Eine Kammer, die eine zerstörte HV-Diode hat, zieht schon bei sehr geringer Spannung einen sehr großen Strom (Tab. 7.1 vierte Spalte). In dem Bereich, in dem der Strom durch die Strommeßboxen gemessen werden kann, ist die Strom-Spannungskennlinie nicht linear (siehe Abb. 7.2). Eine Kammer mit defekter Diode läßt sich allerdings schwer unterscheiden von einer Kammer, die sehr viele Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse hat, da der Strom sehr schnell den Meßbereich der Hochspannungs-Strommesser übersteigt.



**Abbildung 7.2:** Strom-Spannungskennlinie einer MSGC mit einer defekten Hochspannungs-Schutzdiode ([Kra02]).

Konnte an der GEM-Folie die volle Differenzspannung nicht aufrechterhalten werden, hat die GEM-Folie einen GEM-Kurzschluß. Da bei Zugangstagen bei HERA-B immer versucht wurde, GEM-Kurzschlüsse wegzubrennen, kann davon ausgegangen werden, daß dieser Kurzschluß irreparabel ist (Tab. 7.1 dritte Spalte). Diese Detektoren müssen ersetzt werden. Kann die Differenzspannung an der GEM-Folie nur unter ständigen Entladungen angelegt werden, muß die Kammer untersucht und gegebenenfalls auch ersetzt werden (Tab. 7.1 vierte Spalte).

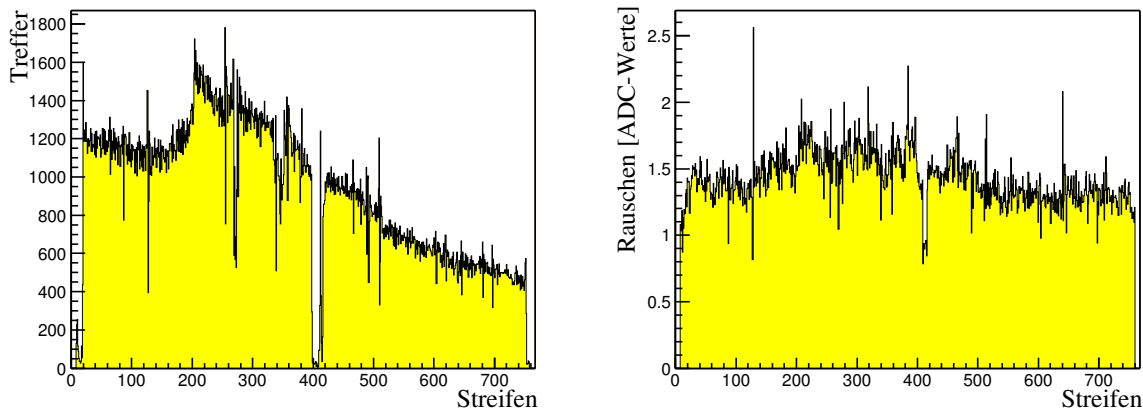
Manche Detektoren zogen über die Drietelektrode einen ungewöhnlich hohen Strom. Solche Kammern müssen überprüft werden, da die Detektoren so nicht betrieben werden können. Diese Detektoren müssen gegebenenfalls ersetzt werden (Tab. 7.1 fünfte Spalte).

## 7.2.2 Trefferverteilungs- und Rauschhistogramm

In Abb. 7.3 ist die typische Trefferverteilung (links) und die Rauschverteilung (rechts) der Kammer MS01+–3 dargestellt. Diese dargestellte Kammer hat im Bereich der Anodenstreifen 400 – 416 einen Kathoden-Anoden-Kurzschluß. Da bei einem Kurzschluß immer Gruppen von 16 Anodenstreifen betroffen sind, kann die Kathodengruppe, in der der Kurzschluß auftritt, ermittelt werden. In diesem Fall ist der Kathoden-Anoden-Kurzschluß in der 24. Kathodengruppe aufgetreten. Durch diese Methode können auch Kathodengruppen, bei denen der Schutzwiderstand während des Aufbaus der Superlage entfernt wurde, detektiert werden (Tab. 7.1 zweite Spalte).

Ein Ausfall der Ausleseelektronik des ganzen Detektors, einzelner PCBs oder einzelner Chips ist deutlich an der Trefferverteilung zu sehen, da in diesem Bereich keine Treffer im Histogramm eingetragen sind. Die Ursache der Ausleseprobleme kann an diesem Histogramm allerdings nicht erkannt werden. Werden in einzelnen Chips, in einzelnen PCBs oder in ganzen Detektoren (obwohl die Hochspannung anliegt) keine Treffer gefunden, hat die Auslese ein Problem (Tab. 7.1 siebte Spalte).

Aus der Rauschverteilung der GEM-MSGC sind rauschende Kammern, PCBs und einzelne



**Abbildung 7.3:** Trefferverteilung und Rauschverteilung der Kammer MS01+–3, das im Jahr 2000 aufgenommen wurden. Im Bereich der Streifen Nr. 400 – 416 ist ein Kathoden-Anoden-Kurzschluß zu sehen. Das Streifenrauschen der Kammer ist normal.

HELIX-Chips sehr leicht zu detektieren. In Abb. 7.3 ist rechts die Rauschverteilung für einen Detektor mit typischem Rauschen gezeigt. Ist das Rauschen zu groß, können Treffer nicht mehr effizient von Rauschereignissen getrennt werden. Die Rauschprobleme der Detektoren im Jahr 1999/2000 sind in Tab. 7.1 in der achten Spalte gezeigt.

Die Probleme, die detektiert wurden, sind auf alle Superlagen relativ gleichmäßig verteilt. In der Superlage MS05 wurden pro Kammer prozentual etwas mehr Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse detektiert als in den anderen Superlagen, ansonsten sind die einzelnen Defekte auf alle Superlagen gleichmäßig verteilt.

### 7.3 Umbau der Superlagen nach der Runperiode 2000

Nach dem Ende der Runperiode 2000 wurden nacheinander alle Halbsuperlagen des inneren Spurkammersystems ausgebaut, in der Testhalle umgebaut, repariert und wieder im Experiment eingebaut. Der Umbau der Superlagen ist in [B<sup>+</sup>02a] beschrieben. Es wurde angestrebt, die Detektoren so lange wie möglich mit Ar:CO<sub>2</sub> durchfließen zu lassen, deswegen wurden die Halbsuperlagen solange wie möglich im Experiment am Gas angeschlossen gehalten und nach dem Umbau sofort wieder eingebaut und an die Gasversorgung angeschlossen.

Bei jeder ausgebauten Superlage wurde als erstes kontrolliert, ob die Hochspannungserfahrungen aus HERA-B mit der Superlage übereinstimmen. Damit sollten mögliche Vertauschungen der Hochspannungs- oder Auslekabel ausgeschlossen werden. Die Ströme bei angelegten Kathodenspannungen von 50 V, die Differenzspannung an der GEM-Folie bei 450 V und die Stabilität der Driftspannung wurden überprüft und mit den früheren Erfahrungen verglichen. Da in der Testhalle kein Teilchenstrahl zur Verfügung stand, konnte kein Trefferverteilungshistogramm aufgenommen werden; es wurde deswegen nur die Auslese und das Rauschverhalten der HELIX-Chips mit dem bei HERA-B detektierten verglichen. Die Beschriftung der Hochspannungs- und Auslekabel wurde kontrolliert. Nachdem auf diese Weise sichergestellt war, daß keine Vertauschung vorlag, wurde die Superlage auseinandergebaut.

Defekte Detektoren wurden sofort aussortiert. Bei allen nicht defekten Detektoren wurden die Dioden, die parallel zu den Widerständen auf dem Kathodenfanin aufgelötet waren, entfernt. Bei Detektoren, die einen neuen HELIX-Chip benötigen, wurde die alte Ausleselektronik entfernt.

Alle Detektoren wurden auf Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse untersucht. Aus dem Trefferverteilungshistogramm wurde die Kathodengruppe, in der sich ein Kathoden-Anoden-Kurzschluß

Superlage	Kurzschluß		Probleme mit				Rauschende Auslese
	K-A	GEM	GEM	Diode	Drift	Auslese	
MS01– MS01+	5 (0,63) 4 (0,5)		2		1	1 MSGC 1 Chip	
MS03– MS03+	3 (0,75) 4 (1,0)				1 1	1Chip	1 MSGC
MS05– MS05+	7 (1,75) 4 (1,0)			1		1 MSGC, 1 PCB 1 Chip	
MS06– MS06+	3 (0,75) 2 (0,5)						
MS10– MS10+	10 (0,63) 2 (0,13)		1	3	1	1 PCB	
MS11– MS11+	2 (0,25) 4 (0,5)		1				
MS12– MS12+	3 (0,38) 8 (1,0)	1	1			1 MSGC	1 MSGC, 1 PCB
MS13– MS13+	12 (0,75) 15 (0,94)		1	1		1 Chip 1 PCB	
total	88 (0,65)	2	6	6	4	3 MSGC, 3 PCB, 4 Chip	2 MSGC, 1 PCB

**Tabelle 7.1:** Zusammenstellung der Probleme und Defekte der Detektoren der Halbsuperlagen des ganzen inneren Spurkammersystems nach der Runperiode 2000. Gezeigt ist wie häufig ein Defekt in der Superlage detektiert wurde. Bei den Kathoden-Anoden-Kurzschlüssen (K-A) ist in Klammern angegeben, wieviele Kurzschlüsse im Mittel pro GEM-MSGC gefunden wurden. „MSGC“ steht für einen Defekt, der den ganzen Detektor betrifft, „Chip“ steht für einen Defekt eines einzelnen Chips und PCB steht für einen Defekt, der beide Chips auf einem PCB betrifft.

befand, ermittelt. Mit einem Multimeter wurde der Widerstand zwischen der Kathodengruppe und den einzelnen Anoden gemessen und damit die den Kurzschluß verursachende Anode ermittelt. Dieser Anodenstreifen wurde auf dem Auslesefanin zwischen MSGC-Substrat und HELIX-Chipauslese von der Auslese getrennt. Bei Detektoren, die eine neue Ausleseelektronik benötigten, wurden Anodenstreifen, die einen Kurzschluß mit der Kathode hatten, nicht auf dem alten Auslesefanin von der Auslese getrennt, sondern es wurde ein neues Auslesefanin präpariert, auf dem die Verbindung zwischen Anodenstreifen und Auslese getrennt wurde.

Nach dem Kurzschlußtest wurden alle Detektoren mit Helium auf Gasdichtigkeit überprüft. Detektoren, die gasundichte Stellen aufweisen, wurden mit STYCAST 1266 abgedichtet. Bei gasdichten Kammern wurde der Gasflußwiderstand der Detektoren gemessen. War der Gasflußwiderstand der Detektoren zu groß, wurden die Gaskapillaren ausgetauscht, da eine eingedrückte Kapillare zu einer Verringerung des Gasflusses führt, was zu einer geringeren Austauschrate des Gases und damit zu einer Verschlechterung des Zählverhaltens des Detektors führt und Alterungsprozesse beschleunigen kann.

An Detektoren, die eine neue Ausleseelektronik benötigen, wurde nach dem Kathoden-Anoden-Kurzschlußtest und dem Gasdichtigkeitstest ein neues HELIX-Chip-PCB mit dem vorbereiteten Auslesefanin neu gebondet. Bei den neugebondeten Detektoren wurde nochmals ein Hochspannungstest des MSGC-Substrats durchgeführt, um zu überprüfen, daß keine weiteren Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse aufgetreten waren. Bei neuen Kurzschlüssen wurden die entsprechenden Anodenstreifen auf dem Auslesefanin von der weiteren Auslese getrennt.

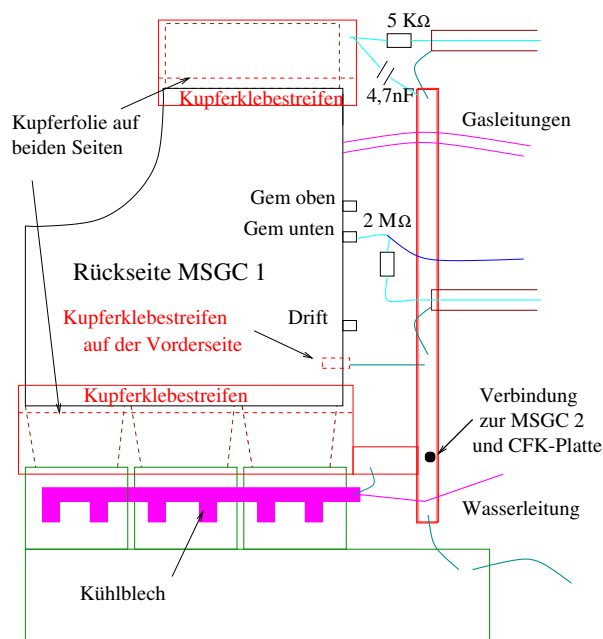
Alle Detektoren bekamen neue Hochspannungskabel, in denen –abweichend vom ursprüngli-



chen Design— keine Schutzwiderstände eingelassen wurden. Da während der Datennahmeperiode 1999/2000 in keinem Fall das Austauschen eines solchen Schutzwiderstandes nötig geworden war, wurde die Möglichkeit, die Widerstände aller Kammern im fertig aufgebauten Kammerpaket noch tauschen zu können, zugunsten eines verbesserten Verhaltens der Ausleselektronik aufgegeben. Die Schutzwiderstände wurden nach dem neuen Erdungsschema direkt an der Kammer auf die Trägerplatte montiert. Eine weitere sehr wichtige Verbesserung der neuen Kabel war, daß sie am Ende, an dem sie an den Verteiler auf der Aluminiumplatte angeschlossen wurden, einen Stecker erhielten und die Hochspannungs- und Abschirmlitze nicht mehr verlötet werden mußten. Ein Stecker an den HV-Kabeln hatte sich als vorteilhaft erwiesen, da die Kabel häufiger an der Lötstelle gebrochen waren und dadurch die Kammer nicht mit der vorgesehenen Hochspannung versorgt werden konnte.

## 7.4 Aufbau der Halbsuperlage mit neuem Erdungsschema

Die Halbsuperlagen wurden wieder wie schon beim ersten Zusammenbau sukzessive, von der äußeren Lage aus angefangen, aufgebaut. Die Trägerplatten wurden auf beiden Seiten mit Kaptonfolie abgedeckt, um sicherzugehen, daß der Erdungskontakt der GEM-MSGC mit der Trägerplatte genau an der von dem neuen Erdungsschema vorgesehenen Position stattfindet. Fertig getestete Detektoren wurden auf die Trägerplatten montiert und entsprechend dem neuen Erdungsschema geerdet. Das neue Erdungsschema, in das alle Erfahrungen mit der Trigger-Testsuperlage eingeflossen waren, ist schematisch in Abb 7.4 dargestellt.



Gas- und Wasserleitungen sind isoliert

**Abbildung 7.4:** Das neue Erdungsschema, nach dem während des Umbaus die Detektoren geerdet wurden (nach [Kel01]).

Das neue Erdungsschema unterscheidet sich von dem ursprünglichen (Abb. 5.7, Kap. 5.5) in folgenden Punkten:

- Kathoden- und Auslesefanin werden durch eine mit  $5 \mu\text{m}$  Kupfer beschichtete Kaptonfolie von beiden Seiten gegen Störsignale abgeschirmt.

- Die Schutzwiderstände für Drift- und GEM-Spannungen werden aus dem Hochspannungskabel entfernt und sehr nahe bei der GEM-MSGC eingebaut.
- Die Erdungskabel werden nicht mehr sternförmig dem zentralen Massenpunkt zugeführt, sondern sie werden an einem Kupferklebestreifen kontaktiert, der direkt neben der Kammer verläuft. Die Länge dieser Kabel wird so kurz wie möglich gewählt.
- Das Erdungskabel der Trigger-Treiber-Karte wird entfernt.
- Der Erdungsanschluß der Vorder- und Hinterseite der GEM-MSGC wird mit einem leitenden Epoxidkleber bewerkstelligt.

Die auf den Trägerplatten montierten GEM-MSGCs wurden einem kurzen Hochspannungstest unterzogen. Dieser Hochspannungstest wurde aus Zeitersparnis ohne Zählgas an Luft durchgeführt, und dauerte pro Lage ca. eine halbe Stunde. Da aus Erfahrungen des ersten Einbaus bekannt war, daß die Detektoren bei moderatem Strahlbetrieb konditioniert werden müssen, wurde bei diesem Test darauf verzichtet, die Detektoren zu konditionieren, es wurde nur die Hochspannungsfestigkeit der Detektoren überprüft. Die in Tab. 7.2 aufgeführten Spannungsschritte wurden dabei an den Detektoren eingestellt; die Ströme von Kathode, Driftelektrode und GEM-Folie wurden während des Hochspannungstests ständig überprüft. Wurde ein neuer Kathoden-Anoden-Kurzschluß festgestellt, wurde der Detektor demontiert und der Anodenstreifen von der Auslese getrennt. Die Chipadresse und das Rauschverhalten des Chips wurden ebenfalls für jede Einzellage überprüft.

$U_{\text{Drift}}$ [V]	$\Delta U_{\text{GEM}}$ [V]	$U_{\text{Kathode}}$ [V]
500	70	50
1000	140	250
2500	350	400
2500	350	450
2500	350	500
2500	350	520

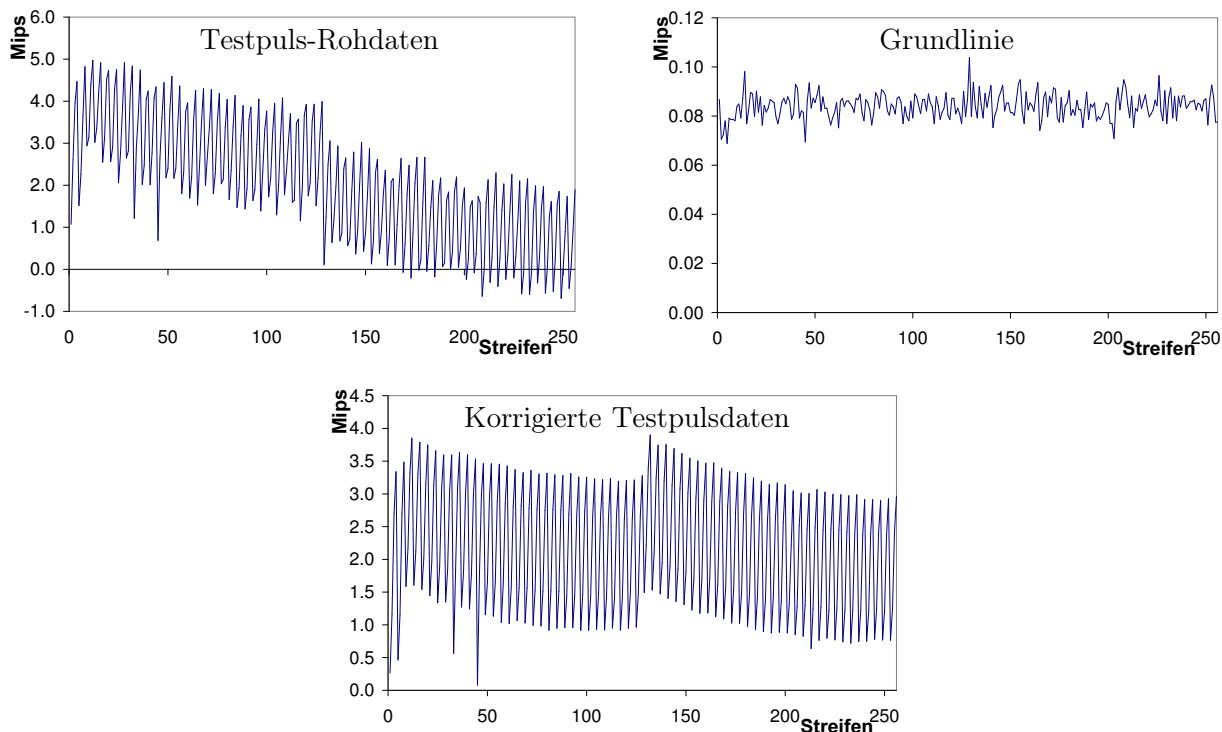
**Tabelle 7.2:** Angelegte Spannungen beim Einzellagen-Hochspannungstest. Beim Einzellagentest wurde kein Zählgas verwendet.

#### 7.4.1 Tests der Halbsuperlagen

Das aufgebaute Kammerpaket wurde in die Tragestruktur eingehängt, verkabelt, an die Gasversorgung angeschlossen und einem ausführlichen Test unterzogen. Zuerst wurde die Halbsuperlage auf Gasdichtigkeit getestet (siehe Kap. 5.6.2). Die gasdichte Superlage wurde daraufhin erneut einem kurzen Hochspannungstest mit den in Tab. 7.2 gezeigten Spannungen unterzogen. Auf jeder Hochspannungsstufe wurden die Detektoren für etwa 30 min gehalten. Während des Hochspannungstests wurde der Chiptest, der bereits in Kap. 5.6.4 beschrieben wurde, durchgeführt.

Von einem Teil der Chips wurden Oszilloskopbilder des Signals und des Testpulssignals aufgenommen. In Abb. 7.5 sind für das erste HELIX-Chip-PCB eines Detektors für alle 256 Kanäle der Mittelwert der Höhe des Signals mit Testpulsen (oben links), der Mittelwert der Kanal-zu-Kanal-Variation (Grundlinie)(oben rechts) und die Differenz der beiden Histogramme (unten) gezeigt. Das Testpulsmuster ist in der linken und in der unteren Abbildung deutlich zu sehen. In der Abbildung, in der vom Testpulsmuster (links) die Grundlinie der Streifen (Mitte) abgezogen wurde, ist das Testpulsmuster viel deutlicher zu sehen. Die äußersten acht Streifen

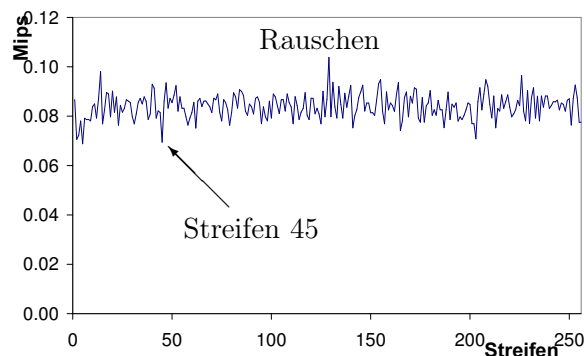
der ersten Chips sind nicht mit dem MSGC-Substrat verbunden und zeigen wegen der kleineren Kapazität am Verstärkereingang nach unten verschobene Testpulse. Genauso zeigen auf dem Auslesefanin abgetrennte Anodenstreifen nach unten verschobene Testpulse; z. B. wurde der Streifen 45 auf dem Kathodenfanin von der Auslese getrennt, da die Anode produktionsbedingt unterbrochen war. Dies ist im Testpuls muster deutlich zu erkennen. Der Anodenstreifen 30 wurde allerdings nicht als produktionsbedingt unterbrochener Anodenstreifen detektiert und auch nicht von der Auslese getrennt. Der Testpuls mustertest kann also nicht alleine dazu verwendet werden, um unterbrochene Anodenstreifen zu finden



**Abbildung 7.5:** Für jeden Kanal des ersten PCBs eines Detektors ist der Mittelwert der Höhe des Signals mit Testpulsen (oben links), der Mittelwert der Grundlinie (oben rechts) und die Differenz der beiden Histogramme (unten) gezeigt. Der Anodenstreifen 45 wurde von der Auslese auf dem Auslesefanin abgetrennt.

Das Rauschen jedes einzelnen Auslestreifens wurde mit Hilfe eines hochauflösenden ADC gemessen. Der Mittelwert des Rauschens der einzelnen Streifen für das erste PCB des Detektors ist in Abb. 7.6 dargestellt. Der von der Auslese getrennte Anodenstreifen 45 ist in diesem Test zu erahnen. Von der Auslese getrennte Anodenstreifen haben ein leicht geringeres Rauschen als durchgehende Anodenstreifen, allerdings sind die anderen Anodenstreifen, die weniger Rauschen bei diesem PCB zeigen, nicht von der Auslese abgetrennt. Da der Unterschied des Rauschens zwischen abgetrennten und nicht abgetrennten Anodenstreifen nicht so groß ist, sind unterbrochene Anodenstreifen auch mit diesem Test nicht zuverlässig zu detektieren.

Bei Detektoren, bei denen das Grundlinienspringen größer war, wurde die Erdung des Detektors überprüft und versucht, das Rauschen zu reduzieren. Fast alle Daten, die bei diesen Tests anfielen, wurden gespeichert und können jederzeit herangezogen werden, um den Zustand der jeweiligen Kammer zum Zeitpunkt des Einbaus zu überprüfen.



**Abbildung 7.6:** Mittelwert des Rauschens der Streifen des Detektors aus Abb. 7.5. Die Anode 45 wurde von der Auslese getrennt.

#### 7.4.2 Zusammenfassung des Umbaus der Superlagen im Shutdown 2001

Während des Shutdowns 2001 wurden alle Superlagen des inneren Spurkammersystems bei HERA-*B* ausgebaut. Die Magnetsuperlagen MS03, MS05 und MS06 wurden ausgebaut und nicht wieder bei HERA-*B* installiert. In der Superlage MS01 wurden daraufhin die besten der GEM-MSGC-Detektoren der Superlagen MS01, MS03 und MS05 verwendet. Bei den Typ I-Detektoren mußte die Ausleseelektronik nicht erneuert werden, da bei allen Superlagen, die nicht zum FLT-Trigger beitragen, weiterhin die Version HELIX 2.2 verwendet wird (siehe Tab. 4.2).

Bei den Superlagen MS11 und MS12 wurden auch von vornherein Typ II-Detektoren mit der HELIX-Version HELIX 2.2 verwendet. Defekte Detektoren, die ausgewechselt werden mußten, wurden durch Kammern der Superlagen MS06 oder Einzellagenkammern der Superlagen MS10 oder MS13 ersetzt, bei denen im Jahr 1999/2000 ebenfalls der HELIX 2.2 verwendet worden war.

Alle Detektoren der Superlagen MS10, MS13, MS14 und MS15 wurden mit neuen PCBs mit der HELIX-Version 3.1a ausgestattet, die zum FLT-Trigger Daten liefern können. Da einige Detektoren während des Betriebs Defekte aufwiesen, die sie unbrauchbar machten, mußten einige Typ II- und Typ III-Detektoren neu gebaut werden. An diese Detektoren konnten direkt die neuen HELIX-Chip-PCBs gebondet werden. Bei Kammern, die keine Defekte zeigten, wurde die alten HELIX-Chip-PCBs abgeschnitten und die neue Elektronik mit Hilfe eines neuen Auslesefanins an den Detektor gebondet. Für die Anodenstreifen, die mit einer Kathode einen Kurzschluß bildeten, wurde die Verbindung zum Vorverstärker auf dem Auslesefanin unterbrochen; so konnten die anderen 15 Anodenstreifen einer Kathodengruppe zur Auslese wieder beitragen. Die von der Zürcher Arbeitsgruppe detektierten unterbrochenen Anodenstreifen wurden ebenfalls auf dem Auslesefanin von der Ausleseelektronik getrennt.

Die Dioden, die ursprünglich parallel zum Schutzwiderstand vor den Kathodengruppen installiert waren, wurden entfernt.

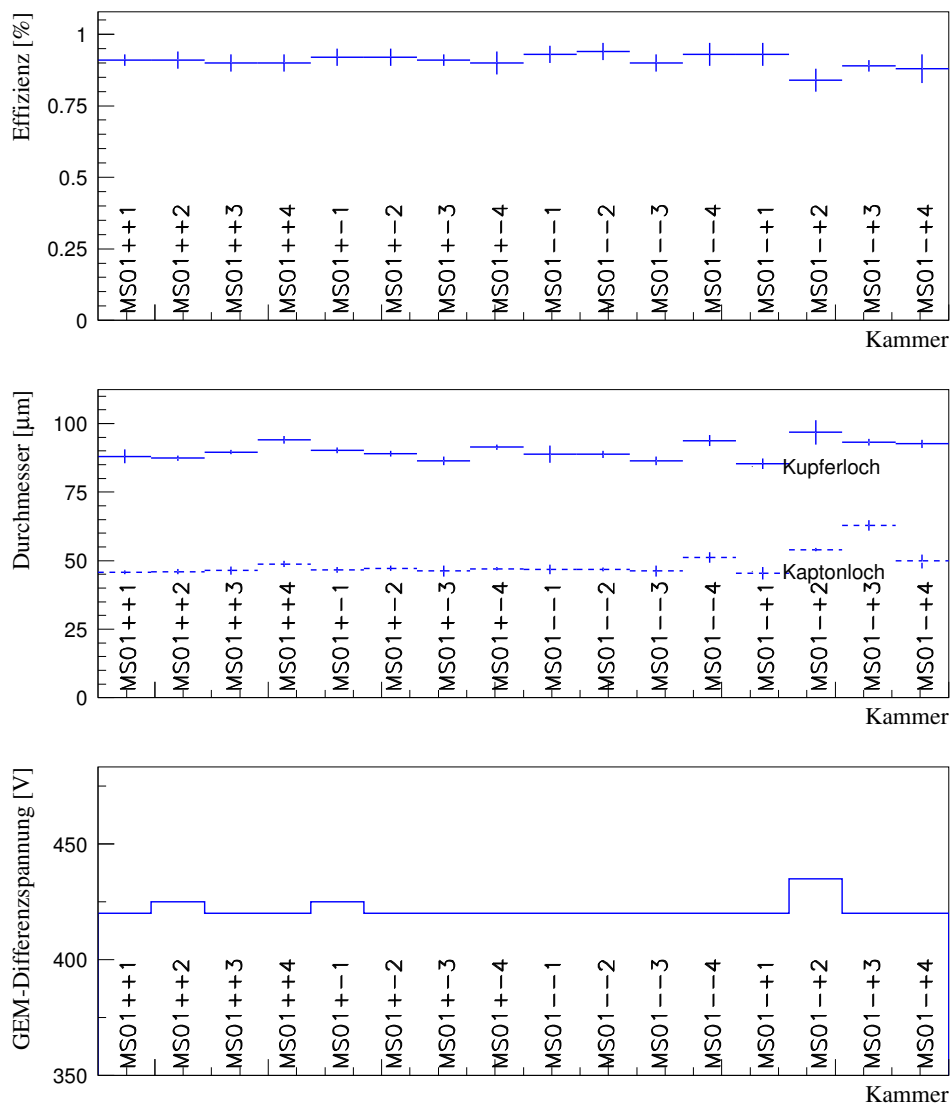
Alle Detektoren erhielten eine neue Erdung nach dem neuen Erdungsschema. Zudem erhielten alle Detektoren neue Hochspannungskabel mit Hochspannungssteckern.

Jede Halbsuperlage wurde vor dem Einbau bei HERA-*B* noch einmal gründlich getestet. Innerhalb von acht Monaten wurde das innere Spurkammersystem komplett repariert und für die Runperiode 2002/2003 vorbereitet.

### 7.5 Das innere Spurkammersystem 2002/2003

Nach einer Konditionierungszeit von 400 Stunden moderaten Strahlbetriebs war das innere Spurkammersystem bereit, Daten zu liefern. Es stellte sich heraus, daß die Superlagen MS01, MS11 und MS12, die nicht umgebondet wurden und zum Teil die besten verfügbaren Detektoren

erhielten, sehr gute Detektorsignale zeigten. Nach einer individuellen Anpassung der GEM-Spannungen sind die Einzellagen-Detektoreffizienzen dieser Superlagen zwischen 85 und 95%.

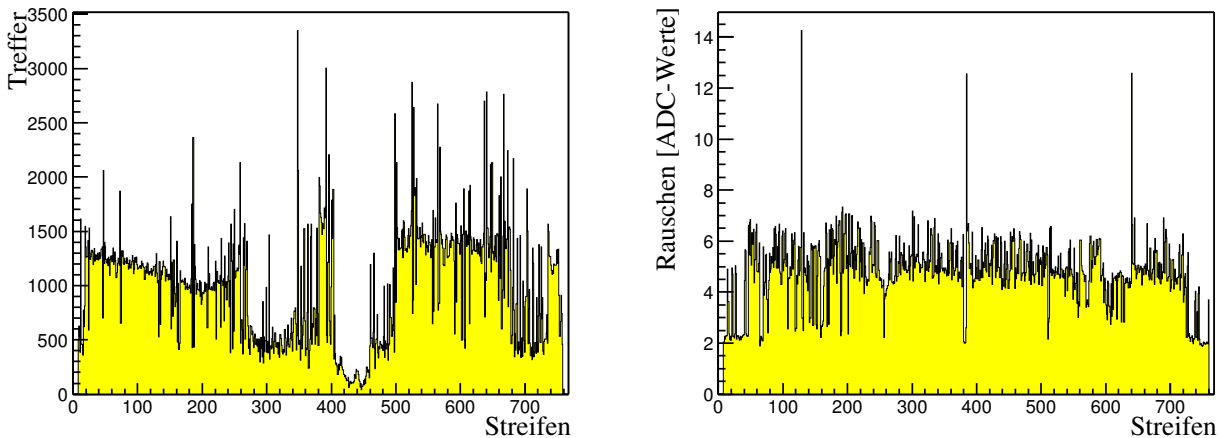


**Abbildung 7.7:** Einzellageneffizienz der Superlage MS01 bei der Datennahme des Runs 20348. Oben ist für jede GEM-MSGC die gemittelte Einzellageneffizienz über 50 verschiedene Datennahmen mit verschiedenen Triggern dargestellt (Effizienzmessung [Gor03a]). In der Mitte ist der Mittelwert der Messungen der Kupfer- und Kaptonlochdurchmesser der GEM-Folie dargestellt. Unten ist die bei dem Run 20348 verwendete GEM-Differenzspannung dargestellt.

In Abb. 7.7 sind für alle Detektoren der Superlage MS01 die gemessenen Kammereffizienzen, gemittelt von 50 verschiedenen Datennahmen verschiedener Trigger ([Gor03a]), die Durchmesser der Kupfer- und Kaptonlöcher sowie die Differenzspannung an der GEM-Folie dargestellt. Es gibt keine klare Abhängigkeit von der Lochgeometrie und der Effizienz der GEM-MSGC. Bei der Kammer MS01-+2, in der die GEM-Folie im Durchschnitt die größten Kupferlöcher und auch relativ große Kaptonlöcher hat, mußte die Differenzspannung zwischen den zwei Seiten der GEM-Folie von den üblichen 420 V auf 435 V erhöht werden, um in etwa die gleiche Kammereffizienz wie bei den übrigen Kammern zu erhalten. Allerdings zeigt die Kammer MS01++4, die auch relativ große Kupfer- und Kaptonlöcher hat, ohne eine Spannungserhöhung an der GEM-Folie die gewünschte Einzellageneffizienz. Eine optische Überprüfung der nicht verarbeiteten GEM-Folien

im Jahr 2000 zeigte, daß bei manchen GEM-Folien die Justierung der verschiedenen Masken bei der Produktion der GEM-Folie nicht stimmt. Durch diese Verschiebung ist die Geometrie der GEM-Löcher nicht die gewollte (Abb. 5.3). Dieser zusätzliche Einfluß kann für die eingebauten Detektoren nicht untersucht werden, ohne die Detektoren zu zerstören.

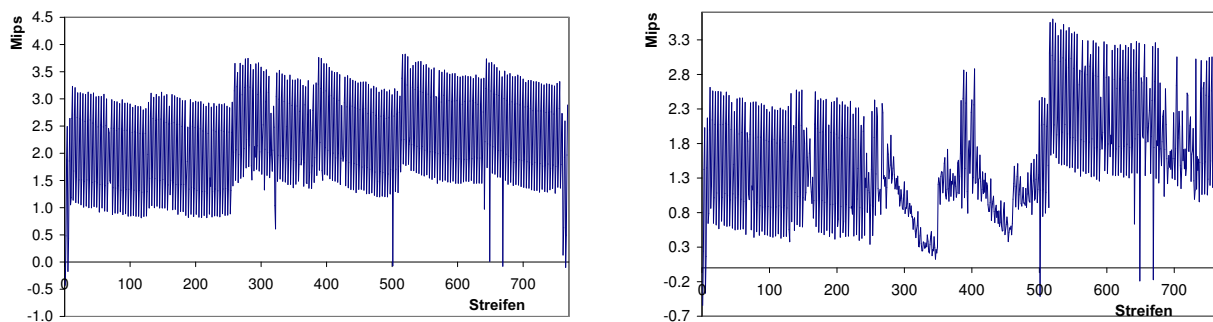
Nur etwa 16 der 64 GEM-MSGCs der Superlagen MS10 und MS13 zeigen die zu erwartenden Trefferverteilungen über den gesamten Detektor. Die restlichen Detektoren zeigen große Bereiche, in denen keine Teilchennachweise gefunden werden. In Abb. 7.8 ist von der Kammer MS10++1 die Treffer- und Rauschverteilung, die bei einer Datennahme Ende 2002 aufgenommen wurde, dargestellt. Im Bereich des zweiten PCBs (bei den Streifen 250 - 500) und im Bereich des letzten Chips (bei den Streifen 620 - 750) wurden signifikant weniger Treffer gefunden als erwartet. Im Gegensatz zu den Bereichen mit normaler Trefferbelegung zeigen die Treffer aus diesen Bereichen auch keine Korrelation zu Treffern aus benachbarten Kammern; die hier gefundenen Treffer sind also reines Rauschen. Die Kammer MS10++1 war bei HERA-B an einer Stelle montiert, wo sie leicht zugänglich ist. Die Kammer wurde während eines Zugangstages demontiert und anschließend gründlich untersucht.



**Abbildung 7.8:** Trefferverteilungs- und Rauschhistogramm der Kammer MS10++1, beim HERA-B-Betrieb 2002 aufgenommen.

Von dieser Kammer wurde kurz vor dem Einbau 2001 der Test mit den Testpulsen durchgeführt und gespeichert. In Abb. 7.9 ist das Ergebnis des Tests mit den Testpulsen kurz vor dem Einbau bei HERA-B 2001 (links) und nachdem die Kammer im Dezember 2002 demontiert wurde (rechts) dargestellt. Die Testpulsverteilung vor dem Einbau sieht bis auf ein paar wenige Einbrüche wie erwartet aus. Die Anodenstreifen 186, 501, 508, 649 und 669 sind produktionsbedingt unterbrochen, und die Streifen 322 und 655 produzierten während des Betriebs 2000 einen Kurzschluß. Alle diese Anodenstreifen wurden im Shutdown 2001 von der Auslese auf dem Auslesefanin abgetrennt. Nach dem Ausbau im Dezember 2002 zeigt die Testpulsverteilung an den Stellen, an denen keine Treffer bei HERA-B detektiert werden konnten, keine Testpulse, wie in Abb. 7.9 rechts zu sehen ist.

Durch den  $V_{fp}$ -Test (siehe Kap. 5.6.4), mit dem die Verbindung des MSGC-Substrats mit der Elektronik geprüft werden kann, konnte sichergestellt werden, daß die Anodenstreifen mit den Vorverstärkern des Chips verbunden sind. Die Testpulse verschwinden bei einem  $V_{fp}$ -Wert von 125 schon bei geringer Spannung. Eine Überprüfung mit dem Multimeter zeigt, daß die Anodenstreifen in dem Bereich, in dem die Kammer keine Treffer zeigt, untereinander eine sehr gut leitende elektrische Verbindung haben. Es konnte sichergestellt werden, daß der Kurzschluß



**Abbildung 7.9:** Verteilung der Testpulse nach Abzug der Grundlinie der Kammer MS10++1 vor dem Einbau im Jahr 2001 und nach dem Ausbau im Dezember 2002.

nicht im Chip oder auf dem PCB auftritt. Ein Test, bei dem bei einem funktionierenden Chip die Ausgänge an der Seite des MSGC-Substrats miteinander kurzgeschlossen wurden zeigt, daß die Testpulse dieser Anodenstreifen auf ähnliche Weise verschwinden.

Eine optische Kontrolle der Klebung zeigte, daß die Anodenstreifen und die Fanins richtig zueinander ausgerichtet sind, es aber elektrische Verbindungen der einzelnen Anodenstreifen durch den Kleber gibt. Da die Testpulse vor dem Einbau keine auffälligen Merkmale aufwiesen, bestand damals wahrscheinlich kein Kontakt zwischen den Anodenstreifen. Dieses Problem der Kurzschlüsse der Anodenstreifen ist bisher unverstanden und bedarf weiterer ausführlicher Tests.

Eine Überprüfung der Trefferverteilungen dieser Kammern zeigte, daß alle diese Kammern von Anfang an eine solche Trefferverteilung zeigen, allerdings können nur Aussagen über den Zeitraum etwa 2 Monate nach dem Einbau bei HERA-B gemacht werden, da in dem Zeitraum davor die Kammern konditioniert wurden und daher keine guten Detektorsignale geliefert haben. Dieses Phänomen der nicht zählenden Bereiche wird im Moment noch untersucht.

## Zusammenfassung des Aufbaus des inneren Spurkammersystem

Das innere Spurkammersystem wurde zusammen von Gruppen der Universitäten Heidelberg, Siegen und Zürich entwickelt und gebaut. Entwicklung und Durchführung von Testverfahren zur Sicherung der Detektorqualität während des Kammerbaus und beim Zusammenbau der Spurkammerstationen stellen einen wesentlichen Teil der vorliegenden Arbeit dar.

In Alterungstests, die parallel zum Anlaufen der Detektorproduktion durchgeführt wurden, stellte sich heraus, daß die GEM-MSGC sehr empfindlich gegenüber Alterungserscheinungen ist, die durch Verunreinigungen des Zählgases hervorgerufen werden. Als Konsequenz wurden die von vorneherein nach ihrem Alterungsverhalten ausgewählten Materialien vor dem Bau nochmals mehrere Stunden lang erhitzt, um ein Ausgasen und damit die Kontamination des fertigen Detektors so weit wie möglich zu verhindern.

Neben Gasalterung kann ein Detektor auch durch einen Kurzschluß in der GEM-Folie unbrauchbar gemacht werden. Daher wurden die GEM-Folien und fertige Detektoren während des Kammerbaus und beim Zusammenbau der Spurkammerstationen mehrfach auf Hochspannungsstabilität getestet. Anschließend wurden die fertigen Stationen vor ihrem Einbau über längere Zeit konditioniert. Diese Maßnahmen sollten sicherstellen, daß in das Experiment nur gut funktionierende Detektoren eingebaut wurden, da sowohl Reparatur als auch Austausch von im Betrieb beschädigten Detektoren nur sehr schwer möglich sind. Sowohl Auslese als auch Hochspannungsfestigkeit der fertiggestellten Stationen entsprachen nach dem Bau den Erwartungen.

Das innere Spurkammersystem wurde während der Datennahmeperiode 1999/2000 an mo-

natlichen Zugangstagen bei HERA-*B* eingebaut. Die größte Überraschung war, daß sie trotz der langen Konditionierungszeit während Kammerbau und -test nicht sofort mit ihren nominellen Betriebsspannungen zuverlässig betrieben werden konnten. Es stellte sich heraus, daß die Detektoren bei Strahlbetrieb über längere Zeit weiter konditioniert werden mußten, bevor ein stabiler Detektorbetrieb bei hinreichend großen Treffereffizienzen möglich war.

Um das Betriebsverhalten des inneren Spurkammersystems während der Datennahme zu überwachen, wurde ein Monitorprogramm implementiert, das Fehlverhalten online detektiert und dies der den Detektor bedienenden Schichtbesatzung sofort durch einen Alarm mitteilt.

Während der Pause im Strahlbetrieb wegen des Luminositäts-Upgrades von HERA wurden im Jahr 2001 alle Detektoren des inneren Spurkammersystems aus dem Experiment ausgebaut, umgebaut und repariert. Defekte Detektoren wurden ersetzt. Ein Teil der Detektoren erhielt neue Ausleseelektronik, und alle Detektoren wurden mit einem neu entwickelten Erdungsschema neu angeschlossen, das die Ausleseelektronik sehr viel unempfindlicher gegen Störungen von außen machte. Dadurch wurde es überhaupt erst möglich, den Triggerausgang der Ausleseelektronik zu verwenden; damit sollte das innere Spurkammersystem zum HERA-*B* FLT-Trigger beitragen. Die mit Hilfe des Monitorprogramms gewonnenen Erkenntnisse wurden beim Umbau dazu herangezogen, Defekte in den Kammern zu detektieren und das Arbeitsprogramm festzulegen.

Nach dem Umbau mußten die Detektoren wieder während des Strahlbetriebs konditioniert werden. Nach der Konditionierung stellte sich allerdings heraus, daß ein großer Teil derjenigen Detektoren, die mit neuer Elektronik ausgerüstet worden waren, großflächige Ineffizienzen aufwiesen und keine Teilchendurchgänge detektierten. Als Ursache hierfür stellte sich heraus, daß Gruppen von benachbarten Anodenstreifen untereinander kurzgeschlossen sind; der Grund für diese Kurzschlüsse, die erst nach den abschließenden Tests vor dem Einbau entstanden sein können, ist bisher noch nicht bekannt. Da dieser Defekt einen Großteil der für den FLT-Trigger umgebauten Detektoren betrifft, konnte das innere Spurkammersystem keinen Beitrag zum FLT-Liefen liefern. Die restlichen Detektoren konnten bei ausreichend hohen Treffereffizienzen über 90 % stabil und zuverlässig betrieben werden und trugen zur Datennahme bei.



## Teil II

# Studien zu einem Open-Charms-Trigger



# Kapitel 8

## Studien zu einem Open-Charm-Meson-Trigger

Bei der Schwerpunktsenergie von  $41,6 \text{ GeV}/c^2$  werden bei HERA-*B*  $c\bar{c}$ -Paare durch harte Streuprozesse mit einem Wirkungsquerschnitt von etwa  $28 \mu\text{b}/\text{Nukleon}$  erzeugt. Ein Teil dieser  $c\bar{c}$ -Paare erzeugt einen gebundenen Charmoniumzustand,  $J/\psi$ ,  $\psi'$  und  $\chi_c$ , der größte Teil erzeugt aber  $D\bar{D}$ -Mesonen. Die gemessenen Charmoniumwirkungsquerschnitte müssen daher auf den Gesamtwirkungsquerschnitt der  $c\bar{c}$ -Produktion normiert werden. Dieser hat aber für  $p$ - $A$ -Stöße und noch mehr für Stöße schwerer Ionen erhebliche Unsicherheiten. Ein wichtiges Ziel eines konsistenten Programms zur Messung der  $A$ -Abhängigkeit der Charmonium-Wirkungsquerschnitte wäre es daher, auch den Wirkungsquerschnitt für Open-Charm als Funktion von  $A$  und  $x_F$  zu messen. Die Möglichkeiten hierzu auszuleuchten und einen praktikablen Trigger hierfür zu finden ist Ziel dieses Teils der Arbeit. Der Open-Charm-Wirkungsquerschnitt ist um nahezu einen Faktor 1000 relativ zum totalen inelastischen  $p$ - $A$ -Wirkungsquerschnitt unterdrückt. Bei einer Targetrate von 5 MHz entspricht das zwar immer noch einer Charmerzeugungsrate von mehreren kHz, es ist aber schwer, diese relativ hohe Rate zu nutzen. Zum einen ist es schwierig, das Charmsignal in einem schnellen Trigger anzureichern. Zum anderen eignen sich nur wenige Zerfälle der  $D$ -Mesonen mit kleinen Verzweigungsverhältnissen zum Nachweis des Charmsignals. Zur schnellen Anreicherung von Charmzerfällen eignen sich nur zwei Beobachtungsgrößen:

1. Leptonen mit hohem Transversalimpuls aus semileptonischen Zerfällen
2. der Nachweis eines separierten Sekundärvertex.

Punkt 1 nutzt aus, daß  $D$ -Mesonen eine relativ hohe Masse haben und andere Quellen von Leptonen mit hohem Transversalimpuls selten sind. Punkt 2 nutzt aus, daß die  $D$ -Mesonen eine relativ lange Lebensdauer haben, die bei Fixed-Target-Experimenten zu Zerfallslängen von mehreren mm führen können. HERA-*B* hat mit seinem Triggersystem und dem guten Vertexdetektor die Möglichkeit, im FLT-Trigger auf ein Lepton zu triggern und dann im SLT-Trigger nach Sekundärvertices zu suchen. Eine effektive Triggerstrategie muß aber folgende Randbedingungen berücksichtigen:

1. die maximal nutzbare FLT-Triggerrate ist ca. 15 kHz, da bei höheren Raten sekundäre Totzeiten bei der Auslese der Daten auf dem Frontend bzw. beim Transfer der Daten zum SLT-Trigger auftreten.
2. Die Rechenzeit im SLT-Trigger ist begrenzt, aufwendige Berechnungen können daher nur für eine begrenzte SLT-Eingangsrate durchgeführt werden, die vom Filteralgorithmus abhängt.

3. Die SLT-Ausgangsrate ist begrenzt auf ca. 200 Hz. Der SLT-Trigger muß also die in allen Triggerstufen dominierenden Minimum-Bias-Ereignisse um einen ausreichend hohen Faktor reduzieren bei hoher Effizienz für die ausgewählten Zerfallskanäle der  $D$ -Mesonen.

Im Folgenden werden daher immer parallel  $D$ -Zerfälle und Minimum-Bias-Ereignisse<sup>1</sup> betrachtet und die Triggeralgorithmen darauf angelegt das Verhältnis vom  $D$ -Mesonsignal zu Untergrund zu optimieren, bei guter Effizienz für die  $D$ -Zerfälle. Im FLT-Trigger besteht die einzige Möglichkeit einer Signalanreicherung darin, auf ein Lepton mit einem hohen Transversalimpuls zu triggern. Die Erfahrungen bei HERA- $B$  zeigen, daß diese Leptontrigger (Elektron- und Myon) nur einen geringen Anteil echter Leptonen haben und vielmehr durch falsche Elektron- bzw. Myonsignaturen dominiert sind. Eine Verbesserung der LeptonenSignatur im Trigger ist für den Elektrontrigger möglich, indem zusätzlich zum Elektrontrigger noch ein Bremsstrahlungsphoton im Kalorimeter verlangt wird. Eine solche Möglichkeit ist in der Trigger-Hardware eingebaut. Simulationen ([Bru03]) haben gezeigt, daß dabei die Triggerrate um einen Faktor 8 reduziert wird und gleichzeitig aber das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis verbessert wird. Dieser Trigger ist interessant für Datennahmen, bei denen nicht nur auf Open-Charm- sondern auch auf Charmonium-Zerfälle getriggert wird. Im darauf folgenden SLT-Trigger wird zuerst das Lepton bis zum Targetdraht verfolgt. Danach wird ein Sekundärvertex gesucht, der deutlich vom Draht separiert ist und eine weitere Trennung von Signal zu Untergrund erlaubt. Dabei werden zwei verschiedene Triggerstrategien untersucht:

1. Es wird versucht, einen Sekundärvertex zu finden, der das Lepton enthält. Für echte  $D$ -Zerfälle entspricht das den Zerfällen  $D^0 \rightarrow e\nu K$  mit einem Zweispurvertex bzw.  $D^+ \rightarrow e\nu K\pi$  mit einem Dreispurvertex.
2. Es wird unabhängig vom Lepton ein separierter Dreispurvertex gesucht. Für  $D^\pm$  Zerfälle entspricht das den Zerfällen  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ .

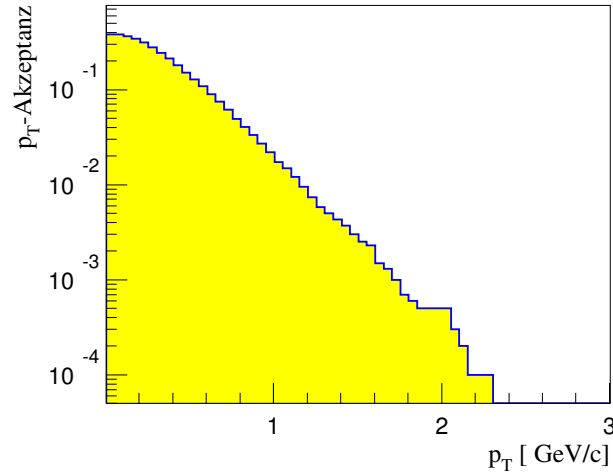
Die erste Strategie hat den Vorteil, daß eine Spur des Zerfalls (das Lepton) bereits durch den FLT-Trigger gefunden ist und das Auffinden einer bzw. zweier zusätzlicher Spuren einfacher ist, als einen Dreispurvertex neu zu finden. Offline würde dann einer der Zerfälle  $D^0 \rightarrow K\pi$  oder  $D \rightarrow K\pi\pi$  des zweiten  $D$ -Mesons gesucht. Der Charmenzustand, mit dem der  $c\bar{c}$ -Wirkungsquerschnitt gemessen wird, ist daher nicht eingeschränkt. In der 2. Strategie wird konsequent auf den Zerfall der  $D \rightarrow K\pi\pi$  gezielt, der den großen Vorteil hat, daß die Lebensdauer des  $D^\pm$ -Mesons 2,5 mal länger ist als die des  $D^0$ -Mesons. Im SLT-Trigger können daher bei diesem Zerfall hohe Verbesserungen des Signal-zu-Untergrund-Verhältnisses erreicht werden, ohne die Effizienz der  $D$ -Zerfälle drastisch zu beschneiden.

## 8.1 Benötigte FLT- und SLT-Triggerraten

Die FLT- und SLT-Triggerraten hängen von der Produktionswahrscheinlichkeit, der Detektorakzeptanz, der Triggereffizienz, der Rekonstruktionseffizienz und der Targetrate ab. In diesem Kapitel wird abgeschätzt, welche Ratenminimierung mit dem SLT-Trigger der  $D$ -Mesonen erreicht werden muß, damit der Trigger angewendet werden kann.

- Akzeptanz für das Elektron aus  $D$ -Mesonzerfall  $\varepsilon_{p_T(\text{Elektron})}$   
Für den semileptonischen Zerfall  $D^0 \rightarrow eX$  ist die Detektorakzeptanz der Elektron-Spur, die mit mindestens 6 Treffern im Vertexdetektor, 15 Treffern im Spurkammersystem und mit einem Treffer im ECAL nachgewiesen wurde, als Funktion des Schnittes auf den Transversalimpuls des Elektrons in Abb. 8.1 dargestellt.

<sup>1</sup>Minimum-Bias-Ereignisse werden mit einem Trigger aufgenommen, der möglichst wenige Anforderungen an die Ereignisse stellt (z.B. 20 Treffer im RICH).



**Abbildung 8.1:** Akzeptanz des Elektrons als Funktion des Transversalimpulsschnittes. Die geometrische Akzeptanz des Detektors ist berücksichtigt.

Die Akzeptanz  $\varepsilon_{p_T(\text{Elektron})}$  des Detektors für Elektronen mit einem Transversalimpuls von  $p_T(e) > 0,5 \text{ GeV}/c$  ist 15%. Für einen Transversalimpuls des Elektrons von  $p_T(e) > 0,6 \text{ GeV}/c$  ist die Akzeptanz 10%.

- ECAL Vortriggereffizienz  $\varepsilon_{ECAL}$   
Die Effizienz, mit der ein Elektron im ECAL einen Vortrigger auslöst, ist 71% [Med02].
- Bremsstrahlungseffizienz  $\varepsilon_{Brems}$   
Beim Durchgang durch Material können Elektronen Bremsstrahlphotonen aussenden. Durch eine Detektion von Bremsstrahlphotonen im elektromagnetischen Kalorimeter kann ein getriggertes Teilchen als Elektron identifiziert werden. Die Bedingung, zu einem Elektron ein Bremsstrahlphoton zu finden, reduziert die Triggerrate um einen Faktor 8 [Bru03]. Ein Schnitt auf das Bremsstrahlphoton kann verwendet werden, um die Ereignisrate zu reduzieren und dabei die Reinheit der selektierten Ereignisse zu erhöhen.
- FLT-Triggereffizienzen  $\varepsilon_{FLT}$   
Die FLT-Triggereffizienz, d.h. die Effizienz die Spur eines Elektrons im FLT-Trigger bis zum Beginn des Spurkammersystems zu verfolgen, ist  $\varepsilon_{FLT_{Spur}} = 0,6$  [Sch03].
- SLT-Triggereffizienz  $\varepsilon_{SLT}$   
Die SLT-Triggereffizienz, eine Spur, die vom FLT-Trigger getriggert wurde, auch im SLT-Trigger zu triggern, ist 0,91 [Nun03].

### SLT- und FLT-Triggereffizienz

Die einzelnen Triggereffizienzen sind in Tab. 8.1 noch einmal zusammengefaßt. Der Schnitt auf das Bremsstrahlphoton wird nur benötigt, wenn die FLT-Triggerrate zu hoch ist. Die Effizienz, ein Elektron mit dem FLT-Trigger anzureichern, ist ohne Bremsstrahlphoton  $42,6 \cdot 10^{-3}$ . Wird ein Bremsstrahlphoton verlangt, ist sie  $5,3 \cdot 10^{-3}$ .

### Die Reduktion der Minimum-Bias-Ereignisse

Bei einer Targetrate von 5 MHz ist die FLT-Triggerrate ca. 10 kHz also nahe der nutzbaren SLT-Triggereingangsrate. Die so selektierten Ereignisse sind immer noch überwiegend *MB*-Ereignisse, eine weitere Selektion der Ereignisse auf dem SLT-Trigger ist also nötig.

Elektronakzeptanz mit $p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$	$\varepsilon_{p_T(\text{Elektron})}$	0,10
ECAL Vortriggereffizienz	$\varepsilon_{ECAL}$	0,71
Bremsstrahleffizienz	$\varepsilon_{Brems}$	0,125
FLT-Triggereffizienz, ein Elektron zu triggern	$\varepsilon_{FLT}$	0,6
FLT-Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{FLT}$	$42,6 \cdot 10^{-3}$
SLT-Triggereffizienz, die FLT-Spur zu triggern	$\varepsilon_{SLT}$	0,91
Totale SLT- FLT-Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{tot}$	$38,8 \cdot 10^{-3}$
FLT-Triggereffizienz mit Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{FLT}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
SLT-Triggereffizienz, die FLT-Spur zu triggern	$\varepsilon_{SLT}$	0,91
Totale SLT- FLT-Triggereffizienz mit Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{tot}$	$4,85 \cdot 10^{-3}$

**Tabelle 8.1:** Effizienz der FLT- und SLT-Trigger

Targetrate		5,0 MHz
Vortriggerrate		2,2 MHz
Reduktionsfaktor des FLT-Triggers		200
FLT-Ausgangsrate ohne Bremsstrahlphoton		11 kHz
SLT-Triggereffizienz, die FLT-Spur zu triggern	$\varepsilon_{SLT}$	0,91
SLT-Ausgangsrate ohne Bremsstrahlphoton		10 kHz
FLT-Ausgangsrate mit Bremsstrahlphoton		1,38 kHz
SLT-Triggereffizienz, die FLT-Spur zu triggern	$\varepsilon_{SLT}$	0,91
SLT-Ausgangsrate mit Bremsstrahlphoton		1,25 kHz

**Tabelle 8.2:** Ausgangsraten aus dem FLT- und SLT-Trigger, mit und ohne Schnitt auf ein Bremsstrahlphoton im FLT-Trigger

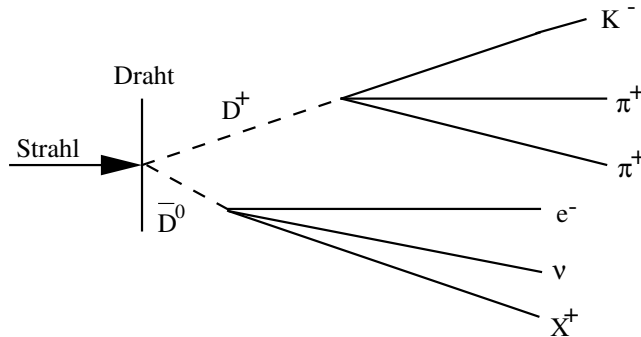
Der SLT-Trigger kann eine FLT-Triggerrate von etwa 10 kHz verarbeiten, ohne Rechenzeitprobleme zu bekommen. Die Triggerrate ohne Bremsstrahlschnitt ist 11 kHz. Wird nur ein Open-Charm-Trigger alleine verwendet, ist die Reduktion des FLT-Triggers gerade ausreichend, wird der Open-Charm-Trigger parallel zu einem anderen Trigger verwendet, muß die Rate des FLT-Triggers reduziert werden. Ein zusätzlicher Schnitt auf ein Bremsstrahlphoton im elektromagnetischen Kalorimeter ermöglicht eine FLT-Triggerrate von 1,38 kHz. Die SLT-Trigger-Ausgangsrate sollte nicht größer als 200 Hz sein, da von einer höheren Rate ab nicht mehr alle Ereignisse gespeichert werden können. Die benötigte Reduktion des Open-Charm-Triggers ist also für einen FLT-Ausgangsrate ohne Bremsstrahlschnitt ein Faktor 50.

## 8.2 Zerfallslängen der betrachteten $D$ -Mesonen

$D$ -Mesonen, die ein  $d$ - oder  $\bar{d}$ -Quark enthalten, sind  $D^+$ - oder  $D^-$ -Mesonen, Mesonen mit einem  $u$ - oder  $\bar{u}$ -Quark sind  $D^0$ - oder  $\bar{D}^0$ -Mesonen. Die  $D^+$  und  $D^-$ -Mesonen, sowie die  $D^0$  und  $\bar{D}^0$ -Mesonen unterscheiden sich jeweils nur durch Ladungskonjugation voneinander, daher werden im weiteren nur die  $D^0$ -oder  $D^+$ -Mesonen betrachtet. Das  $D^+$  zerfällt in 9,1 % der Fälle in  $K^-\pi^+\pi^+$  und in 34 % der Fälle in einen Endzustand mit einem Lepton. Das  $D^0$ -Meson zerfällt in 3,8 % der Fälle in ein  $K^-\pi^+$  und in 13,3 % der Fälle in einen Endzustand mit einem Lepton.

Da die  $D$ -Mesonen nur durch schwache Wechselwirkung zerfallen, haben sie eine relativ große Lebensdauer. Durch den Lorentzboost, der durch die Strahlenergie von 920 GeV hervorgerufen

wird, ergibt sich bei HERA- $B$  eine mittlere Zerfallslänge der  $D$ -Mesonen von einigen mm. Der Zerfall eines produzierten  $D^+/D^0$ -Mesonpaares ist schematisch in Abb. 8.2 dargestellt. Da das  $D^+$ -Meson eine 2,5-fach größere Lebensdauer hat als das  $D^0$ -Meson, ist die mittlere Zerfallslänge des  $D^+$ -Meson erheblich größer als die des  $D^0$ -Mesons, es ist dadurch besser geeignet, Open-Charm-Ereignisse anzureichern.

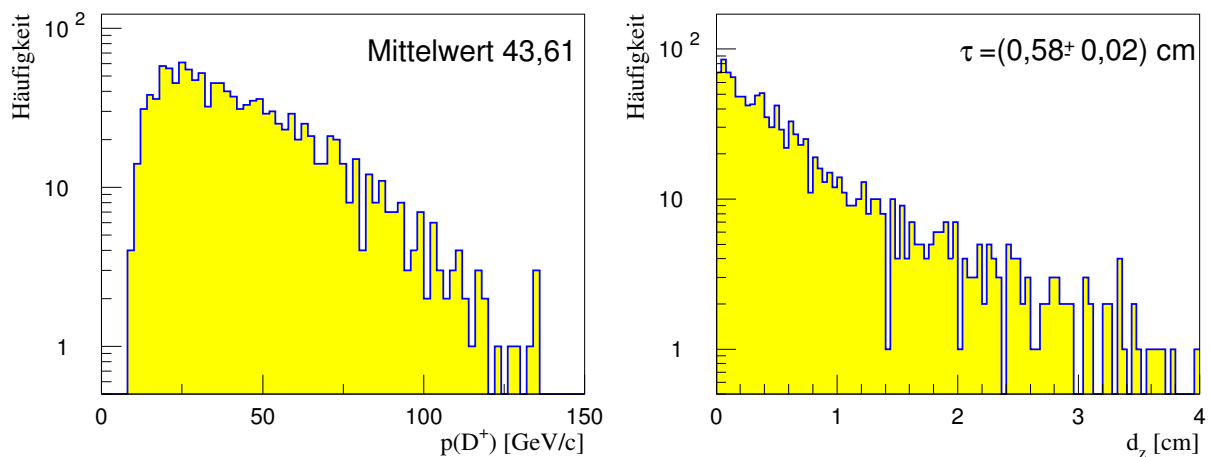


**Abbildung 8.2:** Schematische Darstellung der Zerfälle von  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  und  $D^0 \rightarrow e^- \nu X$ .

In den folgenden zwei Abschnitten wird anhand einer Monte-Carlo-Simulation untersucht, wie sich Lorentzboost und Detektorakzeptanz auf die Zerfallslängenverteilung der nachweisbaren  $D$ -Mesonen auswirkt.

### 8.2.1 Das $D^+$ -Meson

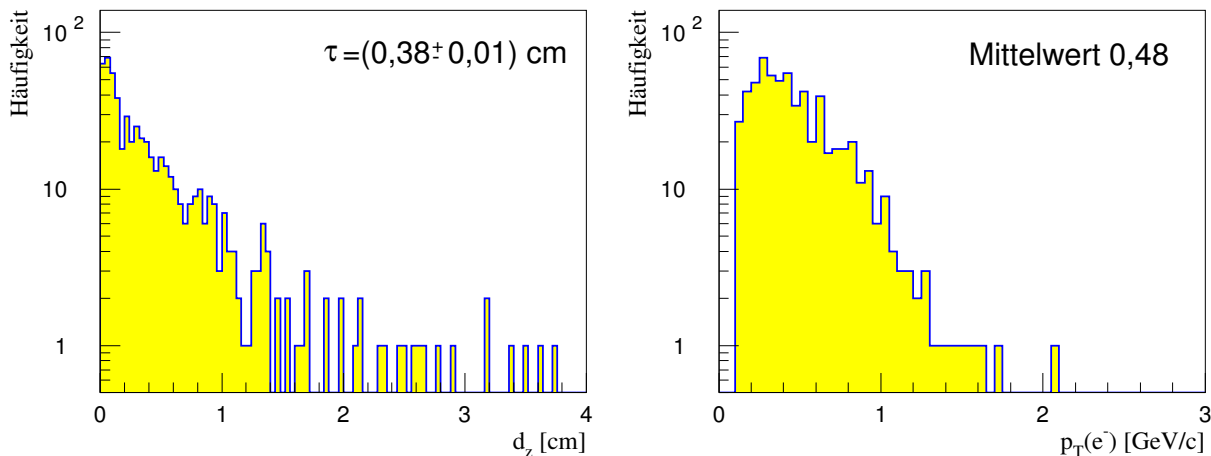
Das  $D^+$ -Meson hat eine Masse von  $m_{D^+} = 1,87 \text{ GeV}/c^2$  und eine Lebensdauer von  $\tau_{D^+} = 1,05 \text{ ps}$  [H<sup>+</sup>02]. Der Impuls der in der Simulation akzeptierten  $D^+$ -Mesonereignisse ist in Abb. 8.3 (links) dargestellt. Im Mittel haben die generierten  $D$ -Mesonen einen Impuls von  $43,61 \text{ GeV}/c$ . Rechts in Abb. 8.3 ist der Abstand ( $d_z$ ) in  $z$ -Richtung des Sekundärvertices vom Produktionsvertex auf dem Draht dargestellt. Die mittlere Zerfallslänge der im Detektor nachweisbaren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle ist  $0,58 \text{ cm}$ . Teilchen, die im HERA- $B$ -Detektor nachweisbar sind, müssen mit mindestens 6 Treffern im Vertexdetektor und mit mindestens 15 Treffern im Spurkammersystem nachgewiesen werden.



**Abbildung 8.3:**  $D^+$ -Meson: links ist der Impuls der generierten und im Detektor nachweisbaren  $D^+$ -Mesonen dargestellt, rechts ist die Verteilung des Abstandes  $d_z$  in  $z$ -Richtung des Sekundärvertices vom Primärvertex dargestellt.

### 8.2.2 Das $D^0$ -Meson

Das  $D^0$ -Meson hat eine Masse von  $m_{D^0} = 1,86\text{GeV}/c^2$  und eine Lebensdauer von  $\tau_{D^0} = 0,4\text{ ps}$  [H<sup>+</sup>02]. Das  $D^0$ -Meson zerfällt hadronisch oder semileptonisch. In dieser Studie wird nur der Fall betrachtet, in dem das  $D^0$ -Meson semileptonisch zerfällt, da auf das Lepton aus dem  $D^0$ -Mesonzerfall mit dem FLT-Trigger getriggert werden soll. Der  $z$ -Abstand der Monte-Carlo-generierten  $D^0$ -Mesonen und der Transversalimpuls der erzeugten Leptonen sind in Abb. 8.4 dargestellt. Hier werden nur Ereignisse betrachtet, in denen das Lepton im Vertexdetektor mit mindestens 6 Treffern, im Spurkammersystem mit mindestens 15 Treffern und mit einem Treffer im ECAL nachgewiesen wird.



**Abbildung 8.4:**  $D^0$ -Meson: links ist die Verteilung des  $z$ -Abstandes vom Primärvertex dargestellt. Rechts ist die Transversalimpulsverteilung  $p_T$  des Elektrons dargestellt.

Die mittlere Zerfallslänge der generierten  $D^0$ -Mesonen ist 3,8 mm. Das Lepton hat im Mittel einen Transversalimpuls von 483 MeV/ $c$ . Der FLT-Trigger schneidet implizit durch die Detektorakzeptanz für Myonen und explizit durch einen Schnitt auf die Transversalenergie  $E_T$  von Elektronen im ECAL, auf einen Transversalimpuls  $\approx 0,6\text{ GeV}/c$  der Leptonen. Um  $D^0$ -Mesonzerfälle durch den FLT-Trigger bei akzeptabler Effizienz anzureichern, sollte der Transversalimpulsschnitt so niedrig wie möglich sein. Im weiteren werden semileptonische  $D$ -Mesonzerfälle betrachtet, bei denen das Lepton mindestens einen Transversalimpuls von  $0,6\text{ GeV}/c$  hat.

Da die Akzeptanzen für Zwei- und Dreiteilchenzerfälle nicht gleich sind, ist das Verhältnis der Zerfallslängen der rekonstruierbaren  $D^0$  und  $D^+$ -Zerfälle nicht das gleiche wie das Verhältnis der Lebensdauern  $c\tau_{D^0}$  und  $c\tau_{D^+}$ .

## 8.3 Verwendete Simulationen

Zur Untersuchung der Unterdrückung von Minimum-Bias-Ereignissen ( $MB$ ) gegenüber dem  $D$ -Mesonzerfall wurden jeweils 10000 Ereignisse generiert. In jedem der 10000 Ereignisse werden der betrachtete  $D$ -Mesonzerfall und ein möglicher Zerfall des anderen erzeugten  $D$ -Mesons, sowie die anderen zum Ereignis gehörenden Teilchen generiert. Die zwei generierten  $D$ -Mesonzerfälle können unabhängig voneinander behandelt werden, da die Akzeptanzen der zwei Zerfälle faktorisieren. Bei der Monte-Carlo-Generation wurde die HERA- $B$ -Detektorgeometrie aus der Runperiode 2000 und der innere Kohlenstoffdraht auf der zweiten Targetstation genutzt. Es werden genauer die Zerfälle  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ ,  $D^+ \rightarrow e^+ \nu K^- \pi^+$  und  $\bar{D}^0 \rightarrow e^- \nu_e X$  betrachtet. Bei den



semileptonischen Zerfällen wurden nur Ereignisse generiert, bei denen das Lepton mindestens einen Transversalimpuls von  $0,5 \text{ GeV}/c$  hat.

Die einzelnen Bedingungen, die an die verschiedenen Simulationen gestellt wurden, sind in Tab. 8.3 gezeigt.

Simulationen	im ganzen Detektor	im Vertexdetektor	Ereignisse
	Treffer <sub>VDS</sub> > 5, Treffer <sub>Tracker</sub> > 15	Treffer <sub>VDS</sub> > 5	
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	$K^- \pi^+ \pi^+$		1248
$D^+ \rightarrow e^+ \nu_e K^- \pi^+$	$e, p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$	$K^- \pi^+$	2801
$D^+ \rightarrow e^+ \nu_e X$	$e, p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$	ein Teilchen	4061
$D^0 \rightarrow e^+ \nu_e X$	$e, p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$	ein Teilchen	1778
$MB$			9959
$MB_{\text{Elektron}}$	ein Teilchen, $p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$		9959

**Tabelle 8.3:** Untersuchte Simulationen. Spuren, die im ganzen Detektor nachgewiesen werden, müssen mit mindestens 6 Treffern im Vertexdetektor und 15 Treffern im Spurkammersystem nachgewiesen werden. Spuren, die nur im Vertexdetektor nachgewiesen werden, müssen mindestens 6 Treffer haben. Elektronen aus den  $D$ -Mesonzerfällen müssen zusätzlich mit mindestens einem Treffer im ECAL nachgewiesen werden.

Bei dem Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  werden nur Ereignisse betrachtet, in denen alle drei geladenen Spuren des Zerfalls im Detektor nachweisbar sind. Hierzu wird verlangt, daß die Spuren durch den Vertexdetektor und durch das Spurkammersystem verlaufen, so daß Richtung und Impuls der Zerfallsspur rekonstruiert werden können. Eine Spur, die durch den Vertexdetektor verläuft, muß mit mehr als 5 Treffern auf der Spur im Vertexdetektor detektiert werden; eine Spur, die durch das Spurkammersystem verläuft, muß dort mit mindestens 15 Treffern detektiert werden. Im  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Monte-Carlo werden nur in 1248 der 10000 generierten Ereignisse alle drei Zerfallsprodukte des  $D^+$ -Mesons im Detektor nachgewiesen.

Beim  $D^+ \rightarrow e^+ \nu_e K^- \pi^+$ -Monte-Carlo werden nur Ereignisse verwendet, bei denen das Positron durch den ganzen Detektor verläuft, dort nachgewiesen wurde, und die anderen zwei geladenen Spuren zumindest im Vertexdetektor nachgewiesen werden. Die Spur des Positrons muß neben den oben erwähnten Kriterien für Spuren, die durch den ganzen Detektor verlaufen, auch einen Treffer im ECAL hinterlassen und einen Transversalimpuls von mindestens  $0,6 \text{ GeV}/c$  haben. Die zwei anderen geladenen Teilchen müssen Spuren im Vertexdetektor, die mit mehr als fünf Treffern auf der Spur nachgewiesen werden, hinterlassen. Nach diesen Spurkriterien werden 2801 der 10000 generierten Ereignisse für die weitere Analyse verwendet.

Bei den  $D^+ \rightarrow e^+ \nu_e X$ - und  $D^0 \rightarrow e^+ \nu_e X$ -Monte-Carlo werden nur Ereignisse verwendet, bei denen das Positron genau wie beim  $D^+ \rightarrow e^+ \nu_e K^- \pi^+$ -Zerfall nachgewiesen werden kann und mindestens ein anderes Teilchen des Zerfalls mindestens 6 Treffer im Vertexdetektor hat. Beim  $D^+ \rightarrow e^+ \nu_e X$ -Monte-Carlo werden 4061 Ereignisse verwendet, und beim  $D^0 \rightarrow e^+ \nu_e X$ -Monte-Carlo werden 1778 Ereignisse weiter verwendet.

In der  $MB$ -Simulation werden Ereignisse, die ein  $c$ - oder  $b$ -Quark enthalten, verworfen und nicht weiter betrachtet; nach diesem Kriterium bleiben noch 9959 der 10000  $MB$ -Ereignisse übrig. Wird die  $MB$ -Simulation ( $MB_{\text{Elektron}}$ ) mit den semileptonischen  $D$ -Mesonzerfällen verglichen, muß ein Teilchen im Vertexdetektor und im Spurkammersystem nachgewiesen werden und einen Transversalimpuls von mindestens  $0,6 \text{ GeV}/c$  haben. Alle 9959 Ereignisse der  $MB$ -Simulation haben mindestens eine Spur, die im ganzen Detektor nachgewiesen werden kann.

Zwei unterschiedliche Triggerstrategien werden weiterhin genauer untersucht.

1. semileptonischer  $D$ -Mesonzerfall, Elektron wird im FLT-Trigger getriggert abgesetzter Sekundärvertex im SLT-Trigger mit diesem Elektron
2. semileptonischer  $D$ -Mesonzerfall, Elektron wird im FLT-Trigger getriggert abgesetzter Dreiteilchenvertex aus dem Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  im SLT-Trigger

## 8.4 Der Sekundärvertex

Zur Bestimmung des Sekundärvertex wird die Methode des „kleinsten Abstands einer Spur zu einem Punkt“ [Sch01] verwendet. Der kleinste Abstand  $d_{min}$  einer Spur zu einem Punkt  $\vec{r}$  ist gegeben durch:

$$d_{min}^2 = (\vec{r} - \vec{s})^2 - [(\vec{r} - \vec{s}) \cdot \vec{n}]^2 \quad (8.1)$$

wobei  $\vec{s}$  ein beliebiger Punkt auf der Spur und  $\vec{n}$  der Einheitsvektor in Richtung der Spur ist. Im allgemeinen treffen sich mehrere Spuren nicht genau in einem Punkt. Daher wird der Punkt im Raum gesucht, bei dem die Summe aller Abstandsquadrate minimal wird. Der beste Fit mehrerer Spuren  $i = 1, \dots, N$  für diesen Punkt ist:

$$\vec{r} = \left( \sum_{i=1}^N (\mathbb{1} - \vec{n}_i \vec{n}_i^T) \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^N (\mathbb{1} - \vec{n}_i \vec{n}_i^T) \vec{s}_i \right). \quad (8.2)$$

Hierbei bezeichnet  $\mathbb{1}$  die Einheitsmatrix und  $\vec{n}_i, \vec{n}_i^T$  die Matrix, die sich wie folgt ergibt:

$$(n_i n_i^T)_{kl} = n_{ik} \cdot n_{il}.$$

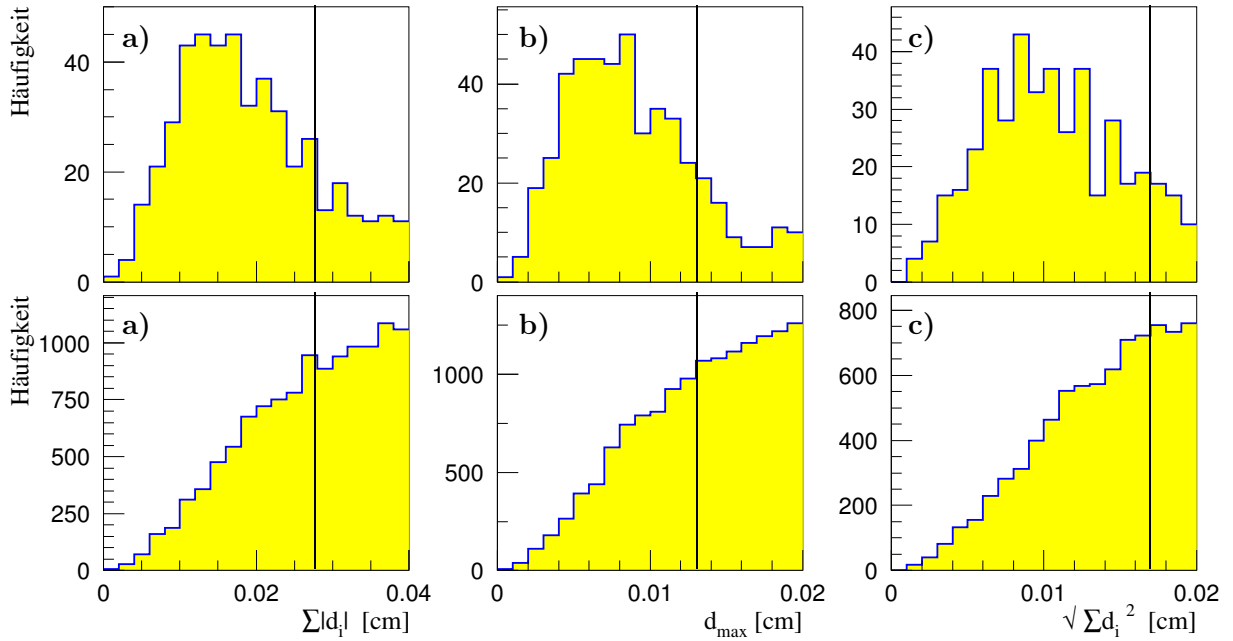
Wird diese Methode auf beliebige drei Spuren angewendet, ergibt sich immer ein Punkt, der nicht zwangsläufig ein Dreiteilchenzerfall ist. Daher müssen die Abstände der Spuren zu diesem Vertex als Qualitätskriterium für den Vertex herangezogen werden. Es gibt mehrere unterschiedliche Möglichkeiten, die Qualität des so erhaltenen Vertex zu bestimmen. Hier werden drei unterschiedliche Möglichkeit betrachtet:

- |  |  |
|--|--|
| a) Schnitt auf die Summe der drei Abstände:                  | $\sum_{i=1}^3  d_i $                   |
| b) Schnitt auf den Abstand der Spur mit dem größten Abstand: | $d_{max}$                              |
| c) Schnitt auf die Wurzel der Summe der Abstandsquadrate:    | $d_{vtx} := \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2}$ |

### 8.4.1 Sekundärvertex beim $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall, Dreiteilchenvertex

Mit Hilfe der  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ - und  $MB$ -Simulation wird der beste Schnitt auf die Qualität des Dreiteilchenvertex ermittelt. Dabei soll als Unterscheidungskriterium die Unterdrückung von  $MB$ -Ereignissen bei festgehaltener Effizienz für wahre  $D^+$ -Zerfälle dienen. Die wahren Zerfallsprodukte des  $D^+$ -Mesons kommen aus einem Vertex. Bei rekonstruierten Spursegmenten aus dem Vertexdetektor ist der Vertex durch die Rekonstruktion etwas verschmiert. In der  $MB$ -Simulation werden sehr wenige Teilchen, die in drei weitere Teilchen zerfallen, produziert, daher kommen fast alle Vertices, die durch die Gl. 8.2 gefunden werden, direkt von Spuren aus dem Primärvertex oder von Spuren, die sich sehr nahe kommen.

Die Verteilungen der drei betrachteten Möglichkeiten für Schnitte auf die Güte des Sekundärvertex sind für 0,5 cm vom Draht abgesetzte Sekundärvertices für den  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall (oben) und für die  $MB$ -Simulation (unten) in Abb. 8.5 dargestellt. In der linken Spalte ist die Verteilung der „Summe der drei Abstände“, in der mittleren Spalte die Verteilung des „Abstands der Spur mit dem maximalen Abstand“ und in der rechten Spalte ist die Verteilung der „Wurzel



**Abbildung 8.5:** (a) Verteilung der „Summe der Abstände“; (b) Abstand der Spur mit dem maximalen Abstand; (c) „Wurzel der Summe der Abstandsquadrate“  $d_{vtx}$ . In der oberen Reihe sind die Verteilungen dargestellt für wahre  $D^+$ -Mesonzerfälle, in der unteren Reihe für Spuren der  $MB$ -Simulation, die sich sehr nahe kommen. Der ermittelte Vertex hat in allen Verteilungen mindestens einen Abstand von 0,5 cm vom Draht. Die Schnitte, bei denen etwa 2/3 der  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle detektiert werden, sind in allen Histogrammen eingezeichnet.

der Summe der Abstandsquadrate“ dargestellt. Obwohl bei den  $D^+$ -Mesonzerfällen alle Spuren vom selben Vertex kommen, sind die Abstände der rekonstruierten Vertexdetektor-Spursegmente zu diesem Vertex zum Teil sehr groß.

Von den ursprünglich 1292  $D^+$ -Mesonzerfällen, die im Vertexdetektor nachgewiesen werden können, haben 596 einen separierten Vertex von mindestens 0,5 cm. Für den Fall, daß etwa 2/3 der  $D^+$ -Mesonzerfälle den Vertexschnitt erfüllen, ist der angewandte Schnitt und die Anzahl der  $MB$ -Vertices, die den gleichen Vertexschnitt erfüllen würden, in Tab. 8.4 aufgelistet.

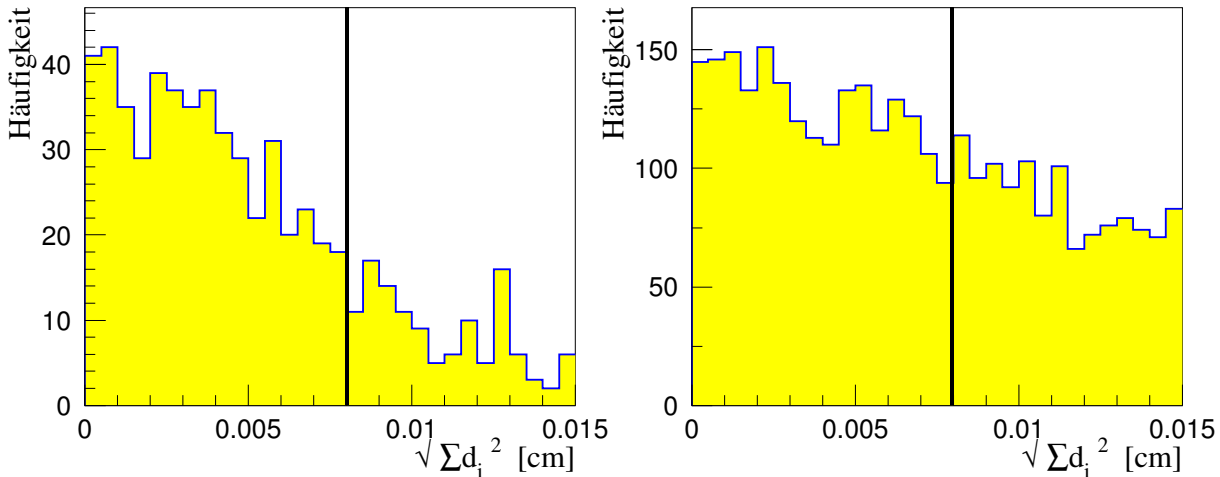
Methode	$\sum_i  d_i $	$d_{max}$	$\sqrt{\sum_i d_i^2}$
Schnitt	0,28 mm	0,13 mm	0,17 mm
$D^+$	406	411	398
$MB$	5883	6179	5734
$D^+/MB$ [%]	6,90	6,65	6,94

**Tabelle 8.4:** Anzahl der Triplets, die den angegebenen Schnitt auf die drei verschiedenen Qualitätskriterien auf den Sekundärvertex erfüllen. 2/3 der  $D^+$ -Mesonzerfälle erfüllen die aufgeführten Vertexschnitte.

Die Methode „Wurzel der Summe der Abstandsquadrate“ ist leicht besser als die Methode der „Summe der Abstände“. Auf den maximalen Abstand zum Vertex zu schneiden läßt bei etwa gleich viel gefundenen  $D^+$ -Mesonen mehr  $MB$ -Ereignisse zu und ist damit schlechter als die ersten beiden Methoden. In der weiteren Analyse wird die Methode der „Wurzel der Summe der Abstandsquadrate“ für den Dreiteilchenvertex verwendet, um auf die Güte des Vertex zu schneiden. Dabei wird auf  $d_{vtx} < 0,17$  mm geschnitten.

### 8.4.2 Sekundärvertex beim $D^0 \rightarrow e^+\nu_e X$ -Zerfall

Bei einem Vertex aus zwei Teilchen sind die drei betrachteten Qualitätskriterien äquivalent, da der Vertex immer genau in der Mitte zwischen den Spuren ist. Als Qualitätsschnitt wird die „Wurzel der Summe der Abstandsquadrate“ verwendet. In Abb. 8.6 ist für den Zerfall  $D^0 \rightarrow e^+\nu_e X$  und die *MB*-Simulation die Verteilung der „Wurzel der Summe der Abstandsquadrate“ für 0,3 cm vom Draht entfernte Sekundärvertices dargestellt. Bei der  $D^0 \rightarrow e^+\nu_e X$ -Simulation werden nur Ereignisse verwendet, bei denen das Positron einen Transversalimpuls von mindestens 0,6 GeV/c hat<sup>2</sup>. Bei einem Schnitt von  $d_{vtx} = 0,08$  mm werden 2/3 der  $D^0 \rightarrow e^+\nu_e X$ -Zerfälle durch den



**Abbildung 8.6:** „Wurzel der Summe der zwei Abstandsquadrate“  $d_{vtx}$  für Zweiteilchen-Sekundärvertices. Links ist die Verteilung dargestellt für wahre  $D^0$ -Mesonzerfälle, rechts für Sekundärvertices der *MB*-Simulation. Es werden nur Vertices betrachtet, die mindestens einen Abstand  $d_z > 0,3$  cm haben. Der Schnitt, bei dem etwa 2/3 der  $D^0 \rightarrow e^+\nu X$ -Zerfälle detektiert werden, ist in beiden Histogrammen eingezeichnet.

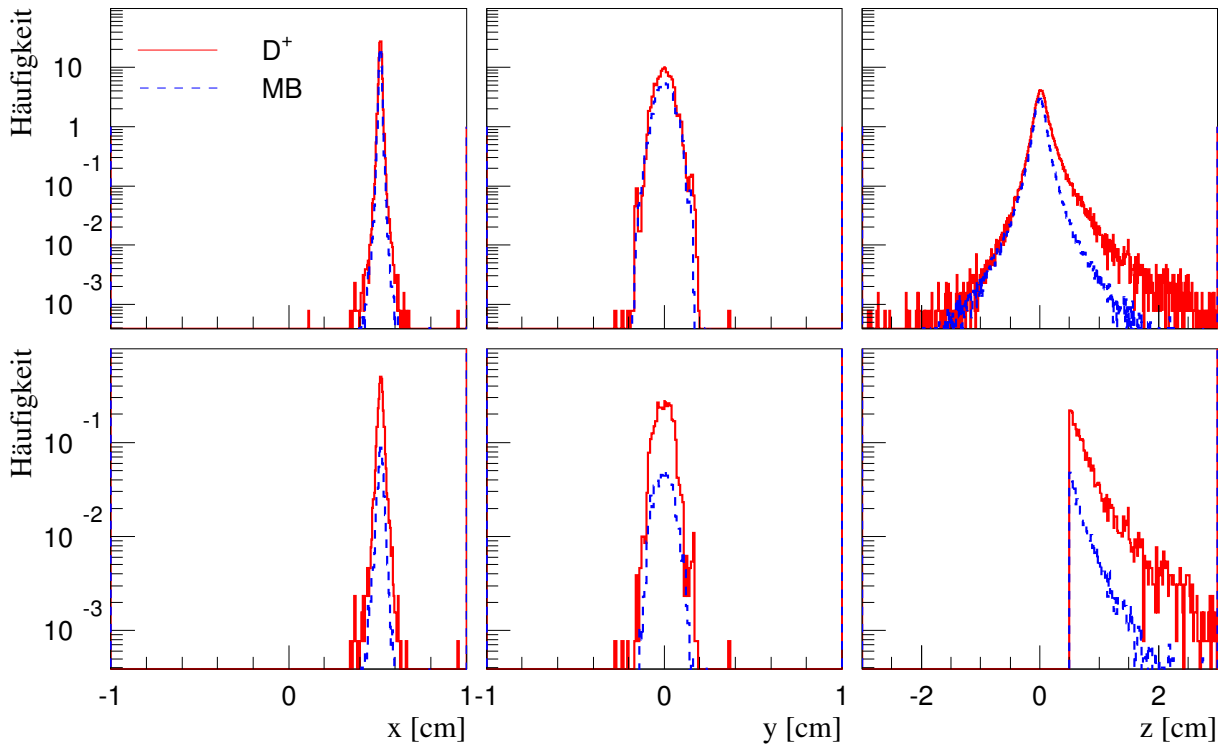
Schnitt auf die Güte des Sekundärvertex nachgewiesen. In der weiteren Analyse wird dieser Schnitt verwendet, um auf Zweiteilchenvertices zu schneiden.

### 8.4.3 Abstand des Sekundärvertex zum Draht

Die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Position der gefundenen Dreiteilchenvertices sind in Abb. 8.7 sowohl für die  $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ - wie für die *MB*-Simulation dargestellt. In der oberen Zeile sind die Verteilungen dargestellt für Spuren, die einen Vertex haben, bei dem  $d_{vtx} < 0,17$  mm ist und in der unteren Zeile sind die Verteilungen dargestellt für Vertices, die zusätzlich einen Abstand vom Draht von  $d_z > 0,5$  cm haben. In der oberen Zeile sind die Positionen der Vertices durch direkt am Draht erzeugte Teilchen dominiert. Daher zeigen alle drei Verteilungen ein scharfes Maximum am Draht. Durch Meßfehler der Spurparameter können Vertices in Protonflugrichtung vor dem Draht möglich sein. Abgesehen von der experimentellen Auflösung der Vertices des Vertexdetektors können sich durch die Extrapolation der rekonstruierten Vertexdetektorsegmente bei der Bestimmung des Vertex Spursegmente, die nicht zueinander gehören, in Protonstrahlrichtung vor dem Drahttarget schneiden, diese Vertices entsprechen im Monte-Carlo keinem realen Vertex<sup>3</sup>. Die Position des (vertikalen) Drahtes ist in der Simulation auf  $x = +2$  cm gesetzt worden. Alle Verteilungen wurden auf die Anzahl der verwendeten Ereignisse normiert. Da es

<sup>2</sup>Generiert wurden nur Ereignisse, bei denen das Lepton einen Transversalimpuls von mindestens 0,5 GeV/c hat.

<sup>3</sup>In Daten sind zusätzlich reelle Vertices in Protonstrahlrichtung vor dem Target durch eine Wechselwirkung des Protonstrahls mit Restgasteilchen in der Strahlröhre möglich.



**Abbildung 8.7:**  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Verteilung der gefundenen Dreiteilchenvertices. Gestrichelt sind die Verteilungen dargestellt für Triplets in  $MB$ -Ereignissen, die durchgezogene Linie zeigt die Verteilung für die  $D^+$ -Mesonsimulation. In der oberen Reihe sind die Verteilungen dargestellt für alle guten Vertices mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm. In der unteren Reihe sind die Verteilungen dargestellt für gute Vertices, die mindestens 0,5 cm in  $z$ -Richtung vom Primärvertex abgesetzt sind. Die Verteilungen sind auf die Anzahl der Ereignisse normiert, es sind pro Ereignis mehr Triplets als eines möglich.

pro Ereignis im Mittel mehrere Triplets gibt, ist das Integral der Verteilung größer als 1. Die Verteilungen der Vertices, wenn kein abgesetzter Vertex verlangt wird, sind für die beiden Simulationen sehr ähnlich und die Anzahl der Vertices pro Ereignis stimmt für beide Simulationen gut überein. Aus der  $MB$ -Verteilung der  $z$ -Position für nicht vom Target abgesetzte Vertices kann die  $z$ -Auflösung des Vertexdetektors für Dreiteilchenvertices bestimmt werden, da diese Vertices von primär am Target produzierten Teilchen stammen. Bei der  $D^+$ -Meson-Simulation werden mehr Vertices bei größerem  $z$ -Abstand gefunden als beim  $MB$ -Monte-Carlo, was von der langen Lebensdauer der  $D^+$ -Mesonen vor dem Zerfall stammt.

#### 8.4.4 Zusammenfassung der Suche nach Sekundärvertices

Durch einen Qualitätsschnitt auf den Sekundärvertex und dadurch, daß ein vom Target abgesetzter Mehrteilchenvertex verlangt wird, können  $D$ -Mesonen angereichert werden. Bei Dreiteilchen-Sekundärvertices ist ein Schnitt auf die „Wurzel der Abstandsquadrate“ von  $d_{vtx} < 0,17$  mm ausreichend, um  $2/3$  der wahren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle zu behalten. Bei Zweiteilchen-Sekundärvertices wird ebenfalls ein Schnitt auf die „Wurzel der Abstandsquadrate“ verwendet, dabei ist ein Schnitt bei  $d_{vtx} < 0,08$  mm ausreichend, um noch  $2/3$  der  $D^0 \rightarrow e^+ \nu_e X$  zu detektieren.

Ein Schnitt auf den  $z$ -Abstand des Sekundärvertex vom Primärvertex auf dem Draht sollte unterschiedlich sein für  $D^+$ - und  $D^0$ -Mesonen, da die  $D^+$ -Mesonen durch ihre längere Lebensdauer weiter durch den Detektor laufen, bevor sie zerfallen.

## 8.5 Triggerszenario: Leptontrigger mit abgesetztem Lepton-Sekundärvertex

Der FLT-Trigger von HERA-*B* ist darauf ausgelegt, Ereignisse anzureichern, in denen Leptonen enthalten sind, die bis in die Nähe des Drahttargets verfolgt werden können. Diese Leptonen können direkt am Target produziert worden sein oder von Teilchen stammen, die in der Nähe des Targets semileptonisch zerfallen. Manche der *D*-Mesonen zerfallen semileptonisch mit weiteren geladenen Teilchen, die im Detektor nachgewiesen werden können. In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit die Selektion von Leptonen aus einem vom Target abgesetzten Mehrteilchenvertex geeignet ist, Open-Charm-Ereignisse anzureichern. Da semileptonische Zerfallskanäle nicht geeignet sind die invariante Masse der Mesonen zu bestimmen, wird hier der Fall untersucht, bei dem das eine *D*-Meson semileptonisch zerfällt und das andere *D*-Meson entweder ein geladenes Meson ist und in  $K\pi\pi$  zerfällt, oder ein ungeladenes *D*-Meson ist und in  $K\pi$  zerfällt.

Die schon in Kap. 8.3 aufgeführten semileptonischen Zerfälle der *D*-Mesonen werden für die weitere Analyse verwendet. Es werden nur solche Ereignisse verwendet, in denen das Elektron einen Transversalimpuls von  $0,6 \text{ GeV}/c$  hat und im ganzen Detektor nachgewiesen werden kann; dazu muß die Spur mit mindestens 6 Treffern im Vertexdetektor, mindestens 15 Treffern im Spurkammersystem und mindestens 1 Treffer im ECAL nachgewiesen werden, und mindestens eine weitere Spur des *D*-Mesonzerfalls muß mit mehr als 5 Treffern im Vertexdetektor nachgewiesen sein.

Durch die Detektorgeometrie und die verwendeten Vortrigger ergeben sich implizite Schnitte auf die Kinematik der Leptonen, die einen Trigger auslösen können. Wie in Abschnitt. 8.5.3 gezeigt ist, liegt die geometrische Akzeptanz für ein Elektron mit einem Transversalimpuls von  $p_T(e) > 0,5 \text{ GeV}/c$  bei 15%, und für einen Transversalimpuls des Elektrons von  $p_T(e) > 0,6 \text{ GeV}/c$  bei 10%. In dieser Studie werden nur Elektronen betrachtet, die einen Transversalimpuls von mindestens  $0,6 \text{ GeV}/c$  haben.

In der  $MB_{\text{Elektron}}$ -Simulation wird für die Elektronspur neben den Treffern im Vertexdetektor und im Spurkammersystem nicht explizit ein Treffer im ECAL verlangt, da in der *MB*-Simulation nicht sehr viele Leptonen generiert werden. Das Teilchen muß aber mindestens einen Transversalimpuls von  $0,6 \text{ GeV}/c$  haben. Die anderen Spuren aus dem Zwei- oder Dreiteilchenvertex müssen wie in der *D*-Mesonensimulation im Vertexdetektor mit mindestens 6 Treffern nachgewiesen werden.

Die benötigte Reduktion in *MB*-Ereignissen ohne einen vorherigen Schnitt auf das Bremsstrahlphoton ist ein Faktor 50 (siehe Abschnitt 8.1).

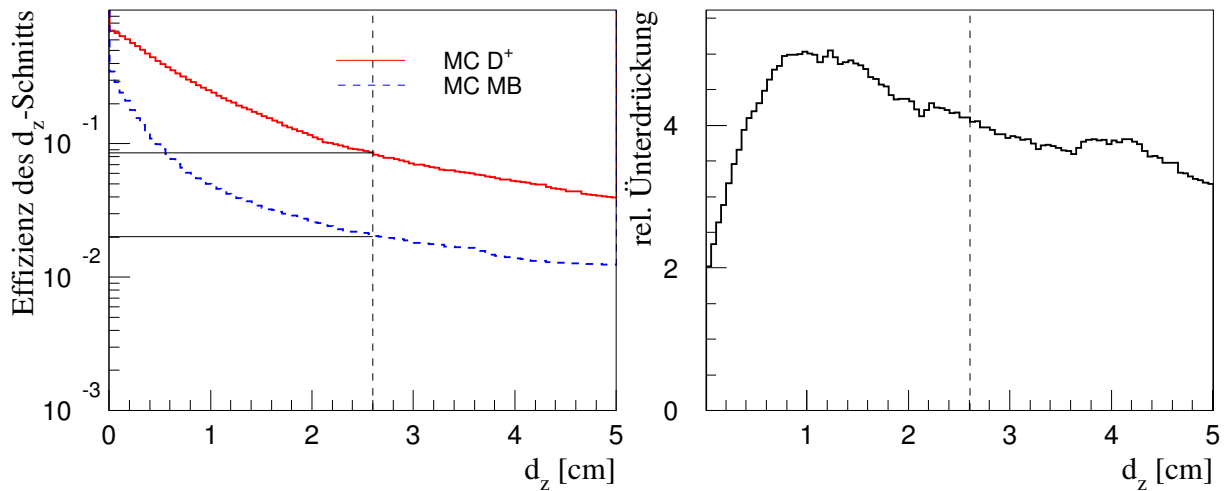
### 8.5.1 Leptonvertex mit einer weiteren Spur

#### Der Leptontrigger für den $D^+ \rightarrow e^+\nu X$ -Zerfall

Für die  $D^+ \rightarrow e^+\nu X$ -Zerfälle wird die Effizienz betrachtet,  $D^+$ -Ereignisse, die in ein Lepton und ein weiteres geladenes Teilchen zerfallen, mit einem Schnitt auf den  $z$ -Abstand  $d_z$  anzureichern. Es werden nur Ereignisse betrachtet, bei denen das Elektron aus dem  $D^+$ -Zerfall einen Transversalimpuls von mindestens  $0,6 \text{ GeV}/c$  hat.

Die Effizienz des Schnittes auf den  $z$ -Abstand  $d_z$  ist in Abb. 8.8 links dargestellt. Hierfür werden nur Vertices mit  $d_{vtx} < 0,08 \text{ mm}$  akzeptiert. Finden sich in einem Ereignis mehrere Kandidaten, wird derjenige mit dem größten Abstand zum Primärvertex verwendet. Die Verteilungen werden auf die Anzahl der verwendeten Ereignisse normiert ( $D^+$ -Simulation: 4061, *MB*-Simulation: 9959 (siehe Abschnitt 8.3)).

Bei einer Reduktion der *MB*-Ereignisse um einen Faktor 50 müßte bei einem Abstand  $d_z$  des Sekundärvertex von  $2,6 \text{ cm}$  geschnitten werden. Rechts in Abb. 8.8 ist die relative Unterdrückung



**Abbildung 8.8:** Links: Effizienz des  $d_z$ -Schnitts für semileptonische Zweiteilchenzerfälle, bei denen  $d_{vtx} < 0,08$  mm ist. Die durchgezogene Linie zeigt die Abnahme der Ereignisse der  $D^+$ -Simulation, die gestrichelte Linie zeigt die Abnahme der  $MB$ -Simulation. Normiert sind die Verteilungen jeweils auf die Anzahl der Ereignisse. Rechts ist die relative Unterdrückung der  $MB$ -Ereignisse gegenüber der  $D^+$ -Ereignisse dargestellt.

mit dem  $d_z$ -Schnitt der  $MB$ -Simulation gegenüber der  $D^+$ -Mesonsimulation dargestellt. Bis zu einem  $d_z$ -Schnitt von ca. 1 cm kann die relative Unterdrückung der  $MB$ -Simulation gesteigert werden, ab diesem  $d_z$ -Schnitt können die  $D^+$ -Mesonereignisse mit einem größeren  $d_z$ -Schnitt nicht effizienter angereichert werden. Dieser Effekt kommt daher, daß bei großem  $d_z$  die gefundenen Sekundärvertices auch in der  $D^+$ -Simulation zum größten Teil von zufälligen Kombinationen dreier Vertexdetektorspuren stammen. Der Abfall der  $D^+$ -Simulation entspricht nicht der für reine  $D^+$ -Zerfälle erwarteten.

Da bei einem so großen Abstand  $d_z$  des Sekundärvertex zum Draht geschnitten werden müßte um die  $MB$ -Ereignisse ausreichend zu reduzieren, und dieser Schnitt ein Vielfaches der  $D^+$ -Zerfallslänge ist (siehe Abb. 8.3), eignet sich dieser Zweiteilchenzerfall nicht, um Open-Charmergebnisse anzureichern.

### Der Leptontrigger für den $\bar{D}^0 \rightarrow e^- \bar{\nu} X$ -Zerfall

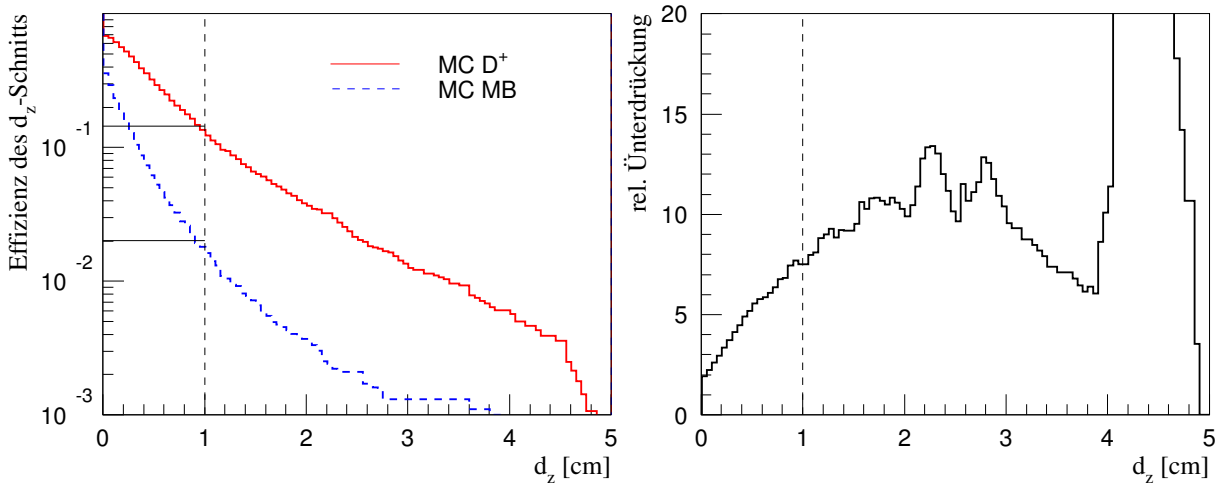
Da die Unterdrückung der  $MB$ -Ereignisse bei Zweiteilchenvertices so schlecht ist, und bei dem  $\bar{D}^0 \rightarrow e^- \bar{\nu} X$ -Zerfall auch bei einem Abstand  $d_z$  von 2,6 cm geschnitten werden muß, können auch mit den  $D^0$ -Zerfällen Open-Charmergebnisse kaum angereichert werden.

## 8.5.2 Leptonvertex mit zwei weiteren Spuren

### Der Leptontrigger für den $D^+ \rightarrow e^+ \nu K^- \pi^+$ -Zerfall

Bei dem Zerfall  $D^+ \rightarrow e^+ \nu K^- \pi^+$  kann auf einen guten Dreiteilchenvertex geschnitten werden ( $d_{vtx} < 0,17$  mm). In der  $D^+$ -Simulation werden nur Ereignisse verwendet, in denen alle drei geladenen Spuren des Zerfalls im Vertexdetektor nachgewiesen werden und das Lepton im Spurkammersystem und im ECAL nachgewiesen werden kann und einen Transversalimpuls von mehr als  $0,6$  GeV/ $c$  hat;

In Abb. 8.9 ist rechts die Effizienz des  $d_z$ -Schnitts für einen guten Dreiteilchenvertex dargestellt, links ist die Reduktion der  $MB$ -Simulation gegenüber der  $D^+$ -Simulation dargestellt. Bei diesem



**Abbildung 8.9:** Links: Effizienz des  $d_z$ -Schnitts für semileptonische  $D^+$ -Dreiteilchenzerfälle, bei denen  $d_{vtx} < 0,17$  mm ist. Die durchgezogene Linie zeigt die Abnahme der Ereignisse des  $D^+$ -Monte-Carlos, die gestrichelte Linie zeigt die Abnahme im  $MB$ -Monte-Carlo. Normiert sind die Verteilungen jeweils auf die Anzahl der Ereignisse. Rechts relative Unterdrückung der  $MB$ -Simulation gegenüber der  $D^+$ -Simulation.

Dreiteilchenvertex wird die  $MB$ -Simulation schon bei 1,0 cm um einen Faktor 50 reduziert. Die Effizienz, ein  $D^+$ -Ereignis zu triggern, ist dabei immer noch 15%. Die Zahl der  $MB$ -Ereignisse wird dabei gegenüber den  $D^+$ -Ereignissen um einen Faktor 7,0 reduziert. Bei den Dreiteilchenvertices können durch größere  $d_z$ -Schnitte die  $MB$ -Ereignisse stärker reduziert werden als die  $D^+$ -Simulation. Bei sehr großem Abstand  $d_z$  werden in der  $MB$ -Simulation keine  $MB$ -Ereignisse mehr gefunden, die diese Schnitte erfüllen. Bei Dreiteilchenvertices wird zum Großteil auf echte  $D^+$ -Zerfälle getriggert, und nicht nur auf zufällige Kombinationen der Vertexdetektorspuren.

### 8.5.3 Open-Charm-Meson-Ratenabschätzung für den Lepton-Sekundärvertex

In diesem Abschnitt wird für das eben beschriebene Triggerszenario, in dem ein vom Draht abgesetzter Dreiteilchen-Sekundärvertex mit dem getriggerten Elektron verlangt wird, die mögliche Rate auf Band geschriebener Open-Charm-Ereignisse abgeschätzt. Die Rate hängt von der Produktionswahrscheinlichkeit, der Detektorakzeptanz, der Triggereffizienz, der Rekonstruktionseffizienz und der Targetrate ab. Es sind nur solche Zerfälle von Interesse, bei denen das eine  $D$ -Meson semileptonisch und das andere Meson ein  $D^\pm$ -Meson ist und in  $K^-\pi^+\pi^+$  zerfällt oder ein  $D^0/\bar{D}^0$ -Meson ist und in  $K\pi$  zerfällt.

- Produktionsrate

Um die Produktionsrate von  $D\bar{D}$ -Mesonen abzuschätzen, wird der gemessene Wirkungsquerschnitt von FNAL-E653 [K<sup>+</sup>91] und LEBC-MPS [A<sup>+</sup>88] für 800 GeV/c Proton-Kern-Streuung für den gesamten  $x_F$ -Bereich verwendet. Für Proton-Kern-Streuung werden folgende Wirkungsquerschnitte für die  $D\bar{D}$ -Meson- und  $MB$ -Produktion abgeschätzt:

$$\sigma_p(D\bar{D}) = 28\mu\text{b}/\text{Nukleon} \quad \sigma_p(\text{inel}) = 30\text{mb}/\text{Nukleon}. \quad (8.3)$$

Der Wirkungsquerschnitt für die verschiedenen Targetmaterialien ergibt sich, indem die Wirkungsquerschnitte folgendermaßen mit der Targetmassenzahl  $A$  multipliziert werden [L<sup>+</sup>94b]

$$\sigma_A(D\bar{D}) = A \times \sigma_p(D\bar{D}) \quad \sigma_A(\text{inel}) = A^{2/3} \times (1,3 + 0,15 \log_{10} A) \times \sigma_p(\text{inel}). \quad (8.4)$$



- $D\bar{D}$ -Produktionswahrscheinlichkeit.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der die einzelnen  $D\bar{D}$ -Mesonenzustände erzeugt werden, ist in Tab. 8.5 aufgeführt. Diese Wahrscheinlichkeiten werden dem Monte-Carlo-Generator PYTHIA/JETSET entnommen.

$p(D^+D^-)$	8,3%
$p(D^+\bar{D}^0)$	21,1%
$p(D^-D^0)$	20,0%
$p(D^0\bar{D}^0)$	50,6%

**Tabelle 8.5:**  $D\bar{D}$ -Produktionswahrscheinlichkeit

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 49,4% wird in der Fragmentation des  $c\bar{c}$ -Paares ein  $D^\pm$ -Meson und mit 91,7% ein  $D^0$ -Meson erzeugt. Für die Open-Charm-Analyse sind die  $D$ -Mesonproduktionen  $p(D^+D^-)$ ,  $p(D^+\bar{D}^0)$  und  $p(D^0D^-)$  von besonderem Interesse, da bei diesen Mesonzerfällen auf einen semileptonischen Zerfall des geladenen Mesons getriggert werden kann, und die anderen geladenen und ungeladenen Mesonen zur Open-Charm-Analyse verwendet werden können. Bei einer Targetrate von 5 MHz ergibt sich also für die Targetmaterialien Kohlenstoff  $^{12}\text{C}$  7,3 kHz und für Wolfram  $^{184}\text{W}$  16,2 kHz Produktionsrate der  $D\bar{D}$ -Mesonen.

- Die totale Wahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{Elektron}$  für  $e\nu K\pi$  im Endzustand

Die Häufigkeit, mit der ein  $D^+$ -Meson in ein Elektron zerfällt, ist 17,2%, davon wiederum enthalten 24% einen Endzustand mit mindestens zwei geladenen Spuren [H<sup>+</sup>02]. Das  $D^0$ -Meson zerfällt in 6,75% der Zerfälle in ein Elektron und eine weitere geladene Spur.

Die Wahrscheinlichkeit für die interessanten Zerfälle ist:

$$\begin{aligned} p(D^+D^- \rightarrow D^\pm + e\nu K\pi) &= 2 \times 0,041 - 0,041^2 = 0,08 \\ p(D^+\bar{D}^0 \rightarrow e\nu K\pi + \bar{D}^0) &= 0,041 = 0,041 \\ p(D^-D^0 \rightarrow e\nu K\pi + D^0) &= 0,041 = 0,041 \end{aligned}$$

Die totale Wahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{Elektron}$ , einen Zerfall des  $D^\pm$  in einen Zustand mit einem Lepton und zwei geladenen Spuren zu finden und das andere  $D$ -Meson als  $D^\pm$ - oder  $D^0/\bar{D}^0$ -Meson zu erhalten, ist dann:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{D\bar{D} \rightarrow e\nu K\pi + D^\pm} &= p(D^+D^-) \times p(D^+D^- \rightarrow D^\pm + e\nu K\pi) \\ &= 0,083 \times 0,080 = 6,6 \cdot 10^{-3} \\ \varepsilon_{D\bar{D} \rightarrow e\nu K\pi + D^0} &= p(D^+\bar{D}^0) \times p(D^+\bar{D}^0 \rightarrow e\nu K\pi + \bar{D}^0) \\ &\quad + p(D^-D^0) \times p(D^+\bar{D}^0 \rightarrow e\nu\pi K + \bar{D}^0) \\ &= 0,211 \times 0,041 + 0,2 \times 0,041 = 16,8 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

- Akzeptanz  $A_{D \rightarrow e\nu K\pi}$ , für einen Dreiteilchen-Leptonvertex des  $D \rightarrow e\nu K\pi$ -Zerfalls

Die Wahrscheinlichkeit, daß das Elektron einen Transversalimpuls von mindestens 0,6 GeV/c hat und im Detektor nachgewiesen wird, ist 10% (siehe Abb. 8.1). Die Wahrscheinlichkeit, daß das Elektron und die zwei geladenen Spuren aus dem Zerfall  $D \rightarrow e\nu K\pi$  im Vertexdetektor nachgewiesen werden, ist 28%.

- Effizienz  $\varepsilon_{D \rightarrow e\nu K\pi}$  des Lepton-Dreiteilchenvertex-Trigger

Die Effizienz, mit dem oben beschriebenen Algorithmus einen mindestens 1 cm vom Target entfernten Sekundärvertex mit dem Elektron und zwei anderen geladenen Spuren zu finden, beträgt 15%.

### 8.5.4 Triggereffizienz des Elektron-Dreiteilchenvertex-Triggers

Aus allen im vorherigen Abschnitt berechneten Effizienzen ergibt sich die  $D$ -Mesonrate, die bei einem Elektrontrigger mit einem abgesetzten Dreiteilchenvertex auf Band geschrieben werden kann. Die allgemeine FLT- und SLT-Triggereffizienz für ein Lepton mit einem Transversalimpuls von  $p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$  ist in Tab.8.6 berechnet.

Leptonspur mit $p_T > 0,6 \text{ GeV}c$		0,10
ECAL Vortriggereffizienz	$\varepsilon_{ECAL}$	0,71
FLT-Triggereffizienz, ein Elektron zu triggern	$\varepsilon_{FLT}$	0,6
SLT-Triggereffizienz, die FLT-Spur zu triggern	$\varepsilon_{SLT}$	0,91
Allgemeine FLT- und SLT-Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{FLTSLT}$	0,039

**Tabelle 8.6:** Allgemeine FLT- und SLT-Effizienzen für ein Elektron mit einem Transversalimpuls  $p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$ .

Die Effizienz des Lepton-Dreiteilchenvertex-Trigger ist für die zwei  $D$ -Mesonen in Tab. 8.7 dargestellt.

Mesonen		$D^+$	$D^0$
totale Wahrscheinlichkeit des $D \rightarrow e\nu K\pi$ -Zerfall	$\varepsilon_{Elektron}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$16,8 \cdot 10^{-3}$
Akzeptanz für Elektron und zwei geladene Spuren	$A_{D \rightarrow e\nu K\pi}$	0,28	0,28
Effizienz des Lepton-Dreiteilchenvertex-Triggers	$\varepsilon_{D \rightarrow e\nu K\pi}$	0,15	0,15
Allgemeine FLT- und SLT-Effizienzen	$\varepsilon_{FLTSLT}$	0,039	0,039
Totale Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{tot}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-5}$
Bremsstrahleffizienz	$\varepsilon_{Brems}$	0,125	0,125
Totale Triggereffizienz mit Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{tot}(Brems)$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$3,44 \cdot 10^{-6}$

**Tabelle 8.7:** Effizienz des  $D^+ \rightarrow e^+\nu K\pi$ -Mesonentriggers für einen Dreiteilchenvertex. Die genauere Beschreibung der Schnitte ist im Text zu finden.

### Zahl der rekonstruierbaren $D$ -Mesonen bei einem Trigger mit abgesetztem Elektron-Dreiteilchen-Sekundärvertex

Interessante  $D$ -Mesonenzerfälle sind Zerfälle, in denen die  $D$ -Mesonen nur in geladene Spuren zerfallen, die vollständig im HERA- $B$ -Detektor nachgewiesen werden können.

Das  $D^\pm$ -Meson zerfällt in 9,1% der Fälle in  $K\pi\pi$ ; in 12,5% der Fälle werden alle drei Zerfallsprodukte mit genügend Treffern auf der Spur im Vertexdetektor und im Spurkammersystem nachgewiesen. Um die Zerfallsspuren aus dem  $D$ -Mesonzerfall sicher von den restlichen Spuren in einem Ereignis zu trennen, muß ein vom Target abgesetzter Vertex verlangt werden. Die Effizienz,  $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ -Zerfälle in einem Abstand von 0,5 cm zum Primärvertex zu detektieren, ist 70%. Das  $D^0$ -Meson zerfällt zu 3,83% in  $K\pi$ . Die Detektorakzeptanz, die beiden Spuren des  $D^0 \rightarrow K\pi$ -Zerfalls im Detektor nachweisen zu können, ist 24,5% [Hus02]. Die Effizienz, diesen Zweiteilchenzerfall in einem Abstand von 0,3 cm zum Primärvertex zu detektieren, ist 50% [Zeu02].

Die Rate, mit der bei den Targetmaterialien Kohlenstoff und Wolfram rekonstruierbare  $D^\pm$ -Mesonen oder  $D^0/\bar{D}^0$  im Detektor nachgewiesen werden können, ist demnach:

Die Zahl der vollständig im HERA- $B$ -Detektor rekonstruierbaren  $D$ -Mesonen ist mit einem Trigger, der auf einen abgesetzten Dreiteilchenvertex der getriggerten Elektronspur triggert, sehr ge-

rekonstruierbare $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle		
	Kohlenstoff	Wolfram
Produktionsrate	7,3 kHz	16,2 kHz
Totale Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$
Rate der produzierten $D^\pm$ -Mesonen	0,079 Hz	0,175 Hz
Produzierte $D^\pm$ -Mesonen pro Stunde	284	630
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Verzweigungsverhältnis	9,1%	9,1%
Detektorakzeptanz für alle drei Spuren	12,5%	12,5%
Effizienz des Schnittes $d_z > 0,5$ cm	70%	70%
Rekonstruierbare $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ ohne Bremsstrahlphoton	$2,3 \text{ h}^{-1}$	$5 \text{ h}^{-1}$
Rekonstruierbare $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ mit Bremsstrahlphoton	$0,3 \text{ h}^{-1}$	$0,6 \text{ h}^{-1}$

rekonstruierbare $D \rightarrow K\pi$ -Zerfälle		
	Kohlenstoff	Wolfram
Produktionsrate	7,3 kHz	16,2 kHz
Totale Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$2,75 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-5}$
Rate der produzierten $D^0/\bar{D}^0$ -Mesonen	0,2 Hz	0,45 Hz
produzierte $D^0/\bar{D}^0$ -Mesonen pro Stunde	723	1604
$D^0 \rightarrow K\pi$ -Verzweigungsverhältnis	3,83%	3,83%
Detektorakzeptanz für beide Spuren	24,4%	24,5%
Effizienz des Schnittes $d_z > 0,3$ cm	50%	50%
Rekonstruierbare $D^0 \rightarrow K\pi$ ohne Bremsstrahlphoton	$3 \text{ h}^{-1}$	$8 \text{ h}^{-1}$
Rekonstruierbare $D^0 \rightarrow K\pi$ mit Bremsstrahlphoton	$0 - 1 \text{ h}^{-1}$	$1 \text{ h}^{-1}$

**Tabelle 8.8:** Anzahl der getriggerten  $D$ -Mesonen auf Band für einen Leptontrigger mit abgesetzten Dreiteilchenvertex für die zwei Targetmaterialien Kohlenstoff und Wolfram.

ring. Dieses Triggerszenario eignet sich nicht, vollständig im Detektor rekonstruierbare  $D^\pm$ - oder  $D/\bar{D}$ -Mesonen anzureichern.

### 8.5.5 Zusammenfassung: Leptontrigger mit abgesetztem Lepton-Sekundärvertex

Der HERA- $B$ -Trigger ist darauf ausgelegt, Ereignisse, in denen Leptonen enthalten sind, anzureichern. Es gibt Zerfallskanäle, in denen das Open-Charm-Meson semileptonisch mit mindestens einem weiteren geladenen Teilchen zerfällt. Auf diese Zerfallskanäle kann in einem SLT-Trigger getriggert werden.

Es wurden verschiedene Zerfallskanäle betrachtet, bei denen sowohl ein  $D^+$ - oder ein  $D^0$ -Meson semileptonisch zerfällt. Hier wurden dazu ein abgesetzter Zwei- bzw. Dreiteilchenvertex verlangt, der aus dem Elektron und einer bzw. zwei weiteren Spuren gebildet wird. Das Elektron soll dabei im Vertexdetektor, im Spurkammersystem und im ECAL nachgewiesen werden, für die anderen Teilchen wird nur der Nachweis im Vertexdetektor gefordert.

Die  $MB$ -Ereignisse müssen im SLT-Trigger um mindestens einen Faktor 50 reduziert werden, damit alle getriggerten Ereignisse auf Band geschrieben werden können. Um die Zweiteilchenvertices um einen Faktor 50 zu reduzieren, müßten die Vertices einen  $z$ -Abstand von  $d_z > 2,6$  cm vom Target entfernt sein. Da dieser Abstand ein Vielfaches der Zerfallslänge der  $D^0$ - und  $D^+$ -Mesonen ist, würde mit diesem Trigger kein Open-Charm angereichert werden, sondern hauptsächlich auf zufällige Kombinationen der Spuren getriggert werden. Bei dem semileptonischen Dreiteilchen-

zerfall können dagegen die  $MB$ -Ereignisse schon bei einem Abstand des Sekundärvertex von 1 cm um einen Faktor 50 reduziert werden. Da dies nur etwa der 1,5-fachen Zerfallslänge des  $D^+$ -Mesons entspricht, können hierbei Open-Charm-Ereignisse angereichert werden.

Wird dieser Open-Charm-Trigger als einziger Trigger verwendet, werden pro Stunde am Kohlenstoff-Target 280  $D^\pm$ -Mesonen und 720  $D^0/\bar{D}^0$ -Mesonen oder am Wolfram-Target 630  $D^\pm$ -Mesonen und 1600  $D^0/\bar{D}^0$ -Mesonen getriggerte  $D$ -Mesonen auf Band geschrieben. Wird der Open-Charm-Trigger nur zusätzlich parallel zu anderen Triggern verwendet, muß der FLT-Trigger untersetzt werden. Wird zum Reduzieren der FLT-Ausgangsrate ein Schnitt auf ein vorhandenes Bremsstrahlphoton verwendet, kann die FLT-Ausgangsrate um einen Faktor 8 reduziert werden. Simulationen zeigen, daß das Verlangen eines Bremsstrahlphotons  $MB$ -Ereignisse um einen Faktor 8 reduziert, aber wahre semileptonische Zerfälle um deutlich weniger reduziert, das Open-Charm-Signal dadurch also nicht so weit reduziert wird wie  $MB$ -Ereignisse. Darüber gibt es aber keine Messungen, es wird hier deshalb davon ausgegangen, daß das Open-Charm-Signal genauso stark reduziert wird.

Diese Trigger eignen sich sehr gut, um semileptonische Open-Charm-Mesonzerfälle anzureichern, allerdings ist bei allen semileptonischen Zerfällen ein Neutrino enthalten, das nicht im Detektor nachgewiesen werden kann. Durch dieses nicht nachweisbare Neutrino kann die Masse des Open-Charm-Mesons nicht genau rekonstruiert werden, wodurch sich eine Unsicherheit in der invarianten Masse des Mesons ergibt. Die Zerfälle  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  und  $D \rightarrow K \pi$ , in die das andere  $D$ -Meson zerfallen könnte, sind hierbei viel interessanter, da bei diesem Zerfall alle Teilchen im HERA- $B$ -Detektor nachgewiesen werden können.

Wird auf ein semileptonisch zerfallendes  $D$ -Meson mit Sekundärvertex getriggert und gleichzeitig ein  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  -oder  $D^0 \rightarrow K \pi$ -Zerfall auf der anderen Seite verlangt, dann werden pro Stunde nur sehr wenige interessierende  $D$ -Mesonen auf Band geschrieben. Der Trigger ist folglich nicht sehr geeignet, interessante Open-Charm-Zerfälle anzureichern.

## 8.6 Triggerzenario: abgesetzter $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfallstrigger

Zerfälle, in denen das  $D$ -Meson nur in geladene Teilchen zerfällt, sind bei der Analyse von besonderem Interesse. Besonders interessante Zerfälle sind dabei  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  und  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ . Diese zwei Zerfälle haben mit 9,1% für den Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  und 3,8% für den Zerfall  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  relativ große Zerfallswahrscheinlichkeiten. Wie schon erwähnt, ist die Lebensdauer von  $D$ -Mesonen 0,4 ps bzw. 1,0 ps, was zu einem vom Target abgesetzten Vertex führt. Dieser abgesetzte Mehrteilchenvertex bietet im SLT-Trigger die Möglichkeit, solche Zerfälle durch einen geeigneten Trigger anzureichern. Da die Lebensdauer der geladenen  $D$ -Mesonen größer ist als die der ungeladenen  $D$ -Mesonen und da die Zerfallswahrscheinlichkeit für den Dreiteilchenzerfall größer ist, bietet sich dieser Zerfall an, um darauf zu triggern. Durch den Dreiteilchenzerfall ergibt sich zusätzlich eine bessere Vertexauflösung als für Zweiteilchenzerfälle. In der folgenden Analyse wird nur der Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  behandelt, da er der bessere Zerfall für einen möglichen Trigger ist.

### Die Triggerstrategie

Der FLT-Trigger soll ausgenutzt werden, um auf das Elektron des einen  $D$ -Mesonzerfalls zu triggern. Der Softwaretrigger auf dem SLT soll den Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  des zweiten Mesons selektieren, indem ein vom Target separierter Dreiteilchenvertex gesucht wird. Um den Zerfallsvertex zu rekonstruieren, müssen alle Treffer des Vertexdetektors ausgelesen werden und damit Spursegmente rekonstruiert werden. Alle diese Spursegmente müssen miteinander kombiniert

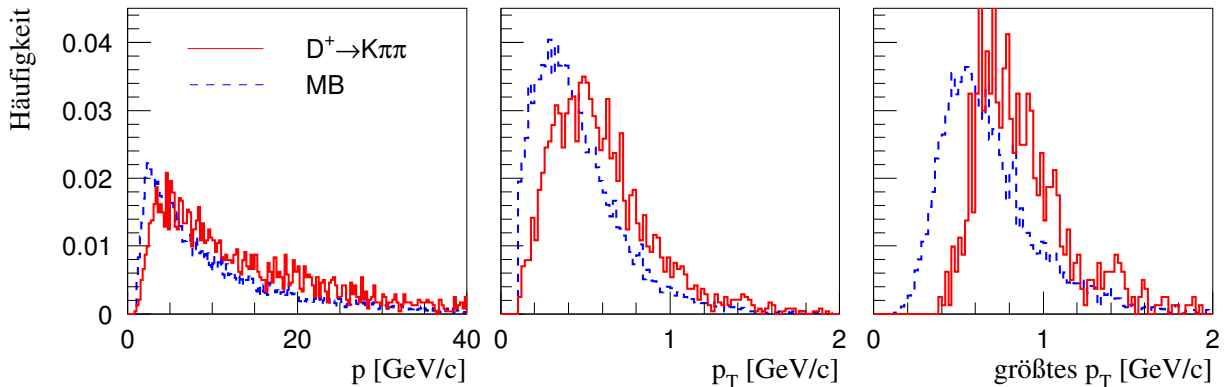
werden, um zu prüfen, ob drei Spuren zusammen einen vom Target separierten Vertex bilden. In der  $MB$ -Simulation gibt es sehr wenige Teilchen, die in drei Teilchen zerfallen, aber drei Spuren können sich an einem Punkt sehr nahe kommen, was als separierter Vertex detektiert werden kann. Zur weiteren Abtrennung von  $D^+$ -Mesonzerfällen kann ausgenutzt werden, daß die aus dem  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall stammenden Teilchen eine andere Impuls- und Transversalimpulsverteilung haben als die Teilchen der  $MB$ -Simulation. Dem SLT-Trigger ist der Impuls der Teilchen nicht bekannt, es kann aber die in Abschnitt. 8.8 vorgestellte Methode verwendet werden, um den Impuls der Teilchen abzuschätzen. Dazu müssen Teilbereiche des Spurkammersystems zusätzlich zum Vertexdetektor ausgelesen werden. Eine weitere Möglichkeit,  $MB$ -Ereignisse zu unterdrücken, ergibt sich durch einen Schnitt auf den Öffnungswinkel der drei Spuren aus einem abgesetzten Vertex. Der größte Öffnungswinkel für Dreiteilchenvertices aus  $MB$ -Ereignissen ist kleiner oder sehr viel größer als der von  $D^+$ -Mesonen.

Da der SLT-Trigger seine Entscheidung innerhalb von 7 ms fällen muß (siehe Abschnitt 3.2.2), bleibt für den Softwaretrigger nur wenig Rechenzeit. Eine vollständige Ereignisrekonstruktion ist daher ausgeschlossen. Es ist aber möglich, in dieser Zeit für Ereignisse, die eine geringe Teilchenmultiplizität haben, den Vertexdetektor auszulesen, im Vertexdetektor Spuren zu rekonstruieren, und Teilbereiche der Triggerspurkammern auszulesen.

### 8.6.1 Impuls und Transversalimpuls

Die Impulse und Transversalimpulse der drei Teilchen aus dem  $D^+$ -Zerfall unterscheiden sich von den in  $MB$  fälschlicherweise gefundenen Dreiteilchenvertices. Diesen Unterschied kann der SLT-Algorithmus ausnutzen, um Ereignisse anzureichern, in denen ein  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall enthalten ist.

In Abb. 8.10 sind der Impuls, der Transversalimpuls und der maximale Transversalimpuls für die drei Teilchen aus einem gut separierten Vertex für die  $MB$ -Simulation (gestrichelte Linie) und für die drei Teilchen aus dem  $D^+$ -Mesonzerfall (durchgezogene Linie) dargestellt.



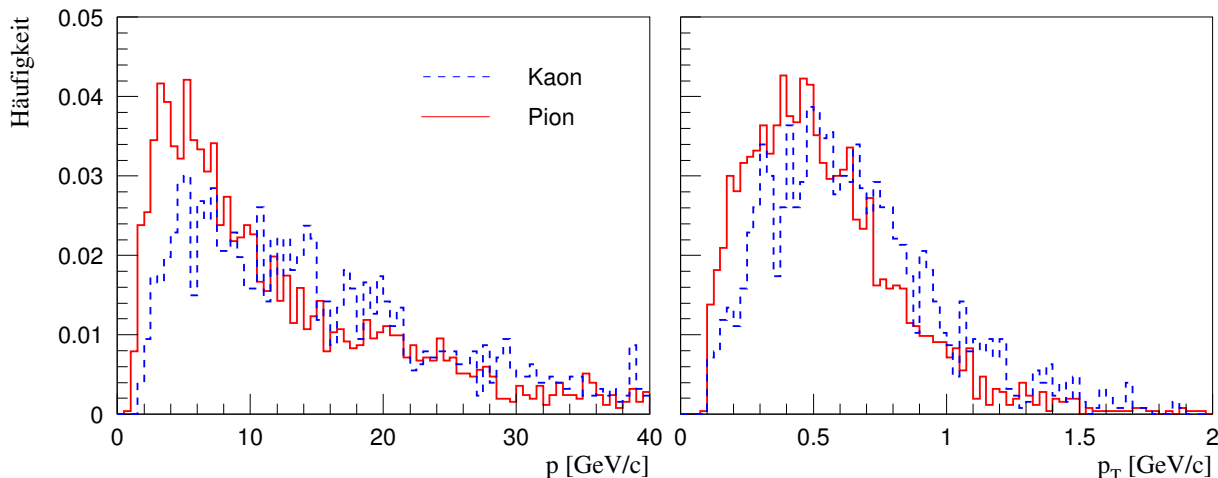
**Abbildung 8.10:** Verteilungen von Impuls (links), Transversalimpuls (mitte) und größtem Transversalimpuls (rechts) der Spuren, die einen separierten Dreiteilchenvertex mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm und  $0,5 < d_z < 5$  cm bilden (durchgezogene Linie: simulierte  $D^+$ -Zerfälle, gestrichelt: zufällige  $MB$ -Tripletts).

Es werden nur gute Tripletts betrachtet, bei denen  $d_{vtx} < 0,17$  mm ist und deren Abstand  $d_z$  vom Primärvertex mindestens 0,5 cm und nicht mehr als 5 cm beträgt. Im linken Bild ist der Impuls der drei Teilchen dargestellt. Die Impulse der drei Teilchen der beiden Simulationen unterscheiden sich kaum. Der Transversalimpuls, der im mittleren Bild dargestellt ist, ist für Teilchen aus der  $D^+$ -Meson-Simulation zu leicht größeren Werten verschoben. Die Spur mit dem größten Transversalimpuls ist für die  $D^+$ -Mesonsimulation im Gegensatz zum  $MB$  eindeutig zu

größeren Transversalimpulsen verschoben (rechte Abbildung).

Bei 89% der  $D^+$ -Mesonzerfälle hat die Spur mit dem größten Transversalimpuls einen Transversalimpuls größer als  $0,6 \text{ GeV}/c$ , aber nur etwa 52,1% der  $MB$ -Triplets haben eine Spur mit einem Transversalimpuls größer als  $0,6 \text{ GeV}/c$ .

Der Impuls und der Transversalimpuls des Kaons und der beiden Pionen aus dem  $D^+$ -Mesonzerfall ist in Abb. 8.11 dargestellt. Der Impuls und der Transversalimpuls des Kaons ist leicht zu größeren Impulsen verschoben im Vergleich zu dem der beiden Pionen. Die Verteilungen sind auf die Anzahl der Pionen und Kaonen im Bild normiert. Das schwerere Kaon trägt also nicht, wie man vermuten könnte, den größten Impuls oder Transversalimpuls der drei Teilchen. Dadurch ergibt sich leider nicht die Möglichkeit, die Ereignisse durch einen Schnitt auf die einzelne Ladung der Zerfallsteilchens und dessen Transversalimpuls weiter anzureichern.



**Abbildung 8.11:** Impuls und Transversalimpuls des Kaons und der beiden Pionen aus dem  $D^+$ -Zerfall. Die Verteilungen sind auf die Anzahl der Pionen und Kaonen normiert.

## 8.7 Abschätzmethode des Transversalimpulses

Ein Schnitt auf den größten Transversalimpuls der drei Spuren aus dem Triplet würde eine Unterdrückung der  $MB$ -Ereignisse gegenüber den  $D^+$ -Mesonereignissen ergeben. Allerdings gibt es für Spuren ausschließlich aus dem Vertexdetektor keine Information über den Impuls der Teilchen. Im folgenden wird eine Möglichkeit diskutiert, den Impuls der Spuren durch Treffernachweise in den Spurtriggersuperlagen nach dem Magneten nach einer Extrapolation der Spur zu erhalten. Unter der Annahme, daß die Steigung der Spur allein von dem Transversalimpuls des Teilchens herrührt, kann durch eine Abschätzung des Impulses des Teilchens der Transversalimpuls berechnet werden.

Geladene Teilchen werden in der  $x$ - $z$ -Ebene, der Ablenkebene des HERA- $B$ -Magneten, (siehe Abschnitt 3.2.1) abgelenkt. Die Ablenkung der Teilchen, die beim Durchlaufen des Magneten kontinuierlich stattfindet, kann durch einen Knick in der Mitte des Magneten angenähert werden. Die Ablenkstärke des HERA- $B$ -Magneten kann folgendermaßen berechnet werden:

$$p_0 = \frac{\int B dl \cdot \text{GeV}/c}{3,3 \text{Tm}} \approx 0,61 \text{GeV}/c. \quad (8.5)$$

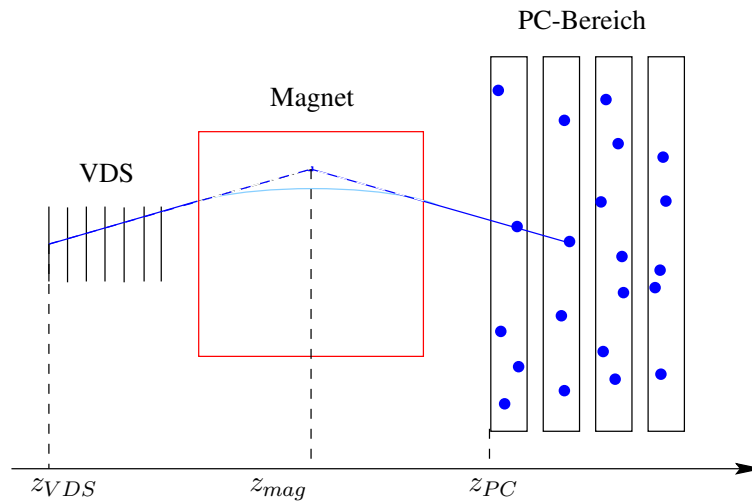
Der Auftreffpunkt ( $x_{PC}$ ,  $y_{PC}$ ) in der ersten Spurkammersuperlage nach dem Magneten (1. PC-Lage) kann ausgehend von den geradlinigen Spursegmenten im Vertexdetektor folgendermaßen

berechnet werden.

$$x_{pc} = x_{vds} + \left( \frac{\Delta x}{\Delta z} \right)_{Spur} \cdot (z_{mag} - z_{vds}) + \frac{p_0}{p_{Teilchen}} \cdot (z_{PC} - z_{mag}) \quad (8.6)$$

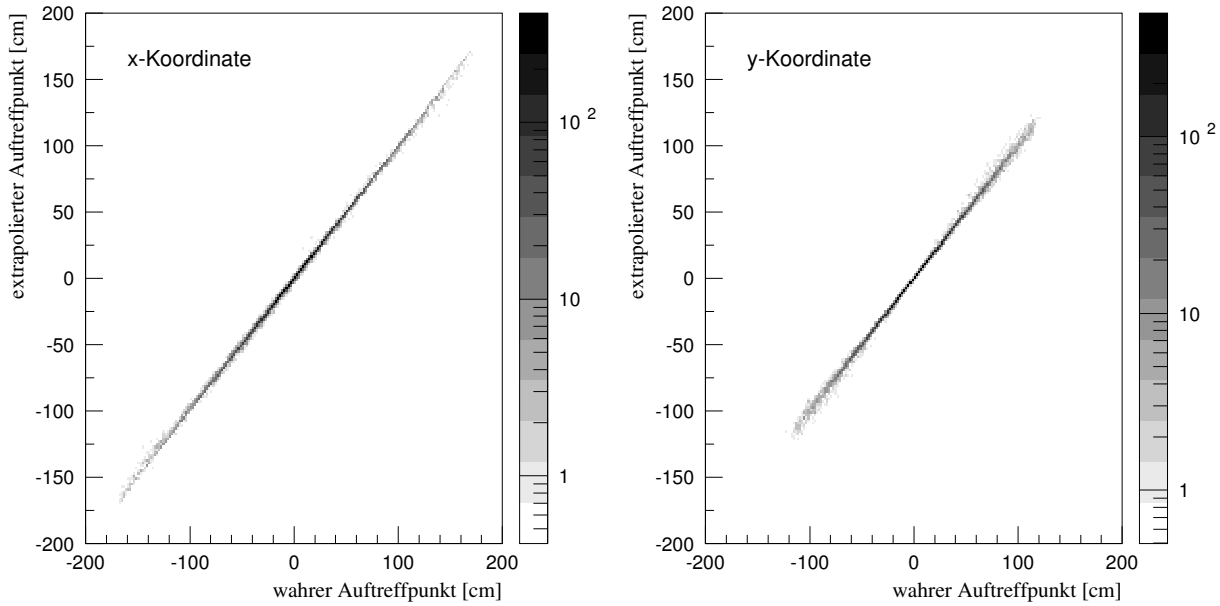
$$y_{pc} = y_{vds} + \frac{\Delta y}{\Delta z} \cdot (z_{PC} - z_{vds}) \quad (8.7)$$

Das Vertexdetektorspurssegment ist definiert durch einen Punkt auf der Spur ( $x_{vds}, y_{vds}, z_{vds}$ ) im HERA- $B$ -Koordinatensystem und die Steigung der Spur ( $\frac{\Delta x}{\Delta z}_{Spur}$  und  $\frac{\Delta y}{\Delta z}_{Spur}$ ).  $p_{Teilchen}$  ist der Impuls des Teilchens,  $z_{mag}$  ist die  $z$ -Position der Mitte des Magneten, an der der hypothetische Knick stattfindet,  $z_{PC}$  ist die  $z$ -Position der PC-Superlage, in der nach einem Treffer gesucht werden soll (siehe [S<sup>+</sup>99]). Ausgehend von einem Vertexdetektorssegment ist die Spur, entlang der das Teilchen tatsächlich verläuft (durchgezogene Linie), und die Spur, wie sie nach der Knickmethode (gestrichelte Linie) verläuft, schematisch in Abb. 8.12 skizziert. Zur Kontrol-



**Abbildung 8.12:** Schematische Skizze der Abschätzungsmethode des Impulses. Gestrichelte Linie: Abschätzungsmethode durch den Knick in der Mitte des Magneten, durchgezogene Linie: wahrer Weg des Teilchens durch den Magneten.

le der Methode ist in Abb. 8.13 für alle Spuren der wahre Auftreffpunkt der Spur gegen den Auftreffpunkt der nach den Gleichungen 8.6 und 8.7 berechneten Abschätzungsmethode für die  $x$ - und die  $y$ -Koordinate aufgetragen. Die Abweichungen der wahren Spur zu der berechneten Spur ist sowohl für die  $x$ - wie für die  $y$ -Koordinate sehr gering, die Korrelation der beiden Methoden ist sehr gut. Da durch die Knickmethode der Auftreffpunkt der Spur in der PC-Superlage hinreichend genau vorhergesagt werden kann, kann die Knickmethode verwendet werden, um von jeder Vertexdetektorspur ausgehend in der 1. PC-Superlage einen Suchbereich für den Transversalimpuls von  $0,6 - 3,0 \text{ GeV}/c$  zu definieren und in diesem Suchbereich nach einem Treffer zu suchen. Wird ein Treffer gefunden, kann unter der Annahme, daß der Treffer zu dieser Vertexdetektorspur gehört, der Impuls des Teilchens und damit der Transversalimpuls berechnet werden.



**Abbildung 8.13:** Korrelation des abgeschätzten Auftreffpunktes mit dem wahren Auftreffpunkt der Spur bei der 1. PC-Lage für alle Teilchen aller Impulse. Linkes Bild für die  $x$ -Koordinate, rechtes Bild für die  $y$ -Koordinate

## 8.8 Transversalimpulstrigger

Die Methode des Abschätzens des Impulses durch einen Knick in der Mitte des Magneten ergibt die Möglichkeit, auf Teilchen mit größerem Transversalimpuls im SLT-Trigger zu triggern. Dazu müssen nach der Rekonstruktion der Vertexdetektorspuren Teilbereiche des Spurkammersystems zwischen Magneten und RICH zusätzlich zum Vertexdetektor ausgelesen werden. In dem Bereich, der ausgehend von der Vertexdetektorspur durch den interessierenden Transversalimpuls von  $(0,6 - 3,0)\text{GeV}/c$  festgelegt wird, muß nach Treffern gesucht werden. Da die Ladung des Teilchens nicht bekannt ist, muß unter beiden Ladungsannahmen geprüft werden, ob ein Treffer zu dieser Vertexdetektorspur gefunden wird. Wird in einem dieser Bereiche ein Treffer gefunden, gehört die Vertexdetektorspur möglicherweise zu einem Teilchen, das einen Transversalimpuls im gesuchten Impulsbereich hat.

Treffer in den Suchbereichen werden akzeptiert, wenn in einer der ersten zwei Doppellagen eine Koinzidenz zwischen einer  $0^\circ$ -Lage und einer Stereowinkellage in dem Suchbereich gefunden wird.

### 8.8.1 Suche nach einer Spur mit großem Transversalimpuls

In dem Suchbereich können mehrere Treffer gefunden werden. Jeder dieser gefundenen Treffer in der 1. PC-Lage wird als der „wahre“ Treffer zu der betrachteten Spur betrachtet und damit der Transversalimpuls  $p_T^*$  und die Ladung  $q^*$  des Teilchens berechnet. Von diesem Treffer ausgehend kann die Spur in die 4. PC-Lage extrapoliert werden; dort wird in einem kleineren Suchbereich, da der Impuls des Teilchens durch den ersten Treffer bekannt ist, nach einem Treffer gesucht. Werden in beiden Suchbereichen Treffer gefunden, wurde möglicherweise ein Teilchen mit dem Transversalimpuls  $p_T^*$  und der Ladung  $q^*$  gefunden.

Die Größe des Suchbereichs hängt von mehreren Faktoren ab: von dem Abstand der Auslesekanäle, dem gewählten Impulsbereich, der Detektorlage, in der nach einem Treffer gesucht wird,



und der Vielfachstreuung.

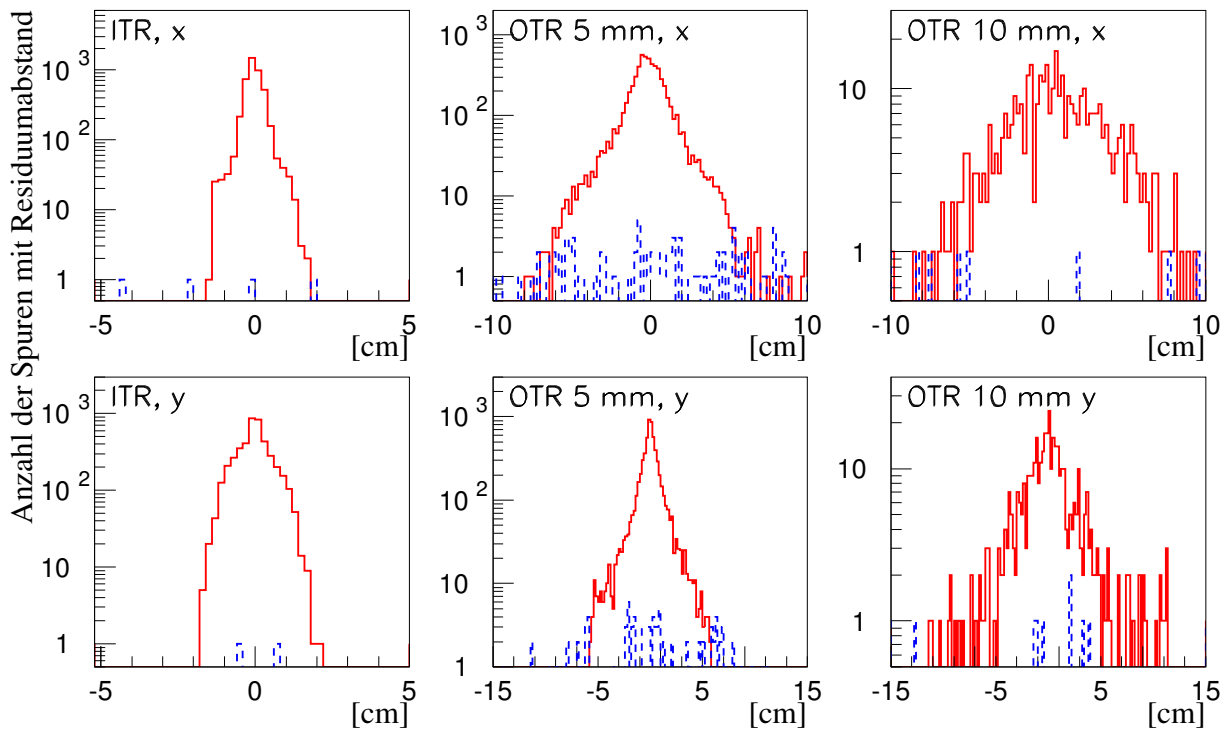
### Die $y$ -Breite des Suchbereichs

hängt vom Abstand der Auslesekänäle und von der Vielfachstreuung ab. Das innere Spurkammersystem hat im PC-Bereich einen Streifenabstand von  $300\ \mu\text{m}$ . Der innere Bereich des äußeren Spurkammersystem hat einen Drahtabstand von  $5\ \text{mm}$  und der äußere Bereich einen von  $10\ \text{mm}$ . Die  $y$ -Breite hängt nicht vom gesuchten Impuls der Teilchen ab, und ist deshalb eine festgewählte Breite pro Detektorbereich.

### Die $x$ -Breite des Suchbereichs

hängt vom Abstand der Auslesekänäle des Detektortyps, von dem Impulsbereich, in dem der Treffer gesucht werden soll, und der Vielfachstreuung ab. Die  $x$ -Breite ist nicht konstant, da die Breite des Suchbereichs von der Steigung der betrachteten Spur und von dem gewünschten Impulsbereich abhängt.

Da das Spurkammersystem aus zwei Technologien mit drei verschiedenen Abständen der Auslesekänäle besteht, werden die drei Detektorgeometrien separat untersucht.



**Abbildung 8.14:** Residuen zwischen der wahren Spur und dem nächsten Treffer des Auftreffpunktes der Abschätzmethode für simulierte Spuren, die im Transversalimpulsbereich zwischen  $(0,7 - 2,9)\ \text{GeV}/c$  liegen. Der Impulssuchbereich ist  $(0,6 - 3,0)\ \text{GeV}/c$ . Obere Reihe:  $x$ -Koordinate, untere Reihe:  $y$ -Koordinate. Linke Spalte: inneres Spurkammersystem; mittlere Spalte:  $5\ \text{mm}$ -Bereich des äußeren Spurkammersystems; rechte Spalte:  $10\ \text{mm}$ -Bereich des äußeren Spurkammersystems. Die durchgezogene Linie zeigt das Residuum, wenn ein Treffer im Suchbereich gefunden wurde, die gestrichelte Linie den Abstand des nächsten Treffers, wenn kein Treffer im Suchbereich mit den in Tab. 8.9 angegebenen Größen der Suchbereiche gefunden wurde.

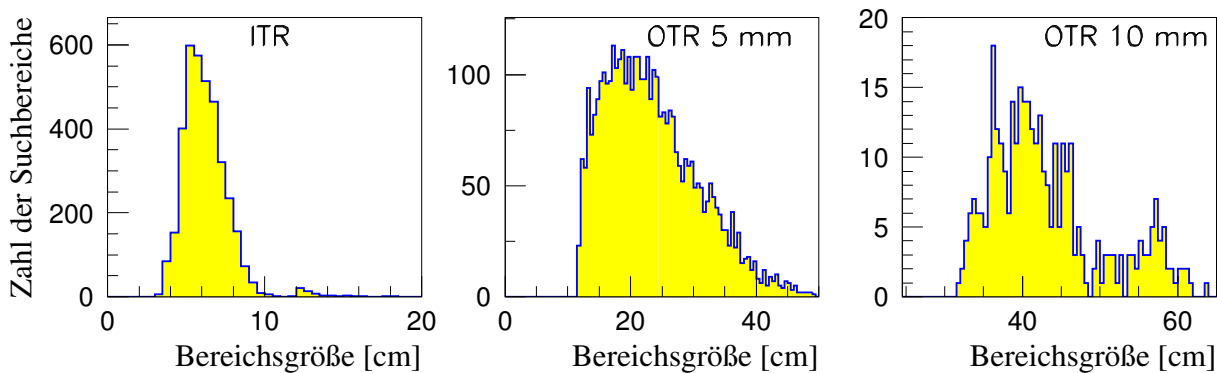
Die Residuen, d.h. die Differenzen zwischen wahren Auftreffpunkt und dem nächsten Treffer der extrapolierten Spur in der  $x$ - und  $y$ -Koordinate, sind für simulierte Spuren, die einen Impuls zwischen  $0,7 - 2,9\ \text{GeV}/c$  haben, in Abb. 8.14 dargestellt. Die durchgezogene Linie zeigt

den Abstand der beiden Punkte, wenn ein Treffer in einem vorgewählten Suchbereich liegt, der für Spuren mit einem Impuls von  $(0,6 - 3,0)$  GeV/ $c$  bemessen wurde, die gestrichelte Linie zeigt den Abstand des nächsten Treffers, wenn kein Treffer im Suchbereich gefunden wurde. Der verwendete Impuls der Teilchen ist etwas kleiner als der Impuls in dem nach einem Teilchen gesucht wird, um nicht durch Randeffekte, wie z. B. Vielfachstreuung zu falschen Fenstergrößen zu gelangen. Als Suchbereich in der  $y$ -Koordinate wurden die in Tab. 8.15 angegebenen Suchbereichsgrößen in den verschiedenen Detektorbereichen verwendet. Der Suchbereich in der  $x$ -Koordinate hängt von der Steigung der Vertexdetektorspur und dem gewünschten Impulsbereich ab, je größer der Winkel zwischen der Spur und der Protonstrahlröhre ist, desto größer wird der Suchbereich in der  $x$ -Koordinate. Im inneren Spurkammersystem und im 5 mm-Bereich des äußeren Spurkammersystems werden etwa gleich viele Spuren gefunden. Im 10 mm-Bereich des äußeren Spurkammersystems werden weniger Spuren gefunden als in den anderen beiden Detektorbereichen. In allen drei Detektorbereichen zeigt sich ein scharfes Maximum bei 0, was von einer guten Übereinstimmung des wahren und des nach der Methode mit dem Knick in der Mitte des Magneten berechneten Auftreffpunktes herrührt. An diesen Residuen kann die Größe der Suchbereiche in der  $y$ -Koordinate bestimmt werden. Die Größe der Suchbereiche sind für

Superlage	Suchbereich	Suchbereichsgröße in cm		
		ITR	OTR (5 mm)	OTR (10 mm)
1. PC-Lage	$x$	4 – 10	10 – 45	30 – 55
	$y$	4,5	11,5	22,5
4. PC-Lage	$x$	2	5	5
	$y$	4,5	11,5	22,5

**Tabelle 8.9:** Größe des Suchbereichs in cm in  $x$ - und  $y$ -Koordinate für die 1. und 4. PC-Lage.

die 1. PC-Lage und auch für die 4. PC-Lage in Tab. 8.9 gezeigt. In der  $y$ -Koordinate werden in beiden PC-Lagen die gleichen Suchbereichsgrößen verwendet, da die Größe des Suchbereichs in der  $y$ -Koordinate nicht durch den gesuchten Impuls, sondern hauptsächlich vom Auslesestreifenabstand abhängt. In der  $x$ -Koordinate wird in der 1. PC-Lage abhängig von der Steigung der Spur ein zum Teil sehr großer Suchbereich verwendet, in der 4. PC-Lage kann dieser Bereich, da der Impuls aus dem gefundenen Treffer aus der 1. PC-Lage ermittelt wurde, deutlich kleiner gewählt werden.

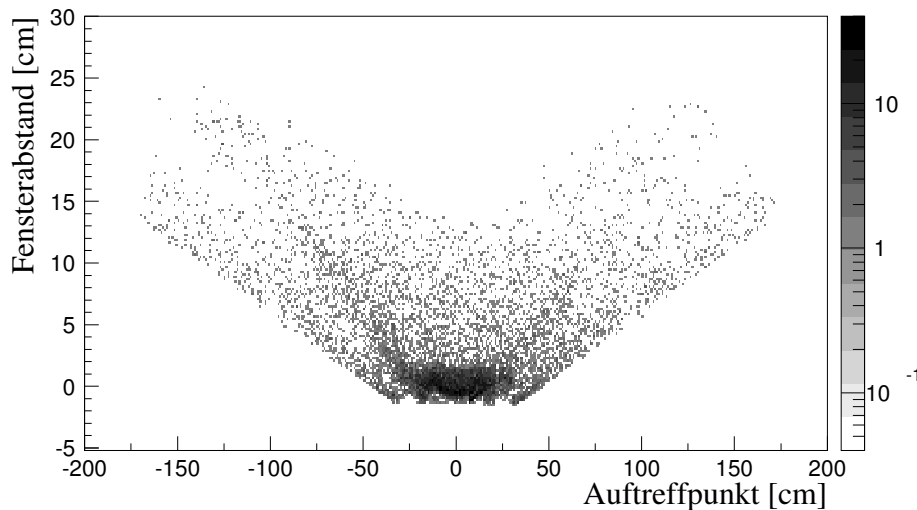


**Abbildung 8.15:** Größe des Suchbereichs in der  $x$ -Koordinate in der 1. PC-Lage.

Die  $x$ -Breite des Suchbereichs in der 1. PC-Lage ist für Suchbereiche, die ganz in einem der drei Detektorbereiche liegen, in Abb. 8.15 dargestellt. Im inneren Spurkammersystem, das dem

Strahlrohr am nächsten ist, ist der  $x$ -Suchbereich im Mittel 6 cm groß; im äußeren Spurkammersystem mit Drahtabstand 5 mm ist der Suchbereich im Mittel 23 cm groß; im 10-mm-Bereich des äußeren Spurkammersystems ist er 42 cm groß. Je weiter außen im Detektor der Treffer gesucht wird, desto größer ist der Suchbereich.

Da bei den Vertexdetektorspuren die Ladung des Teilchens unbekannt ist, muß in zwei Suchbereichen in der 1. PC-Lage nach einem Treffer gesucht werden. Da der Ort des Suchbereichs hauptsächlich von der Steigung der Vertexdetektorspur abhängt, können die Suchbereiche sich sehr nah sein oder sich überlappen. Der  $x$ -Abstand der Suchbereiche ist in Abb. 8.16 abhängig vom Auftreffpunkt der Spur mit der richtigen Ladung dargestellt. Im  $x$ -Bereich von -30 bis 30 cm überlappen sich die Suchbereiche sehr häufig. Insgesamt überlappen sich 28% der Suchbereiche. Je steiler die Vertexdetektorspur ist und je weiter außen daher der Auftreffpunkt im Detektor ist, desto weiter sind die Suchbereiche voneinander getrennt.



**Abbildung 8.16:** Abstand der beiden Suchbereiche zueinander in Abhängigkeit des Auftreffpunktes des Teilchens mit der richtigen Ladung. In 28% der Fälle überlappen sich die Suchbereiche.

### 8.8.2 Effizienz der Suchmethode für einen perfekten Detektor

Im Kap. 8.8.1 wurde aufgezeigt, wie die Suche nach einer Spur mit einem großen Transversalimpuls technisch implementiert werden kann. In diesem Abschnitt werden Effizienzen, Spuren mit großem Transversalimpuls zu finden, angegeben. Teilchen, die nicht im gewünschten Impulsbereich liegen, können durch Treffer, die in beiden Suchbereichen liegen, fälschlicherweise als Spur mit großem Transversalimpuls detektiert werden und so zu einer Fakeeffizienz führen. Es wird in beiden Spurkammersuperlagen in zwei Doppellagen nach einer Trefferkoinzidenz von zwei der drei Stereolagen gesucht. Eine Spur mit einem großen Transversalimpuls muß in beiden Spurkammersuperlagen jeweils in einer der Doppellagen einen Treffer haben, um detektiert zu werden.

Zur Überprüfung der Effizienz, eine Spur mit großem Transversalimpuls zu finden, wird ein 100% effizienter Detektor simuliert. Es werden nur Spuren verwendet, die sowohl durch die 1. als auch durch die 4. PC-Lage verlaufen. Zur Berechnung der Effizienz und Fakeeffizienz wird die Ladung des Teilchens als bekannt vorausgesetzt, dadurch ergibt sich ein richtiger und ein falscher Ladungsbereich. Es können die folgenden unterschiedlichen Fälle eintreten:

- Teilchen mit Impuls im gesuchten Impulsbereich, richtige Ladung
  - Treffer in der 1. PC-Lage nachgewiesen.
  - Treffer nicht in der 1. PC-Lage nachgewiesen.
  - Treffer in der 1. und 4. PC-Lage nachgewiesen.
  - Treffer in der 1., aber nicht in der 4. PC-Lage nachgewiesen.
- Teilchen mit Impuls im gesuchten Impulsbereich, falsche Ladung
  - Treffer in der 1. PC-Lage nachgewiesen.
  - Treffer in der 1. und 4. PC-Lage nachgewiesen.
- Teilchen mit Impuls außerhalb des Impulsbereichs
  - Treffer in der 1. PC-Lage nachgewiesen.
  - Treffer in der 1. und 4. PC-Lage nachgewiesen.

Minimale Voraussetzung an die Spuren sind, daß sie mindestens 6 Treffer im Vertexdetektor haben, und mindestens 15 Treffer im Spurkammersystem. In der Simulation wurden 13605 Spuren, die im Transversalimpulsbereich liegen, und 46022 Spuren, die nicht im Transversalimpulsbereich liegen, generiert. Mit diesen Spuren wird die Effizienz, mit der ein Teilchen mit großem Transversalimpuls gefunden wird, sowie die Fakeeffizienz, mit der eine Spur außerhalb des Transversalimpulsbereichs fälschlicherweise als Spur mit großem Transversalimpuls gefunden wird, berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 8.10 gezeigt. Überlappen sich die Suchbereiche, wird im falschen Ladungssuchbereich nur in dem nicht überlappenden Bereich nach Treffern gesucht. Die Effizienzen und Fakeeffizienzen sind in der Tabelle wieder in die drei Spurkammersystembereiche unterteilt, wobei bei Spuren, die in der 1. und 4. PC-Lage in unterschiedlichen Teilbereichen des Spurkammersystems gefunden werden, die Effizienzen und Fakeeffizienz bei dem Spurkammersystem eingetragen sind, bei dem sie in der 1. PC-Lage gefunden wurden. Die Effizienz, in der 1. PC-Lage, die Spur eines Teilchens mit einem Transversalimpuls im gewünschten Bereich zu finden, ist 98%.

Die Effizienz, ein Teilchen mit einem großen Transversalimpuls in der 1. und 4. PC-Lage zu finden, ist über alle Detektorbereiche gemittelt mit 96,5% sehr hoch. Die Effizienz, fälschlicherweise ein Teilchen mit einem Impuls außerhalb des gewünschten Transversalimpulsbereichs oder im falschen Ladungsbereich in beiden PC-Lagen zu finden, ist mit 26,1% bzw. 7,6% allerdings auch relativ hoch. Es werden nicht alle Teilchen, die im Impulsbereich liegen, mit dieser Methode nachgewiesen, weil das Magnetfeld durch Randeffekte leicht von einem idealen Dipolfeld abweicht, und deswegen Teilchen anders abgelenkt werden können, oder die Teilchen durch Vielfachstreuung an den Detektoren von ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt werden.

### 8.8.3 Effizienz der Suchmethode für einen reellen Detektor

Im vorherigen Abschnitt wurde ein 100% effizienter Detektor verwendet. In diesem Abschnitt wird ein reelles Detektorverhalten simuliert. Die Spurkammern haben in diesem Fall keine 100%ige Effizienz, sondern nur eine 90%ige Effizienz. Durch die geringere Kammereffizienz verringert sich die Treffermultiplizität in den Detektoren. Für diesen reellen Detektor ist in Tab. 8.11 die gleiche Effizienztable wie im vorherigen Kapitel aufgezeigt.

Für einen reellen Detektor werden sehr viel weniger Spuren, die genügend Treffer im Vertexdetektor oder im Spurkammersystem haben, gefunden. Die Effizienz, in der 1. und in der 4.

Treffer gefunden/ Treffer nicht gefunden	Auftrittspunkt des Treffers im Detektorbereich			Gesamt
	ITR	OTR (5 mm)	OTR (10 mm)	
Spur mit Impuls im Bereich $0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ und Ladung C				
Anzahl Spuren	4986	6965	727	12678
in 1. PC-Lage	4981 (99,9%)	6792 (97,5%)	709(97,5%)	(98,3%)
nicht in 1. PC-Lage	5 (0,1%)	173 ( 2,5%)	18 ( 2,5%)	( 1,7%)
in 1. und 4. PC-Lage	4973 (99,7%)	6628 (95,2%)	689 (94,7%)	(96,5%)
in 1. nicht in 4. PC-Lage	8 (0,2%)	164 (2,%)	20(2,8%)	(2,6%)
Spur mit Impuls im Bereich $0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ und falscher Ladung C				
in 1. PC-Lage	1134	1775	163	(24,2%)
in 1. und 4. PC-Lage	430	517	19	(7,6%)
Spur mit Impuls nicht im Bereich $0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ , beide Ladungen				
	46871			
in 1. PC-Lage	8901	15885	2706	(58,7%)
in 1. und 4. PC-Lage	4499	6758	996	(26,1%)

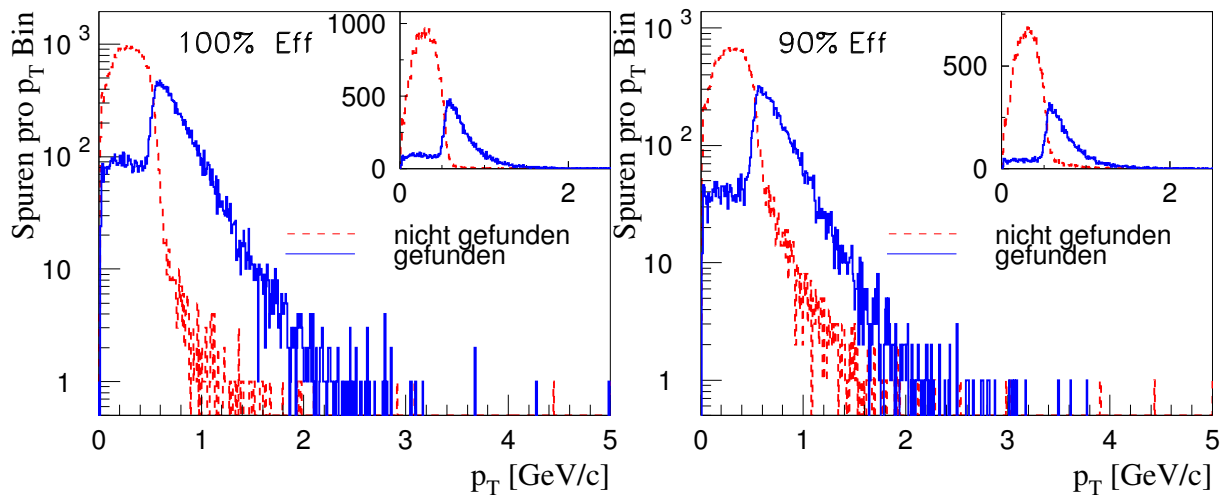
**Tabelle 8.10:** Effizienz der Suchbereiche und Anzahl der fälschlicherweise gefundenen Spuren mit großem Transversalimpuls für einen perfekten Detektor. Es werden nur Spuren, die durch den ganzen Detektor verlaufen, verwendet. Es ist die Anzahl der Spuren, die durch die Suchmethode gefunden werden, sowie der Anteil in Prozent an der jeweiligen Gesamtzahl angegeben.

Treffer gefunden/ Treffer nicht gefunden	Auftrittspunkt des Treffers im Detektorbereich			Gesamt
	ITR	OTR (5 mm)	OTR (10 mm)	
Spur mit Impuls im Bereich $0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ und Ladung C				
	4895	3565	484	8944
in 1. PC-Lage	4890 (99,9 %)	3335 (93,5%)	450 (93,0%)	95,5%
nicht in 1. PC-Lage	5 (0,1%)	230 (6,5%)	34 (7,0%)	4,5%
in 1. und 4. PC-Lage	4789 (97,3%)	2800 (78,5%)	374 (77,3%)	84,4%
in 1. nicht in 4. PC-Lage	101 (2,1%)	535 (15,0%)	76 (15,7%)	10,9%
Spur mit Impuls im Bereich $0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ und falscher Ladung C				
in 1. PC Lage	967	620	66	18,5%
in 1. und 4. PC-Lage	325	139	6	5,3%
Spur mit Impuls nicht im Bereich $0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ beide Ladungen				
	31642			
in 1. PC-Lage	7555	6226	1419	48,0%
in 1. und 4. PC-Lage	3753	2196	441	20,1%

**Tabelle 8.11:** Effizienzen der Suchbereiche für einen realistischen Detektor. Es ist die Anzahl der Spuren, die in dem Impulsbereich liegen, wie auch der Anteil in % von der Gesamtzahl angegeben.

PC-Lage einen Treffer zu finden, ist von den 96,5% für einen perfekten Detektor auf 84,4% für einen realen Detektor zurückgegangen. Die Effizienz, im falschen Ladungsbereich einen Treffer zu finden, ist von 7,6% auf 5,3% zurückgegangen, die Fakeeffizienz, einem Teilchen irrtümlich einen großen Transversalimpuls zuzuordnen, ist von 26,1% auf 20,1% zurückgegangen.

Mit einem realen Detektor ist die Effizienz, ein Teilchen mit großem Transversalimpuls zu finden, immer noch sehr hoch im Vergleich zu der Effizienz, irrtümlich ein Teilchen mit einem Transversalimpuls im Impulsbereich durch zufällige Trefferkombinationen zu finden.



**Abbildung 8.17:** Transversalimpulsverteilung nach Treffersuche in der 1. und 4. PC-Lage. Gestrichelt ist der Transversalimpuls dargestellt für die durch die Suchbereiche gefundenen Teilchen. Die durchgezogene Linie zeigt den Transversalimpuls der Teilchen, wenn kein Treffer in beiden Suchbereichen gefunden wurden. Das linke Bild zeigt die Verteilungen für einen 100% effizienten Detektor, das rechte Bild die Verteilung für einen reellen Detektor.

Für einen idealen Detektor und für einen reellen Detektor ist in Abb. 8.17 der Transversalimpuls des Teilchens gezeigt, wenn es durch die Suchmethode gefunden oder nicht gefunden wurde. Die gestrichelte Linie zeigt die Transversalimpulse der nicht gefundenen Teilchen, die durchgezogene Linie den Transversalimpuls der in den Suchbereichen gefundenen Teilchen. Im Transversalimpulsbereich von  $(0,6 - 3,0)$  GeV/c werden durch die Suchbereichsmethode mehr Teilchen gefunden als außerhalb dieses Bereichs. Bei dem idealen Detektor werden durch die Suchmethode 97% der Teilchen mit einem Transversalimpuls im gesuchten Bereich detektiert, bei einem 90% effizienten Detektor werden 89% der Teilchen detektiert. Bei beiden Detektoreffizienzen werden etwa 16–17% der Teilchen mit einem Transversalimpuls außerhalb des gesuchten Suchbereichs detektiert.

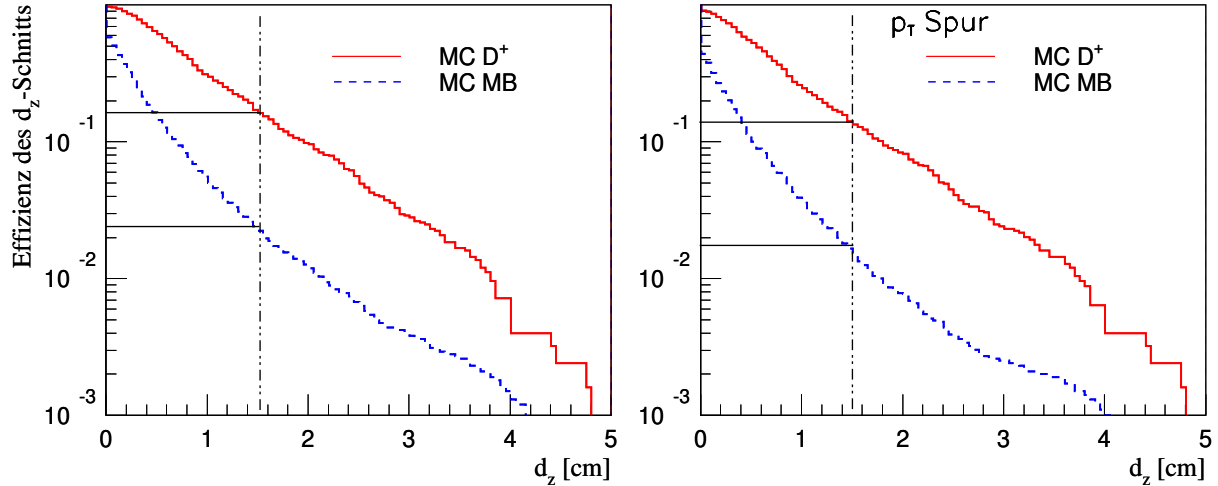
#### 8.8.4 Zusammenfassung Transversalimpulstrigger

Es ist möglich, mit der Suchbereichsmethode Teilchen im vorgegebenen Transversalimpulsbereich zu detektieren. Die Effizienz, ein solches Teilchen zu detektieren, ist für ein 90% effizientes Spurkammersystem 84%, wobei ein Teilchen außerhalb des gewünschten Transversalimpulsbereichs mit einer Wahrscheinlichkeit von 20% akzeptiert wird.

Der Transversalimpulstrigger soll dazu verwendet werden, Ereignisse, die einen  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall enthalten, anzureichern. Eines dieser Zerfallsprodukte hat einen Transversalimpuls zwischen  $(0,6 - 3,0)$  GeV/c. Es muß also ausgehend von einem abgesetzten Dreiteilchenvertex jede dieser Spuren mit der Suchbereichsmethode überprüft werden, ob sie einen großen Transversalimpuls hat.

Für einen Detektor mit einer 90%igen Spurkammereffizienz soll nun die Effizienz für  $D^+$ -Zerfälle und die Reduktion von  $MB$ -Ereignissen als Funktion des Schnittes auf die Vertexseparation  $d_z$  bestimmt werden. Hierfür werden nur Dreispurvertices mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm akzeptiert. Finden sich in einem Ereignis mehrere Kandidaten, wird derjenige mit dem größten Abstand zum Primärvertex verwendet. Die Verteilungen werden auf die Anzahl der verwendeten Ereignisse normiert ( $D^+$ -Simulation 1246,  $MB$ -Simulation 9959 (siehe Abschnitt 8.3)). Die sich ergeben-

den Verteilungen sind links in Abb. 8.18 dargestellt. In der rechten Abbildung wird zusätzlich zu diesem guten Vertex verlangt, daß eine der drei Spuren eine durch die Suchbereichsmethode gefundene Spur mit einem Transversalimpuls von  $(0, 6 - 3, 0)$  GeV/c hat. Durch einen  $d_z$ -Schnitt von 1,5 cm kann etwa der benötigte Unterdrückungsfaktor für  $MB$ -Ereignisse erreicht werden (siehe Abschnitt 8.1), zum besseren Vergleich werden im weiteren nur  $d_z$ -Schnitte von 1,5 cm betrachtet.



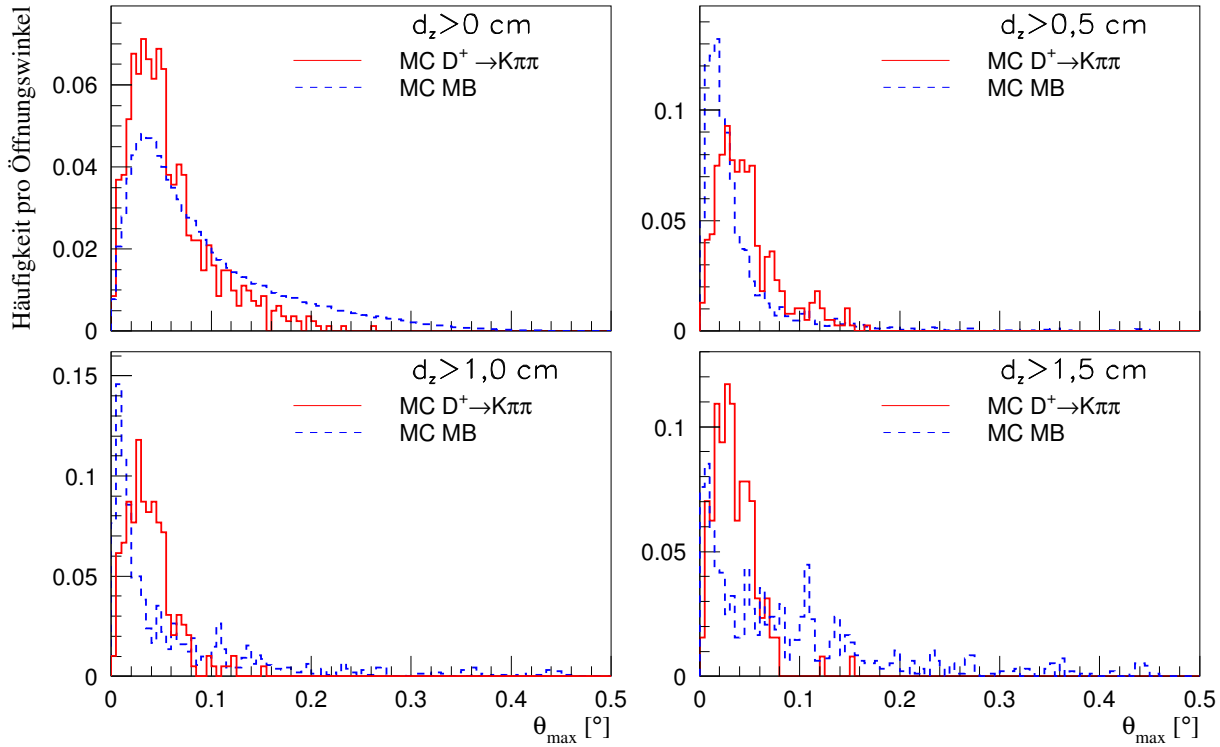
**Abbildung 8.18:** Effizienz des  $d_z$ -Schnitts, für einen realistischen Detektor, für gute Dreiteilchenvertices, bei denen  $d_{vtx} < 0,17$  mm ist. Die durchgezogene Linie zeigt die Abnahme der Ereignisse der  $D^+$ -Simulation, die gestrichelte Linie zeigt die Abnahme der  $MB$ -Simulation. Links ist die Abnahme der Ereignisse dargestellt, wenn nur auf die Vertexqualität geschnitten wird. Rechts ist die Abnahme dargestellt, wenn zusätzlich zu der Vertexqualität noch verlangt wird, daß eine der Spuren des Triplets eine durch die Suchbereichsmethode gefundene Spur mit großem  $p_T$  hat. Normiert sind die Verteilungen auf die Anzahl der Ereignisse

Wird ein guter Dreiteilchenvertex mit einem Abstand  $d_z > 1,5$  cm verlangt, werden die  $MB$ -Ereignisse um einen Faktor 7,0 mehr gegenüber den  $D^+$ -Ereignissen reduziert. Wird zusätzlich eine Spur mit einem großem Transversalimpuls, der durch die Suchmethode gefunden wurde, verlangt, beträgt die Reduktion der  $MB$ -Ereignisse gegenüber den  $D^+$ -Ereignissen ein Faktor 8,5. Die Unterdrückung der  $MB$ -Ereignisse kann also durch die Suche nach einer Spur mit großem  $p_T$  mit dem Transversalimpulstrigger erhöht werden. Der Verlust der  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle durch diesen zusätzlichen Schnitt beträgt 18%, die  $MB$ -Ereignisse werden um 35% reduziert.

## 8.9 Öffnungswinkeltrigger

Eine weitere Größe, die helfen kann, wahre  $D^+$ -Zerfälle von zufälligen Kombinationen dreier Spuren zu trennen, ist der Öffnungswinkel der Spuren am Zerfallsvertex. Der größte Öffnungswinkel  $\theta_{max}$  der wahren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle und guter Dreiteilchenvertices aus der  $MB$ -Simulation für Vertices, bei denen  $d_{vtx} < 0,17$  mm ist, ist in Abb. 8.19 für vier verschiedene Abstände  $d_z$  dargestellt. In der oberen linken Abbildung wird kein  $d_z$  verlangt, in den anderen Abbildungen wird jeweils der angegebene Abstand der Dreiteilchenvertices verlangt.

Wird kein Abstand  $d_z$  des Dreiteilchenvertex verlangt, werden mehr Ereignisse in der  $MB$ -Simulation gefunden, die ein  $\theta_{max}$  bei größeren Winkeln haben. Wird verlangt, daß der Dreiteilchenvertex einen Abstand  $d_z > 0,5$  cm hat, sehen die Verteilungen des größten Öffnungswinkels in den beiden Simulationen sehr verschieden aus. Die größten Öffnungswinkel der Triplets aus der  $MB$ -Simulation sind zu kleineren Winkeln verschoben, bei den wahren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -

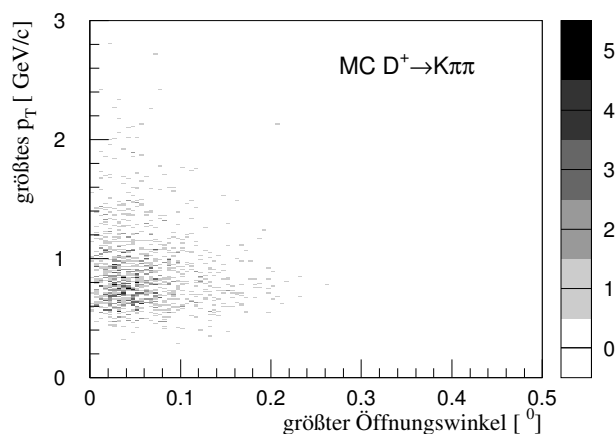


**Abbildung 8.19:** Größter Öffnungswinkel bei Dreiteilchenzerfällen aus Vertices mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm und einem angegebenen Abstand  $d_z$ . Gestrichelt für Triplets der  $MB$ -Simulation, die durchgezogene Linie zeigt den größten Öffnungswinkel aus dem Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ . Die Histogramme sind auf die Anzahl der Einträge normiert.

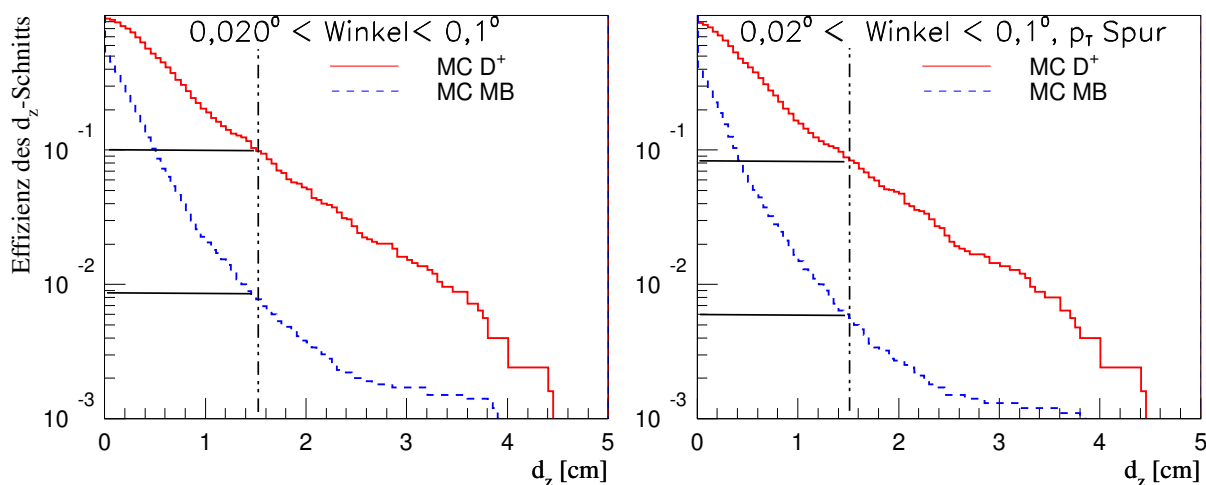
Zerfällen werden bei sehr kleinen Öffnungswinkeln weniger Einträge gefunden. Es bietet sich also die Möglichkeit,  $MB$ -Ereignisse gegenüber den wahren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfällen zu reduzieren. Da nur wenige  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle mit einem  $\theta_{max} > 0,1^\circ$  und mehr  $MB$ -Triplets als  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle mit einem  $\theta_{max} < 0,02^\circ$  gefunden werden, kann ein Schnitt  $\theta_{max} \in [0,02^\circ; 0,1^\circ]$  angewendet werden. In Abb. 8.20 ist der größte Öffnungswinkel  $\theta_{max}$  der wahren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle gegenüber dem größten Transversalimpuls der Spuren aufgetragen. Es gibt keine Korrelation zwischen den beiden Größen. Daher bietet sich die Möglichkeit, beide Schnitte zu verwenden, und sowohl auf den größten Öffnungswinkel sowie auf eine Spur mit großem Transversalimpuls mit Hilfe der Suchbereichsmethode zu schneiden.

Die Effizienz des  $d_z$ -Schnittes, wenn eine Spur aus dem Vertex mit einem größten Öffnungswinkel im Bereich von  $(0,02 - 0,1)^\circ$  gefunden wurde, ist links in Abb. 8.21 dargestellt. Durch das Verlangen eines größten Öffnungswinkels im Bereich von  $(0,02 - 0,1)^\circ$  können die  $MB$ -Ereignisse um einen Faktor 12,6 gegenüber den Ereignissen der  $D^+$ -Simulation reduziert werden. Wird zusätzlich auch noch der Transversalimpulsschnitt auf die Ereignisse angewandt, können die  $MB$ -Ereignisse gegenüber den  $D^+$ -Zerfällen um einen Faktor 14,6 reduziert werden. Die  $MB$ -Ereignisse werden mit diesen Schnitten schon weit mehr als einen Faktor 50 reduziert, es sind daher etwas lockere Schnitte im Abstand  $d_z$  möglich.





**Abbildung 8.20:** Größter Öffnungswinkel gegen Transversalimpuls der Spur mit dem größten Transversalimpuls für wahre  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle.



**Abbildung 8.21:** Effizienz des  $d_z$ -Schnitts, für einen realistischen Detektor, für gute Dreiteilchenvertices, bei denen  $d_{vtx} < 0,17$  mm ist. Die durchgezogene Linie zeigt die Abnahme der Ereignisse der  $D^+$ -Simulation, die gestrichelte Linie zeigt die Abnahme der  $MB$ -Simulation. Links muß der größte Öffnungswinkel im Bereich zwischen  $(0,02 - 0,1)^\circ$  liegen, um diesen Schnitt zu erfüllen. Rechts wird zusätzlich eine Spur mit einem  $p_T$  im Bereich zwischen  $(0,6 - 3,0)$  GeV/c verlangt, die durch die Methode des Transversalimpulstriggers gefunden wurde. Normiert sind die Verteilungen auf die Anzahl der ursprünglichen Ereignisse.

### 8.9.1 Zusammenfassung des Sekundärvertex-Triggers auf den $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall

Der Zerfall  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ , bei dem ein geladenes  $D$ -Meson, das eine Lebensdauer von 1,05 ps hat und dadurch einige mm durch den Detektor verläuft, bevor es in drei geladene Spuren zerfällt, ist besonders geeignet, Open-Charms-Mesonen anzureichern. Dieser vom Target separierte Dreiteilchenvertex bietet sich an, um darauf im SLT-Trigger zu triggern. Dazu muß der ganze Vertexdetektor ausgelesen werden und es müssen Spuren im Vertexdetektor rekonstruiert werden. Alle Spuren müssen miteinander kombiniert werden, und geprüft werden, ob die Kombinationen einen guten Dreiteilchenvertex bilden.

Bei guten Dreiteilchenvertices ist die „Wurzel der Summe der Abstandsquadrate“ zu einem rekonstruierten Vertex kleiner als 0,17 mm. Neben den Schnitten auf einen guten Dreiteilchenvertex kann ein  $z$ -Abstand  $d_z$  des Sekundärvertex zum Target als Unterscheidungsmerkmal für

$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle verwendet werden. Da in  $MB$ -Ereignisse alle Mehrteilchenzerfälle vom Target herrühren, bietet sich hierbei schon eine gute Reduktion der  $MB$ -Ereignisse. Als weitere Unterscheidungsmerkmale zwischen  $MB$ -Ereignissen und wahren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfällen bieten sich Schnitte auf den größten Transversalimpuls und den größten Öffnungswinkel der drei Spuren aus dem Zerfall an.

Im SLT-Trigger ist der Impuls und die Ladung der Teilchen nicht bekannt. Sie können aber durch eine Extrapolation der Vertexdetektorspur durch den Magneten in das Spurkammersystem abgeschätzt werden. Dazu müssen Teilbereiche des Spurkammersystems zusätzlich zum Vertexdetektor ausgelesen werden. Es bietet sich dadurch die Möglichkeit Spuren in einem gewissen Impulsbereich zu selektieren, und dadurch  $MB$ -Ereignisse gegenüber Ereignissen mit einem  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfall zu reduzieren.

Im SLT-Trigger muß die Eingangsrate um einen Faktor 50 reduziert werden, damit alle getriggerten Ereignisse auf Band geschrieben werden können. Mit in den vorherigen Abschnitten besprochenen Triggerszenarien können  $MB$ -Ereignisse sehr gut reduziert werden. Bisher wurde die Reduktion der Ereignisse für einen  $d_z$ -Schnitt von 1,5 cm betrachtet. Die Hinzunahme weiterer Schnitte erlaubt bei gleicher Rate von  $MB$ -Ereignissen die Lockerung des  $d_z$ -Schnittes. In Tab. 8.12 sind für verschiedene angewandte Schnitte der  $d_z$ -Abstand, der mit den weiteren angewandten Schnitten eine Reduktion der  $MB$ -Ereignisse um einen Faktor 50 liefert und die Effizienz der  $D^+$ -Simulation angegeben, .

	$d_{vtx} < 0,17$ mm und weitere Schnitte			
	$d_z$	$d_z$ $p_T$ -Spur	$d_z$ $\theta_{max}$	$d_z$ $p_T$ -Spur $\theta_{max}$
benötigter $d_z$ -Schnitt	1,6 cm	1,4 cm	1,05 cm	0,9 cm
Effizienz der $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Simulation	15,5%	18,6%	19,1%	20,0%

**Tabelle 8.12:** Effizienz der  $D^+$ -Simulation, bei einer Reduktion der  $MB$ -Simulation um einen Faktor 50, für gute Dreiteilchenvertices mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm. Die Effizienzen sind für gute Dreiteilchenvertices mit  $d_z$ -Schnitt, einem zusätzlichen Schnitt auf den größten Transversalimpuls von  $0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3,0 \text{ GeV}/c$ , sowie nach einem weiteren Schnitt auf den größten Öffnungswinkel von  $0,02^\circ < \theta_{max} < 0,1^\circ$  angegeben.

Durch die in den letzten Abschnitten besprochenen Schnitte können  $MB$ -Ereignisse bei hoher Effizienz von rekonstruierbaren  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfällen genügend Reduziert werden, um die Ausgangsrate des SLT-Triggers von 200 Hz zu erreichen.

## 8.10 Vergleich von Simulation und Daten

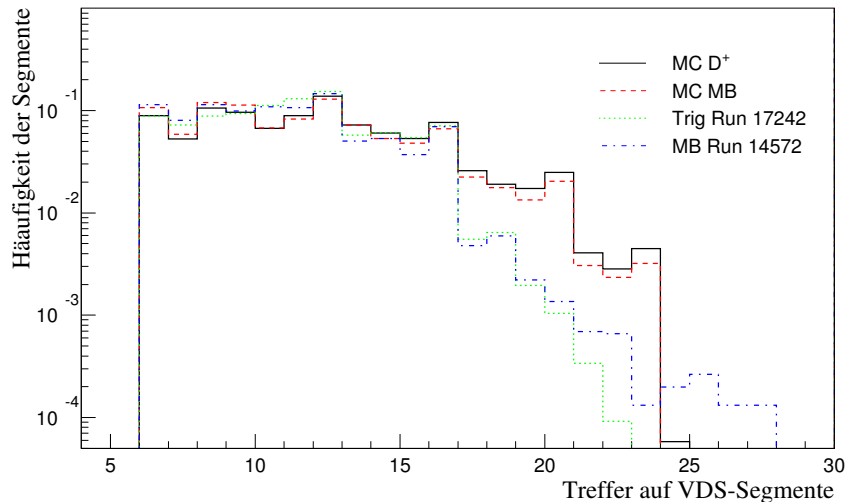
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit Daten aus zwei Datennahmeperioden des Jahres 2000 überprüft. Insbesondere werden wichtige Grundverteilungen überprüft wie Vertexpauflösung, die Multiplizität und die relevanten Verteilungen der Sekundärvertices  $d_z$  und  $d_{vtx}$ . Leider konnte keine Datennahme verwendet werden, die den simulierten Triggerbedingungen entspricht. Verglichen wurde mit einem Run mit zufälligen Triggern (Run 14572) und ein Run mit einem FLT-Trigger auf ein Lepton (Run 17242). Im Run 17242 wurde auf eine Leptonspur getriggert, bei diesem wurde ausgehend von einem Vortriggerlepton eine FLT-Spur und eine SLT-Spur gefunden. Die Myonen hatten durch die geometrische Akzeptanz mindestens einen Transversalimpuls von  $0,6 \text{ GeV}/c$ . Die getriggerten Elektronen hatten mindestens eine Transversalenergie von  $1,5 \text{ GeV}/c^2$ .

Der Run 14572 ist ein *MB*-Run, bei dem jedes zufällig getriggerte Ereignis auf Band geschrieben wurde. Da bei dieser Datennahme keinerlei Ereignisselektion verwendet wurde, werden hier nur Ereignisse verwendet, die mindestens 20 Treffer im RICH haben. Dieses sind in etwa die Kriterien, die beim Wechselwirkungstrigger verwendet werden, um nur Ereignisse, die eine Wechselwirkung der Strahlprotonen mit den Kernen aus dem Drahttarget hatten, auf Band zu schreiben. Beide Runs wurden bei einer Targetrate von 2 MHz aufgenommen. Da das Monte-Carlo nur Ereignisse erzeugt, die genau eine Kollision des Strahls mit dem Draht enthalten, werden auch in den Daten nur Ereignisse verwendet, die genau einen Primärvertex haben.

### 8.10.1 Vertexdetektorspuren und Vertexdetektormultiplizität

Als Vertexdetektormultiplizität wird im folgenden die Anzahl der Spursegmente bezeichnet, die im Vertexdetektor rekonstruiert werden. Ein Spursegment muß dabei in dieser Studie mindestens 6 Treffer im Vertexdetektor haben.

Die Anzahl der Treffer auf den Vertexdetektorspuren ist für die betrachteten Runs und Simulationen in Abb. 8.22 dargestellt. Für bis zu 15 Treffer auf dem Vertexdetektorsegment haben die Simulationen und Daten eine gute Übereinstimmung, ab 15 Treffer auf der Spur überschätzt die Simulation die Daten, und es werden mehr Spuren mit höherer Trefferzahl gefunden.

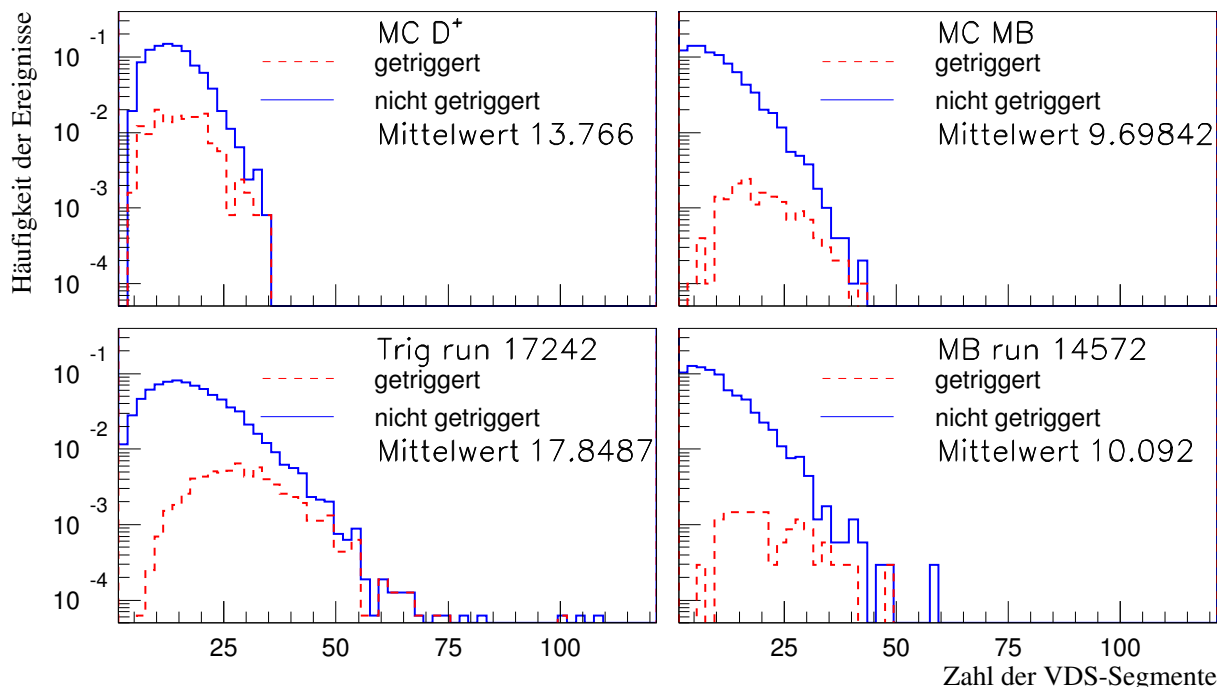


**Abbildung 8.22:** Zahl der Vertexdetektortreffer pro Segmente, für die Simulation und für Daten. Die Histogramme sind auf die gleiche Anzahl von Einträgen von Vertexdetektorsegmenten normiert.

Die Vertexdetektormultiplizität ist für die beiden Simulationen und für die beiden Runs in Abb. 8.23 dargestellt. In den dargestellten Verteilungen wurden nur Ereignisse mit genau einem Primärvertex verwendet. Die durchgezogene Linie beschreibt die Multiplizität aller Ereignisse. Die gestrichelte Linie zeigt die Multiplizität der Ereignisse an, wenn ein SLT-Dreiteilchentrigger mit folgenden Bedingungen ausgelöst worden wäre:

- mindestens drei Spuren im Vertexdetektor
- $\sqrt{\sum_i d_i^2} < 0,17 \text{ mm}$
- $1,5 \text{ cm} < d_z < 5 \text{ cm}$
- 1 Spur mit  $p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$  durch Suchbereichsmethode gefunden.

Die *MB*-Simulation hat etwa die gleiche Multiplizität wie der *MB*-Run 14572. Die Multiplizität des getriggerten Runs 17242 ist eindeutig größer. Bei einer großen Anzahl von Spuren steigt



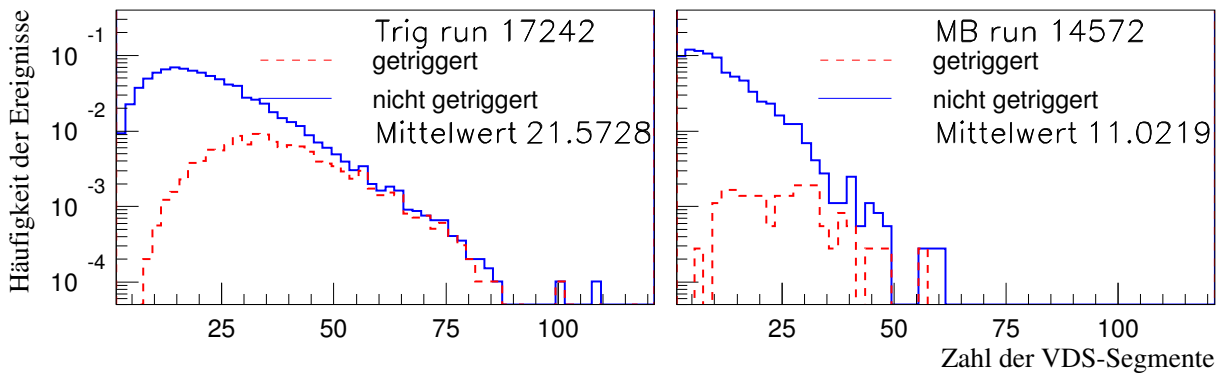
**Abbildung 8.23:** Zahl der Vertexdetektorsegmente pro Ereignis für die Simulationen und für Daten. Die gestrichelte Linie gibt an, wie häufig das Ereignis mit einem Transversalimpulstrigger getriggert worden wäre, wobei ein guter Vertex mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm und ein Abstand  $d_z$  von 1,5 cm verlangt wurde. Bei diesen Verteilungen werden nur Ereignisse berücksichtigt, die nur einen Primärvertex haben.

die Wahrscheinlichkeit, bei  $MB$ -Ereignissen einen zufälligen Vertex an. Dieser Anstieg ist nicht linear. Im Kap. 8.11 wird der Effekt verschiedener Schnitte auf die Daten deswegen separat für verschiedene Multiplizitätsbereiche betrachtet. Bei dem getriggerten Run 17242 ist der Mittelwert der Anzahl der Vertexdetektorsegmente pro Ereignis am größten. Für diesen Vergleich wurden in allen Datensätzen nur Ereignisse verwendet, die genau einen Primärvertex enthalten. Wird diese Einschränkung nicht verlangt, werden im Mittel sehr viel mehr Vertexdetektorspuren gefunden. Dies ist in Abb. 8.24 zu sehen. Der HERA- $B$ -Trigger reichert, wie in der linken Abbildung zu sehen ist, Ereignisse mit vielen Spuren im Vertexdetektor an. Im Mittel haben die durch den HERA- $B$ -Trigger ausgewählten Ereignisse 22 Vertexdetektorspuren, fast einen Faktor 2 mal so viele Spuren wie zufällig getriggerte Ereignisse im  $MB$ -Run 14572.

Ereignisse mit einer hohen Zahl von Segmenten erlauben keine gute Untergrundreduzierung und sie erfordern durch die große Kombinatorik bei der Vertexbestimmung überproportional hohe Rechenzeit. Sie sollen daher so schnell wie möglich aussortiert werden. Das reduziert die Effizienz von Open-Charm-Ereignissen nur wenig.

Ereignisse mit vielen Vertexdetektorspuren sollen deswegen schon früh vor der Rekonstruktion im SLT-Trigger verworfen werden. Während des HERA-Umbaus 2001 wurde zu diesem Zweck ein RICH-Veto entwickelt, das abhängig von der Anzahl der Treffer in einem Teilbereich des RICH-Detektors dem FLT-Trigger ein Multiplizitätsveto für das Ereignis geben kann (siehe [Cru02, Brü02]).

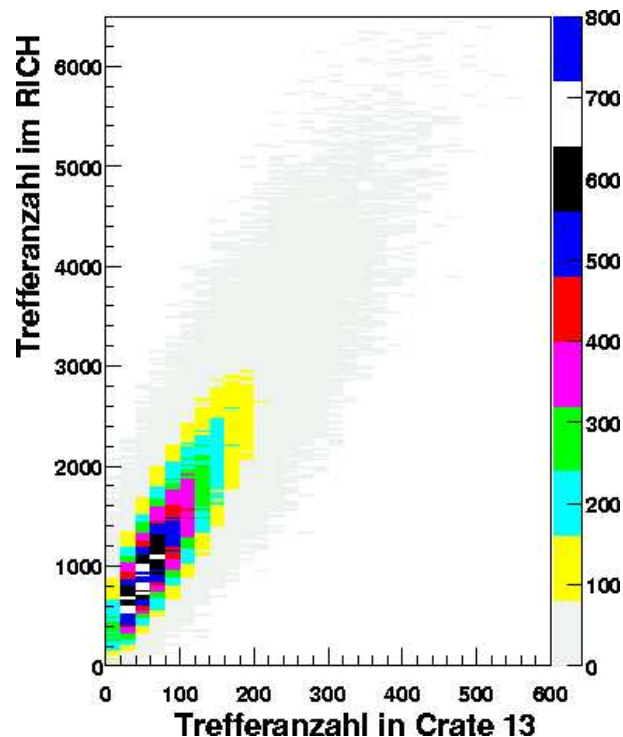
Für den Run 16784 ist in Abb. 8.25 die Anzahl der Treffer im ganzen RICH aufgetragen gegenüber der Anzahl der Treffer in dem Auslesebereich des RICH-Veto. Die Treffer, die im RICH-Veto gefunden werden, und die Treffer, die im ganzen RICH gefunden werden, haben eine gute Korrelation. Durch einen Schnitt auf diese Treffer im RICH oder RICH-Vetobereich können Ereignisse mit hoher Multiplizität sehr früh verworfen werden. Dadurch können vor der



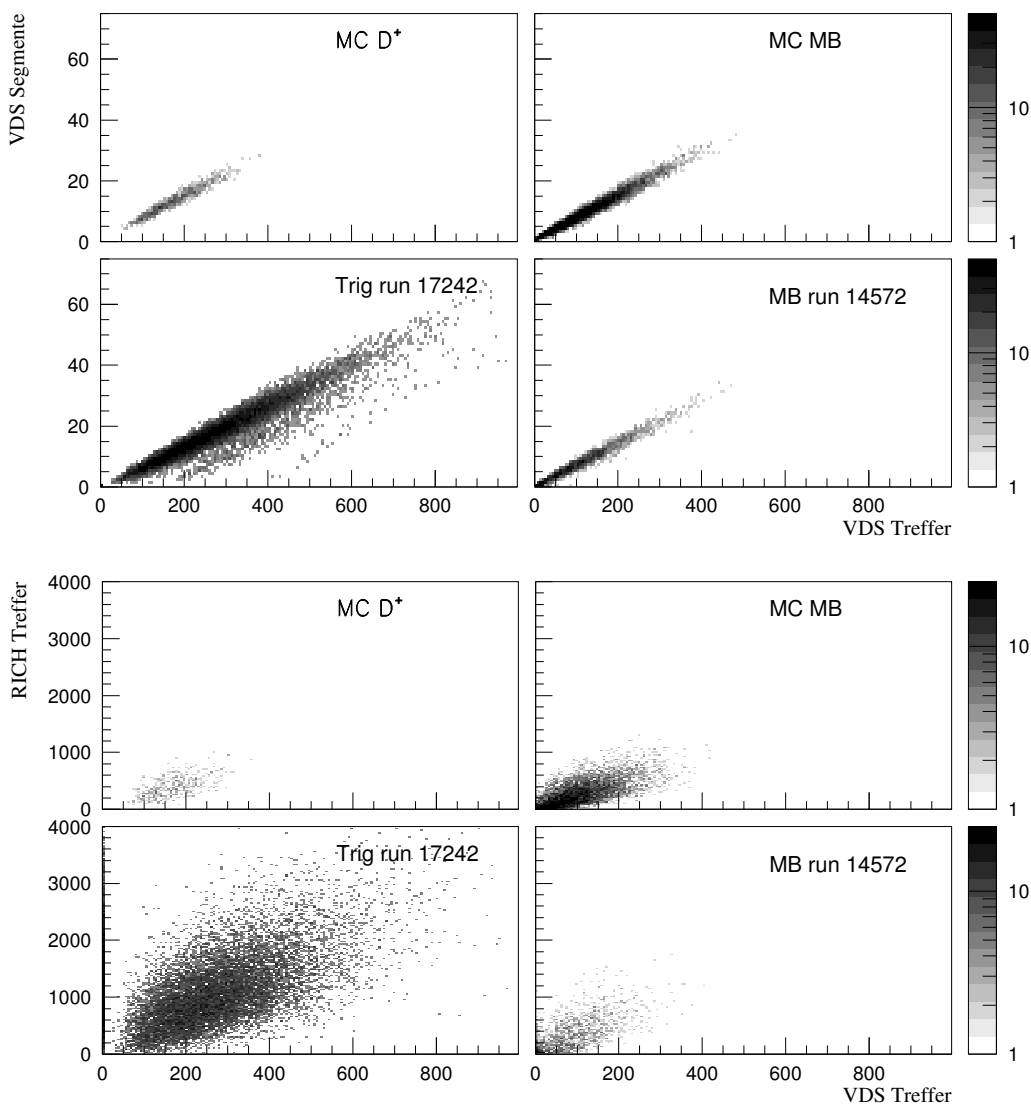
**Abbildung 8.24:** Zahl der Vertexdetektorsegmente pro Ereignis für die beiden Datennahmen. Die gestrichelte Linie gibt wieder die Ereignisse an, wenn sie durch den Transversalimpulstrigger getriggert worden wären. Bei diesen Verteilungen werden alle Ereignisse berücksichtigt, auch wenn mehrere Primärvertices gefunden wurden.

Rekonstruktion im SLT-Trigger Ereignisse mit sehr vielen Treffern im Vertexdetektor und damit auch sehr vielen Vertexdetektorspuren verworfen werden.

Für die beiden Simulationen und die beiden Datennahmeperioden sind in Abb. 8.26 die Korrelationen zwischen Vertexdetektortreffern, der Zahl der Vertexdetektorsegmente und der Zahl der Treffer im RICH dargestellt. Die oberen vier Abbildungen zeigen die Korrelation zwischen der Anzahl der Treffer im Vertexdetektor und den daraus rekonstruierten Vertexdetektorsegmenten. Die Korrelation dieser zwei Größen ist sowohl für die Simulation als auch für die Daten sehr gut. Die unteren vier Abbildungen zeigen die Korrelation zwischen der Zahl der Treffer im RICH und der Treffer im Vertexdetektor. Es ist in Daten wie auch in der Simulation eine Korrelation sichtbar, die aber nicht perfekt ist. Daher kann ein aktives RICH-Multiplizitätsveto effektiv Er-



**Abbildung 8.25:** Korrelation der Treffer im RICH-Vetobereichs mit der im ganzen RICH für den Run 16784 ([Brü02]).



**Abbildung 8.26:** Vergleich Daten mit Monte-Carlo. Obere vier Histogramme: Zahl der Vertexdetektorsegmente gegen Zahl der Treffer im Vertexdetektor; untere vier Histogramme: Zahl der RICH-Treffer gegenüber Zahl der Vertexdetektortreffer.

eignisse zurückweisen, die auch viele Spuren im Vertexdetektor haben und daher für die Suche nach Open-Charm-Ereignissen nicht geeignet sind.

### 8.10.2 FLT-Triggerstrategie

Die Spurmultiplicität ist bei getriggerten Datennahmen höher. Durch diese höhere Multiplicität steigt die Kombinatorik bei einem SLT-Trigger, der auf abgesetzte Dreiteilchenvertices triggert, stark an und somit auch die Rechenzeit, die der SLT-Trigger benötigt. In Ereignissen mit hoher Multiplicität sind nicht überproportional mehr Open-Charm-Ereignisse enthalten, deswegen sollen Ereignisse mit einer großen Multiplicität im FLT-Trigger verworfen werden. Eine maximale Multiplicität von 25 Vertexdetektorspuren wäre wünschenswert.

Da die Zahl der Treffer im RICH mit der Zahl der Treffer im Vertexdetektor, und somit mit der Anzahl der Vertexdetektorsegmente korreliert ist, bietet sich die Möglichkeit, auf verschiedenen Stufen des Triggersystems uninteressante Ereignisse schon früh vor der Rekonstruktion im SLT-Trigger zu verwerfen.

Da die Treffer des RICH-Veto und des RICH stark miteinander korrelieren, kann sehr früh im FLT-Trigger auf die Treffer im RICH-Veto geschnitten werden. Ein loser Schnitt auf die Treffer im RICH von 1500 Treffern verwirft viele Ereignisse mit mehr als 25 Vertexdetektorsegmenten. 1500 Treffer im ganzen RICH entsprechen etwa 100 Treffern im RICH-Veto. Da die Korrelation der Vertexdetektorsegmente mit den Treffern im Vertexdetektor sehr gut ist, bietet sich außerdem die Möglichkeit, Ereignisse, die sehr viele Vertexdetektorspuren haben, schon vor der Rekonstruktion durch ein Zählen der Treffer im Vertexdetektor zu verwerfen. 25 Vertexdetektorspuren haben in etwa 350 Treffern im Vertexdetektor.

Diese zwei Schnitte auf Treffer im RICH-Veto und die Anzahl der Treffer im Vertexdetektor bieten die Möglichkeit, die Ereignisse, die durch ihre hohe Vertexdetektormultiplizität nicht interessant sind, vor der Rekonstruktion der Spuren im Vertexdetektor zu verwerfen.

### 8.10.3 Überprüfung der Vertexpföschung des Vertexdetektors

Die Auflösung des Vertexdetektors für einen Dreiteilchenvertex kann aus der Verschmierung des Primärvertex abgelesen werden. Bei einem Dreiteilchenvertex müssen die drei Spuren folgende Bedingungen erfüllen:

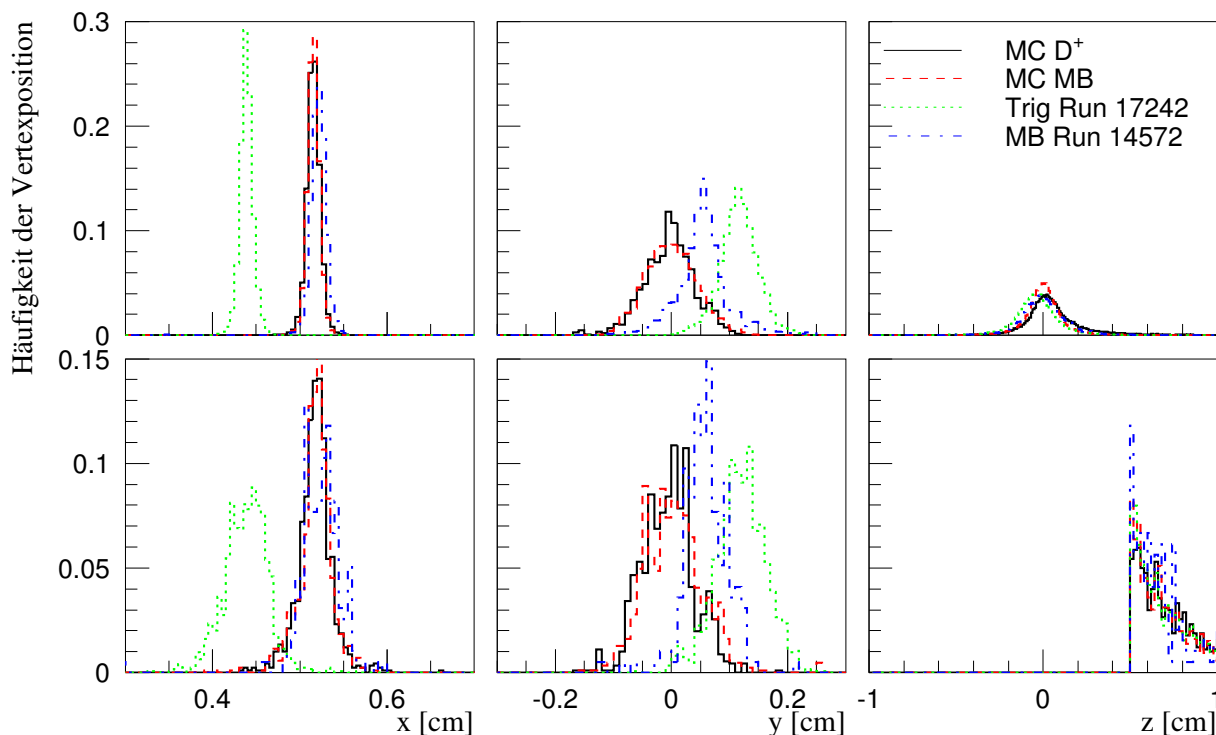
- jedes Vertexdetektorsegment muß mehr als 5 Treffer haben
- $d_{vtx} < 0,17$  mm

Für die beiden Simulationen und die beiden Runs sind in Abb. 8.27 die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Positionen des Dreiteilchenvertex dargestellt. Bei der Simulation wie in den Daten wurde der Kohlenstoffdraht der zweiten Targetstation verwendet. Es werden in der Simulation wie in den Daten nur Ereignisse betrachtet, die eine Vertexdetektormultiplizität von 10 – 14 Spuren haben. In der unteren Zeile wird im Gegensatz zur oberen Zeile ein Abstand  $d_z$  zwischen Primärvertex und Sekundärvertex von mindestens 0,5 cm verlangt. Der verwendete Kohlenstoffdraht ist ein vertikaler Draht, dadurch ist die Breite der Verteilung in der  $x$ -Koordinate dominiert von der Drahtdicke und die Breite der Verteilung in der  $y$ -Koordinate dominiert durch die Strahlbreite. Die Strahlposition kann von Protonfüllung zu Protonfüllung leicht variieren. Dadurch können die Strahlpositionen während der Datennahme und in der Simulation voneinander abweichen, diese Abweichung ist in den Verteilungen der  $x$ - und  $y$ -Positionen der Vertices zu sehen. Bei der  $z$ -Koordinate, die nicht von der Strahlposition abhängt, liegen die Verteilungen aufeinander. Wird kein abgesetzter Vertex verlangt, kommen die meisten gefundenen Dreiteilchenvertices vom Target, daher kann aus den Verteilungen der Targetpositionen ohne abgesetzten Vertex die Auflösung des Vertexdetektors für Dreiteilchenzerfälle bestimmt werden. In Tab. 8.13 ist die Breite einer Gauß-Verteilung, die an die  $x$ - und  $z$ -Verteilungen angepaßt wurde, für die Simulationen und die Daten gezeigt.

Run	$x$ -Breite [ $\mu\text{m}$ ]	$z$ -Breite [ $\mu\text{m}$ ]
MC $D^+$	$65,4 \pm 2,0$	$678,9 \pm 35,7$
MC $MB$	$64,2 \pm 0,4$	$764,1 \pm 3,1$
Trig Run 17242	$114,4 \pm 0,2$	$911,9 \pm 5,3$
$MB$ -Run 14572	$90,0 \pm 0,7$	$976,2 \pm 8,9$

**Tabelle 8.13:** Breite einer an die Histogramme der  $x$ - und  $z$ -Position des Primärvertex angepaßten Gaußverteilung.

Die Vertexpföschung des Vertexdetektors wird in der  $x$ - wie in der  $z$ -Koordinate im Monte-Carlo zu optimistisch angenommen. Die  $z$ -Koordinatenauföschung für einen Dreiteilchenvertex ist in Daten etwa 1 mm. Die Breiten der Verteilungen der Vertices, die einen Abstand  $d_z$  von



**Abbildung 8.27:**  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Position der Sekundärvertices. In der oberen Zeile wird kein vom Drahttarget abgesetzter Vertex verlangt. In der unteren Zeile wird ein Abstand  $d_z$  von mindestens 0,5 cm verlangt. Alle Histogramme sind auf die Anzahl der Einträge normiert. Es werden nur Ereignisse mit einer Vertexdetektormultiplizität von 10 – 14 Spuren verwendet.

einigen mm haben, haben nichts mit der Vertexauflösung zu tun, da hier der zugelassene Abstand zwischen den drei Spuren eingeht.

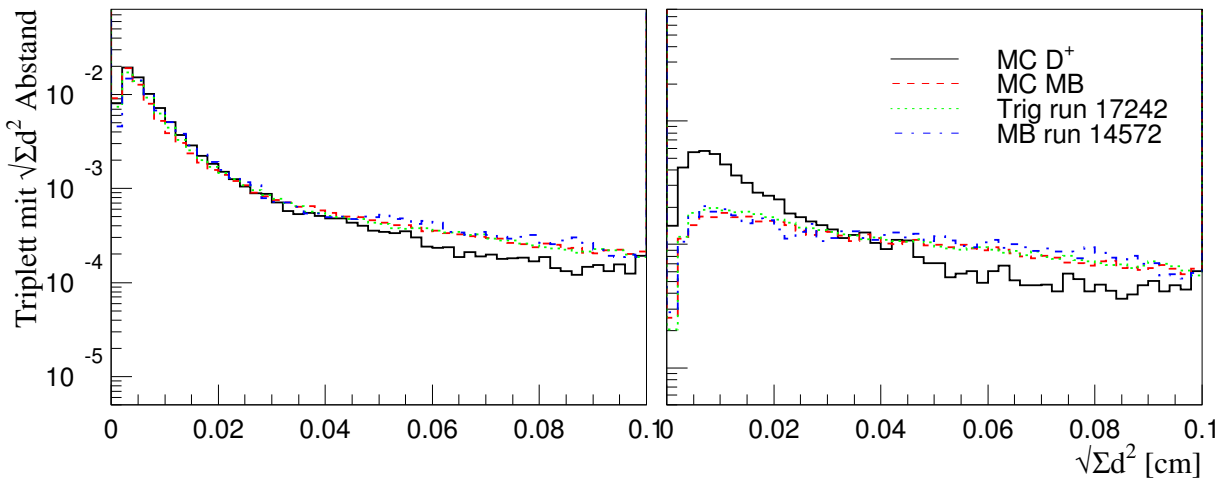
#### 8.10.4 Die Verteilung des Sekundärvertex

In Kap. 8.4 wird erklärt, wie der Sekundärvertex bestimmt wird. In Abb. 8.28 ist die „Summe der Abstandsquadrate“ der einzelnen Spuren zum berechneten Sekundärvertex dargestellt. In der linken Abbildung wird kein Abstand des Sekundärvertex zum Draht verlangt, in der rechten Abbildung wird ein Abstand von 0,5 cm verlangt. Um unabhängig von den Unterschieden in der Multiplizität zu sein, werden bei dieser Abbildung nur Ereignisse verwendet, deren Vertexdetektormultiplizität zwischen 10 und 14 liegt. Die Verteilungen der Datennahmeperioden und der  $MB$ -Simulationen liegen gut aufeinander. Die  $D^+$ -Simulation liefert wie erwartet bei kleinen  $d_{vtx}$  mehr Einträge.

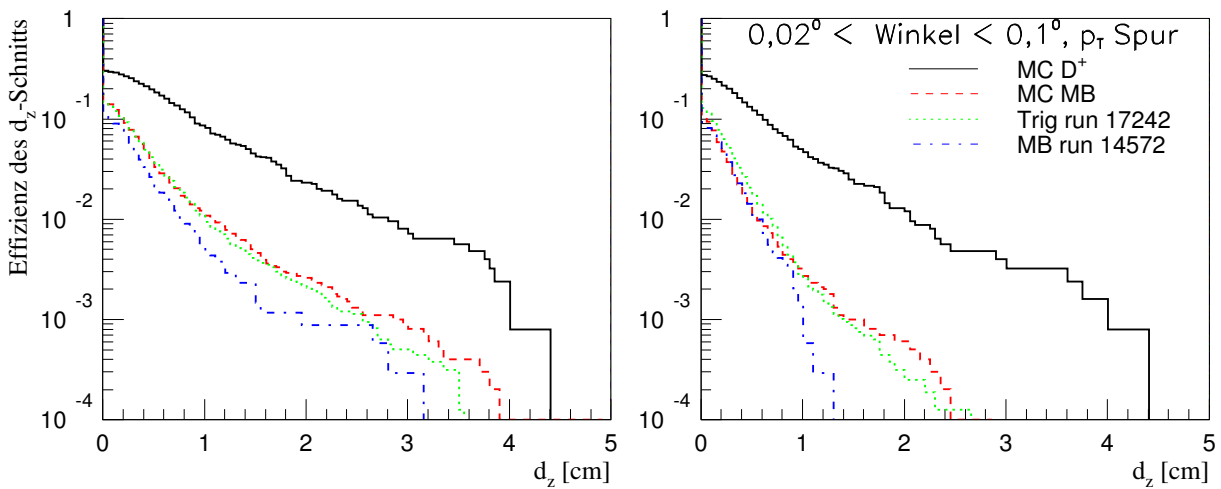
Die Effizienz des  $d_z$ -Schnittes für die beiden Simulationen und die beiden Datennahmeperioden ist in Abb. 8.29 dargestellt. Es werden nur Ereignisse verwendet, bei denen die Vertexdetektormultiplizität zwischen 10 – 14 ist. Die Sekundärvertices müssen mindestens ein  $d_{vtx} < 0,17$  mm haben. In der linken Abbildung wird die Effizienz des  $d_z$ -Schnittes für Vertices dargestellt, die durch den  $d_{vtx}$ -Schnitt alleine gefunden werden. Rechts wird zusätzlich zu den guten Vertices verlangt, daß der größte Öffnungswinkel im Bereich zwischen  $(0,02 - 0,1)^\circ$  liegt und daß durch die Suchbereichsmethode eine Spur mit einem Transversalimpuls von  $(0,6 - 3,0)$  GeV/ $c$  gefunden wurde.

Die simulierten  $D^+$ -Ereignisse nehmen mit  $d_z$  langsamer ab als die Daten und die  $MB$ -Monte-Carlo-Simulation. Der getriggerte Run 17242 und die  $MB$ -Simulation haben in etwa die gleiche Abnahme durch den  $d_z$ -Schnitt. Der  $MB$ -Run 14572 hat nach dem Schnitt von





**Abbildung 8.28:** Vergleich Simulation/Daten:  $d_{vtx}$ . In der rechten Abbildung wurden nur Ereignisse verwendet, bei denen der Sekundärvertex einen Abstand  $d_z$  von mindestens 0,5 cm hat. Die Vertexdetektormultiplizität ist 10 – 14 Segmente pro Ereignis.



**Abbildung 8.29:** Vergleich Simulation/Daten: Effizienz des  $d_z$ -Schnittes. Links: Abnahme der Ereignisse nur durch den Qualitätsschnitt auf den Vertex ( $d_{vtx} < 0,17$  mm). Rechts: Abnahme der Ereignisse nach einem weiteren Schnitt auf den größten Öffnungswinkel und auf eine Spur mit einem Transversalimpuls im Bereich  $(0,6 - 3,0)$  GeV/c, die mit der Suchbereichsmethode gefunden wurde.

mindestens 20 Treffern im RICH-Detektor auch eine vergleichbare Abnahme mit dem Abstand  $d_z$  des Sekundärvertices zum Draht.

## 8.11 Datenreduktion durch verschiedene Schnitte

Es wurde gezeigt, daß zufällige und echte Dreiteilchenvertices durch Schnitte in  $d_{vtx}$ - und  $d_z$  getrennt werden können. In der Simulation werden bei einem Schnitt auf  $d_{vtx}$  von 0,17 mm 2/3 der Dreiteilchenzerfälle detektiert. Da in der Simulation die Detektorauflösung überschätzt wird, ist dieser Schnitt für die Daten wahrscheinlich zu hart. In Kap. 8.10.1 wurde gezeigt, daß die Multiplizität im getriggerten Run 17242 sehr viel höher ist als die in simulierten Ereignissen oder im *MB*-Run 14572. Wegen des starken Multiplizitätsunterschiedes werden die Simulationen und die Daten für Multiplizitätsbereiche im folgenden miteinander verglichen.

Run	Ereignisse	$d_z$	$d_z$ $p_T$ -Spur	$d_z$ $\theta_{max}$	$d_z$ $p_T$ -Spur $\theta_{max}$
<b>0-9 Segmente <math>d_z</math> Schnitt 0,5 cm</b>					
MC $D^+$	287	135	112	100	84
%	100	$47,0 \pm 2,9$	$39,0 \pm 2,9$	$34,8 \pm 2,8$	$29,3 \pm 2,7$
MC $MB$	4608	189	94	81	36
%	100	$4,1 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$
Trig Run 17242	2281	135	99	71	52
%	100	$5,9 \pm 0,5$	$4,3 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	1432	53	35	35	22
%	100	$3,7 \pm 0,5$	$2,4 \pm 0,4$	$2,4 \pm 0,4$	$1,5 \pm 0,3$
<b>10-14 Segmente <math>d_z</math> Schnitt 1,0 cm</b>					
MC $D^+$	379	108	90	75	63
%	100	$28,5 \pm 2,3$	$23,7 \pm 2,2$	$19,8 \pm 2,0$	$16,6 \pm 1,9$
MC $MB$	1628	121	75	51	32
%	100	$7,4 \pm 0,7$	$4,6 \pm 0,5$	$3,1 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,3$
Trig Run 17242	2524	173	117	66	45
%	100	$6,9 \pm 0,5$	$4,6 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,3$	$1,8 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	437	19	13	9	5
%	100	$4,3 \pm 1,0$	$3,0 \pm 0,8$	$2,1 \pm 0,7$	$1,1 \pm 0,5$
<b>15-19 Segmente <math>d_z</math> Schnitt 1,5 cm</b>					
MC $D^+$	244	47	39	29	25
%	100	$19,3 \pm 2,5$	$16,0 \pm 2,3$	$11,9 \pm 2,1$	$10,2 \pm 1,9$
MC $MB$	764	50	35	16	12
%	100	$6,5 \pm 0,9$	$4,6 \pm 0,8$	$2,1 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,4$
Trig Run 17242	2313	135	106	40	34
%	100	$5,8 \pm 0,5$	$4,6 \pm 0,4$	$1,7 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	259	13	10	6	4
%	100	$5,0 \pm 1,4$	$3,9 \pm 1,2$	$2,3 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,8$
<b>15-19 Segmente <math>d_z</math> Schnitt 2,0 cm</b>					
MC $D^+$	94	17	10	8	7
%	100	$18,1 \pm 4,0$	$10,6 \pm 3,2$	$8,5 \pm 2,9$	$7,4 \pm 2,7$
MC $MB$	345	26	15	9	6
%	100	$7,5 \pm 1,4$	$4,3 \pm 1,1$	$2,6 \pm 0,9$	$1,7 \pm 0,7$
Trig Run 17242	1649	70	57	21	19
%	100	$4,2 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,4$	$1,3 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	124	3	2	0	0
%	100	$2,4 \pm 1,4$	$1,6 \pm 1,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$

**Tabelle 8.14:** Reduktion der Ereignisse für verschiedene Multiplizitätsbereiche. Der Schnitt auf die Güte des Sekundärvertex ist bei allen Bereichen  $\sqrt{\sum_i d_i^2} = 0,17$  mm. Für die verschiedenen Bereiche wurden verschiedene Schnitte auf den Abstand des Sekundärvertex zum Draht verwendet ( $d_z$ ). Weitere angewandte Schnitte sind der Transversalimpuls-Schnitt durch die Suchbereichsmethode und der Öffnungswinkel. Angegebene Fehler sind die Fehler nach der Binominalverteilung.

Die Reduktion der Ereignisse durch einen Schnitt auf einen guten Dreiteilchenvertex mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm und einem  $d_z$ -Schnitt ist in Tab. 8.11 dargestellt. In der Tabelle sind außerdem die Effekte eines weiteren Schnitts auf ein Teilchen mit einem Transversalimpuls im Bereich von  $(0,6 - 3,0)$  GeV/ $c$ , das durch die Suchbereichsmethode gefunden wurde, aufgezeigt, sowie der Effekt eines Schnitts auf den größten Öffnungswinkel der drei Teilchen, der im Bereich zwischen  $(0,02 - 0,1)^\circ$  liegt, sowie der Effekt aller Schnitte gleichzeitig. In dieser Tabelle ist jeweils der für den Multiplizitätsbereich beste  $d_z$ -Schnitt dargestellt, bei dem die  $MB$ -Ereignisse nach allen Schnitten um mindestens 50% reduziert wurden.

Eine vollständige Tabelle, in der die Reduktion der Ereignisse der einzelnen Bereiche in Abhängigkeit vom  $d_z$ -Schnitt dargestellt sind, befindet sich im Anhang B. Durch die verschiedenen Schnitte werden die Ereignisse der  $D^+$ -Simulation nicht so stark reduziert wie die aller anderen Datensätze. Die Schnitte sind so gewählt, daß nach Anwendung aller Schnitte eine ähnliche Reduktion von  $MB$ -Ereignissen erreicht wird. Dies geht auch auf Kosten des  $D^+$ -Signals.

Das Verhältnis der  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle zu falschen Dreiteilchenvertices soll möglichst groß sein. Es kann ein von der Zahl der Vertexdetektorsegmente abhängiger  $d_z$ -Schnitt verwendet werden, bei dem bei der jeweiligen Multiplizität das Verhältnis zwischen gefundenen  $D^+$ -Mesonen und irrtümlich gefundenen Dreiteilchenvertices immer das gleiche bleibt. Der hierfür verwendete  $d_z$ -Schnitt bei verschiedener Anzahl von Vertexdetektorsegmenten ist in Tab. 8.15 gezeigt.

Vertexdetektorsegmente	0 – 9	10 – 14	15 – 19	20 – 24
$d_z$ Schnitt [cm]	0,5	1,0	1,5	2,0

**Tabelle 8.15:** Staffelung des  $d_z$ -Schnittes in Abhängigkeit von der Zahl der Vertexdetektorsegmente.

Wie im Kap. 8.10.1 gezeigt wurde, korrelieren die Zahl der Treffer in einem Ereignis für verschiedene Subdetektoren miteinander, und die Anzahl der Vertexdetektorsegmente korreliert mit der Anzahl der Treffer im Vertexdetektor. In Tab. 8.16 ist die Reduktion der Ereignisse aufgeführt, die sich durch einen Schnitt auf die Treffer im RICH und im Vertexdetektor (VDS) sowie auf die Anzahl der rekonstruierten Segmente im Vertexdetektor ergibt. In Tab. 8.17 wurde auf die Ereignisse, die nach den Schnitten auf die Zahl der Treffer im RICH und die Zahl der Segmente noch übrig bleiben, ein variabler  $d_z$ -Schnitt angewandt. Der getriggerte Run 17242 wird schon um 85% durch die Anzahl der Treffer im RICH- und Vertexdetektor reduziert. Die Reduktion des  $MB$ -Runs 14572 durch die Anzahl der Treffer im RICH- und Vertexdetektor, sowie die Anzahl an verwendeten Vertexdetektorsegmenten ist 46%.

Wird nach den Schnitten auf die Anzahl der Treffer im RICH- und Vertexdetektor und den Schnitten auf die Anzahl der Vertexdetektorsegmente ein von der Anzahl der Vertexdetektorsegmente abhängiger  $d_z$ -Schnitt angewandt, ist die Reduktion nach den bisher diskutierten Schnitten der  $MB$ -Simulation und der beiden Datennahmen etwa gleich groß, wobei immer noch sehr viel mehr Ereignisse der  $D^+$ -Simulation erhalten bleiben.

	Ereignisse	Treffer (RICH) <1500	Treffer(VDS) < 350	Seg (VDS) > 3	Seg (VDS) < 25
MC $D^+$	1248	1247	1220	1220	1214
%	100	$99,9 \pm 0,1$	$97,8 \pm 0,4$	$97,8 \pm 0,4$	$97,3 \pm 0,5$
MC $MB$	9959	9089	8927	8375	8343
%	100	$91,3 \pm 0,3$	$89,6 \pm 0,3$	$84,1 \pm 0,4$	$83,8 \pm 0,4$
$MB$ -Run 14572	15880	10327	8541	8482	8444
%	100	$65,0 \pm 0,4$	$53,8 \pm 0,4$	$53,4 \pm 0,4$	$53,2 \pm 0,4$
Trig Run 17242	18672	2734	2642	2481	2475
%	100	$14,6 \pm 0,3$	$14,1 \pm 0,3$	$13,3 \pm 0,2$	$13,3 \pm 0,2$

**Tabelle 8.16:** Reduktion der verschiedenen Runs durch eine Schnitt auf die Anzahl der Treffer im RICH, Anzahl der Treffer im Vertexdetektor Detektor und Anzahl der Vertexdetektorsegmente

Run	Ereignisse RICH/VDS Treffer VDS Segmente	$d_z$	$d_z$ $p_T$ -Spur	$d_z$ $\theta_{max}$	$d_z$ $p_T$ -Spur $\theta_{max}$
MC $D^+$	1214	340	280	227	190
%	$97,3 \pm 0,5$	$28,0 \pm 1,3$	$23,1 \pm 1,2$	$18,7 \pm 1,1$	$15,7 \pm 1,0$
MC $MB$	8343	431	249	172	96
%	$83,8 \pm 0,4$	$5,2 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,1$
$MB$ -Run 14572	8444	475	342	174	124
%	$53,2 \pm 0,4$	$5,6 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,1$
Trig Run 17242	2475	96	67	55	35
%	$13,3 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,4$	$2,7 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,3$	$1,4 \pm 0,2$

**Tabelle 8.17:** Reduktion der verschiedenen Runs durch einen variablen  $d_z$  Schnitt (siehe Tab. 8.15) nach einem Schnitt auf die Treffer im RICH, den Treffer im Vertexdetektor und der Anzahl der erlaubten Vertexdetektorsegmente (siehe Tab. 8.16) Der Schnitt auf die Güte des Sekundärvertex ist  $\sqrt{\sum_i d_i^2} = 0,17$  mm.

## 8.12 Ratenabschätzung für einen FLT-Leptontrigger mit zusätzlichen $D \rightarrow K\pi\pi$ -SLT-Trigger

In diesem Abschnitt wird die Rate des  $D$ -Mesontriggerszenarios, bei dem mit dem FLT-Trigger ein Lepton getriggert werden soll, und mit dem SLT-Trigger auf einen abgesetzten Dreiteilchenzerfall des  $D \rightarrow K\pi\pi$  getriggert werden soll, abgeschätzt.

- Produktionsrate  
Bei einer Targetrate von 5 MHz ergeben sich die  $D$ -Meson-Produktionsraten für die Targetmaterialien Kohlenstoff  $^{12}C$  und Wolfram  $^{184}W$  zu 7,3 kHz bzw. 16,8 kHz (siehe Abschnitt 8.5.3).
- Die totale Wahrscheinlichkeiten  $\varepsilon_{Elektron}$  für  $e\nu X + D^\pm$  im Endzustand  
Von den erzeugten  $D^\pm$ -Mesonen zerfallen 17,2% in einen Endzustand mit einem Elektron. Von den erzeugten  $D^0/\bar{D}^0$ -Mesonen zerfallen 6,75% in ein Elektron. Daraus ergeben sich folgende Wahrscheinlichkeiten:

$$\begin{aligned} p(D^+D^- \rightarrow D^\pm + eX) &= 2 \cdot 0,172 - 0,172^2 = 0,3144 \\ p(D^+\bar{D}^0 \rightarrow D^+ + eX) &= 0,0675 \end{aligned}$$

Die totale Wahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{Elektron}$ , im Endzustand ein Elektron und ein  $D^\pm$ -Meson zu erhalten, ist dann:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{D\bar{D} \rightarrow eX + D^\pm} &= 2 \cdot p(D^+D^-) \cdot p(D^+D^- \rightarrow D^+ + eX) \\ &\quad + p(D^+\bar{D}^0) \cdot p(D^+\bar{D}^0 \rightarrow D^+ + eX) \\ &\quad + p(D^0D^-) \cdot p(D^+\bar{D}^0 \rightarrow D^+ + eX) \\ \varepsilon_{D\bar{D} \rightarrow eX + D^\pm} &= 2 \cdot 0,083 \cdot 0,3144 + 0,2 \cdot 0,068 + 0,21 \cdot 0,068 = 0,080 \end{aligned}$$

- Allgemeine FLT- und SLT Effizienzen  $\varepsilon_{FLTSLT}$   
Die allgemeine Triggereffizienz (ohne Bremsstrahlphoton), ein Lepton mit einem Transversalimpuls  $p_T > 0,6 \text{ GeV}/c$  zu triggern, ist 0,039 (siehe Abschnitt 8.5.4).
- Verzweigungsverhältnis  $Br(D \rightarrow K\pi\pi)$   
Das Verzweigungsverhältnis des Zerfalls  $D \rightarrow K\pi\pi$  ist 9,1% [H<sup>+</sup>02].
- Detektorakzeptanz  $A_{D \rightarrow K\pi\pi}$ , des  $D \rightarrow K\pi\pi$ -Zerfalls  
Die Wahrscheinlichkeit, daß alle Zerfallsprodukte des  $D \rightarrow K\pi\pi$ -Zerfalls im Detektor nachgewiesen werden, ist 12,5%. Dieser Wert wird aus der Monte-Carlo-Simulation bestimmt.
- Effizienz  $\varepsilon_{D \rightarrow K\pi\pi}$ ,  $D^\pm$ -Mesonereignisse zu triggern  
Die Effizienz,  $D^\pm$ -Mesonereignisse zu triggern mit folgenden Triggerbedingungen: variabler  $d_z$ -Schnitt, der von der Anzahl der rekonstruierten Vertexdetektorspuren abhängt, Schnitt auf die Güte des Sekundärvertex von  $d_{vtx} < 0,17 \text{ mm}$ , eine durch den Suchbereichs-Trigger gefundene Spur aus dem Vertex mit einem Transversalimpuls  $0,6 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$  und ein größter Öffnungswinkel der Spuren aus dem Vertex  $0,02^\circ < \theta_{max} < 0,1^\circ$ , beträgt 15,7%.

### Triggereffizienz des $DD \rightarrow K\pi\pi + e\nu X$ -Triggers

In Tab. 8.18 werden alle aufgeführten Effizienzen für einen  $D\bar{D}^\pm \rightarrow eX + K\pi\pi$  zusammengefaßt.

totale Wahrscheinlichkeit des $DD \rightarrow e\nu X D^\pm$	$\varepsilon_{Elektron}$	0,08
Allgemeine FLT- und SLT Effizienzen	$\varepsilon_{FLTSLT}$	0,039
Totale Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{tot}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$
Bremsstrahleffizienz	$\varepsilon_{Brems}$	0,125
Totale Triggereffizienz mit Bremsstrahlphoton	$\varepsilon_{tot}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$

**Tabelle 8.18:** Effizienz des  $DD \rightarrow K\pi\pi + e\nu X$ -Triggers

rekonstruierbare $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ -Zerfälle		
	Kohlenstoff	Wolfram
Produktionsrate	7,3 kHz	16,2 kHz
Totale Triggereffizienz ohne Bremsstrahlphoton	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$
Rate der produzierten $D^\pm$ -Mesonen	23 Hz	51 Hz
Produzierte $D^\pm$ -Mesonen pro Stunde	82080	181800
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ Verzweigungsverhältnis	9,1%	9,1%
Detektorakzeptanz für alle drei Spuren	12,5%	12,5%
Triggereffizienz $\varepsilon_{D \rightarrow K\pi\pi}$ - Trigger	15,7%	15,7%
Rekonstruierbare $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ ohne Bremsstrahlphoton	$147 \text{ h}^{-1}$	$325 \text{ h}^{-1}$
Rekonstruierbare $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ mit Bremsstrahlphoton	$18 \text{ h}^{-1}$	$41 \text{ h}^{-1}$

**Tabelle 8.19:** Anzahl der getriggerten  $D^\pm$ -Mesonen auf Band für einen abgesetzten Dreiteilchenvertex-Trigger für die zwei Targetmaterialien Kohlenstoff und Wolfram.

### Zahl der rekonstruierbaren $D^\pm$ -Mesonen auf Band

Die Rate, mit der bei den beiden Targetmaterialien Kohlenstoff  $^{12}\text{C}$  und Wolfram  $^{184}\text{W}$  rekonstruierbare  $D^\pm$ -Mesonen auf Band geschrieben werden, ist also:

## 8.13 Zusammenfassung des Triggerszenarios für den Zerfall $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ im SLT-Trigger

Mit diesem in den vorherigen Abschnitten besprochenen Triggerszenario ist die mögliche Triggerrate ohne Bremsstrahlphoton noch nicht ausgeschöpft, es wären leicht losere Schnitte im SLT-Trigger möglich, um die ganze Bandbreite beim Sichern der Daten auszunutzen. Diese Berechnungen beruhen aber, da keine Testtriggerdaten aufgenommen wurden, zum Großteil auf Effizienzen aus Simulationen. Da die Simulation aber insbesondere die Spurmultiplicität in getriggerten Runs deutlich unterschätzt, ist wahrscheinlich die Rate der fälschlicherweise akzeptierten Ereignisse zu gering abgeschätzt.

Wird der Trigger alleine verwendet, kann ohne einen zusätzlichen Bremsstrahlphotonschnitt getriggert werden, und es können pro Stunde 146  $D^\pm$ -Mesonen vom Kohlenstoffdraht oder 320  $D^\pm$ -Mesonen vom Wolframdraht auf Band geschrieben werden. Kann der entwickelte Trigger nur zusätzlich zu anderen Triggern verwendet werden, würde bei diesem Trigger zusätzlich ein Bremsstrahlphotontrigger verlangt werden, und es könnten damit pro Stunde 18  $D^\pm$ -Mesonen vom Kohlenstoffdraht und 40 vom Wolframdraht auf Band geschrieben werden.

## 8.14 Test des $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Triggers an Daten

Da nachträglich der ganze Open-Charm-Trigger an Daten nicht getestet werden kann, wird in diesem Abschnitt überprüft, ob in den Daten ein  $D^\pm$ -Signal mit den härtesten Schnitten des  $D^\pm$ -Triggers zu finden ist.

### 8.14.1 Minimum-Bias-Datennahme 2002/2003

Während des HERA-Lumiupgrades wurde in allen Detektorkomponenten die Performance der Detektoren verbessert. Die unterbrochenen Drähte des äußeren Spurkammersystems wurden repariert und die Treffernachweiseeffizienz dadurch auf 95% erhöht. Die Superlagen des inneren Spurkammersystems hinter dem RICH wurden eingebaut, allerdings haben mehrere Superlagen des inneren Spurkammersystems in einem Teil der Detektoren sehr geringe Nachweiseffizienz (siehe Abschnitt 7.5). Die Superlagen des Spurkammersystems im Magneten wurden entfernt, um weniger Material vor dem ECAL zu haben und dadurch bessere Nachweiseffizienzen im ECAL zu erreichen.

Im Datennahmezeitraum 2002/2003 wurden hauptsächlich Triggerdaten aufgenommen, für die auf zwei Leptonen getriggert wurde. Aber es wurden insgesamt  $170 \cdot 10^6$  MB-Ereignisse mit unterschiedlichen Drahttargetmaterialien auf Band geschrieben. Bei dieser Datennahme wurde ein Wechselwirkungstrigger verwendet, der nur Ereignisse, die mindestens 20 Treffer im RICH haben, für die weitere Analyse auf Band schreibt. Da noch nicht alle Runs dieser Datennahme zum Zeitpunkt dieser Analyse reprozessiert waren, werden nur  $110 \cdot 10^6$  Ereignisse verwendet. Die für die Analyse verwendeten Runs sind in Tab. 8.20 aufgelistet.

Runnummer	Ereignisse	Targetmaterial	Runnummer	Ereignisse	Targetmaterial
20609	161580	W	20703	782064	Ti
20611	207874	W + C	20704	1234621	Ti
20653	1732592	W	20705	1213497	C
20662	50148	C	20706	36267	C
20663	4003997	C	20723	2845949	C
20668	2288926	C	20724	247948	C
20670	2580816	C	20725	3147911	C
20671	2625666	W	20728	451704	C
20675	7730931	W	20734	7433569	C
20676	675437	C	20735	1043289	W
20678	5121506	C	20738	2080780	W
20679	8675028	W	20739	7003330	W
20680	1374786	W	20740	3786598	C
20682	5497520	Ti	20742	2714468	C
20693	573379	Ti	20743	3641525	C
20695	4722483	Ti	20746	5002784	W
20696	494957	Ti	20747	6219769	W
20697	816526	Ti	20749	3897458	W
20701	2009312	W	20750	6199374	W + C

**Tabelle 8.20:** Verwendete Runs für die Datenanalyse. Gezeigt sind die Runnummern, die Anzahl der Ereignisse und das verwendete Targetmaterial.

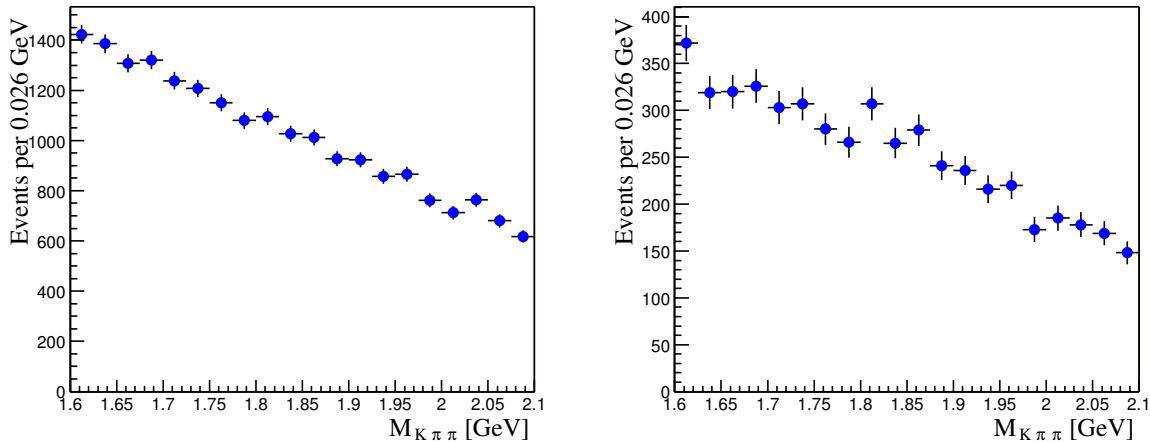
Es wurden nur Ereignisse verwendet, die genau einen Primärvertex haben und bei denen ein abgesetzter Dreiteilchenvertex mit  $d_{vtx} < 0,17$  mm gefunden wurde. Der Abstand in  $z$ -Richtung  $d_z$

dieses Sekundärvertex zum Primärvertex auf dem Draht wurde variabel gewählt, abhängig von der Anzahl der Vertexdetektorspuren. Bei dem Test des Triggers konnte der Transversalimpuls-Suchbereichstrigger nicht angewandt werden, ersatzweise wurde auf den rekonstruierten Transversalimpuls der Teilchen geschnitten. Das Teilchen mit dem größten Transversalimpuls mußte mindestens einen Transversalimpuls von  $(0,6 < p_T < 3,0)$  GeV/c haben. Der größte Öffnungswinkel zwischen zwei der drei Spuren muß im Bereich von  $0,02^\circ < \theta_{max} < 0,1^\circ$  liegen.  $7,6 \cdot 10^5$  Ereignisse erfüllten diese simulierten Triggeranforderungen. In Tab. 8.21 sind die angewandten Triggerschnitte noch einmal aufgeführt. In Abb. 8.30 ist für alle Sekundärvertices, die einen größeren Abstand in  $z$ -Richtung zum Draht als  $d_z > 1,5$  cm haben, das Massenspektrum um das  $D$ -Meson dargestellt. Da die Ladungen der Teilchen dem Triggeralgorithmus nicht bekannt sind, müssen alle drei möglichen Massenhypothesen berücksichtigt werden.

variabler $d_z$ -Schnitt	0,5 cm - 2,0 cm
Güte des Sekundärvertex	$d_{vtx} < 0,17$ mm
größter Transversalimpuls	$0,6 \text{ GeV}/c < p_T < 3,0 \text{ GeV}/c$
größter Öffnungswinkel	$0,02^\circ < \theta_{max} < 0,1^\circ$

**Tabelle 8.21:** Verwendete Schnitte für den  $D$ -Meson Dreiteilchen-Sekundärvertex-Trigger

Bei einer weiteren Analyse dieser „getriggerten“ Ereignisse wird neben diesen bisher erwähnten Schnitten die Ladungsinformation der Teilchen und ein RICH-Likelihood-Schnitt verwendet. Die verwendeten Likelihood-Schnitte sind die bei anderen  $D^\pm$ -Analysen üblichen Schnitte [Con02]. Da in dieser Studie keine genauere Analyse der Open-Charms-Mesonen folgen soll, wurden diese Likelihood-Schnitte übernommen. Rechts in Abb. 8.30 ist die invariante Masse aufgetragen, unter der Berücksichtigung der Ladung.



**Abbildung 8.30:** Invariantes Massenspektrum für gute Dreiteilchenvertices  $d_{vtx} < 0,17$  mm und einem  $d_z > 1,5$  cm. Links: Der Triggeralgorithmus kennt nur die Ladung einer Spur, es müssen also alle drei möglichen Massenhypothesen berücksichtigt werden. Rechts: Nach der vollständigen Rekonstruktion sind alle Ladungen der Spuren bekannt. Hier sind nur noch die korrekten Kombinationen  $-++$  und  $+--$  mit der jeweiligen korrekten Massenhypothese eingetragen.

Es wird sowohl nach  $D^+$ -als auch nach  $D^-$ -Zerfällen gesucht, d.h. nur Spurtripletts mit den Ladungskombinationen  $++-$  und  $+--$  akzeptiert. Die Kaonspur, die Spur mit der einzelnen Ladung, muß durch den RICH mit einem harten Likelihood-Schnitt als Kaon identifiziert worden sein, während an die Pionspuren nur sehr weiche Anforderungen bezüglich Teilchenidentifikation

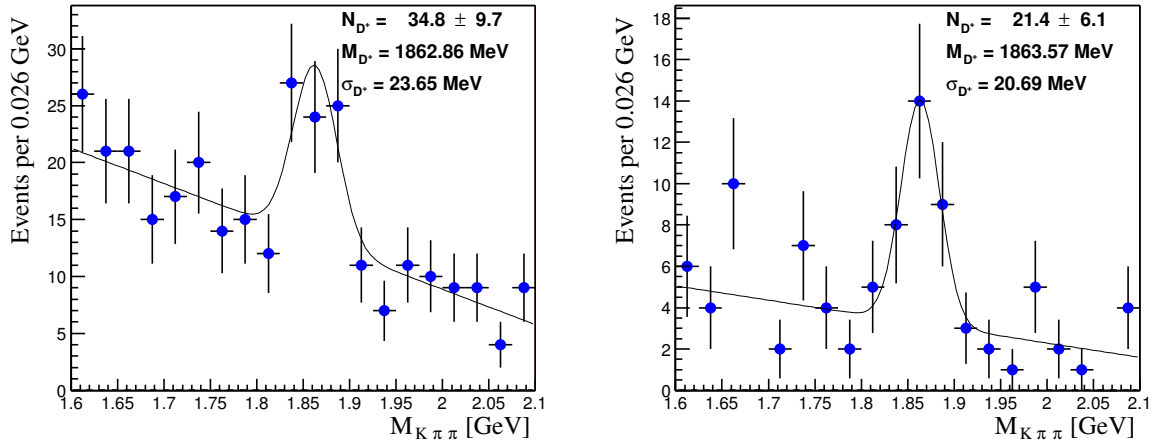


gestellt werden. Die zusätzlich zum Triggeralgorithmus verwendeten Analyseschritte sind in Tab. 8.22 gezeigt.

$d_z$ -Schnitt	$>1,5$ cm
Ladung der Zerfallsprodukte	$++ -$ oder $-- +$
Kaon-Likelihood (RICH)	$L_{Kaon} > 0,9$
Proton-Likelihood der Pionen (RICH)	$L_{Proton} < 0,85$
Kaon-Likelihood der Pionen (RICH)	$L_{Kaon} < 0,95$
eines der Pionen ein leichtes Teilchen (RICH)	
Elektron-Likelihood Myon-Likelihood	$L_e + L_\mu + L_\pi > 0,05$
Pion haben keinen Treffer im Myonsystem	Treffer <sub>Myon</sub> = 0

**Tabelle 8.22:** Verwendete Schnitte auf die Daten

Da die Vertexauflösung in der Simulation etwas besser ist als die in den Daten, wird der Schnitt auf  $d_{vtx}$  ein wenig gelockert. Mit einem Schnitt von  $d_{vtx} < 0,26$  mm und den in Tab. 8.21 und Tab. 8.22 aufgeführten Schnitten finden sich in  $110 \cdot 10^6$  Ereignissen 12900 Spurtriplets. Das invariante Massenspektrum in der Nähe der Masse des  $D$ -Mesons ist in Abb. 8.31 links gezeigt. Mit diesen Schnitten werden  $34 \pm 10$   $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Zerfälle gefunden. Wird der ursprüngliche Schnitt von  $d_{vtx} < 0,17$  mm verwendet, bleiben 4600 Triplets übrig, in denen  $21 \pm 6$   $D^\pm$ -Kandidaten gefunden werden.



**Abbildung 8.31:** Invariantes Massenspektrum der Minimum-Bias-Daten 2002/2003 für Vertices, nach weiteren Schnitten auf die Teilchenidentifizierung (siehe Tab. 8.22). Links für Dreiteilchenvertices mit einem Schnitt auf die Güte des Vertex von  $d_{vtx} < 0,26$  mm, rechts  $d_{vtx} < 0,17$  mm.

Bei beiden Schnitten auf die Güte des Sekundärvertex ist deutlich das  $D^+$ -Mesonsignal zu sehen. Diese Ereignisse wären bei einem Trigger mit den in Tab. 8.22 dargestellten Schnitten getriggert worden. Die verwendeten Triggerschnitte sind also geeignet, Ereignisse mit Open-Charm-Meson anzureichern.

## 8.15 $D^\pm$ -Produktionswirkungsquerschnitt

Das im vorigen Abschnitt gezeigte Signal kann dazu verwendet werden, den Wirkungsquerschnitt für  $D^+$ -Produktion in Proton-Nukleon-Streuung abzuschätzen. Eine Messung des  $c\bar{c}$ -

Wirkungsquerschnitts bei HERA- $B$  ist in [Gor03b] gegeben:

$$\sigma_N(c\bar{c}) = (124 \pm 34_{-24}^{+21}) \frac{\mu\text{b}}{\text{Nukleon}} . \quad (8.8)$$

Mit der vorliegenden Statistik von  $D^\pm$ -Zerfällen, die vom entwickelten Triggeralgorithmus und den gewählten Analyseschnitten selektiert wurden, ist keine genaue Messung des Wirkungsquerschnitts  $\sigma_N(c\bar{c})$  möglich. Aber es kann überprüft werden, ob die angegebenen Effizienzen für den Triggeralgorithmus grob falsch sind.

### Effizienz der Analyseschnitte

Neben der in Abschnitt 8.14 bestimmten geometrischen Akzeptanz und aus Abb. 8.21 gewonnenen Effizienz des Triggeralgorithmus wird noch die Effizienz  $\varepsilon_{\text{ana}}$  der Analyseschnitte benötigt. Aus der Monte-Carlo-Simulation wird die Effizienz gewonnen, mit den angegebenen Schnitten auf die Teilchenidentifizierung und mit dem Schnitt auf die Zerfallslänge  $\delta_z > 1.5$  cm tatsächlich  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Zerfälle zu rekonstruieren. Da die gewählte Separation von Primär- zu Sekundärvertex mehr als zwei mittlere Zerfallslängen beträgt, ist die Gesamteffizienz der Analyseschnitte relativ klein. Sie beträgt

$$\varepsilon_{\text{ana}} = (7 \pm 1) \times 10^{-3} .$$

Der angegebene Fehler ist der statistische Fehler, der sich aus der Größe des verwendeten Monte-Carlo-Datensatzes ergibt.

### Luminosität

Um die Luminosität  $\mathcal{L}$  zu erhalten, wird einen Prozeß mit hinreichend genau bekanntem Wirkungsquerschnitt betrachtet. Für die Minimum-Bias-Daten von HERA- $B$  bietet sich der inelastische Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{\text{inel}}$  an, dessen Werte für die verwendeten Targetmaterialien in Tab. 8.23 gezeigt sind [C<sup>+</sup>02]. Die Luminosität ergibt sich aus der beobachteten Zahl von inelastischen Wechselwirkungen zu

$$\mathcal{L} = \frac{N_{\text{inel}}}{\sigma_{\text{inel}}} .$$

Der verwendete Wechselwirkungstrigger selektiert Ereignisse, in denen mehr als 20 Treffer im RICH gefunden werden; das entspricht einer geladenen Spur, die durch die Akzeptanz des RICH verläuft. Die Ineffizienz dieses Triggers ist in [Gor03b] abgeschätzt zu  $\eta = 0,94$ .

Da die Daten bei einer kleinen Wechselwirkungsrate von ungefähr 1 MHz aufgenommen wurden, ist die Wahrscheinlichkeit, daß in einem HERA-Bunchcrossing mehr als eine Wechselwirkung stattfindet, ebenfalls klein: Die Zahl der gleichzeitig stattfindenden Wechselwirkungen kann als poissonverteilt mit einem Mittelwert  $\mu = 0,1$  angenommen werden. Demnach ist die Wahrscheinlichkeit  $p_1$ , in einem Bunchcrossing genau eine Wechselwirkung zu erhalten,  $p_1 = 0,0905$  und die Wahrscheinlichkeit  $p_{>1}$  für mehr als eine Wechselwirkung  $p_{>1} = 0,0047$ .

In guter Näherung ist daher die Zahl  $N_{\text{inel}}$  der produzierten inelastischen Ereignisse gegeben durch die Zahl  $N_{\text{inel}}^{\text{trig}}$  der getriggerten Ereignisse, die auf die Ineffizienz korrigiert wird.

Die Luminosität  $\mathcal{L}_{\text{tot}}$  des betrachteten Datensatzes setzt sich zusammen aus den einzelnen Luminositäten auf den verschiedenen Targetmaterialien:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{tot}} &= \mathcal{L}_{\text{C}} + \mathcal{L}_{\text{Ti}} + \mathcal{L}_{\text{W}} \\ &= \frac{1}{\eta} \left( \frac{N_{\text{C}}}{\sigma_{\text{inel,C}}} + \frac{N_{\text{Ti}}}{\sigma_{\text{inel,Ti}}} + \frac{N_{\text{W}}}{\sigma_{\text{inel,W}}} \right) \\ &= 207 \cdot 10^3 \text{ mb}^{-1} \end{aligned} \quad (8.9)$$

Material	C	Ti	W
$\sigma_{\text{inel}}$ [mb]	$255 \pm 2,4$	$681,8 \pm 6,9$	$1775 \pm 19$
Ereignisse [ $10^6$ ]	43,34	14,12	52,86

**Tabelle 8.23:** Inelastische Wirkungsquerschnitte für die verschiedenen Targetmaterialien, die für die benutzten Daten verwendet wurden [C<sup>+</sup>02], und Zahl der in der Analyse verwendeten Ereignisse.

Da die Zahl der gefundenen  $D^\pm$ -Zerfälle eine separate Suche in den drei Datensätzen nicht erlaubt, wird die Produktion an einem „effektiven“ Kern mit der Massezahl  $A^{\text{eff}} = 99$ , dem mit der Ereigniszahl gewichteten Mittelwert der Kernmassenzahlen, betrachtet. Für diese Mittelung wurde eine eventuelle Abhängigkeit der  $D$ -Produktion von der Kernmassenzahl  $A$  vernachlässigt; bisherige Meßwerte sind im Rahmen ihrer Fehler kompatibel mit dieser Annahme. Siehe z.B. [L<sup>+</sup>94a], hier wurde  $\alpha_D = 1,02 \pm 0,036$  gemessen. Die Vernachlässigung dieser Abhängigkeit verursacht einen systematischen Fehler von ca. 10% .

### Bestimmung des Wirkungsquerschnitts für $D^\pm$ -Produktion

Die für die Bestimmung des Wirkungsquerschnitts benutzten Effizienzen und Akzeptanzen sind nochmals in Tab. 8.24 zusammengefaßt.

Geometrische. Akzeptanz	$\varepsilon_{\text{geo}}$	0,12
Effizienz des Triggeralgorithmus	$\varepsilon_{\text{Trig}}$	0,08
Effizienz der Analyseschnitte	$\varepsilon_{\text{ana}}$	$(7 \pm 1) \cdot 10^{-3}$

**Tabelle 8.24:** Für die Bestimmung des Wirkungsquerschnitts benötigte Effizienzen und Akzeptanzen

Mit den beobachteten  $21 \pm 6$  Zerfällen ergibt sich der Wirkungsquerschnitt für die Produktion von  $D^\pm$ -Mesonen damit zu

$$\begin{aligned}
 \sigma_A(D^\pm) &= \frac{N_{D^\pm}}{\mathcal{L}_{\text{tot}}} \\
 &= \frac{N_{D^+}^{\text{beob}}}{2\text{Br}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) \varepsilon_{\text{geo}} \varepsilon_{\text{Trig}} \varepsilon_{\text{ana}}} \cdot \frac{1}{\mathcal{L}_{\text{tot}}} \\
 &= (8 \pm 3 \text{ (stat)}) \text{ mb} .
 \end{aligned} \tag{8.10}$$

Wieder unter der Annahme, daß die nukleare Abhängigkeit der Charm-Produktion klein ist ergibt sich damit der Produktionswirkungsquerschnitt pro Nukleon zu

$$\sigma_N(D^\pm) = \frac{\sigma_A(D^\pm)}{A^{\text{eff}}} = (81 \pm 30) \frac{\mu\text{b}}{\text{Nukleon}} . \tag{8.11}$$

Um aus dem Produktionswirkungsquerschnitt für  $D^\pm$  den Wirkungsquerschnitt  $\sigma_N(c\bar{c})$  zu erhalten, benötigt man noch die Wahrscheinlichkeit  $F_{D^\pm}$ , daß in der Fragmentation eines  $c\bar{c}$ -Paares ein  $D^\pm$  auftaucht. Dieser Wert wird der Monte-Carlo-Simulation entnommen, die das Fragmentationsmodell von JETSET benutzt, und beträgt näherungsweise

$$F_{D^\pm} = 0,48 .$$

Damit ergibt sich insgesamt für die Charm-Produktion in Proton-Nukleon-Stößen ein Wirkungsquerschnitt von

$$\sigma_N(c\bar{c}) = (169 \pm 63 \text{ (stat)}) \frac{\mu\text{b}}{\text{Nukleon}} . \tag{8.12}$$

Der angegebene Fehler beinhaltet nur die statistischen Fehler der Zahl der gefundenen  $D^\pm$ -Zerfälle und der Analyseeffizienz, die sicher den größten Beitrag liefern. Im Rahmen der Fehler ist der in dieser Analyse bestimmte Wirkungsquerschnitt kompatibel mit dem in [Gor03b] gemessenen von  $(124 \pm 34_{-24}^{+21}) \mu\text{b}/\text{Nukleon}$ .

# Kapitel 9

## Zusammenfassung

Am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg befindet sich das Experiment HERA-*B*. Das Experiment wurde aufgebaut, um die CP-Verletzung im System der *B*-Mesonen zu untersuchen. Der Start der Datennahme von HERA-*B* hat sich wegen verschiedener Detektorprobleme um mehrere Jahre verzögert. Die ersten Testdaten wurden im Jahr 1999/2000 genommen. Wegen der Zeitverzögerung zu Beginn des Experiments wurde ein neues Physikprogramm ausgearbeitet, das sich mit Aspekten der QCD beschäftigt, insbesondere der Charmoniumphysik. In einer zweiten Datennahmeperiode 2002/2003 wurden deswegen nur Daten genommen, die zum Ziel hatten, QCD-Effekte zu vermessen. Eine der Komponenten des HERA-*B*-Detektors ist das innere Spurkammersystem, das aus GEM-MSGC-Detektoren besteht. Die GEM-MSGC-Detektoren wurden gemeinsam von Gruppen der Universitäten Heidelberg, Siegen und Zürich entwickelt und gebaut.

Da die Redundanz des inneren Spurkammersystems nicht allzu groß ist, sollte schon beim Bau der Detektoren sichergestellt werden, daß möglichst wenig GEM-MSGCs durch permanente Defekte ausfallen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde beim Bau der GEM-MSGC-Detektoren dazu beigetragen, die Bauprozedur so aufzusetzen, daß nur Detektorkomponenten verwendet wurden, die hochspannungsstabil und gasdicht waren. Insbesondere wurde die Hochspannungsstabilität der GEM-Folie direkt nach der Produktion, kurz vor dem Bau des Detektorteils mit GEM-Folie und Driftdeckel, sowie kurz vor dem Zusammenfügen dieses Detektorteils mit dem MSGC-Substrat getestet. Dadurch konnten GEM-Folien, die nicht hochspannungsstabil waren, vor dem Zusammenbau mit dem MSGC-Substrat aussortiert werden. Da die GEM-MSGC bei den für HERA-*B* erwarteten Teilchenflüssen leicht zu Alterung neigt, wurden außer dem MSGC-Substrat alle Detektorteile vor dem Bau für mehrere Stunden auf hohe Temperatur gebracht, um das Ausgasen der Materialien und damit eine Kontamination des Zählgasen zu verhindern.

Aus allen gasdichten und hochspannungsstabilen Detektoren wurden die Superlagen des Spurkammersystems aufgebaut. Diese Superlagen wurden in einer Testhalle in Hamburg unter betriebsnahen Bedingungen über mehrere Tage getestet. Dazu wurde ein dem bei HERA-*B* verwendeten ähnliches Gassystem verwendet und die Detektoren mit der bei HERA-*B* später verwendeten Ausleseelektronik getestet. Bei diesen Tests wurden die Betriebsspannungen an den Detektoren über mehrere Schritte langsam erhöht, um die Detektoren langsam an die bei HERA-*B* benötigten Spannungen zu gewöhnen. Die Tests zeigten, daß die verwendeten Detektoren in einem sehr guten Zustand waren. Die Auslese der Detektoren funktionierte bis auf sehr wenige Ausnahmen ohne Probleme. Das innere Spurkammersystem wurde von Nov. 1999 bis Juni 2000 sukzessive installiert und in Betrieb genommen. Dabei traten eine Reihe neuer unerwarteter Probleme auf. Die Detektoren mußten über einen längeren Zeitraum schrittweise konditioniert werden, um bei HERA-*B* einen stabilen Betrieb zu ermöglichen.

Nachdem alle Stationen bei HERA-*B* eingebaut waren, wurde ein Datenqualitätsprogramm

entwickelt, das die Daten des inneren Spurkammersystems online überwacht und bei Fehlverhalten des Detektors einen Alarm ausgibt. Im Shutdown 2001 wurden alle Detektoren nochmals ausgebaut, defekte Detektoren und Ausleseelektronik ersetzt und die Erdung der Detektoren verbessert. Der Ausbau der Detektoren war notwendig geworden, weil bei einem Teil der Detektoren (Triggersuperlagen) die Ausleseelektronik ersetzt werden mußte.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein Triggeralgorithmus entwickelt, der Open-Charm-Ereignisse anreichern soll. Dieser Triggeralgorithmus wurde mit simulierten Daten aus der Datennahmeperiode 2002 getestet. Die Ausgangsrate des Triggers darf am Ende nur 200 Hz sein, um alle getriggerten Daten auf Band schreiben zu können. Es wurde die Möglichkeit untersucht, semileptonische Zerfälle durch einen Trigger anzureichern, der ausgehend von der vom FLT-Trigger gefundenen Leptonspur einen Zwei- oder Dreiteilchenvertex mit diesem Lepton im SLT-Trigger sucht. Beim Trigger auf einen Zweiteilchenvertex muß auf einen  $z$ -Abstand des Sekundärvertex zum Primärvertex  $d_z > 2,6$  cm geschnitten werden, um die benötigte Reduzierung zu erhalten. Da dieses einem Vielfachen der Lebensdauer der  $D$ -Mesonen entspricht, wird dabei hauptsächlich auf zufällige Zweiteilchenvertices getriggert. Beim Dreiteilchenvertex kann der  $d_z$ -Schnitt viel kleiner gewählt werden, so daß semileptonische  $D$ -Mesonen angereichert werden können. Interessant sind Zerfälle, bei denen alle Zerfallsprodukte im Detektor nachgewiesen werden können. Das sind die Zerfälle  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$  und  $D^0/\bar{D}^0 \rightarrow K^\mp \pi^\pm$ . Allerdings ist das Verzweigungsverhältnis dieser Zerfälle klein und die Effizienz, daß alle Teilchen im Detektor nachgewiesen werden, sehr gering. Dadurch werden durch diesen Trigger, der auf semileptonische  $D$ -Mesonzerfälle triggert, kaum interessante  $D$ -Mesonzerfälle angereichert.

Aber es kann im SLT-Trigger auch direkt auf die interessantesten  $D$ -Mesonzerfälle getriggert werden. Der Dreiteilchenzerfall  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$  stellte sich als besonders geeignet heraus, Open-Charm-Ereignisse anzureichern, da durch die  $D^\pm$ -Mesonen-Lebensdauer von 1,05 ps ein abgesetzter Vertex zu finden ist, der einige mm vom Primärvertex entfernt ist. Die Spur des  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Zerfalls mit dem größten Transversalimpuls bietet eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit für die verschiedenen Ereignisse. Beim  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Zerfall hat das Teilchen mit dem größten Transversalimpuls meistens einen Transversalimpuls zwischen 0,6 GeV/ $c$  und 3,0 GeV/ $c$ . Da die Ladung, der Impuls und der Transversalimpuls des Teilchens im SLT-Trigger nicht zur Verfügung stehen, wurde ein Transversalimpulstrigger erarbeitet, der es ermöglicht, Spuren im Transversalimpulsbereich von 0,6 und 3,0 GeV/ $c$  anzureichern. Eine weitere Möglichkeit,  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Zerfälle anzureichern, bietet sich darin, auf den größten Öffnungswinkel der Spuren aus den abgesetzten Dreiteilchenvertices zu triggern. Dadurch können Ereignisse mit wahren Dreiteilchenvertices weiter angereichert werden. Um die benötigte Unterdrückung im SLT-Trigger zu erhalten, wird ein variabler  $d_z$ -Schnitt verwendet, der abhängig von der Zahl der Vertexdetektorsegmente ist. Nur gute Dreiteilchenvertices in einem Abstand  $d_z$ , deren größter Öffnungswinkel zwischen  $0,02^\circ$  und  $0,1^\circ$  liegt und die eine Spur enthalten deren  $p_T$  zwischen 0,6 GeV/ $c$  und 3,0 GeV/ $c$  liegt, werden getriggert. Der Transversalimpuls der Teilchen wird dabei mit einer neu entwickelten Suchbereichsmethode abgeschätzt. Mit diesem Triggerszenario können 15% der produzierten  $D^+$ -Mesonen, die in drei im Detektor nachweisbare Spuren zerfallen, nachgewiesen werden, aber nur 1,5% der  $MB$ -Ereignisse werden durch diesen Triggeralgorithmus irrtümlich getriggert. Dadurch können pro Stunde bei einer Targestrate von 5 MHz etwa 41 (Wolframtarget) bzw 18 (Kohlenstofftarget) rekonstruierbare Open-Charm-Ereignisse auf Band geschrieben werden. Der Trigger wurde mit Minimum-Bias-Daten der Runperiode 2002/2003 getestet, und damit grob der  $D\bar{D}$ -Wirkungsquerschnitt abgeschätzt.

# Anhang A

## Bauprozedur der im Jahr 2002 eingesetzten GEM-MSGC-Detektoren

In den folgenden Tabellen sind für die 2002 eingebauten GEM-MSGC-Detektoren die verschiedenen Bauprozeduren aufgeführt. Ab einer MSGC-Substratnummer von 398 wurden die Detektoren vom Fraunhofer-Institut mit einem Oberflächenwiderstand von  $10^{15} \Omega/\square$  geliefert. Während des Baus der Kammern des Typs II, die zu Beginn der Produktion gebaut wurden, wurde die Bauprozedur zum Teil noch geändert. Bei GEM-MSGC-Detektoren der Typen I und III wurde überall die gleiche Bauprozedur verwendet.

Substratnr.	Substrat erhitzt	GEM-Folie und Rahmen 12 h auf 100° C	Driftbox-Klebung mit N <sub>2</sub> -Spülung	GEM-MSGC nachträglich 24 h auf 45° C mit N <sub>2</sub> -Spülung	HERA-B-Detektorposition
354	nein	ja	ja	ja	MS01++1
343	nein	ja	ja	ja	MS01++2
356	nein	ja	ja	ja	MS01++3
362	nein	ja	ja	ja	MS01++4
363	nein	ja	ja	ja	MS01+-1
361	nein	ja	ja	ja	MS01+-2
318	nein	ja	ja	ja	MS01+-3
359	nein	ja	ja	ja	MS01+-4
339	nein	ja	ja	ja	MS01--1
336	nein	ja	ja	ja	MS01--2
319	nein	ja	ja	ja	MS01--3
346	nein	ja	ja	ja	MS01--4
348	nein	ja	ja	ja	MS01-+1
337	nein	ja	ja	ja	MS01-+2
357	nein	ja	ja	ja	MS01-+3
359	nein	ja	ja	ja	MS01-+4

**Tabelle A.1:** Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS01. In der Superlage MS01 werden GEM-MSGC-Typ I verwendet.

Substratnr.	Substrat erhitzt	GEM-Folie und Rahmen 12 h auf 100° C	Driftbox-Klebung mit N <sub>2</sub> -Spülung	GEM-MSGC nachträglich 24 h auf 45° C mit N <sub>2</sub> -Spülung	HERA-B-Detektorposition
481	ja	ja	ja	ja	MS10++1
117	nein	ja	ja	ja	MS10++2
140	nein	ja	ja	ja	MS10++3
157	nein	ja	ja	ja	MS10++4
54	nein	nein	nein	nein	MS10++5
123	nein	ja	ja	ja	MS10++6
174	nein	ja	ja	ja	MS10++7
166	nein	ja	ja	ja	MS10++8
57	nein	nein	nein	ja	MS10+-1
405	ja	ja	ja	ja	MS10+-2
141	nein	ja	ja	ja	MS10+-3
26	nein	nein	nein	nein	MS10+-4
163	nein	ja	ja	ja	MS10+-5
165	nein	ja	ja	ja	MS10+-6
73	nein	nein	nein	ja	MS10+-7
48	nein	nein	nein	nein	MS10+-8
408	ja	ja	ja	ja	MS10--1
490	ja	ja	ja	ja	MS10--2
398	ja	ja	ja	ja	MS10--3
484	ja	ja	ja	ja	MS10--4
190	nein	ja	ja	ja	MS10--5
403	ja	ja	ja	ja	MS10--6
68	nein	nein	nein	nein	MS10--7
85	nein	nein	nein	ja	MS10--8
478	ja	ja	ja	ja	MS10-+1
44	nein	nein	nein	nein	MS10-+2
418	ja	ja	ja	ja	MS10-+3
40	nein	nein	nein	nein	MS10-+4
142	nein	ja	ja	ja	MS10-+5
399	ja	ja	ja	ja	MS10-+6
467	ja	ja	ja	ja	MS10-+7
483	ja	ja	ja	ja	MS10-+8

**Tabelle A.2:** Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS10. In der Superlage MS10 werden GEM-MSGC-Typ II verwendet.



Substratnr.	Substrat erhitzt	GEM-Folie und Rahmen 12 h auf 100° C	Driftbox-Klebung mit N <sub>2</sub> -Spülung	GEM-MSGC nachträglich 24 h auf 45° C mit N <sub>2</sub> -Spülung	HERA-B-Detektorposition
460	ja	ja	ja	ja	MS11++1
464	ja	ja	ja	ja	MS11++2
101	nein	ja	ja	ja	MS11++3
419	ja	ja	ja	ja	MS11++4
412	ja	ja	ja	ja	MS11+-1
24	nein	nein	nein	nein	MS11+-2
444	ja	ja	ja	ja	MS11+-3
33	nein	nein	nein	nein	MS11+-4
168	nein	ja	ja	ja	MS11--1
195	nein	ja	ja	ja	MS11--2
150	nein	ja	ja	ja	MS11--3
397	nein	ja	ja	ja	MS11--4
131	nein	ja	ja	ja	MS11-+1
170	nein	ja	ja	ja	MS11-+2
415	ja	ja	ja	ja	MS11-+3
95	nein	ja	ja	ja	MS11-+4

**Tabelle A.3:** Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS11. In der Superlage MS11 werden GEM-MSGC-Typ II verwendet.

Substratnr.	Substrat erhitzt	GEM-Folie und Rahmen 12 h auf 100° C	Driftbox-Klebung mit N <sub>2</sub> -Spülung	GEM-MSGC nachträglich 24 h auf 45° C mit N <sub>2</sub> -Spülung	HERA-B-Detektorposition
45	nein	nein	nein	nein	MS12++1
413	ja	ja	ja	ja	MS12++2
122	nein	ja	ja	ja	MS12++3
159	nein	ja	ja	ja	MS12++4
193	nein	ja	ja	ja	MS12+-1
206	nein	ja	ja	ja	MS12+-2
182	nein	ja	ja	ja	MS12+-3
89	nein	ja	ja	ja	MS12+-4
441	ja	ja	ja	ja	MS12--1
440	ja	ja	ja	ja	MS12--2
445	ja	ja	ja	ja	MS12--3
202	nein	ja	ja	ja	MS12--4
446	ja	ja	ja	ja	MS12-+1
148	nein	ja	ja	ja	MS12-+2
197	nein	ja	ja	ja	MS12-+3
27	nein	nein	nein	nein	MS12-+4

**Tabelle A.4:** Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS12. In der Superlage MS12 werden GEM-MSGC-Typ II verwendet.

Substratnr.	Substrat erhitzt	GEM-Folie und Rahmen 12 h auf 100° C	Driftbox-Klebung mit N <sub>2</sub> -Spülung	GEM-MSGC nachträglich 24 h auf 45° C mit N <sub>2</sub> -Spülung	HERA-B-Detektorposition
203	nein	ja	ja	ja	MS13++1
386	nein	ja	ja	ja	MS13++2
175	nein	ja	ja	ja	MS13++3
390	nein	ja	ja	ja	MS13++4
387	nein	ja	ja	ja	MS13++5
409	ja	ja	ja	ja	MS13++6
183	nein	ja	ja	ja	MS13++7
470	ja	ja	ja	ja	MS13++8
121	nein	ja	ja	ja	MS13+-1
395	nein	ja	ja	ja	MS13+-2
35	nein	nein	nein	nein	MS13+-3
407	ja	ja	ja	ja	MS13+-4
389	nein	ja	ja	ja	MS13+-5
393	nein	ja	ja	ja	MS13+-6
401	ja	ja	ja	ja	MS13+-7
411	ja	ja	ja	ja	MS13+-8
81	ja	nein	nein	ja	MS13--1
51	ja	nein	nein	nein	MS13--2
49	ja	nein	nein	nein	MS13--3
59	ja	nein	nein	nein	MS13--4
462	ja	ja	ja	ja	MS13--5
477	ja	ja	ja	ja	MS13--6
42	nein	nein	nein	nein	MS13--7
461	ja	ja	ja	ja	MS13--8
78	ja	nein	nein	ja	MS13-+1
154	nein	ja	ja	ja	MS13-+2
80	nein	nein	nein	ja	MS13-+3
473	ja	ja	ja	ja	MS13-+4
486	ja	ja	ja	ja	MS13-+5
75	nein	nein	nein	ja	MS13-+6
474	ja	ja	ja	ja	MS13-+7
468	ja	ja	ja	ja	MS13-+8

**Tabelle A.5:** Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS13. In der Superlage MS13 werden GEM-MSGC-Typ II verwendet.

Substratnr.	Substrat erhitzt	GEM-Folie und Rahmen 12 h auf 100° C	Driftbox-Klebung mit N <sub>2</sub> -Spülung	GEM-MSGC nachträglich 24 h auf 45° C mit N <sub>2</sub> -Spülung	HERA-B-Detektorposition
438	ja	ja	ja	ja	MS14++1
508	ja	ja	ja	ja	MS14++2
439	ja	ja	ja	ja	MS14++3
528	ja	ja	ja	ja	MS14++4
526	ja	ja	ja	ja	MS14++5
521	ja	ja	ja	ja	MS14++6
427	ja	ja	ja	ja	MS14+-1
298	nein	ja	ja	ja	MS14+-2
509	ja	ja	ja	ja	MS14+-3
510	ja	ja	ja	ja	MS14+-4
432	ja	ja	ja	ja	MS14+-5
512	ja	ja	ja	ja	MS14+-6
306	nein	ja	ja	ja	MS14--1
268	nein	ja	ja	ja	MS14--2
520	ja	ja	ja	ja	MS14--3
252	nein	ja	ja	ja	MS14--4
435	ja	ja	ja	ja	MS14--5
293	nein	ja	ja	ja	MS14--6
295	nein	ja	ja	ja	MS14-+1
280	nein	ja	ja	ja	MS14-+2
297	nein	ja	ja	ja	MS14-+3
296	nein	ja	ja	ja	MS14-+4
437	ja	ja	ja	ja	MS14-+5
434	ja	ja	ja	ja	MS14-+6

**Tabelle A.6:** Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS14. In der Superlage MS14 werden GEM-MSGC-Typ III verwendet.

Substratnr.	Substrat erhitzt	GEM-Folie und Rahmen 12 h auf 100° C	Driftbox-Klebung mit N <sub>2</sub> -Spülung	GEM-MSGC nachträglich 24 h auf 45° C mit N <sub>2</sub> -Spülung	HERA-B-Detektorposition
287	nein	ja	ja	ja	MS15++1
275	nein	ja	ja	ja	MS15++2
239	nein	ja	ja	ja	MS15++3
247	nein	ja	ja	ja	MS15++4
225	nein	ja	ja	ja	MS15++5
277	nein	ja	ja	ja	MS15++6
273	nein	ja	ja	ja	MS15+-1
523	nein	ja	ja	ja	MS15+-2
251	nein	ja	ja	ja	MS15+-3
238	nein	ja	ja	ja	MS15+-4
292	nein	ja	ja	ja	MS15+-5
250	nein	ja	ja	ja	MS15+-6
513	ja	ja	ja	ja	MS15--1
515	ja	ja	ja	ja	MS15--2
265	nein	ja	ja	ja	MS15--3
291	nein	ja	ja	ja	MS15--4
269	nein	ja	ja	ja	MS15--5
244	nein	ja	ja	ja	MS15--6
302	nein	ja	ja	ja	MS15-+1
516	ja	ja	ja	ja	MS15-+2
256	ja	ja	ja	ja	MS15-+3
231	nein	ja	ja	ja	MS15-+4
240	nein	ja	ja	ja	MS15-+5
278	nein	ja	ja	ja	MS15-+6

**Tabelle A.7:** Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS15. In der Superlage MS15 werden GEM-MSGC-Typ III verwendet.

## Anhang B

# Reduktion der Ereignisse durch verschiedene Schnitte

Da die Vertexdetektor-Multiplizitäten unterschiedlich für die Simulationen und die Datensätze sind, werden in den folgenden Tabellen die Wirkungen der verschiedenen Schnitte auf die Anzahl der Ereignisse in Abhängigkeit von der Vertexdetektor-Multiplizität aufgeführt. Die betrachteten Bereiche in der Vertexdetektor-Multiplizität sind dabei: 0–9; 10–14; 15–19 und 20–24 Vertexdetektorsegmente.

In allen Ereignissen, die in dem jeweiligen Multiplizitätsbereich liegen, wird nach guten Dreiteilchenvertices, bei denen die Wurzel der Summe der Abstandsquadrate kleiner als 0,17 mm ist, gesucht. Die Sekundärvertices müssen verschiedene Schnitte auf den Abstand  $d_z$  in  $z$ -Richtung des Vertex zum Primärvertex auf dem Draht erfüllen. Der Effekt des  $d_z$ -Schnittes wird für die Abstände 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 cm vom Draht betrachtet.

Alle guten Triplets, die im Multiplizitätsbereich liegen und einen genügend großen  $d_z$ -Abstand vom Draht haben, werden dann daraufhin überprüft, ob sie ein Teilchen mit einem Transversalimpuls im Bereich von (0,6-3,0) GeV/ $c$ , das durch die Suchbereichsmethode gefunden wurde, haben, oder ob der größte Öffnungswinkel der Triplets im Bereich zwischen (0,02 - 0,1)° liegt, oder ob sogar beide Schnitte durch eines dieser Triplets erfüllt werden. In der Tabelle sind alle Ereignisse, bei denen die angewandten Schnitte mindestens durch ein Triplet erfüllt wurden, aufgelistet.

Durch die verschiedenen Schnitte wird die  $D^+$ -Simulation am wenigsten reduziert. Die zwei betrachteten Datensätze sowie die  $MB$ -Simulation werden durch die verschiedenen Schnitte etwa gleich stark reduziert.

**0-9 Vertexdetektorsegmente**

Run	Ereignisse	$d_z$	$d_z$ $p_T$ -Spur	$d_z$ $\alpha_{\text{Öffnung}}$	$d_z$ $p_T$ -Spur $\alpha_{\text{Öffnung}}$
<b><math>d_z</math> Schnitt 0,5 cm</b>					
MC $D^+$	287	135	112	100	84
%	100	$47,0 \pm 2,9$	$39,0 \pm 2,9$	$34,8 \pm 2,8$	$29,3 \pm 2,7$
MC $MB$	4608	189	94	81	36
%	100	$4,1 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$
Trig Run 17242	2281	135	99	71	52
%	100	$5,9 \pm 0,5$	$4,3 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	1432	53	35	35	22
%	100	$3,7 \pm 0,5$	$2,4 \pm 0,4$	$2,4 \pm 0,4$	$1,5 \pm 0,3$
<b><math>d_z</math> -Schnitt 1,0 cm</b>					
MC $D^+$	287	60	51	39	32
%	100	$20,9 \pm 2,4$	$17,8 \pm 2,3$	$13,6 \pm 2,0$	$11,1 \pm 1,9$
MC $MB$	4608	35	22	7	4
%	100	$0,8 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,0$
Trig Run 17242	2281	30	22	8	7
%	100	$1,3 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$
$MB$ -Run 14572	1432	6	5	1	1
%	100	$0,4 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,2$	$0,1 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 1,5 cm</b>					
MC $D^+$	287	35	29	26	21
%	100	$12,2 \pm 1,9$	$10,1 \pm 1,8$	$9,1 \pm 1,7$	$7,3 \pm 1,5$
MC $MB$	4608	8	6	2	1
%	100	$0,2 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
Trig Run 17242	2281	7	5	1	0
%	100	$0,3 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
$MB$ -Run 14572	1432	1	1	0	0
%	100	$0,1 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 2,0 cm</b>					
MC $D^+$	287	22	21	17	16
%	100	$7,7 \pm 1,6$	$7,3 \pm 1,5$	$5,9 \pm 1,4$	$5,6 \pm 1,4$
MC $MB$	4608	4	3	0	0
%	100	$0,1 \pm 0,0$	$0,1 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
Trig Run 17242	2281	7	5	1	0
%	100	$0,3 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
$MB$ -Run 14572	1432	1	1	0	0
%	100	$0,1 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$

**Tabelle B.1:** Reduktion durch verschiedene Schnitte, 0 – 9 Vertexdetektorsegmente

**10-14 Vertexdetektorsegmente**

Run	Ereignisse	$d_z$	$d_z$ $p_T$ -Spur	$d_z$ $\alpha_{\text{Öffnung}}$	$d_z$ $p_T$ -Spur $\alpha_{\text{Öffnung}}$
<b><math>d_z</math> Schnitt 0,5 cm</b>					
MC $D^+$	379	245	210	197	166
%	100	$64,6 \pm 2,5$	$55,4 \pm 2,6$	$52,0 \pm 2,6$	$43,8 \pm 2,5$
MC $MB$	1628	389	238	227	134
%	100	$23,9 \pm 1,1$	$14,6 \pm 0,9$	$13,9 \pm 0,9$	$8,2 \pm 0,7$
Trig Run 17242	2524	664	522	411	328
%	100	$26,3 \pm 0,9$	$20,7 \pm 0,8$	$16,3 \pm 0,7$	$13,0 \pm 0,7$
$MB$ -Run 14572	437	90	67	69	49
%	100	$20,6 \pm 1,9$	$15,3 \pm 1,7$	$15,8 \pm 1,7$	$11,2 \pm 1,5$
<b><math>d_z</math> -Schnitt 1,0 cm</b>					
MC $D^+$	379	108	90	75	63
%	100	$28,5 \pm 2,3$	$23,7 \pm 2,2$	$19,8 \pm 2,0$	$16,6 \pm 1,9$
MC $MB$	1628	121	75	51	32
%	100	$7,4 \pm 0,7$	$4,6 \pm 0,5$	$3,1 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,3$
Trig Run 17242	2524	173	117	66	45
%	100	$6,9 \pm 0,5$	$4,6 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,3$	$1,8 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	437	19	13	9	5
%	100	$4,3 \pm 1,0$	$3,0 \pm 0,8$	$2,1 \pm 0,7$	$1,1 \pm 0,5$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 1,5 cm</b>					
MC $D^+$	379	57	45	39	31
%	100	$15,0 \pm 1,8$	$11,9 \pm 1,7$	$10,3 \pm 1,6$	$8,2 \pm 1,4$
MC $MB$	1628	50	30	17	10
%	100	$3,1 \pm 0,4$	$1,8 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,3$	$0,6 \pm 0,2$
Trig Run 17242	2524	65	45	18	14
%	100	$2,6 \pm 0,3$	$1,8 \pm 0,3$	$0,7 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,1$
$MB$ -Run 14572	437	8	6	1	0
%	100	$1,8 \pm 0,6$	$1,4 \pm 0,6$	$0,2 \pm 0,2$	$0,0 \pm 0,0$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 2,0 cm</b>					
MC $D^+$	379	29	25	17	16
%	100	$7,7 \pm 1,4$	$6,6 \pm 1,3$	$4,5 \pm 1,1$	$4,2 \pm 1,0$
MC $MB$	1628	27	16	8	6
%	100	$1,7 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,2$
Trig Run 17242	2524	35	22	9	5
%	100	$1,4 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$
$MB$ -Run 14572	437	3	3	0	0
%	100	$0,7 \pm 0,4$	$0,7 \pm 0,4$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$

**Tabelle B.2:** Reduktion durch verschiedene Schnitte, 10 – 14 Vertexdetektorsegmente

**15-19 Vertexdetektorsegmente**

Run	Ereignisse	$d_z$	$d_z$ $p_T$ -Spur	$d_z$ $\alpha_{\text{Öffnung}}$	$d_z$ $p_T$ -Spur $\alpha_{\text{Öffnung}}$
<b><math>d_z</math> Schnitt 0,5 cm</b>					
MC $D^+$	244	181	164	156	137
%	100	$74,2 \pm 2,8$	$67,2 \pm 3,0$	$63,9 \pm 3,1$	$56,1 \pm 3,2$
MC $MB$	764	358	253	231	155
%	100	$46,9 \pm 1,8$	$33,1 \pm 1,7$	$30,2 \pm 1,7$	$20,3 \pm 1,5$
Trig Run 17242	2313	1119	963	805	698
%	100	$48,4 \pm 1,0$	$41,6 \pm 1,0$	$34,8 \pm 1,0$	$30,2 \pm 1,0$
$MB$ -Run 14572	259	133	118	95	84
%	100	$51,4 \pm 3,1$	$45,6 \pm 3,1$	$36,7 \pm 3,0$	$32,4 \pm 2,9$
<b><math>d_z</math> -Schnitt 1,0 cm</b>					
MC $D^+$	244	88	73	63	51
%	100	$36,1 \pm 3,1$	$29,9 \pm 2,9$	$25,8 \pm 2,8$	$20,9 \pm 2,6$
MC $MB$	764	114	74	50	35
%	100	$14,9 \pm 1,3$	$9,7 \pm 1,1$	$6,5 \pm 0,9$	$4,6 \pm 0,8$
Trig Run 17242	2313	341	273	147	126
%	100	$14,7 \pm 0,7$	$11,8 \pm 0,7$	$6,4 \pm 0,5$	$5,4 \pm 0,5$
$MB$ -Run 14572	259	30	25	15	13
%	100	$11,6 \pm 2,0$	$9,7 \pm 1,8$	$5,8 \pm 1,5$	$5,0 \pm 1,4$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 1,5 cm</b>					
MC $D^+$	244	47	39	29	25
%	100	$19,3 \pm 2,5$	$16,0 \pm 2,3$	$11,9 \pm 2,1$	$10,2 \pm 1,9$
MC $MB$	764	50	35	16	12
%	100	$6,5 \pm 0,9$	$4,6 \pm 0,8$	$2,1 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,4$
Trig Run 17242	2313	135	106	40	34
%	100	$5,8 \pm 0,5$	$4,6 \pm 0,4$	$1,7 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	259	13	10	6	4
%	100	$5,0 \pm 1,4$	$3,9 \pm 1,2$	$2,3 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,8$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 2,0 cm</b>					
MC $D^+$	244	30	26	15	14
%	100	$12,3 \pm 2,1$	$10,7 \pm 2,0$	$6,1 \pm 1,5$	$5,7 \pm 1,5$
MC $MB$	764	24	16	9	7
%	100	$3,1 \pm 0,6$	$2,1 \pm 0,5$	$1,2 \pm 0,4$	$0,9 \pm 0,3$
Trig Run 17242	2313	58	42	12	11
%	100	$2,5 \pm 0,3$	$1,8 \pm 0,3$	$0,5 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$
$MB$ -Run 14572	259	4	4	1	1
%	100	$1,5 \pm 0,8$	$1,5 \pm 0,8$	$0,4 \pm 0,4$	$0,4 \pm 0,4$

**Tabelle B.3:** Reduktion durch verschiedene Schnitte, 15 – 19 Vertexdetektorsegmente



**20-24 Vertexdetektorsegmente**

Run	Ereignisse	$d_z$	$d_z$ $p_T$ -Spur	$d_z$ $\alpha_{\text{Öffnung}}$	$d_z$ $p_T$ -Spur $\alpha_{\text{Öffnung}}$
<b><math>d_z</math> Schnitt 0,5 cm</b>					
MC $D^+$	94	48	37	26	22
%	100	$51,1 \pm 5,2$	$39,4 \pm 5,0$	$27,7 \pm 4,6$	$23,4 \pm 4,4$
MC $MB$	345	89	62	32	23
%	100	$25,8 \pm 2,4$	$18,0 \pm 2,1$	$9,3 \pm 1,6$	$6,7 \pm 1,3$
Trig Run 17242	1649	442	374	208	182
%	100	$26,8 \pm 1,1$	$22,7 \pm 1,0$	$12,6 \pm 0,8$	$11,0 \pm 0,8$
$MB$ -Run 14572	124	31	26	14	12
%	100	$25,0 \pm 3,9$	$21,0 \pm 3,7$	$11,3 \pm 2,8$	$9,7 \pm 2,7$
<b><math>d_z</math> -Schnitt 1,0 cm</b>					
MC $D^+$	94	48	37	26	22
%	100	$51,1 \pm 5,2$	$39,4 \pm 5,0$	$27,7 \pm 4,6$	$23,4 \pm 4,4$
MC $MB$	345	89	62	32	23
%	100	$25,8 \pm 2,4$	$18,0 \pm 2,1$	$9,3 \pm 1,6$	$6,7 \pm 1,3$
Trig Run 17242	1649	442	374	208	182
%	100	$26,8 \pm 1,1$	$22,7 \pm 1,0$	$12,6 \pm 0,8$	$11,0 \pm 0,8$
$MB$ -Run 14572	124	31	26	14	12
%	100	$25,0 \pm 3,9$	$21,0 \pm 3,7$	$11,3 \pm 2,8$	$9,7 \pm 2,7$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 1,5 cm</b>					
MC $D^+$	94	31	22	14	13
%	100	$33,0 \pm 4,8$	$23,4 \pm 4,4$	$14,9 \pm 3,7$	$13,8 \pm 3,6$
MC $MB$	345	42	27	16	12
%	100	$12,2 \pm 1,8$	$7,8 \pm 1,4$	$4,6 \pm 1,1$	$3,5 \pm 1,0$
Trig Run 17242	1649	170	137	55	46
%	100	$10,3 \pm 0,7$	$8,3 \pm 0,7$	$3,3 \pm 0,4$	$2,8 \pm 0,4$
$MB$ -Run 14572	124	7	6	3	3
%	100	$5,6 \pm 2,1$	$4,8 \pm 1,9$	$2,4 \pm 1,4$	$2,4 \pm 1,4$
<b><math>d_z</math>-Schnitt 2,0 cm</b>					
MC $D^+$	94	17	10	8	7
%	100	$18,1 \pm 4,0$	$10,6 \pm 3,2$	$8,5 \pm 2,9$	$7,4 \pm 2,7$
MC $MB$	345	26	15	9	6
%	100	$7,5 \pm 1,4$	$4,3 \pm 1,1$	$2,6 \pm 0,9$	$1,7 \pm 0,7$
Trig Run 17242	1649	70	57	21	19
%	100	$4,2 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,4$	$1,3 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$
$MB$ -Run 14572	124	3	2	0	0
%	100	$2,4 \pm 1,4$	$1,6 \pm 1,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$

**Tabelle B.4:** Reduktion durch verschiedene Schnitte, 20 – 24 Vertexdetektorsegmente



# Literaturverzeichnis

- [A<sup>+</sup>88] R. Ammar et al., *D-MESON PRODUCTION IN 800-GEV/C P P INTERACTIONS*, Phys. Rev. Lett. **61** (1988), 2185–2188.
- [A<sup>+</sup>97] T. Alexopoulos et al., [E-771] , *Differential cross sections of  $J/\psi$  and  $\psi'$  in 800-GeV/c p Si interactions*, Phys. Rev. **D55** (1997), 3927–3932.
- [A<sup>+</sup>00a] Hiroaki Aihara et al., [BELLE] , *A measurement of CP violation in  $B^0$  meson decays at Belle*, hep-ex/0010008.
- [A<sup>+</sup>00b] B. Aubert et al., [BABAR] , *A study of time-dependent CP-violating asymmetries in  $B^0 - J/\psi K^0(S)$  and  $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^0(S)$  decays*, hep-ex/0008048.
- [A<sup>+</sup>01] G. Avoni et al., *The electromagnetic calorimeter of the HERA-B experiment*, Nucl. Instrum. Meth. **A461** (2001), 332–336.
- [A<sup>+</sup>02a] K. Abe et al., [Belle] , *Observation of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system*, Phys. Rev. **D66** (2002), 032007, hep-ex/0202027.
- [A<sup>+</sup>02b] B. Aubert et al., [BABAR] , *The BaBar detector*, Nucl. Instrum. Meth. **A479** (2002), 1–116, hep-ex/0105044.
- [A<sup>+</sup>03a] I. Abt et al., [HERA-B] , *Measurement of the b anti-b production cross section in 920-GeV fixed-target proton nucleus collisions*, Eur. Phys. J. **C26** (2003), 345–355, hep-ex/0205106.
- [A<sup>+</sup>03b] I. Arino et al., *The HERA-B ring imaging Cerenkov counter*, hep-ex/0303012.
- [A<sup>+</sup>03c] B. Aubert et al., [BABAR] , *Measurement of the CKM Matrix Element  $|V_{ub}|$  with  $B \rightarrow \rho e \nu$  Decays*, hep-ex/0301001.
- [B<sup>+</sup>01] M. Böcker et al., *The Muon pretrigger system of the HERA-B experiment*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **48** (2001), 1270–1275.
- [B<sup>+</sup>02a] Y. Bagaturia et al., *Работа по модернизации системы внутреннего трекера HERA-B в 2001 г. (Upgrade Activity of the HERA-B Inner Tracker System in 2001 (In Russian).)*, Preprint Lebedev Physical Institute N 15, Moscow (2002).
- [B<sup>+</sup>02b] Y. Bagaturia et al., [HERA-B Inner Tracker] , *Studies of aging and HV break down problems during development and operation of MSGC and GEM detectors for the inner tracking system of HERA-B* , Nucl. Instrum. Meth. **A490** (2002), 223–242, hep-ex/0204011.
- [B<sup>+</sup>02c] V. Balagura et al., *The first-level trigger of the HERA-B experiment: Performance and expectations*, Nucl. Instrum. Meth. **A494** (2002), 526–534.

- [BCM98] R. Bonciani, S. Catani, M. L. Mangano, and P. Nason, *NLL resummation of the heavy-quark hadroproduction cross-section*, Nucl. Phys. **B529** (1998), 424–450, hep-ph/9801375.
- [Brä01a] M. Bräuer, Private Mitteilung, März 2001.
- [Brä01b] M. Bräuer, *Alignment des HERA-B Vertexdetektors*, Dissertation, Universität Heidelberg, 2001.
- [Brü02] M. Brüggemann, *Untersuchungen zum RICH-Vetosystem des HERA-B-Experiment*, Diplomarbeit, Universität Dortmund, August 2002.
- [Bru03] M. Bruschi, Private Mitteilung, März 2003.
- [Buc00] V. Buchholz, *Monitoring für das innere Spurkammersystem von HERA-B*, Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2000.
- [C<sup>+</sup>02] J. Carvalho et al., [HERA-B], *Luminosity measurement in HERA-B*, Preprint submitted to Elsevier Science (2002).
- [Cab63] N. Cabibbo, *Unitary Symmetry and Leptonic Decays*, Phys. Rev. Lett. **10** (1963), 531–532.
- [CCFT64] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, *Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K(2)0$  Meson*, Phys. Rev. Lett. **13** (1964), 138–140.
- [CG99] J. Hüfner C. Gerschel, *Charmonium Suppression in Heavy-Ion Collisions*, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci **49** (1999), 255–301.
- [Con02] P. Conde Muino, *Measurement of the ratio between the  $D^+$  and the  $D^0$  production cross section using an impact parameter method*, 2002.
- [Cru02] C. Cruse, *Das RICH-Multiplizitätsveto-System für das HERA-B Experiment*, Dissertation, Universität Dortmund, 2002.
- [DES00] DESY, Hamburg, *Abteilung Presse und Öffentlichkeitsarbeit*, 2000.
- [E<sup>+</sup>01] V. Eiges et al., *The muon detector at the HERA-B experiment*, Nucl. Instrum. Meth. **A461** (2001), 104–106.
- [Ger00] V. German, *Investigations on the reliability of the Microstrip Gas Detectors with Gas Electron Multiplier*, Diplomarbeit, Universität Siegen, 2000.
- [Gor03a] I. Gorbounov, Private Mitteilung, Januar 2003.
- [Gor03b] Andrej Gorisek, *Cross section measurement of  $D^0$  and  $D^{*+}$  meson production in inelastic collisions of 920 GeV protons with nuclei*, 2003.
- [Gra01] W. Gradl, *The Readout System of the HERA-B Inner Tracker and Prospects of HERA-B in the Field of Drell-Yan Physics*, Dissertation, Universität Heidelberg, 2001.
- [H<sup>+</sup>02] K. Hagiwara et al., *Review of Particle Physics*, Phys. Rev. **D 66** (2002), 010001.
- [Hau99] S. Hausmann, *Das Auslesesystem der Inneren Spurkammern bei HERA-B*, Dissertation, Universität Heidelberg, Februar 1999.

- [hbs] *ARTE, HERA-B event reconstruction software*,  
<http://www-hera-b.desy.de/subgroup/software/>.
- [Hei99] C. Heiß, *Aufbau und Inbetriebnahme eines automatisierten Gasversorgungssystems für das Innere Spurkammersystem des HERA-B-Experimentes*, Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 1999.
- [HER00] HERA-B Collaboration, *HERA-B Physics in 2001/2002*, Letter to the DESY Directorate, Dezember 2000.
- [Hil99] M. Hildebrandt, *Entwicklung und Bau der Detektoren für das Innere Spurkammersystem bei HERA-B*, Dissertation, Universität Heidelberg, 1999.
- [Hoh01] M. Hohlmann, *The outer tracker of HERA-B*, Nucl. Instrum. Meth. **A461** (2001), 21–24.
- [Hot97] T. Hott, *Entwicklung und Test großflächiger Mikro-Streifen-Gas-Kammern für das innere Spurkammersystem von HERA-B*, Dissertation, Universität Heidelberg, 1997.
- [Hus02] U. Husemann, Private Mitteilung, August 2002.
- [J<sup>+</sup>95] D. M. Jansen et al., *Measurement of the bottom quark production cross-section in 800-GeV/c proton - gold collisions*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995), 3118–3121.
- [K<sup>+</sup>91] K. Kodama et al., [Fermilab E653] , *Charm meson production in 800-GeV/c proton - emulsion interactions*, Phys. Lett. **B263** (1991), 573–578.
- [Kel01] S. Keller, *Aufbau eines Spurtriggers bei HERA-B mit GEM-MSGC Detektoren*, Dissertation, Universität Siegen, 2001.
- [KLMV01] Nikolaos Kidonakis, Eric Laenen, Sven Moch, and Ramona Vogt, *Sudakov resummation and finite order expansions of heavy quark hadroproduction cross sections*, Phys. Rev. **D64** (2001), 114001, hep-ph/0105041.
- [KM73] M. Kobayashi and T. Maskawa, *CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction*, Prog. Theor. Phys. **49** (1973), 652–657.
- [Kra02] C. Krauss, *Investigations on the Operational Behavior of the GEM-MSGC Inner Tracking System and Study on the Reconstruction of  $\chi_c$  Events in the HERA-B-Detector*, Dissertation, U Heidelberg, 2002.
- [L<sup>+</sup>94a] M. J. Leitch et al., [E789] , *Nuclear dependence of neutral D meson production by 800-GeV/c protons*, Phys. Rev. Lett. **72** (1994), 2542–2545.
- [L<sup>+</sup>94b] T. Lohse et al., [HERA-B Collaboration] , *HERA-B: An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring*, Mai 1994, DESY-PRC 94/02.
- [Mas00] S. Masciocchi, Private Mitteilung, 2000.
- [Mas02] S. Masciocchi, Tracking Meeting, Juli 2002.
- [Med02] M. Medinnis, Private Mitteilung, Oktober 2002.
- [MRST02] A. D. Martin, R. G. Roberts, W. J. Stirling, and R. S. Thorne, *NNLO global parton analysis*, Phys. Lett. **B531** (2002), 216–224, hep-ph/0201127.

- [Nun03] M.-T. Nunez Pardo de Vera, Private Mitteilung, März 2003.
- [Oed88] A. Oed, *Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases*, Nucl. Instr. and Meth. **A 263** (1988), 351.
- [Pet02] B. A. Petersen, *Beauty Production at HERA-B. Performance of the Second Level Trigger and the  $b$  anti- $b$  Cross Section in 920 GeV  $pN$  Collisions*, Dissertation, Universität Kopenhagen, 2002.
- [Rah02] Shahram Rahatlou, [BABAR], *Measurement of the CP-violating asymmetry amplitude  $\sin(2\beta)$  with the BaBar detector*, hep-ex/0207088.
- [Ric00] C. Richter, *Development of Micro Pattern Gas Detectors for High Rate Experiments*, Dissertation, Universität Heidelberg, 2000.
- [S+99] R. Schwitters et al., *Measuring Momentum with the HERA-B RICH and ECAL*, Internal Note 99-100, 1999.
- [Sau97] F. Sauli, *GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors*, Nucl. Instrum. Meth. **A386** (1997), 531.
- [Sch00] U. Schwanke, *Trigger and Reconstruction Farms in the HERA-B Experiment and Algorithms for a third level trigger*, Dissertation, Humboldt-Uni Berlin, 2000.
- [Sch01] M. Schmelling, Private Mitteilung, 2001.
- [Sch03] B. Schwingenheuer, Private Mitteilung, März 2003.
- [SM+02] (ed.) S. Mori et al., [BELLE], *The Belle detector*, Nucl. Instrum. Meth. **A479** (2002), 117–232.
- [Tru00] U. Trunk, *Development and Characterisation of the Radiation tolerant HELIX128-2 Readout Chip for the HERA-B Microstrip Detectors*, Dissertation, Universität Heidelberg, 2000.
- [V+00] I. Vassiliev et al., *Multi-target operation at the HERA-B experiment*, AIP Conf. Proc. **512** (2000), 359–361.
- [Vog02] R. Vogt, *Are the  $J/\psi$  and  $\chi_c$   $A$ -dependencies the same?*, Nucl. Phys. **A700** (2002), 539–554, hep-ph/0107045.
- [Wal01] T. Walter, *Contributions to the Development of Microstrip Gas Chambers (MSGC) for the HERA-B Experiment*, Dissertation, Universität Zürich, 2001.
- [Wer00] C. Werner, *Untersuchungen zur Betriebssicherheit und zum Langzeitverhalten von GEM-MSGC-Detektoren bei ihrem Einsatz in einem Hochratenexperiment.*, Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2000.
- [Wil00] M. Wilde, *Die Slow-Control der Inneren Spurrkammern bei HERA-B und Untersuchungen zu geeigneten Hochspannungs-Parametern der GEM-MSGCs*, Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2000.
- [Wol03] R. Wolf, *Studien zur Bestimmung der Zentralität von Proton-Kern-Stößen am HERA-B-Experiment*, Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2003.

- [Zeu98] T. Zeuner, *Entwicklung eines Spurdetektors für das Experiment HERA-B*, Dissertation, Universität Siegen, 1998.
- [Zeu02] T. Zeuner, Private Mitteilung, 2002.
- [Zie98] M. Ziegler, Private Mitteilung, 1998.





# Abbildungsverzeichnis

2.1	Der $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitt . . . . .	4
2.2	Das Charmonium-Termschema . . . . .	5
2.3	Vorhersagen verschiedener Modelle für $\alpha(x_F)$ . . . . .	6
3.1	Der Ringbeschleuniger HERA . . . . .	9
3.2	Der HERA- <i>B</i> Detektor im Jahr 2000 . . . . .	10
3.3	Der Vertexdetektor . . . . .	12
3.4	Das FLT-Triggerschema . . . . .	16
4.1	Elektrisches Feld von MSGC und GEM-Folie . . . . .	19
4.2	Querschnitt und Aufsicht einer GEM-MSGC von HERA- <i>B</i> . . . . .	20
4.3	Der HERA- <i>B</i> -Detektor, nicht maßstäblich . . . . .	21
4.4	Anordnung der GEM-MSGC-Detektoren auf den Trägerplatten . . . . .	23
4.5	Blockschaltbild des HELIX-Auslesechips . . . . .	25
4.6	Schematische Zeichnung der Hochspannungsversorgung der GEM-MSGCs . . . . .	27
4.7	Schematische Zeichnung der Gasversorgung der GEM-MSGCs . . . . .	28
5.1	Bemaßte Zeichnung des Querschnittes einer HERA- <i>B</i> -GEM-MSGC . . . . .	33
5.2	Anzahl der Anodenunterbrüche der 2002/2003 verwendeten GEM-MSGCs . . . . .	34
5.3	Der Querschnitt der GEM-Folien, nach verschiedenen Produktionsschritten . . . . .	35
5.4	Mikroskopabbildung einer GEM-Folie . . . . .	36
5.5	Kupfer- und Kaptonlochdurchmesser der produzierten GEM-Folien . . . . .	37
5.6	Schematische Zeichnung der Fanins der GEM-MSGCs . . . . .	42
5.7	Erdungsschema der Detektoren im Jahr 2000 . . . . .	43
5.8	Bild der Superlage MS12 in Meßposition . . . . .	44
5.9	Bild der Halbsuperlage MS14- <i>x</i> Seite . . . . .	45
5.10	Auslesemuster der HELIX-Chips mit und ohne Testpuls . . . . .	49
5.11	Auslesemuster der HELIX-Chips mit $V_{fp} = 125$ für 40 V und 60 V . . . . .	50
6.1	Rohdaten eines HELIX-Chip-PCBs . . . . .	54
6.2	Rohdaten und korrigierte Daten eines HELIX-Chips . . . . .	54
6.3	Korrigierte Daten mit Rauschband eines PCBs. . . . .	55
6.4	L2-Monitorprogramm: Streifenrauschen des inneren Spurkammersystems . . . . .	58
6.5	Schematische Zeichnung des HERA-Bunchcrossingspektrums . . . . .	59
6.6	L2-Monitorprogramm: Treffer gegenüber der HERA-Bunchzahl . . . . .	59
6.7	L4-Monitorprogramm: Trefferverteilung über die MSGC-Streifen . . . . .	60
6.8	L4-Monitorprogramm: Residuum pro Halbsuperlagen . . . . .	61
6.9	L4-Monitorprogramm: Anzahl der Treffer auf rekonstruierten Spuren . . . . .	62
7.1	GEM-Überschläge und Kathoden-Anoden-Kurzschlüsse im Jahr 1999/2000 . . . . .	65

7.2	Strom-Spannungskennlinie einer MSGC mit einer defekten Diode . . . . .	68
7.3	Trefferverteilungs- und Rauschhistogramm der Kammer MS01+−3, aus dem Jahr 2000 . . . . .	69
7.4	Das Erdungsschema der Detektoren 2002/2003 . . . . .	71
7.5	Testpulse- und Grundlinie eines PCB . . . . .	73
7.6	Mittelwert des Streifenrauschens eines Detektors . . . . .	74
7.7	Einzellageneffizienz, GEM-Lochdurchmesser der Superlage MS01, 2002 . . . . .	75
7.8	Trefferverteilungs- und Rauschhistogramm der Kammer MS10++1, im Jahr 2002 . . . . .	76
7.9	Testpulsverteilung der Kammer MS10++1, im Jahr 2001 und im Dezember 2002 . . . . .	77
8.1	Akzeptanz des Elektrons als Funktion des Transversalimpulsschnittes. . . . .	83
8.2	Schematische Darstellung des $D$ -Mesonzerfalls . . . . .	85
8.3	$D^+$ -Meson: $D^+$ -Mesonimpuls und $z$ -Abstand des Sekundärvertex . . . . .	85
8.4	$D^0$ -Meson: $z$ -Abstand und Transversalimpulsverteilung des Elektrons . . . . .	86
8.5	Güte des Dreiteilchen-Sekundärvertices . . . . .	89
8.6	„Wurzel der Summe der zwei Abstandskquadrate“ $d_{vtx}$ für Zweiteilchen-Sekundärvertices . . . . .	90
8.7	$x$ -, $y$ und $z$ -Verteilung des Vertex . . . . .	91
8.8	Effizienz des $d_z$ -Schnittes für semileptonische $D^+$ -Zweiteilchenzerfälle . . . . .	93
8.9	Effizienz des $d_z$ -Schnittes für semileptonische $D^+$ -Dreiteilchenzerfälle . . . . .	94
8.10	Impuls und Transversalimpuls der Spuren aus einem Sekundärvertex . . . . .	99
8.11	Impuls und Transversalimpuls von Kaon und Pionen aus dem $D^+$ -Zerfall . . . . .	100
8.12	Die Methode des Abschätzens des Impulses . . . . .	101
8.13	Korrelation: abgeschätzter und wahrer Auftreffpunkt . . . . .	102
8.14	Residuen zwischen der wahren Spur und der Abschätzmethode. . . . .	103
8.15	Größe des Suchbereichs in der $x$ -Koordinate in der 1. PC-Lage . . . . .	104
8.16	Abstand der beiden Suchbereiche zueinander . . . . .	105
8.17	Transversalimpulsverteilung nach Treffersuche in der 1. und 4. PC-Lage . . . . .	108
8.18	Effizienz des $d_z$ -Schnittes und Transversalimpulsschnittes. . . . .	109
8.19	Größter Öffnungswinkel des Dreiteilchenzerfalls . . . . .	110
8.20	Größter Öffnungswinkel gegen größten Transversalimpuls . . . . .	111
8.21	Effizienz des $d_z$ -Schnittes und des Öffnungswinkelschnitts. . . . .	111
8.22	Zahl der Treffer pro Vertexdetektorsegment . . . . .	113
8.23	Zahl der Vertexdetektorsegmente pro Ereignis . . . . .	114
8.24	Zahl der Vertexdetektorsegmente pro Ereignis ohne Primärvertexschnitt . . . . .	115
8.25	Korrelation: RICH-Treffer und Treffer im RICH-Vetobereich . . . . .	115
8.26	Vergleich Simulation/Daten: Treffer im RICH und Vertexdetektor. . . . .	116
8.27	Vergleich Simulation/Daten: Position des Vertex . . . . .	118
8.28	Vergleich Simulation/Daten: $d_{vtx}$ . . . . .	119
8.29	Vergleich Simulation/Daten: Effizienz des $d_z$ -Schnittes . . . . .	119
8.30	Invariantes Massenspektrum . . . . .	126
8.31	Invariantes Massenspektrum der Minimum-Bias-Daten 2002/2003 mit Likelihood-schnitten . . . . .	127

# Tabellenverzeichnis

2.1	Charmoniumzerfälle mit einem Leptonpaar oder $J/\psi$ im Endzustand . . . . .	5
3.1	Targetmaterialien in der Datennahme 1999/2000 und 2002 . . . . .	11
4.1	Aufbau der Superlagen des inneren Spurkammersystems . . . . .	24
4.2	Die HELIX-Versionen . . . . .	26
5.1	Sollmaße und erlaubte Abweichungen der Rahmen . . . . .	38
5.2	Angelegte Spannungen an den GEM-MSGCs beim Kammertest in Siegen . . . . .	41
5.3	Angelegte Spannungen an den GEM-MSGCs beim Kammertest in der Testhalle . . . . .	47
5.4	Hochspannungsdefekte, die in der Testhalle gefunden wurden . . . . .	52
5.5	Auslesedefekte, die in der Testhalle gefunden wurden . . . . .	52
7.1	Defekte und Probleme der Detektoren nach der Runperiode 1999/2000 . . . . .	70
7.2	Angelegte Spannungen beim Einzellagen-Hochspannungstest . . . . .	72
8.1	Effizienz der FLT- und SLT-Trigger . . . . .	84
8.2	Ausgangsraten aus dem FLT- und SLT-Trigger . . . . .	84
8.3	Untersuchte Simulationen . . . . .	87
8.4	Vergleich der Qualitätskriterien für einen Dreiteilchen-Sekundärvertex. . . . .	89
8.5	$D\bar{D}$ -Produktionswahrscheinlichkeit . . . . .	95
8.6	Allgemeine FLT- und SLT-Effizienzen für ein Elektron mit $p_T > 0,6$ GeV/c. . . . .	96
8.7	Effizienz des $D^+ \rightarrow e^+ \nu K \pi$ -Mesonentriggers für einen Dreiteilchenvertex . . . . .	96
8.8	Anzahl der getriggerten $D$ -Mesonen auf Band für Leptontrigger mit abgesetzten Dreiteilchenvertex . . . . .	97
8.9	Größe des Suchbereichs in $x$ - und $y$ -Koordinate für die 1. und 4. PC-Lage . . . . .	104
8.10	Effizienzen der Suchbereiche für einen perfekten Detektor . . . . .	107
8.11	Effizienzen der Suchbereiche für einen realistischen Detektor . . . . .	107
8.12	Effizienz der $D^+$ -Simulation, bei einer Reduktion der $MB$ -Simulation um einen Faktor 50 . . . . .	112
8.13	Breite der Gaußverteilung der $x$ - und $z$ -Position des Primärvertex . . . . .	117
8.14	Reduktion der Ereignisse durch günstige Schnitte . . . . .	120
8.15	Staffelung des $d_z$ -Schnittes . . . . .	121
8.16	Reduktion der Ereignisse durch Schnitte auf Vertexdetektor- und RICH-Treffer . . . . .	122
8.17	Reduktion der getriggerten Ereignisse durch zusätzlichen variablen $d_z$ Schnitt . . . . .	122
8.18	Effizienz des $DD \rightarrow K\pi\pi + e\nu X$ -Triggers . . . . .	124
8.19	Anzahl der getriggerten $D^\pm$ -Mesonen . . . . .	124
8.20	Verwendete Runs in der Datenanalyse . . . . .	125
8.21	Verwendete Schnitte für den $D$ -Meson-Dreiteilchen-Sekundärvertex-Trigger . . . . .	126
8.22	Verwendete Schnitte auf die Daten . . . . .	127

---

8.23	Inelastische Wirkungsquerschnitte für die verschiedenen Targetmaterialien, die für die benutzten Daten verwendet wurden [C <sup>+</sup> 02], und Zahl der in der Analyse verwendeten Ereignisse. . . . .	129
8.24	Für die Bestimmung des Wirkungsquerschnitts benötigte Effizienzen und Akzeptanzen . . . . .	129
A.1	Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS01 . . . . .	133
A.2	Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS10 . . . . .	134
A.3	Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS11 . . . . .	135
A.4	Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS12 . . . . .	135
A.5	Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS13 . . . . .	136
A.6	Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS14 . . . . .	137
A.7	Bauprozedur der 2002 verwendeten GEM-MSGC-Superlage MS15 . . . . .	138
B.1	Reduktion durch verschiedene Schnitte, 0 – 9 Vertexdetektorsegmente . . . . .	140
B.2	Reduktion durch verschiedene Schnitte, 10 – 14 Vertexdetektorsegmente . . . . .	141
B.3	Reduktion durch verschiedene Schnitte, 15 – 19 Vertexdetektorsegmente . . . . .	142
B.4	Reduktion durch verschiedene Schnitte, 20 – 24 Vertexdetektorsegmente . . . . .	143

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei meiner Arbeit besonders unterstützt haben.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Franz Eisele bedanken für die Möglichkeit, in der Arbeitsgruppe des inneren Spurkammersystems zu arbeiten, und für die Unterstützung, die ich von ihm in den letzten Jahren erhalten habe.

Herrn Prof. Jürgen von Krogh möchte ich danken für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Es hat großen Spaß gemacht, bei HERA-*B* in Hamburg zu promovieren. Ich möchte der ganzen Gruppe, die sich in Hamburg zusammengefunden hat, dafür danken:

Jens, der mir half, während dieser Zeit eine Unmenge an Tee zu vernichten, und der dafür sorgte, daß ich über alles, was in und um HERA-*B* vor sich ging, auf dem laufenden blieb.

Ulrich möchte ich ganz besonders danken für seine Bereitschaft, zu jeder Tages- und Nachtzeit bei Berechnungen oder Rootproblemen zu helfen, und dafür, daß er bei der Generation der vielen verschiedenen Monte-Carlo Simulationen, die ich benötigte, immer so schnell und zuverlässig wie ein Pizzaservice war.

Roger, daß er immer dafür sorgte, daß ich wohlbehalten nach Hause kam, oder mich zur Not zu sich nach Hause nahm.

Malte und Katharina möchte ich für die schöne Zeit in Heidelberg danken.

Nicht zu vergessen ist der Rest der Gruppe in Hamburg, die dieses tolle Arbeitsklima ja erst ausmachten: Carsten, Hartmut, Martin, Malika, Michael, Stefan K., Stefan R., Torsten, Ulrich, Verena, Wolfgang, Yuri.

Danken möchte ich auch unseren russischen und georgischen Kollegen Yuri Bagaturia, Boris Lomonosov und Michael Negodaev für die tolle Zusammenarbeit in der Testhalle.

Mein großes Dankeschön gilt den Leuten, die mir halfen, einen roten Faden in diese Arbeit einzubauen und die nicht müde wurden, meine falschgesetzten Kommas an die richtigen Stellen zu bringen, und die unermüdlich waren, „rauchende“ Kammern, „abgelegte“ und „abgeleckte“ Teilchen und „Fragnebtatuib“ sicher aus dieser Arbeit zu verbannen: Hartmut, Ulrich und Wolfgang. Mein besonderer Dank gilt meinem Mann Wolfgang für seine Liebe und Unterstützung in den letzten Wochen.