

**Systematische Untersuchung zur Auswirkung der
Detektorgeometrie auf die Spurrekonstruktionseffizienz
und Stoßparameterauflösung des
CBM Mikro-Vertex-Detektor**

Masterarbeit

von

Christian Trageser

Betreuer

Prof. Dr. Joachim Stroth

vorgelegt am Fachbereich Physik
der Goethe-Universität
Frankfurt am Main

Frankfurt, 16. August 2012

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Abhängigkeit der Effizienz der Spurrekonstruktion des CBM-Experimentes (Compact Baryonic Matter) von der Detektorgeometrie des Mikro-Vertex-Detektors (MVD) untersucht.

Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen wurden Schwerionenstöße der Reaktion Au+Au bei einer Strahlenergie von 25 AGeV simuliert, wie sie bei Experimenten an der zukünftigen Beschleunigeranlage SIS300 der FAIR-Anlage (Facility for Antiproton and Ion Research) des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung durchgeführt werden sollen.

In der Studie wurden verschiedene MVD-Geometrien untersucht. Dabei wurden ausgehend von zwei Detektorstationen weitere Detektorebenen hinzugefügt. Dadurch wurde eine MVD-Geometrie mit drei und eine mit vier Stationen zusätzlich zu der geplanten mit zwei Stationen definiert. Eine erwartete Abhängigkeit der Effizienz der Spurrekonstruktion von der Anzahl an MVD-Stationen wird aufgrund der zusätzlichen potentiellen Spurpunkte auf den neuen MVD-Stationen, aber vor allem durch den verkleinerten Abstand zwischen MVD und STS (Silicon-Tracking-System) motiviert.

Zur Bewertung der Spurrekonstruktion bei unterschiedlichen MVD-Geometrien wurden die rekonstruierten Spuren mit den simulierten Spuren verglichen. Dabei zeigte sich, ob ein Treffer richtig, falsch oder gar nicht einer Spur zugeordnet wurde. Im letzteren Fall wurden zusätzlich zwei verschiedene Ursachen (geometrische Akzeptanz und Detektorineffizienzen) für die nicht erfolgte Zuordnung unterschieden. Auf diese Weise wurden verschiedene Spurklassen definiert, die als Angabe für die Rekonstruktionsgüte dienen. Um entscheiden zu können, welche minimale Rekonstruktionsgüte benötigt wird, wurde die Auflösung der Stoßparameterverteilung von Untergrundspuren mit der benötigten Auflösung für den Nachweis von D^0 -Tocherteilchen verglichen. Es zeigte sich, dass hierfür nur Spuren in Frage kommen, die keine Fehler in der Spurrekonstruktion oder Verluste durch Detektorineffizienzen aufweisen. Allerdings sind Verluste durch die geometrische Akzeptanz des Detektors akzeptabel.

Im nächsten Schritt wurde die Zahl der rekonstruierten Untergrundspuren, nach ihrer Spurklasse aufgeschlüsselt, für verschiedene MVD-Geometrien und Pile-Up-Szenarien betrachtet. Bei hohen Pile Up-Werten und wenigen MVD-Stationen zeigte sich, dass die Zahl an Spuren mit Rekonstruktionsfehler besonders hoch ist. Durch zusätzliche MVD-Stationen lassen sich Spuren mit Rekonstruktionsfehler jedoch reduzieren. Die Zahl der durch die Spurauswahlverfahren entfernten Spuren bei hohen Pile Up-Werten sinkt ebenfalls mit zusätzlichen MVD-Stationen.

Diese Arbeit zeigt eine effizientere Spurrekonstruktion durch zusätzliche MVD-Stationen, die den Abstand zwischen MVD und STS verringern. Die größte Verbesserung der Rekonstruktionsgüte der Spurrekonstruktion wurde unter Verwendung von einer zusätzlichen MVD-Station bei einer Position von $z = 15$ cm beobachtet.

B

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Ziele und Aufbau des CBM-Experimentes	1
1.2 Zielsetzung dieser Arbeit	5
2 Der CBM-MVD, Technik und Simulationsmodell	7
2.1 Der Mikro-Vertex-Detektor	7
2.1.1 Rekonstruktion von <i>D</i> -Mesonen	9
2.1.2 Arbeitsbedingungen des MVD in den Simulationen	12
2.2 Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS)	15
2.2.1 Funktionsweise	16
2.2.2 Mimoso-26	16
2.3 Das CBM-Simulationsframework	18
2.4 Detektorresponsemodell für den Mikro-Vertex-Detektor	20
2.4.1 Funktionsweise des Hitfinders	21
2.5 Rekonstruktion der Teilchenspuren	24
2.5.1 Level 1 Cellular Automaton - Algorithmus	25
3 Spurrekonstruktion mit zwei MVD-Stationen	27
3.1 Stoßparameterauflösung als Funktion der Trefferdichte	27
3.2 Analyse der rekonstruierten Spuren	32
3.2.1 Definition der MVD Spurklassen	35
3.3 Effizienz der Spurrekonstruktion	41
3.4 Effizienz der Untergrundunterdrückung	43

4 Spurrekonstruktion mit zusätzlichen MVD-Stationen	45
4.1 Auswirkungen auf die Stoßparameterauflösung	45
4.2 Stoßparameterauflösung verschiedener Spurklassen	48
4.3 Effizienz der Spurrekonstruktion	50
4.4 Effizienz der Untergrundunterdrückung	52
5 Zusammenfassung	55
A Anhang	59
A.1 Anforderungen an einen Mikro-Vertex-Detektor	59
A.2 Zeitbedarf in den Rekonstruktionsimulationen	62
A.3 Ortsverteilung der richtig/falsch zugefügten Treffer	63
Literaturverzeichnis	67

Abbildungsverzeichnis

1.1	Phasendiagramm der stark wechselwirkenden Materie	2
1.2	Durchschnittliche Teilchenmultiplizitäten von Mesonen, die in einer AuAu-Kernkollision erzeugt werden, als Funktion der Strahlenergie. Für diese Berechnungen wurden HSD-Simulationen erstellt. Der Energiebereich des CBM-Experimentes (SIS300) ist in der Abbildung farblich gekennzeichnet. Abbildung ist [Col05] entnommen.	3
1.3	Das CBM-Detektorsystem	4
2.1	CAD-Modell des Mikro-Vertex-Detektors	8
2.2	Visualisierung der Spurauswahlverfahren	11
2.3	Spurmultiplizitäten im MVD und STS	13
2.4	Verteilungen der Treffermultiplizitäten auf den MVD-Stationen	13
2.5	Treffermultiplizitäten auf den MVD-Stationen	14
2.6	Mittlere Trefferdichten auf den MVD-Stationen	15
2.7	Funktionsweise eines MAPS	16
2.8	Aufbau des Mimosa-26	17
2.9	Simulationskette des FairRoot-Frameworks	19
2.10	Definition eines Cluster (MVD)	21
2.11	Abhängigkeit Clusterform und -größe vom Einschlagswinkel eines Teilchen	22
2.12	Clustermerging	23
2.13	Clustermerging-Anteil auf den MVD-Station	24
2.14	Der Spurkonus in der Spurrekonstruktion	25
3.1	Verteilung der X-Komponente des Stoßparameters	29
3.2	Verteilung der Y-Komponente des Stoßparameters	30
3.3	Abhängigkeit der Rekonstruktionsgüte von der Stationsposition und Trefferdichte	32
3.4	Definition von ideal rekonstruierten und Geisterspuren	33
3.5	Schematische Darstellung des Problems beim 70%-Kriterium	34
3.6	Schematische Darstellung der vier Unterkategorien der Guten Spuren	38
3.7	Breite der X-Komponente der Stoßparameterverteilung von primären Spuren verschiedener Spurklassen.	40

3.8	Breite der Y-Komponente der Stoßparameterverteilung von primären Spuren verschiedener Spurklassen.	40
3.9	Untergrundanalyse bei einem MVD2	42
3.10	Spurrekonstruktionseffizienz für einen MVD2	42
3.11	Falsch akzeptierten Untergrundspuren	44
3.12	Unterdrückungseffizienzen für Untergrundspuren	44
4.1	Verteilung der X-Komponente des Stoßparameters	46
4.2	Verteilung der Y-Komponente des Stoßparameters	47
4.3	Breite der X-Komponente der Stoßparameterverteilung der unterschiedlichen Spurklassen bei einem Pile Up-Wert von zehn. Die benötigte Auflösung ist als graue Linie eingezeichnet.	49
4.4	Breite der Y-Komponente der Stoßparameterverteilung der unterschiedlichen Spurklassen bei einem Pile Up Wert von zehn. Die benötigte Auflösung ist als graue Linie eingezeichnet.	50
4.5	Zahl der rekonstruierten Untergrundspuren aufgeschlüsselt nach Spurklasse für verschiedenen Simulationsszenarien	51
4.6	Spurrekonstruktionseffizienz für unterschiedlichen MVD-Geometrien und Pile Up-Werte	52
4.7	Zahl der nicht verworfenen Untergrundspuren je Frame nach Spurklasse aufgeschlüsselt	53
4.8	Unterdrückungseffizienz der Untergrund-Spurklassen	54
A.1	Anforderungen an einen MVD	60
A.2	Zeitperformance in der Spurrekonstruktion	62
A.3	Verteilung der richtig/falsch zugefügten Treffer auf den MVD-Stationen bei geringen Trefferdichten	63
A.4	Verteilung der richtig/falsch zugefügten Treffer auf den MVD-Stationen bei hohen Trefferdichten	64

Tabellenverzeichnis

2.1	In den Studien verwendeten MVD-Geometrien	9
2.2	Auflistung der Einzelspur-Auswahlverfahren	10
2.3	Auflistung der Spurpaar-Auswahlverfahren	10
3.1	Auflistung der durchgeführten Simulationsszenarien	28
3.2	Breite der Stoßparameterverteilungen	31
3.3	Definition von Spurklassen	35
3.4	Definition der zwölf Spurklassen für den MVD	37
A.1	Die für die Berechnung der Auflösung des Stoßparameters verwendeten Größen mit Zahlenwerten.	61

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ziele und Aufbau des CBM-Experimentes

Die Untersuchung des Phasendiagramms der stark wechselwirkenden Materie ist einer der Forschungsschwerpunkte der Schwerionenphysik. Die starke Wechselwirkung ist die stärkste aller fundamentalen Kräfte und wirkt ausschließlich auf Quarks und Gluonen. Die Vermittler der starken Wechselwirkung (Gluonen) wechselwirken auch untereinander, sodass das Potential der starken Wechselwirkung mit zunehmendem Abstand ansteigt. Aufgrund dieser sogenannten „asymptotischen Freiheit“ sind einzelne Quarks nicht separierbar. Hierdurch können nur Verbundsysteme aus Quarks und Gluonen untersucht werden [Col01].

Für Kernmaterie unter extremen Bedingungen, wie sie in hochenergetischen Stößen schwerer Ionen erreicht werden, wird eine neue Phase (im Phasendiagramm) vorhergesagt. In dieser Phase sollen die Hadronen weitgehend ihre Struktur verlieren und sich Quarks frei durch die Phase bewegen können. Diese Phase wird als Quark-Gluonen-Plasma bezeichnet und ist für das Verständnis der starken Wechselwirkung von besonderem Interesse [Col01]. Dieser Zustand ist mit thermodynamischen Zustandsgrößen (Netto-Baryondichte, Temperatur) beschreibbar und in Abbildung 1.1 gezeigt. Es wird erwartet, dass der Phasenübergang sowohl für höhere Temperaturen wie auch für höhere Netto-Baryonen-Dichten bzw. höheres baryo-chemisches Potential eintreten wird. Im Bereich höherer Temperaturen wird ein kontinuierlicher Phasenübergang bei niedrigem chemischen Potential vorhergesagt, bei höherem chemischen Potential ein Übergang erster Ordnung mit einer Koexistenz von hadronischer und partonischer Phase. Des Weiteren wird ein kritischer Punkt erwartet, in dem eine Unterscheidung zwischen diesen verschiedenen Phasen (analog zum Phasendiagramm für Wasser) nicht mehr möglich ist. Das CBM-Experiment plant, die in Schwerionenstößen erzeugte, dichte und heiße Kernmaterie mit Open-Charms (D -Mesonen, Λ_C , ...) zu untersuchen. Durch die Lebenszeit von Open-Charms-Teilchen ($\tau \approx 10^{-13}$ s) bedingt, können lediglich deren Tochterteilchen (z.B. Pionen und Kaonen)

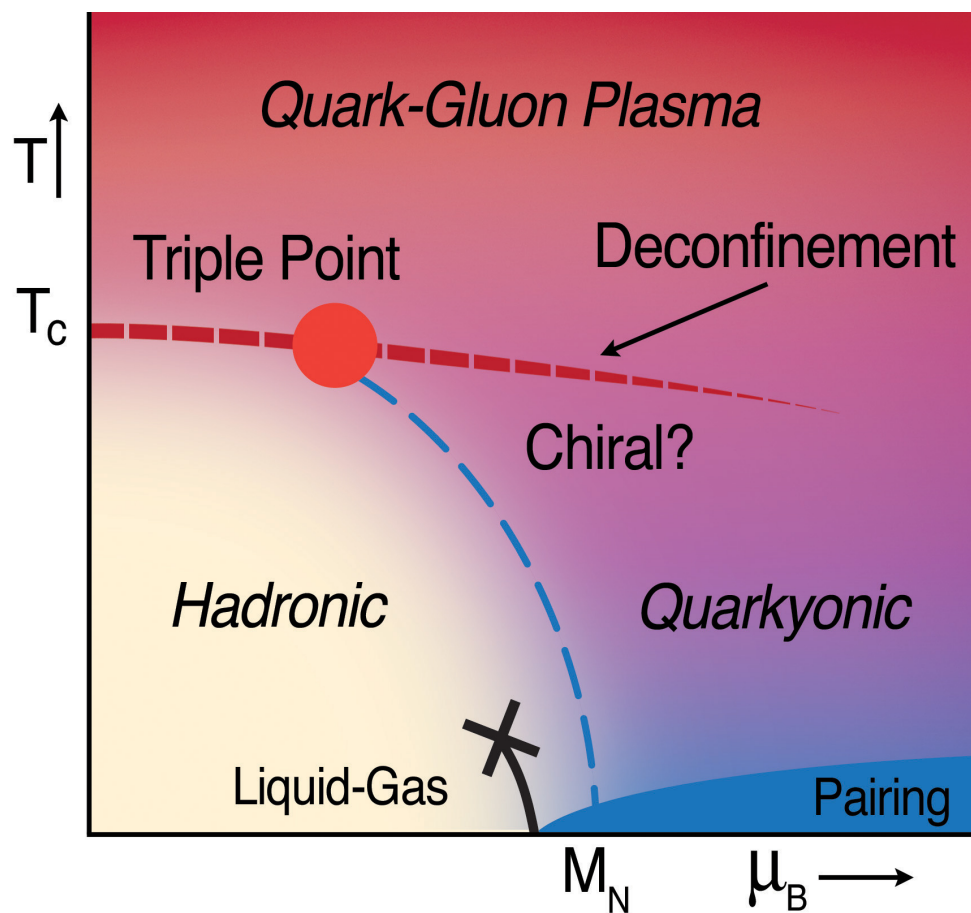


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Phasendiagramms stark wechselwirkender Materie als Funktion der Temperatur und des Baryo-chemischen Potentials. Abbildung ist [Col01] entnommen.

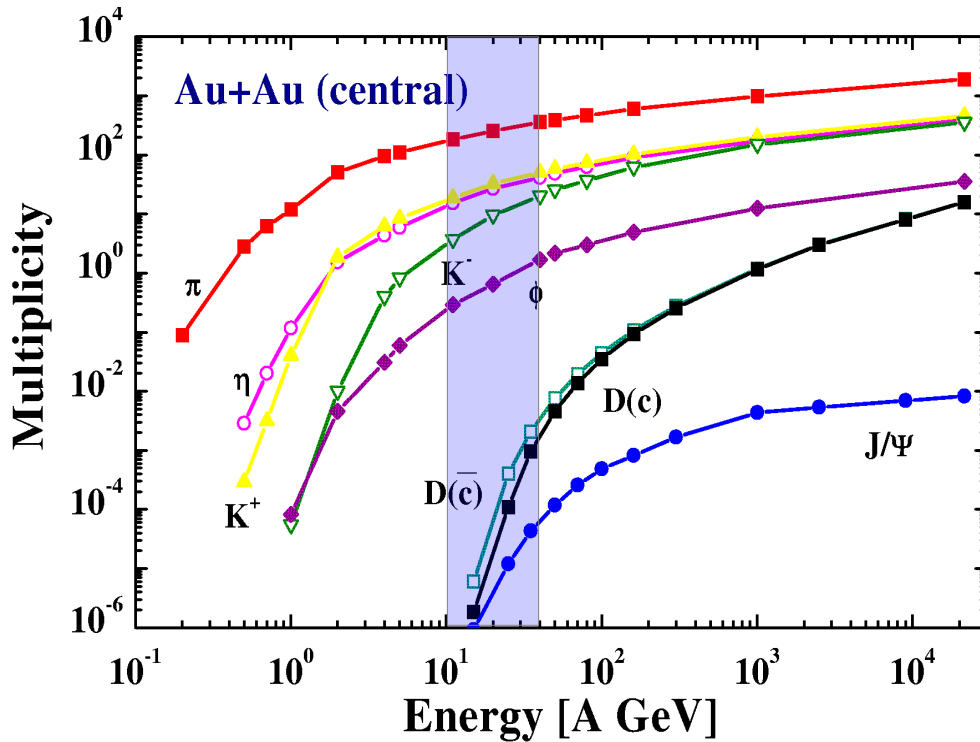


Abbildung 1.2: Durchschnittliche Teilchenmultiplizitäten von Mesonen, die in einer AuAu-Kernkollision erzeugt werden, als Funktion der Strahlenergie. Für diese Berechnungen wurden HSD-Simulationen erstellt. Der Energiebereich des CBM-Experimentes (SIS300) ist in der Abbildung farblich gekennzeichnet. Abbildung ist [Col05] entnommen.

direkt nachgewiesen werden. Da die Pionen/Kaonen ebenfalls in Kernkollisionen, dort aber mit größerer Multiplizität, erzeugt werden, stellt sich ein weiteres Problem in der Auswahl der Tochterteilchen der D^0 -Mesonen. Abbildung 1.2 vergleicht die Multiplizitäten der in der Kernkollision entstandenen Kaonen und Pionen mit der von D -Mesonen. Der Energiebereich des CBM-Experimentes ist eingezeichnet. Da die Multiplizitäten der D -Mesonen mehrere Größenordnungen geringer sind als die der Pionen und Kaonen aus Kernkollisionen, bedarf es eines hocheffizienten Detektorsystems für deren Nachweis.

Zur Untersuchung des Phasendiagramms der stark wechselwirkenden Materie wird das **C**ompressed **B**aryonic **M**atter **E**xperiment (CBM) an der zukünftigen Beschleunigeranlage FAIR entwickelt. Das Detektorsystem ist als Vorwärtsdetektorsystem konzipiert. Es wird in zwei Konfigurationen entwickelt: Die Elektronen- (Abbildung 1.3 links) und die Myonen-Konfiguration (Abbildung 1.3 rechts). Der Unterschied der Konfigurationen besteht insbesondere in dem RICH-Detektor (**R**ing-**I**maging-**C**herenkov) für die Elektronen-Konfiguration und den MUCH-Detektor (**M**uon-**C**hamber) für die Myonen-Konfiguration. Das Detektorsystem besteht aus folgenden Teildetektoren:

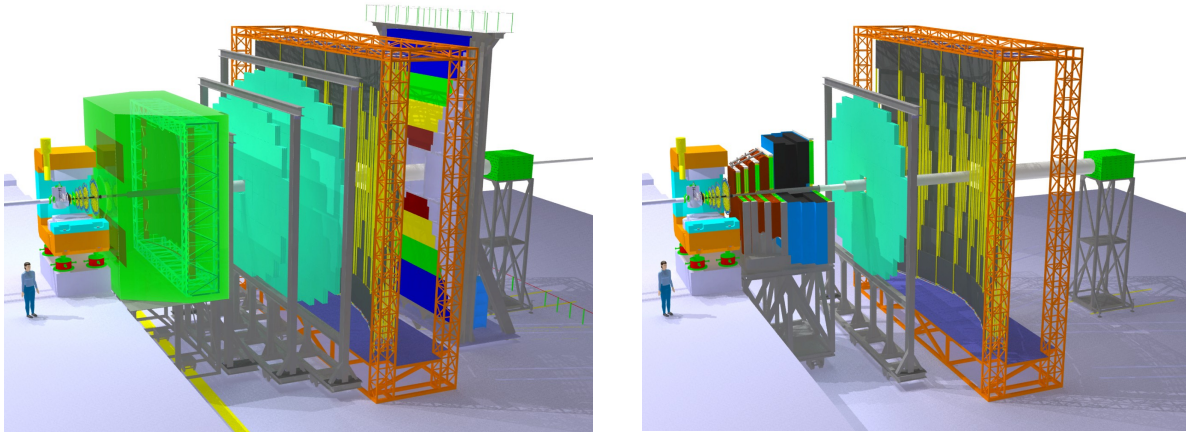


Abbildung 1.3: Das CBM-Detektorsystem in der Elektronenkonfiguration (links) und in der Myonenkonfiguration (rechts). Die Abbildungen wurden [Par] entnommen.

- Mikro-Vertex-Detektor (MVD): Dieser Teildetektor ist für die Vermessung der Zerfallvertices von Teilchen mit kurzer Lebenszeit nötig. Um die angestrebte Vertexpauflösung von $50\ \mu\text{m}$ entlang der Strahlrichtung zu garantieren, sind die Detektorebenen des MVD im Vakuum und nahe des Targets angeordnet.
- Silicon-Tracking-System (STS): Dieser Teildetektor ist für die Spurrekonstruktion zuständig und besitzt dafür eine hohe Orts- und Zeitauflösung. Er besteht aus acht Detektorebenen, die sich innerhalb des magnetischen Feldes des 1 Tm Magneten von CBM befinden. Die einzelnen Detektorebenen sind mit doppelseitigen Silizium-Streifen-Sensoren bestückt. Dabei sind die Silizium-Streifen auf der Rückseite um einen Winkel von 15° zu den Streifen auf der Vorderseite verdreht.
- Ring-Imaging-Cherenkov (RICH), Transition-Radiation-Detektor (TRD): Diese beiden Teildetektoren ermöglichen eine sehr gute Elektronen-Identifikation, die für die Rekonstruktion von in Elektron/Positron-Paare zerfallenen Hadronen benötigt wird. Während der RICH Elektronen aus dem niedrigen und mittleren Energiebereich gut identifizieren kann, besitzt der TRD eine hohe Effizienz für den Nachweis von hochenergetischen Elektronen. Dies dient zur Separation der Pionen von Elektronen.
- Time-Of-Flight-Detektor (TOF): Der TOF misst die Flugzeit der Teilchen und ermöglicht gemeinsam mit der Impulsmessungen mittels des STS die Teilchenidentifikation für langsame und mittelschnelle Hadronen.

1.2 Zielsetzung dieser Arbeit

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Ermittlung der Effizienz der Spurrekonstruktion von der MVD-Geometrie des CBM-Experimentes unter Benutzung von Simulationsstudien. Dabei baut diese Arbeit auf [CAD11] auf. In dieser wurden ebenfalls Simulationsstudien durchgeführt, die zeigen, dass die Rekonstruktion beim Auftreten von Pile Up problematisch ist. Das Auftreten von Pile Up ist im MVD nicht vermeidbar, da die Zeitauflösung der Sensoren bei geforderter Ortsauflösung eine technisch nicht beliebig weit optimierbare Größe ist. Da zudem der Wirkungsquerschnitt für die Erzeugung von D^0 -Mesonen bei den CBM-Energien klein ist, lässt sich die Kollisionsrate ebenfalls nicht beliebig verringern. Daher kommt es im MVD zum Auftreten von Pile Up. Für diese Arbeit wurden die folgenden zwei Fragestellungen formuliert:

1. Liegen die Ursachen für die in [CAD11] beobachteten Probleme in einer Überlastung der Spurrekonstruktionssoftware?
2. Können diese beobachteten Probleme durch zusätzliche MVD-Stationen behoben werden?

Im Kapitel 3 wird die Performance eines Mikro-Vertex-Detektors mit zwei Stationen untersucht. Im erste Schritt werden Kriterien definiert, an Hand derer die Leistungsfähigkeit des MVD beurteilt werden konnte. Es zeigt sich, dass die Stoßparameterauflösung des MVD für diesen Zweck grundsätzlich geeignet ist. Um eine quantitative Aussage zu ermöglichen, werden aus den Eigenschaften des Open-Charm-Zerfalls Anforderungen an diese Auflösung hergeleitet. Durch Analyse der Auswirkungen von verschiedenen Fehlern in der Spurrekonstruktion auf die Stoßparameterauflösung des MVD können akzeptable und nicht-tolerierbare Rekonstruktionsfehler gegeneinander abgegrenzt werden. Die Zahl der nicht-tolerierbaren Rekonstruktionsfehler wird nachfolgend genutzt, um die Leistungsfähigkeit des MVD für verschiedene Kollisionsraten zu beurteilen.

Im Kapitel 4 wird geprüft, ob Verbesserungen der MVD-Geometrie (durch das Ergänzen von MVD-Stationen) die Zahl der auftretenden Rekonstruktionsfehler entscheidend absenken kann. Dabei wird festgestellt, dass sich die Zahl der vollständig falsch rekonstruierten Spuren (Geisterspuren) durch zusätzliche MVD-Stationen reduzieren.

Kapitel 2

Der CBM-MVD, Technik und Simulationsmodell

2.1 Der Mikro-Vertex-Detektor

Ein Mikro-Vertex-Detektor (MVD) dient zur Bestimmung des Ortes von Teilchenstößen und -zerfällen mit hoher Auflösung. Diese Information wird in CBM insbesondere zur Rekonstruktion von Open-Charm-Teilchen benötigt. Um die notwendige Auflösung zu erreichen, müssen die Sensoren auf den Detektorebenen des MVD über eine gute Ortsauflösung verfügen. Außerdem müssen sich die Detektorebenen nahe am Target befinden und ein geringes Materialbudget besitzen, um den Effekt von Vielfachstreuung zu minimieren. In Abschnitt A.1 ist der Zusammenhang zwischen diesen Größen und dem Auflösungsvermögen des MVD an einem Beispiel durchgerechnet. Um seltene Observablen in einem handhabbaren Zeitraum beobachten zu können, muss ein MVD darüber hinaus über eine gute Strahlenhärte und eine hohen Ratenfestigkeit sowie eine gute Vertexauflösung verfügen. Diese Anforderungen sind im Hinblick auf die technische Umsetzung widersprüchlich und erfordern im Allgemeinen das Eingehen von Kompromissen. So wird beispielsweise die Luminosität des Ionenstrahls so eingestellt, dass es zu mehreren Kernkollisionen pro Auslesezyklus der MVD-Sensoren kommt um genug Open-Charm Teilchen in einem handhabbaren Zeitraum zu erzeugen. Die Zahl der Kernkollisionen je Auslesezyklus wird im Folgenden als Pile Up bezeichnet.

Zu Beginn dieser Arbeit wurde von der CBM-Kollaboration ein MVD mit zwei Detektorebenen geplant, die im Vakuum betrieben werden sollten. In Abbildungen 2.1 ist ein CAD-Modell dieses Detektorentwurfs gezeigt. Genauere Informationen über den technischen Ansatz des Detektors können in [DAD⁺09] gefunden werden.

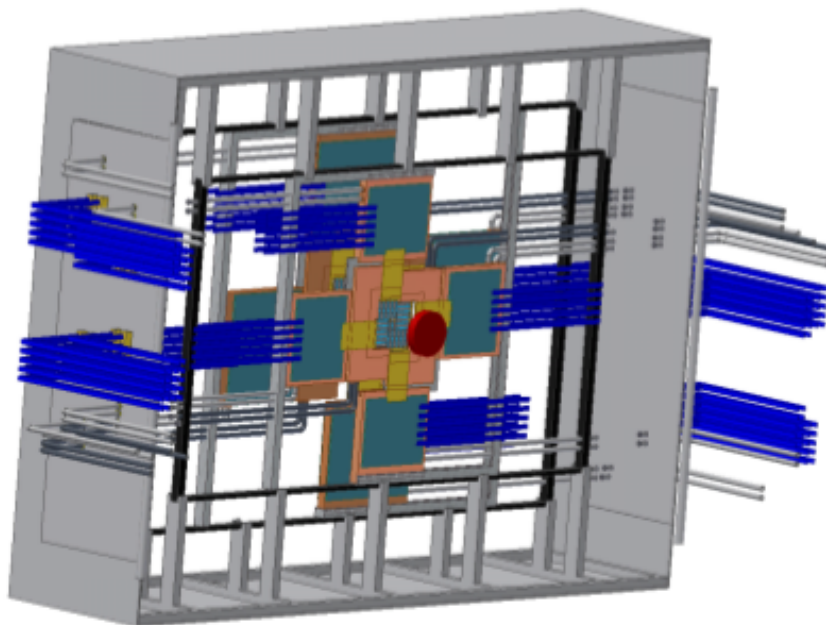


Abbildung 2.1: CAD-Modell des für das CBM-Experiment geplanten MVD. Neben den aktiven Sensorflächen des Detektors sind unter anderem auch die Haltestrukturen zu sehen. Dieses Bild ist [eFS11] entnommen.

In den Simulationsstudien wurde die in Tabelle 2.1 definierte, vereinfachte Geometrie des MVD verwendet. In dieser Geometrie werden die Detektorebenen in einer idealisierten Form durch Kreisscheiben dargestellt. Damit sind die relevanten Parameter der so beschriebenen Detektorebenen ihr äußerer Radius, der (sogenannte) innere Radius, der für den Strahldurchtritt vorgesehenen Öffnung in der Ebene, ihre Z-Position sowie das Materialbudget. Neben der bisherigen Geometrie des Mikro-Vertex-Detektors mit zwei Detektorebenen, wurden in dieser Arbeit zwei alternative Geometrien auf ihre Eignung geprüft. Alle drei Geometrien sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. Man erkennt, dass die Geometrien mit zusätzlichen Detektorebenen durch Ergänzung von Ebenen erzeugt wurden. Die bereits vorhandenen Ebenen wurden dabei unverändert beibehalten. Damit unterscheiden sich die einzelnen MVD-Geometrien ausschließlich in der Anzahl an Detektorebenen. Diese Wahl wurde getroffen um mögliche Effekte unmittelbar auf die unterschiedliche Anzahl an Detektorebene zurückführen zu können.

MVD Geometrie	MVD2		MVD3			MVD4			
Station in Geometrie	1	2	1	2	3	1	2	3	4
Abstand zum Target [cm]	5	10	5	10	15	5	10	15	20
Innerer Radius [mm]	5,5	5,5	5,5	5,5	8,3	5,5	5,5	8,3	11
Äußerer Radius [mm]	25	50	25	50	75	25	50	75	100
Dicke [μm]	300	300	300	300	500	300	300	500	600

Tabelle 2.1: Die in den Simulationsstudien verwendeten MVD-Geometrien mit ihren Parametern. Die Nummer am Ende der Bezeichnung der MVD-Geometrie indiziert die Zahl der Detektorstationen in der Geometrie.

2.1.1 Rekonstruktion von D -Mesonen

D -Mesonen und ihre Eigenschaften müssen, durch die kurze Lebenszeit der Mesonen ($\tau \approx 10^{-13}$ s) bedingt, aus den Eigenschaften ihrer Zerfallsprodukte rekonstruiert werden. Technisch wird diese Rekonstruktion dadurch umgesetzt, dass zuerst alle Einzelspuren rekonstruiert werden. In einem zweiten Schritt werden dann von diesen Einzelspuren diejenigen verworfen, die wahrscheinlich aus einem anderen Zerfallskanal kommen. Dies geschieht durch Auswahlverfahren (Einzelspur-Auswahlverfahren), deren Kriterien in Abbildung 2.2 auf der linken Seite abgebildet sind. Diese setzen sich aus einem Kriterium für den longitudinalen und den transversalen Impuls sowie zwei weiteren Bedingungen für die Größe des Stoßparameters der rekonstruierten Teilchenspur zusammen. Der Stoßparameter ist dabei als der Abstand zwischen dem primären Vertex und dem Durchstoßpunkt, der auf die Targetebene extrapolierten ($z = 0$ cm) Teilchenspur, definiert. Dieses Kriterium ist durch die Tatsache motiviert, dass D -Mesonen angesichts ihrer Lebensdauer nur in einem recht eng begrenzten Bereich von der Targetebene zerfallen können. Tabelle 2.2 fasst diese vier Auswahlverfahren zusammen.

Nach der Anwendung dieser vier Auswahlverfahren werden aus den verbleibenden Spurkandidaten Spurpaare gebildet. Auf diese Spurpaare wird dann eine zweite Reihe von Auswahlverfahren (Spurpaar-Auswahlverfahren) angewendet, die auf der rechten Seite der Abbildung 2.2 aufgelistet sind. Diese bestehen aus einem Kriterium, das ein Spurpaar auf einen Schnittpunkt hin überprüft. Dabei wird der Punkt der nächsten Annäherung zweier Spuren bestimmt. Diese Entfernung wird dann in Vielfachen des Fitfehlers σ_{Fit} ausgedrückt und darf einen maximalen Wert von 1.194σ [MD08] nicht überschreiten, damit zwei Spuren als ein Spurpaar akzeptiert werden. Dieses Kriterium wird im Folgenden als Sv. Chi (Secondary Vertex **Chi**) Kriterium bezeichnet. Das sogenannte IPD0 (Impact Parameter D^0) Kriterium überprüft, ob der rekonstruierte Impulsvektor des hypothetischen Mutterteilchens auf den Kollisionspunkt des Strahlions mit dem Target (primären Vertex) zeigt. Das letzte Kriterium überprüft die Zerfallsposition des hypothetischen D -Mesons, das durch die endliche Lebenszeit eines D -Mesons eine untere und eine obere Grenze aufweist. Dies wird im Text als Svz-Z (Secondary Vertex **Z**-Position)

Kriterium bezeichnet. Tabelle 2.3 fasst diese Kriterien zusammen.

Auswahlverfahren	Bedingung	Motivation
(longitudinaler) Impuls	$> 1 \text{ GeV}/c$	hoher Impuls der D -Mesonen
(transversaler) Impuls	$> 0,3 \text{ GeV}/c$	hohe Zerfallsenergie $D \rightarrow \pi^+ K^-$ (Massendifferenz)
maximaler Stoßparameter	$< 600 \mu\text{m}$	Mesonen zerfallen wegen ihrer endlichen Lebenszeit nicht beliebig fern vom primären Vertex.
minimaler Stoßparameter	$> 6\sigma_{Fit}$	Dieses Kriterium dient zum Ausschluss von Teilchen, die im Primären Vertex entstanden sind.

Tabelle 2.2: Die auf die Einzelspuren angewandten Spurauswahlverfahren, um Tochterspuren von D -Mesonen zu selektieren. Der Stoßparameter ist hierbei als Abstand zwischen dem Durchstoßpunkt der Teilchentrajektorie durch die Targetebene und dem primären Vertex auf der Targetebene $z = 0 \text{ cm}$ definiert. Die Werte für die Auswahlverfahren sind durch [MD08] und durch [CAD11] motiviert.

Auswahlverfahren	Bedingung	Motivation
Svz Chi	$< 1,194 \sigma$	Tochterspuren aus einem Zerfall, besitzen einen Punkt beliebig kleinster Annäherung.
Svz Z	$774 \mu\text{m} < \text{Svz-Z} < 1 \text{ cm}$	Dieses Kriterium dient zum Ausschluss von im primären Vertex zerfallenen Teilchen.
IPD0	$< 22,3 \mu\text{m}$	Rekonstruierte Spuren von D -Mesonen stammen aus dem primären Vertex.

Tabelle 2.3: Auflistung der Spurpaar-Auswahlverfahren. Diese werden auf Spuren angewandt, die durch Einzelspur-Auswahlverfahren nicht verworfen wurden. Die Werte für die Auswahlverfahren sind durch [MD08] und durch [CAD11] motiviert.

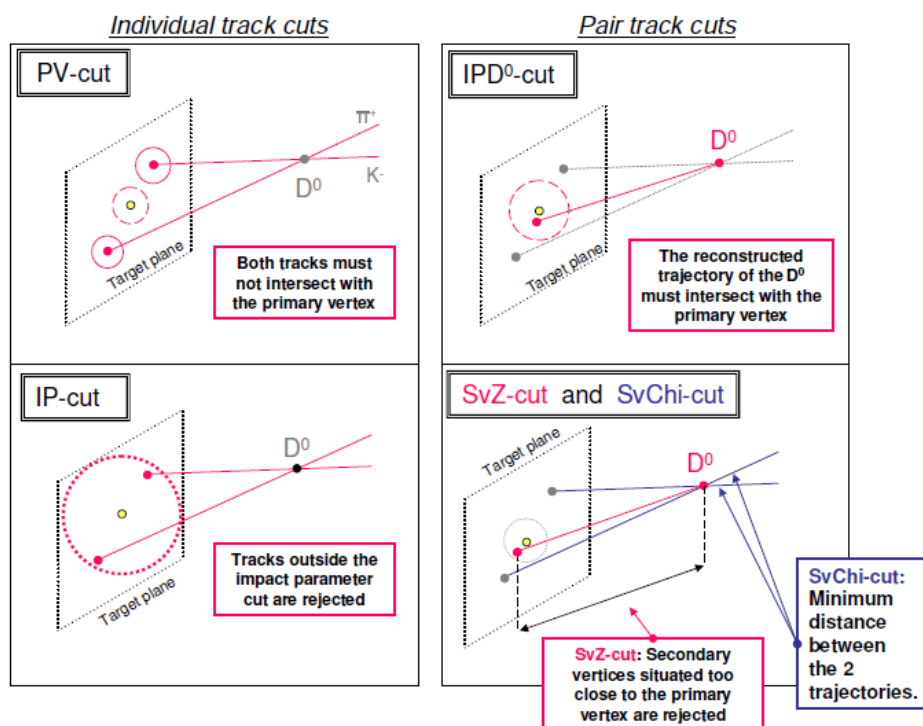


Abbildung 2.2: Es werden die verschiedene Spurauswahlverfahren dargestellt. Auf der linken Seite findet sich die Selektion auf den minimalen Stoßparameter (oben) und auf den maximalen Stoßparameter (unten). Auf der rechten Seite werden die Spurauswahlverfahren für die Spurpaare veranschaulicht. [MD08]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die Rekonstruktion zwei Gruppen von Auswahlverfahren verwendet werden:

1. Einzelspur-Auswahlverfahren
2. Spurpaar-Auswahlverfahren

Die erste Gruppe von Spurauswahlverfahren kommt im CBM-Experiment eine besondere Bedeutung zu, da die Analyse in Echtzeit ablaufen soll. Um dies zu ermöglichen, muss die Rechenzeit daher möglichst gering gehalten werden. Gerade aber Auswahlverfahren der zweiten Gruppe, die Kriterien von kombinierten Spuren verwenden, benötigen viel Rechenzeit. Daher ist es hier wichtig, dass diese Auswahlverfahren nur eine begrenzte Zahl von Spuren überprüfen. Dies gelingt im CBM-Experiment dadurch, dass die Einzelspur-Auswahlverfahren zeitlich vor den Spurpaar-Auswahlverfahren ablaufen und so die Anzahl der Spuren und die Menge an Rechenzeit minimiert werden. Diese Methodik wird umso wichtiger, da im CBM-Experiment der Prozentsatz der zu entfernenden Spuren enorm ist. Wie im Abschnitt 1.1 bereits gezeigt wurde. Dies, zusammen mit der geplanten Echtzeit-Analyse der Daten, macht eine hohe Effizienz der Auswahlverfahren der ersten Gruppe unabdingbar.

2.1.2 Arbeitsbedingungen des MVD in den Simulationen

In diesem Abschnitt werden die Arbeitsbedingungen eines Mikro-Vertex-Detektors mit zwei Stationen dargestellt (siehe Tabelle 2.1). Dies beinhaltet die Spur- und Treffermultiplizitäten im MVD und auf dessen Detektorebenen, sowie die auf den letzteren auftretenden Trefferdichten.

In Abbildungen 2.3 ist die Zahl an Teilchenspuren im Mikro-Vertex-Detektor und dem Silicon-Tracking-System veranschaulicht. Dabei sind auf der linken Seite ausschließlich die Teilchenspuren der Pionen und Kaonen gezeigt, die in einer zentralen Kernkollision entstanden sind. Bei Betrachtung der beiden Abbildung ist zu erkennen, dass die δ -Elektronen auf einen sehr einseitigen Bereich der MVD-Stationen treffen und einige von ihnen auch im Magnetfeld spiralisieren. Beides lässt sich durch die Ladung und den geringen Impuls dieser Teilchen erklären und wird im Folgenden zu sehr einseitig erhöhten Trefferdichten führen. Dies wird in Abbildung 2.4 ersichtlich. Dort ist die Zahl der Treffer auf der ersten MVD-Station ohne δ -Elektronen (links) und mit δ -Elektronen (rechts) gezeigt.

Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Treffer von δ -Elektronen (rechte Abbildung) asymmetrisch auf der Station vorhanden sind. Es sind rechts neben der inneren Öffnung zwei Bereiche zu erkennen, an denen ein maximaler Wert von 3,5 δ -Elektronen je mm^2 erreicht wird. Diese Bereiche werden daher auch als „Hotspots“ bezeichnet.

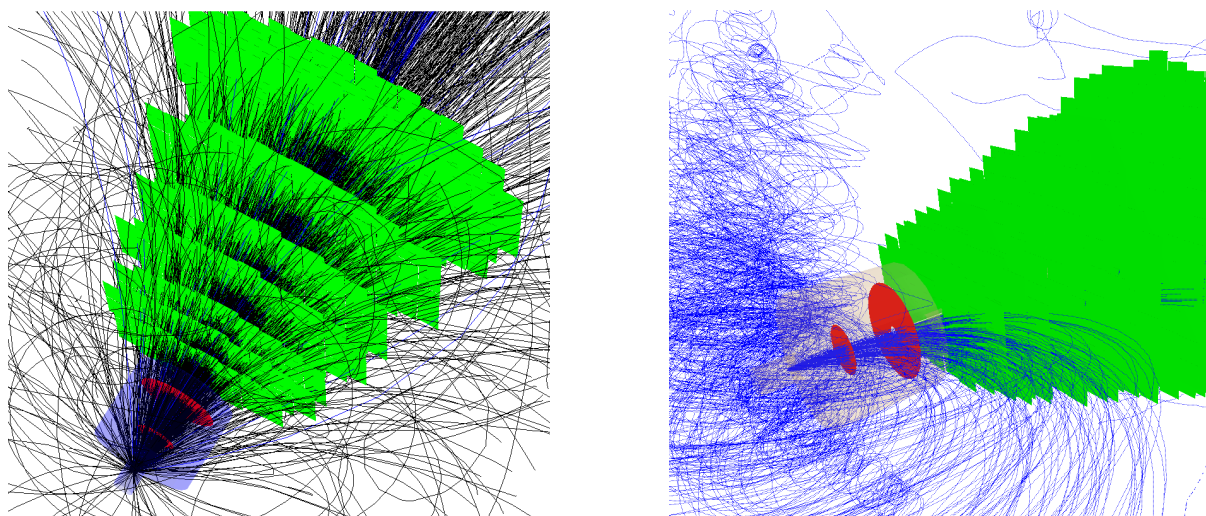


Abbildung 2.3: Spuren der Teilchen aus einer Kernkollision (links) und die der δ -Elektronen (rechts). In der linken Abbildungen sind nur Pionen (π^0, π^\pm in schwarz und K^+, K^- in blau dargestellt). In der rechten Abbildungen sind ausschließlich δ -Elektronen in blau zu sehen. Diese Darstellungen wurden mit FairRoot-Frameworkt erstellt.

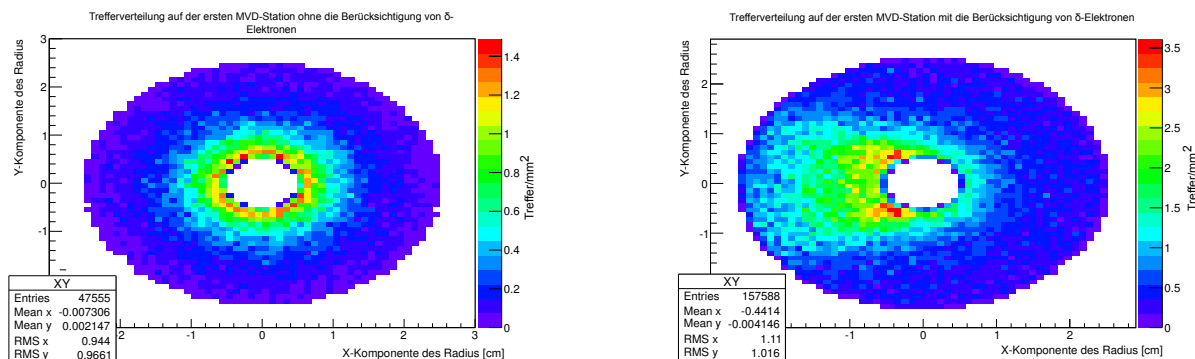


Abbildung 2.4: Trefferbelegung auf der ersten Station des Mikro-Vertex-Detektor ohne δ -Elektronen (links) und mit δ -Elektronen (rechts). Die durch die δ -Elektronen verursachte asymmetrische Verteilung der Treffer über der Station ist mit den sogenannten „Hotspots“ zu erkennen.

Neben der Verteilung der Treffer auf den Detektorstationen ist auch die Anzahl an Treffern interessant. Diese ist in Abbildung 2.5 für verschiedene Pile Up-Werte gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Zahl an Treffern je Ausleseframe linear mit dem Pile Up skaliert. Zusätzlich ist zu erkennen, dass auf der zweiten Station immer weniger Treffer je Frame vorkommen. Dies liegt an dem größeren Abstand zum Target und an der Tatsache, dass einige der δ -Elektronen wie

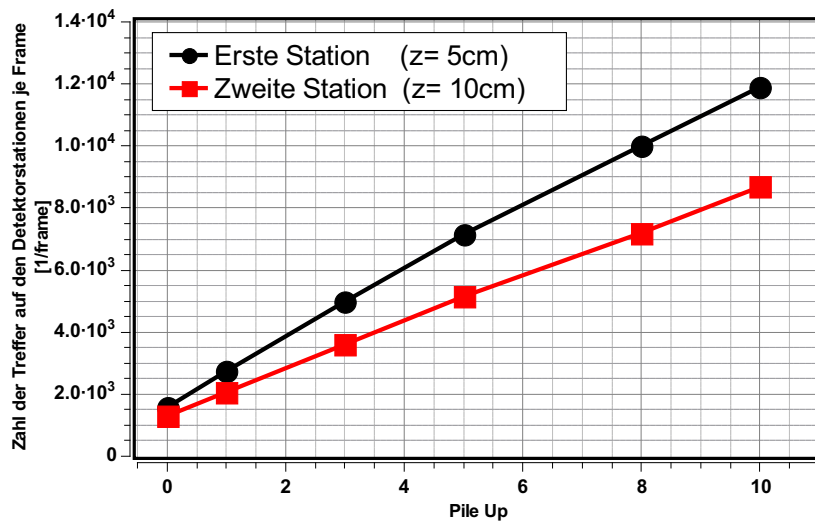


Abbildung 2.5: Zahl der Treffer je Frame auf den beiden MVD-Stationen der MVD-Geometrie MVD2 für verschiedene Pile Up-Szenarien.

in Abbildung 2.3 (rechts) zu erkennen sind aus dem Akzeptanzbereich des MVD ausgelenkt werden.

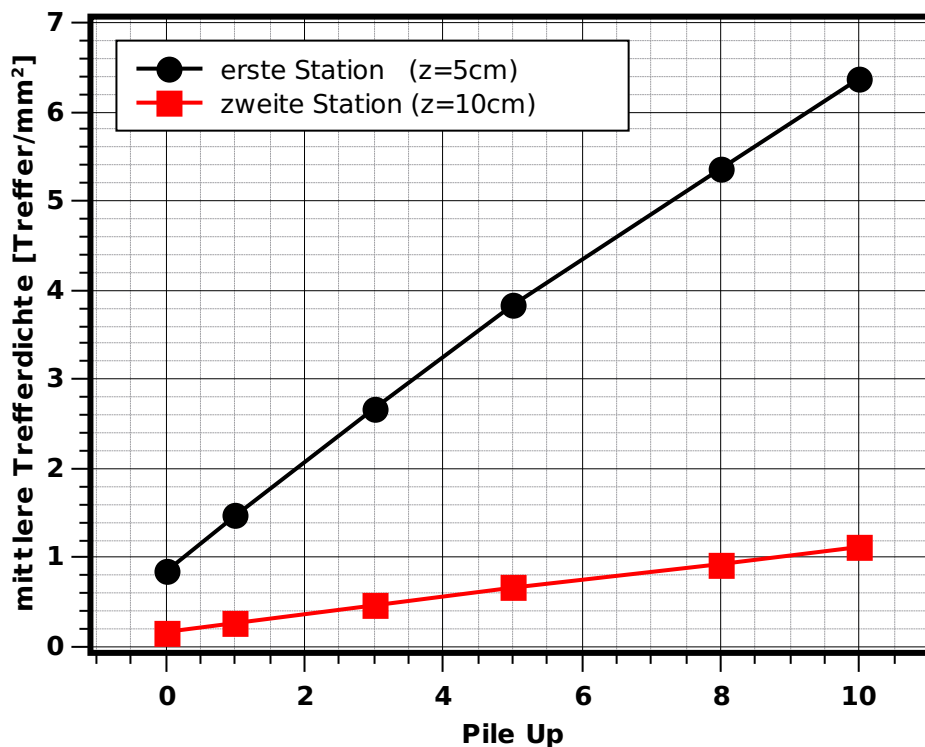


Abbildung 2.6: Mittlere Trefferdichte auf den ersten beiden MVD-Stationen, für verschiedene Pile Up-Szenarien. Diese Daten wurden mit dem FairRoot-Framework (Version Trunk April 2011) für die MVD-Geometrie MVD2 erstellt.

2.2 Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS)

Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS) sind die für den Mikro-Vertex-Detektor vorgesehenen Sensoren. Dabei handelt es sich um neuartige Silizium-Pixel-Sensoren. Diese wurden ursprünglich für den Einsatz in Digitalkameras entwickelt und seit 1999 am IPHC für den Einsatz in der Detektorphysik optimiert. Zu ihren Eigenschaften zählen eine geringe Dicke von ca. 50 μm und eine hohe Granularität. Letztere wird durch die Größe der Pixel bestimmt, welche je nach Sensortyp von 10 bis 30 μm reicht und eine Ortsauflösung von 1 bis 5 μm ermöglicht. Gerade diese beiden Eigenschaften machen MAPS attraktiv für den Einsatz in Vertexdetektoren in Schwerionen- und Hochenergieexperimenten.

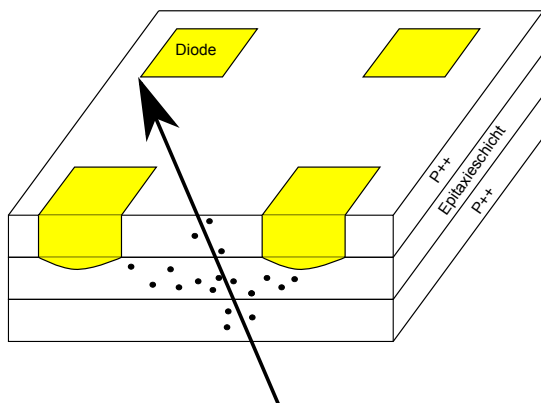


Abbildung 2.7: Abbildung zeigt Aufbau und Funktionsweise eines MAPS. Das, den Sensor durchfliegende, Teilchen (Pfeil) setzt auf seinem Weg Elektronen/Loch-Paare (schwarze Punkte) frei. Diese diffundieren solange durch den Sensor, bis sie rekombinieren. Die Elektronen/Loch-Paare in der Epitaxieschicht können zusätzlich an den Dioden (gelbe Fläche) eintreten und so detektiert werden.

2.2.1 Funktionsweise

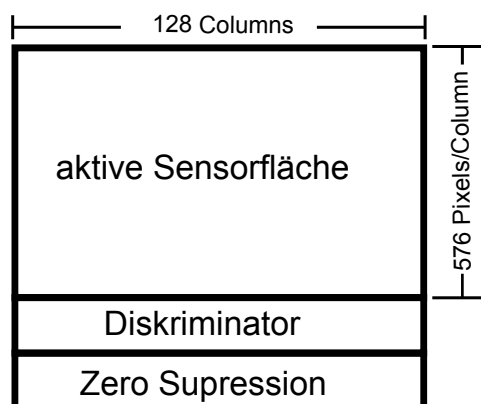
Der eigentliche Sensor eines MAPS besteht aus drei Schichten mit verschiedenen Dotierungen (siehe Abbildung 2.7). Bei diesen Schichten handelt es sich um zwei hoch P-dotierte Schichten und einer moderat P-dotierten Schicht. Letztere wird als Epitaxieschicht bezeichnet. Die obere, hoch P-dotierte Schicht wird dabei durch N-dotierte Implantationen unterbrochen. Diese Implantationen ergeben zusammen mit der Epitaxieschicht die Sammeldiode des Sensors.

Geladene Teilchen oder Photonen regen im Silizium Elektronen/Loch-Paare an. Die im aktiven Volumen des Sensors, der Epitaxieschicht, angeregten freien Elektronen diffundieren durch diese Schicht und werden an einer oder mehreren Dioden gesammelt, sofern sie die Verarmungszone dieser erreichen, bevor sie mit Löchern rekombinieren. Auf wie viele Dioden sich die von einem Teilchen freigesetzten Ladungen verteilt, hängt neben der genauen Sensorgeometrie und der genauen Dotierung der verschiedenen Schichten stark vom Einschlagswinkel der Teilchen ab. Besonders bei flachen Einschlagswinkel wird sich die Ladung auf eine größere Zahl an Dioden verteilen. Dies kann die Rekonstruktion des Einschlagsort des Teilchens erschweren (siehe Abschnitt 2.4.1).

2.2.2 Mimosa-26

Es wurden verschiedene Versionen der MAPS entwickelt. Die aktuellste MAPS-Version ist Mimosa-26, welche hier vorgestellt wird. Für das spätere CBM-Experiment ist geplant den sogenannten MISTRAL-Sensor für den MVD zu verwenden.

Abbildung 2.8: Aufbau eines Mimosa-26 Sensors. Er besteht aus einer aktiven Sensorfläche, einem Diskriminator und einer Zero Supression, die die Daten komprimiert. Für die aktive Sensorfläche ist die Zahl der Reihen und die Zahl der Pixel je Rehe angegeben.



Der gesamte Mimosa-26 Sensor besteht aus der im vorherigen Abschnitt beschriebene aktiven Sensorfläche, einem Diskriminator und einer sogenannten „Zero Supression“, die die Daten komprimiert (Abbildung 2.8). Die aktive Sensorfläche enthält eine Pixelmatrix, mit $N_{Reihen} = 1152$ Reihen und $N_{Pixel} = 576$ Pixel je Reihe. Die Auslese einer Pixelmatrix eines Mimosa-26 Sensors geschieht reihenparallel (columns parallel), das heißt alle Reihen werden zeitgleich ausgelesen. Dadurch ergibt sich die Auslesezeit eines Sensors als Funktion der Zahl der Pixel je Reihe und der Auslesefrequenz. Für letztere wird ein Wert von $v_{Auslese} = 5$ MHz angenommen, damit ergibt sich eine Auslesegeschwindigkeit von

$$t = \frac{N_{pixel}}{v_{Auslese}} = 115,2 \mu\text{s} \quad (2.1)$$

Diese Auslesezeit von $115,2 \mu\text{s}$ ist viel größer als die vorhergesehen $30 \mu\text{s}$. Für die Zukunft ist geplant, die Pixelmatrix mit 576 Pixeln je Reihe in mehrere Pixelmatrizen aufzuteilen. Dadurch würde die Zahl an Pixeln je Reihe verringert, was ebenso die Auslesezeit verringert. Weitere Informationen sind in [R. 10] [IPH11] zu finden.

2.3 Das CBM-Simulationsframework

Die Durchführung der Simulationsstudien, die dieser Arbeit zugrunde liegen, ist in mehrere Schritte aufgeteilt. Die Prozesse, die in den einzelnen Simulationsschritten durchgeführt werden, bauen dabei auf den Daten vorhergegangener Schritte auf. Diese Schritte sind im Einzelnen:

- Bestimmung der Produkte (Teilchenmultiplizitäten, Kinematik) einer Kernkollision
- Bestimmung der Ein- und Austrittspunkte sowie die Energieverluste der Teilchen beim Durchqueren von sensitivem Detektormaterial
- Berücksichtigung der Detektoreigenschaften für eine möglichst „realistische“ Simulation der Detektorausgabe

Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics (UrQMD) wurde zur Durchführung des ersten Schritts verwendet. Der zweite Schritt wurde durch **Geometry and Tracking** (GEANT3) in der Version 3 durchgeführt. Für den dritten und letzten Schritt wurde speziell für die CBM-Detektoren entwickelte Software verwendet. Diese wurden in Root von der CBM-Collaboration entwickelt, während UrQMD und GEANT von externen Entwicklern stammen. Diese drei verschiedenen Softwaremodule werden durch das FairRoot-Framework miteinander verbunden. Dabei handelt es sich um ein Simulations- und Analyseframework, das auf Root und Virtual Monte Carlo Interface (VMC) basiert.

Abbildung 2.9 zeigt eine schematische Darstellung der ablaufenden Simulationsschritte. In dieser Abbildung sind die bisher beschriebenen Module zu erkennen. Daneben finden sich auch noch bisher nicht erwähnte Module. Das erste dieser Module ist der D^0 -Generator. Dieser ist notwendig, da UrQMD keine Zerfälle von D-Mesonen simulieren kann [Fri02]. Des Weiteren ist ein Hit- und Clusterfinder ebenfalls Teil der Simulationskette. Dies ist speziell für den Mikro-Vertex-Detektor notwendig und stellt aus den vom Detektormodell zur Verfügung gestellten Daten die letztendlichen Trefferinformationen. Diese werden dann in der Spurrekonstruktion weiter verarbeitet. Letztere ist in zwei Einzelmodulen aufgeteilt: Spurfindung und Spuranpassung. Diese werden im Abschnitt 2.5 genauer dargestellt. Zwei Module, zur Bestimmung des primären und des sekundären Vertex werden im Rahmen des Analysecodes zur Teilchenrekonstruktion eingesetzt.

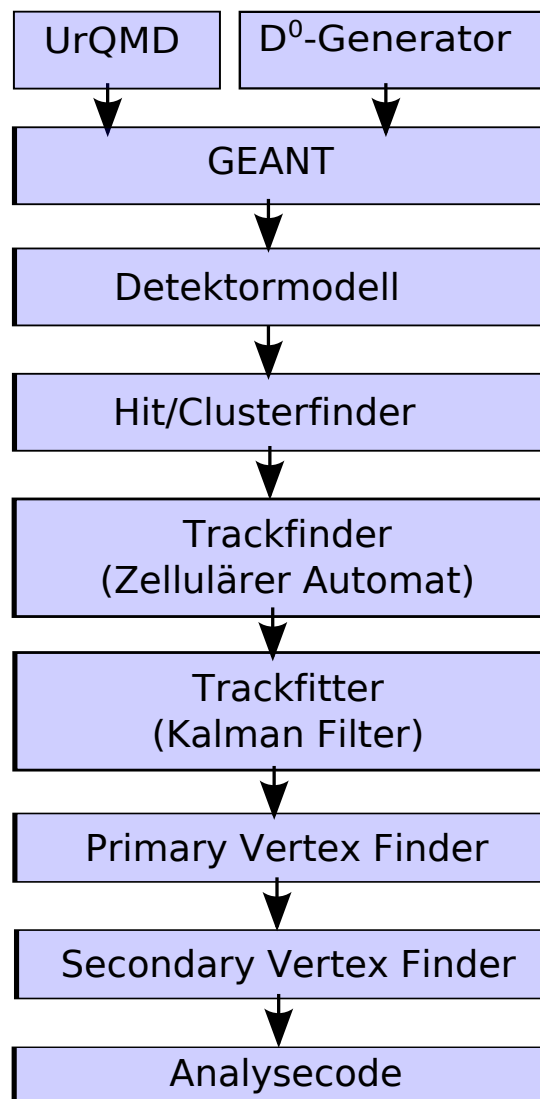


Abbildung 2.9: Es sind die verschiedenen Schritte und der Ablauf einer Simulation mit dem FairRoot-Framework gezeigt („Simulationskette“).

2.4 Detektorresponsemodell für den Mikro-Vertex-Detektor

Wie bereits beschrieben wurde, hat das Detektorresponsemodell oder kurz Detektormodell die Aufgabe, aus den von GEANT bereitgestellten Daten eine realistische Detektorausgabe, d.h. unter Berücksichtigung der Detektoreigenschaften, für den den MVD zu generieren. Hierfür müssen verschiedene Schritte durchgeführt werden:

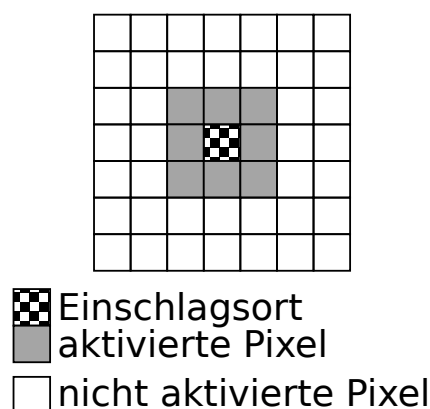
1. Berechnung, welche Spuren innerhalb eines Auslesezyklus (Ausleseframe) aufgenommen werden
2. Berücksichtigung der Detektionscharakteristik der MAPS
3. Rekonstruktion des Einschlagortes

Da GEANT den Effekt des Pile Ups nicht berücksichtigt, dieser aber Einfluss auf die Trefferdichte hat (siehe Abschnitt 2.1.2), wird dies durch das Detektorresponsemodell nachträglich einbezogen. Dabei werden die von GEANT stammenden Daten umstrukturiert, sodass die Treffer als Funktion der Zahl des Ausleseframes und nicht mehr der Kernkollision vorliegen.

Eine der Aufgaben des Detektormodell des Mikro-Vertex-Detektor besteht darin, Simulationen mit mehreren Kernkollisionen pro Frame zu ermöglichen. Dafür benötigt das Detektormodell noch eine zusätzliche GEANT-Simulation. Aus dieser generiert es dann wieder ein Ausleseframe, das dann weiter verarbeitet wird. Die zusätzliche Simulation besitzt, bis auf eine Ausnahme, identische Parameter wie die erste. Dieser Unterschied liegt in den von GEANT benötigten UrQMD-Daten. Während für die erste GEANT-Simulation nur Kernkollision mit einem Stoßparameter $b = 0$ fm (zentrale Kernkollision) berücksichtigt werden, wird für die zweite Simulation $b \geq 0$ fm („minimum bias“-Kollision) verwendet. Da die Treffer aus der zweiten Simulation nur für die Simulation des Pile Ups im MVD nötig sind, werden aus dieser auch nur die Treffer auf den MVD-Stationen benutzt. Diese werden dann zu den Information der ersten GEANT-Simulation gespeichert.

Auf die gleiche Weise werden auch die sogenannten δ -Elektronen in die Simulationen integriert. Dabei handelt es sich um Elektronen, die von den Strahlionen aus den Atomhüllen des Targets freigesetzt wurden. Für diese wird eine dritte Simulation durchgeführt, in der nur diese simuliert werden. Hierfür wird keine UrQMD Simulation benötigt, da GEANT die δ -Elektronen selbständig durch die Simulation von elektromagnetischen Wechselwirkungsprozessen eines Ions mit seiner Umgebung bestimmen kann. Hierbei muss die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Kernkollision im Target bekannt sein. In der Simulation wird ein 1%-Target eingesetzt, d.h. unter 100 Ionen, die das Target durchfliegen, kommt es genau zu einer Kernkollision. Daher wird auf jede auftretende Kernkollision, die δ -Elektronen von den 100 durch das Target fliegenden Ionen, gemischt (zehn bis zwölf δ -Elektronen pro Ion). Dies wird nicht nur auf die zentrale Kernkollision angewendet, sondern auch auf die Pile Up-Kollisionen.

Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der Definition eines Clusters. Der Einschlagsort ist als kariertes, aktivierte Pixel als graue und nicht aktivierte als weiße Kästchen kenntlich gemacht.



2.4.1 Funktionsweise des Hitfinders

Wie bereits im Abschnitt 2.2.1 erläutert, verteilt sich die von einem Teilchen freigesetzte Ladung auf mehrere Pixel. Dabei spielen der Einschlagswinkel und der Einschlagsort eines Teilchens auf die Detektorebene eine Rolle und prägen die Verteilung der Ladungen auf die Pixel. Für die Rekonstruktion des Einschlagortes des Teilchens (Treffer) ist es notwendig die von einem Teilchen aktivierten Pixel zu finden. Die Gesamtheit dieser Pixel wird als Cluster bezeichnet. Abbildung 2.10 zeigt einen solchen Cluster auf einem Sensor. Es sind neben dem Durchstoßpunkt des Teilchens (kariertes Kästchen), aktivierte (in grau) und nicht aktivierte Pixel (in weiß) dargestellt. Als ersten Schritt ist es notwendig die Cluster auf einer Detektorstation zu identifizieren. Herausfordernd ist hierbei die Separation von Cluster, die durch verschiedene Teilchen verursacht wurden. Da die Form der Cluster variiert (hauptsächlich bestimmt durch den Einschlagswinkel der Teilchen (siehe Abbildung 2.11)) und durch die binäre Ausgabe der Mimoso-26-Sensoren eine Trennung durch die Impulshöhe nicht möglich ist. In der Simulationsskette (Abbildung 2.9) wird diese Aufgabe vom Clusterfinder ausgeführt.

Die MAPS werden im späteren CBM-Experiment einen Diskriminator besitzen. Damit lässt sich ausschließlich feststellen, ob ein Pixel eine Ladung gesammelt hat, die über einen Schwellwert liegt. In diesem Fall wird das Pixel als aktiviert angesehen. Der Algorithmus zur Bestimmung der Cluster funktioniert so, dass aktivierte Pixel verworfen werden, wenn neben ihnen keine weiteren Pixel aktiviert wurden. Da es sehr unwahrscheinlich ist, dass sich die von einem Teilchen freigesetzte Ladung nur in einem Pixel sammelt. Werden hingegen weitere aktivierte Pixel gefunden, so werden rekursiv alle angrenzenden aktivierten Pixel nach weiteren angrenzenden aktivierten Pixel durchsucht. Als Cluster wird dann die Gesamtheit aller angrenzenden aktivierten Pixel abgespeichert. Prinzipiell ist der Größe des Clusters keine Grenze nach oben gesetzt. So ist es hypothetisch möglich, dass der Algorithmus nur einen einzigen über die gesamte Station ausgebreiteten Cluster identifiziert.

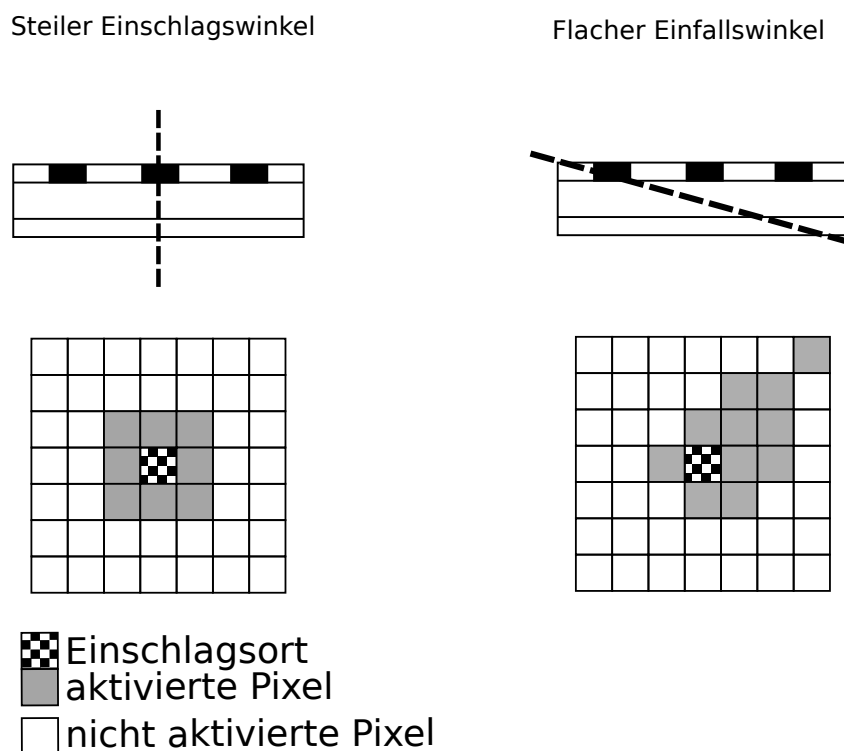


Abbildung 2.11: Abhängigkeit der Clusterform und Größe vom Einschlagswinkel des Winkels. Der Einschlagsort ist als kariertes, aktivierte Pixel als graue und nicht aktivierte als weiße Kästchen kenntlich gemacht.

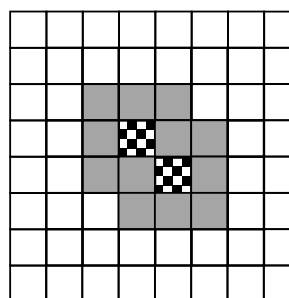
Die Rekonstruktion des Einschlagortes eines Teilchen aus dem Cluster gelingt durch die Bildung des Schwerpunktes.

$$x_{\text{Schwerpunkt}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^N x_i \quad (2.2)$$

$$y_{\text{Schwerpunkt}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^N y_i \quad (2.3)$$

Dabei wird die X- und Y-Koordinaten der einzelnen Pixel als x_i, y_i bezeichnet. Hinter diesem Prinzip zur Rekonstruktion von Clustern steckt die Annahme, dass ein Pixel jeweils nur zu einem einzigen Cluster gehört. Dies entspricht nicht zwangsweise der Realität, da sich die von einem Teilchen freigesetzte Ladung auf mehrere Pixel verteilt. Daher kann es dazu kommen, dass ein Pixel Ladung von zwei verschiedenen Teilchen sammelt. Dadurch wird es schwer zu entscheiden, wo die Grenzen der Cluster sind (siehe Abbildung 2.12). Da dabei mehrere Cluster

Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des Clustermergings. Zwei Teilchen (karierte Kästchen) treffen so nahe beieinander auf den Sensor, dass einige Pixel die freigesetzten Ladungen von beiden Teilchen sammeln. Diese Pixel können daher nicht mehr eindeutig einem Teilchen zugeordnet werden. Dadurch werden zwei Treffer als ein einziger erkannt, wodurch Informationen verloren gehen.



 Einschlagsorte
 aktivierte Pixel
 nicht aktivierte Pixel

auf einem abgebildet werden, wird dieses Phänomen im Weiteren als Clustermerging bezeichnet. Die Häufigkeit dieses Phänomens hängt von der Trefferdichte auf der Detektorstation ab. Diese wurde im Abschnitt 2.1.2 bereits dargestellt und zeigt, dass diese bei hohen Pile Up-Werten recht hoch ist. Daher ist zu vermuten, dass der Clustermerging-Anteil bei hohen Pile Up-Werten ebenfalls groß ist. Um dies zu prüfen wurde aus den schon gezeigten Detektorsimulationen ebenfalls dieser Wert bestimmt und ist in Abbildung 2.13 in Abhängigkeit des Pile Ups für die erste und zweite Detektorstation gezeigt. Auf der Abbildung ist der lineare Anstieg der Anteil der Cluster mit mehreren Teilchentreffer zu erkennen, die bei einem Pile Up zehn auf der ersten Station über elf Prozent aller vorhandenen Cluster ausmachen. Auf der zweiten Station ist der Anteil deutlich geringer. Dies lässt sich durch die dort geringere Trefferdichte erklären.

Die Folge von Clustermerging besteht darin, dass der Algorithmus nicht mehr in der Lage ist, die einzelnen Cluster zu unterscheiden. Da in den Sensoren nur ein Diskriminator verwendet wird, stehen auch die vom Pixel gesammelte Ladung nicht zur Verfügung. So sind verschmolzene Cluster nicht zu erkennen oder zu trennen. Dadurch kann im nächsten Schritt die Rekonstruktion der Einschlagsorte der Teilchen aus den Clusterinformationen nur noch fehlerhaft ablaufen. Hierbei wird es erstens zur Rekonstruktion eines Einschlagortes kommen, den es nie gegeben hat. Außerdem kommt es zweitens dazu, dass aufgetretene Einschlagsorte nicht rekonstruiert werden. Es kommt damit zum Informationsverlust. Dies wird bei der Rekonstruktion von Spuren wichtig, da diese durch die rekonstruierten Einschlagsorte auf den Stationen geschieht.

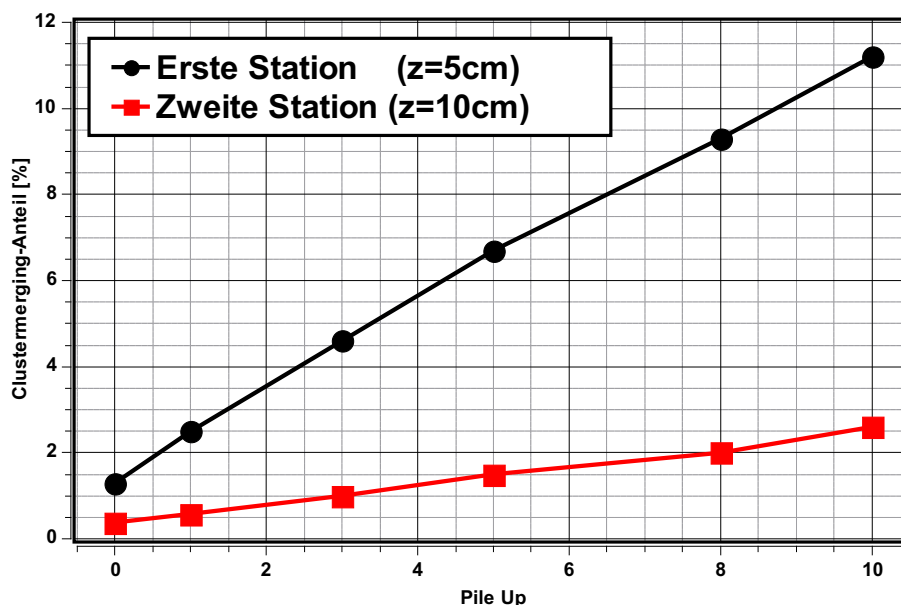
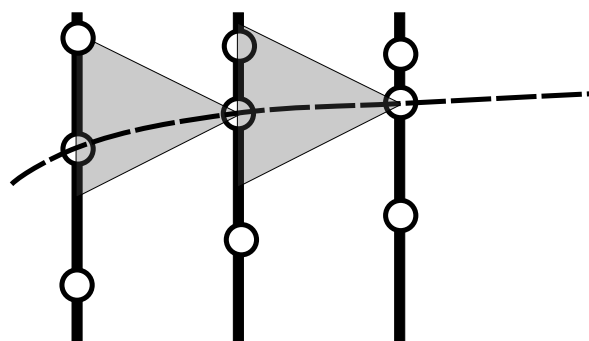


Abbildung 2.13: Clustermerging-Anteil auf den beiden MVD-Stationen der MVD2-Geometrie, bei verschiedenen Pile Up-Szenarien.

2.5 Rekonstruktion der Teilchenspuren

Der nächste Schritt in der Simulationskette besteht in der Rekonstruktion der Teilchenspuren aus den aufgenommenen Treffern. Dies wird als Spurrekonstruktion bezeichnet und lässt sich in zwei Schritte aufteilen: die Spurfindung und die Spuranpassung. Bei der Spurfindung werden alle Treffer auf den verschiedenen Detektorstationen kombiniert, die von ein und demselben Teilchen verursacht wurden. Der zweite Schritt der Spuranpassung besteht dann aus der Rekonstruktion der konkreten Spurbahn und des Impulses des Teilchens. Bei der Spurfindung besteht die große Schwierigkeit in der Kombinatorik der aufgenommenen Spurpunkte. Wenn beispielsweise 100 Teilchen einen Detektor mit zehn Stationen durchqueren, dann können auf jeder Station bis zu 100 Treffer registriert werden. Mit diesem naiven Ansatz ergäben sich dann bis zu 100^{10} Kombinationsmöglichkeiten an Spuren. Aufgabe der Spurrekonstruktion ist es nun, unter diesen vielen Kombinationsmöglichkeiten die richtigen zu identifizieren. Problematisch ist hierbei, dass in der Rekonstruktion außer den geometrischen Positionen der Treffer nichts weiter bekannt ist. Daher wird zuerst ein geometrisches Kriterium benutzt, das auf der benachbarten Station einen Bereich definiert, in dem ein weiterer Treffer liegen kann. Dieser Bereich wird durch die Distanz beider Stationen und dem χ^2 des bisherigen Spurverlaufs bestimmt (siehe Abbildung 2.14). Als sogenannter Spurkegel bzw. Spurkanus wird das geometrische Objekt aus dem Spurpunkt und dem Bereich auf der benachbarten Station bezeichnet. Des Weiteren lassen sich auch Spuren mit unphysikalischen Verläufen ausschließen z.B. „Zickzack-Kurs“. Diese sind zwei allgemeine

Abbildung 2.14: Der Spurkonus bzw. Spurkegel bei der Spurfindung. Neben den Detektorstationen (schwarze Balken) sind die Treffer (Kreisringe) sowie eine Teilchenspur (gestrichelte Linie) und zwei Spurkegel (grau gefärbte Dreiecke) eingezeichnet.



Beispiele wie die Kombinatorik in der Spurfindung reduziert werden kann.

2.5.1 Level 1 Cellular Automaton - Algorithmus

Das Ausfiltern von physikalisch unplausiblen Spuren aus der Listen der naiven Kombinationen ist Aufgabe des Spurfindungsalgorithmus. In CBM-Experiment kommt der sogenannte L1 Cellular Automaton Algorithmus (kurz L1 - Algorithmus) zum Einsatz. Dieser läuft in zwei Schritten ab. Im Ersten werden aus den einfachen Treffern auf den Detektorstationen Spurkandidaten definiert. Im zweiten Schritt werden diese durch Auswahlverfahren selektiert und die verbliebenen als rekonstruierte Spuren abgespeichert.

Im ersten Schritt sucht der Algorithmus auf drei benachbarten Stationen jeweils einen zufälligen Treffer heraus. Daraus erstellt er einen sogenannten „Trackseed“. Benachbarte Trackseeds werden dann zu Spurkandidaten zusammengefügt. Hierfür muss der Endpunkt des einen Trackseeds identisch mit dem Anfangspunkt des anderen sein. Des Weiteren wird ein hypothetische Impuls der Trackseeds aufgestellt und als weiteres Kriterium verwendet. Außerdem werden physikalisch unplausible Spuren wie beispielsweise ein „Zickzack-Kurs“ verworfen.

Im zweiten Schritt wird dann aus der Liste der im ersten Schritt erstellten Spurkandidaten die zu behaltenden Spuren ausgewählt. Hierbei werden vor allem lange Spuren, mit den kleinsten Spuranpassungsfehler bevorzugt. Eine besondere Charakteristik des L1-Algorithmus ist es, dass ein Treffer immer nur zu einer Spur gehören darf. Gibt es somit mehrere Spurkandidaten, die einen oder mehrere identische Treffer teilen, so wird ausschließlich die Spur mit dem kleinsten Spuranpassungsfehler akzeptiert. Die Forderungen, dass ein Treffer nur von einem Teilchen stammt, ist zwar plausibel, wird aber problematisch, wenn Verluste durch Detektorineffizienzen (wie Clustermgering) bedacht werden. Genauere Informationen zu der Funktionsweise des L1-Algorithmus sind in [SUI⁺07], [Kie02], [Kie10] und [ACIG06] zu finden.

Kapitel 3

Spurrekonstruktion mit zwei MVD-Stationen

3.1 Stoßparameterauflösung als Funktion der Trefferdichte

Um die Stoßparameterauflösung des Mikro-Vertex-Detektors zu bewerten eignen sich Spuren, die aus dem primären Vertex stammen. Da diese einen bekannten Stoßparameter (siehe Abschnitt 2.1.1) von $b = 0$ cm besitzen. Solche werden im Folgenden als primäre Spuren bezeichnet. In A.1 wird an einem einfachen Beispiel gezeigt, dass die Auflösung dieser Größe von den Positionen der Detektorebenen, den Ortsfehlern auf ihnen sowie der Vielfachstreuung abhängig ist. Da diese Größe als Kriterium für die Auswahl an Spuren (siehe Abschnitt 2.1.1) verwendet wird, ist eine gute Auflösung für die Stoßparameter wichtig.

Die in diesem Abschnitt zu testende Frage ist, ob die Auflösung durch höhere Trefferdichten verringert wird, da bei hohen Trefferdichten Fehler in der Spurrekonstruktion wahrscheinlicher werden. Um diesen unterstellten Zusammenhang zu quantifizieren und im Besonderen die Auswirkungen von δ -Elektronen und Pile Up im Einzelnen zu untersuchen, wurden fünf Simulationsszenarien durchgeführt. Mit Ausnahme des ersten Simulationsszenario wird jeweils der in Tabelle 2.1 bereits eingeführte MVD2 und der STS als einzige Detektoren verwendet. Das erste verbleibende, Simulationsszenario nutzt nur den STS und zeigt die Auflösung, wie sie ohne MVD erreicht würde. Die Simulationsszenarien zwei bis vier untersuchen die Auflösung des Detektors mit MVD für verschiedene Trefferdichten, d.h. für unterschiedliche hohen Pile Up im MVD. Die fünfte Simulationsstudie ermittelt die Anforderungen an die Auflösung des MVD. Hierfür wurden die Stoßparameterverteilung der Tochterteilchen von zerfallenen D^0 -Meson bestimmt.

Nr.	MVD	δ -Elektronen	Pile Up	primäre Spuren	D^0 -Tochterspuren
1	-	-	-	X	-
2	X	-	0	X	-
3	X	X	0	X	-
4	X	X	10	X	-
5	X	-	-	-	X

Tabelle 3.1: Es werden die durchgeführten fünf Simulationsstudien mit ihren Parametern aufgeführt. Aktivierte Parameter sind mit einem X und deaktivierte mit einem - kenntlich gemacht. Außerdem ist der verwendete Pile Up-Wert der verschiedenen Szenarien angegeben.

Abbildung 3.1 zeigt die Resultate der Studie. Um die Auflösung des Detektors auf Rotationssymmetrie zu prüfen, wurden die X- bzw. Y-Komponenten des Stoßparameters getrennt betrachtet. Zur Verbesserung der Darstellung wurden die Beträge der Spektren auf doppellogarithmischen Achsen aufgetragen. Da auf logarithmischen Achsen keine negativen Zahlen dargestellt werden können, wird der positive und der negative Koordinatenbereich in getrennten Abbildungen aufgeführt. Wie erwartet findet sich die schlechteste Stoßparameterauflösung für ein Detektorsystem, das keinen MVD besitzt und daher ausschließlich auf den STS angewiesen ist (graue Linie). Den besten plausiblen Wert erwartet man für ein System mit MVD, in dem eine geringe Trefferdichte des Detektors eine robuste Spurrekonstruktion ermöglicht. Dieses Szenario wurde durch eine Simulation mit einer MVD-Geometrie erzeugt, bei der der δ -Elektronen-Generator ausgeschaltet blieb. Hierdurch wurden lediglich die primären Spuren der Kernkollision dargestellt, während die zahlreichen δ -Elektronen in der Simulation nicht berücksichtigt wurden. Dies erzeugte die angestrebte starke Reduzierung der Trefferdichte. Die zugehörige Stoßparameterverteilung ist in der Abbildung in blau dargestellt.

Werden δ -Elektronen in den Simulationen berücksichtigt, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für Fehler in der Spurrekonstruktion und man erwartet eine Verbreiterung der Verteilung. Dieser Effekt ist in der schwarz dargestellten Verteilung zu erkennen und wird deutlich ausgeprägter, wenn die Trefferdichte des MVD durch einen Pile Up von zehn weiter erhöht wird (rote Verteilung). Im letzteren Fall verbreitert sich die Verteilung deutlich und die Auflösung des Systems nähert sich der Auslösung des Systems ohne MVD an. Die fünfte Simulationsstudie, die nur Tochterspuren von D^0 -Zerfällen enthält, ist in grün dargestellt. Diese beantwortet die Frage nach der minimalen Auflösung, die für die Rekonstruktion von D^0 -Mesonen notwendig ist. Da in dieser Simulation, im Gegensatz zu den vorherigen, kein primärer Vertex vorhanden ist (da keine UrQMD Ereignisse vorhanden sind) wurde hier der Stoßparameter bzgl. des Koordinatenursprungs ($X = 0, Y = 0, Z = 0$) definiert. Es ist zu erkennen, dass die Stoßparameterverteilung der fünften Simulationsstudie komplett in den Verteilungen der Stoßparameter der ersten vier Simulationsstudien eingebettet ist. Hieraus lässt sich vorläufig schlussfolgern, dass die Stoßparameterauflösung des MVD nicht ausreicht, um die Tochterteilchen von D^0 -Zerfällen

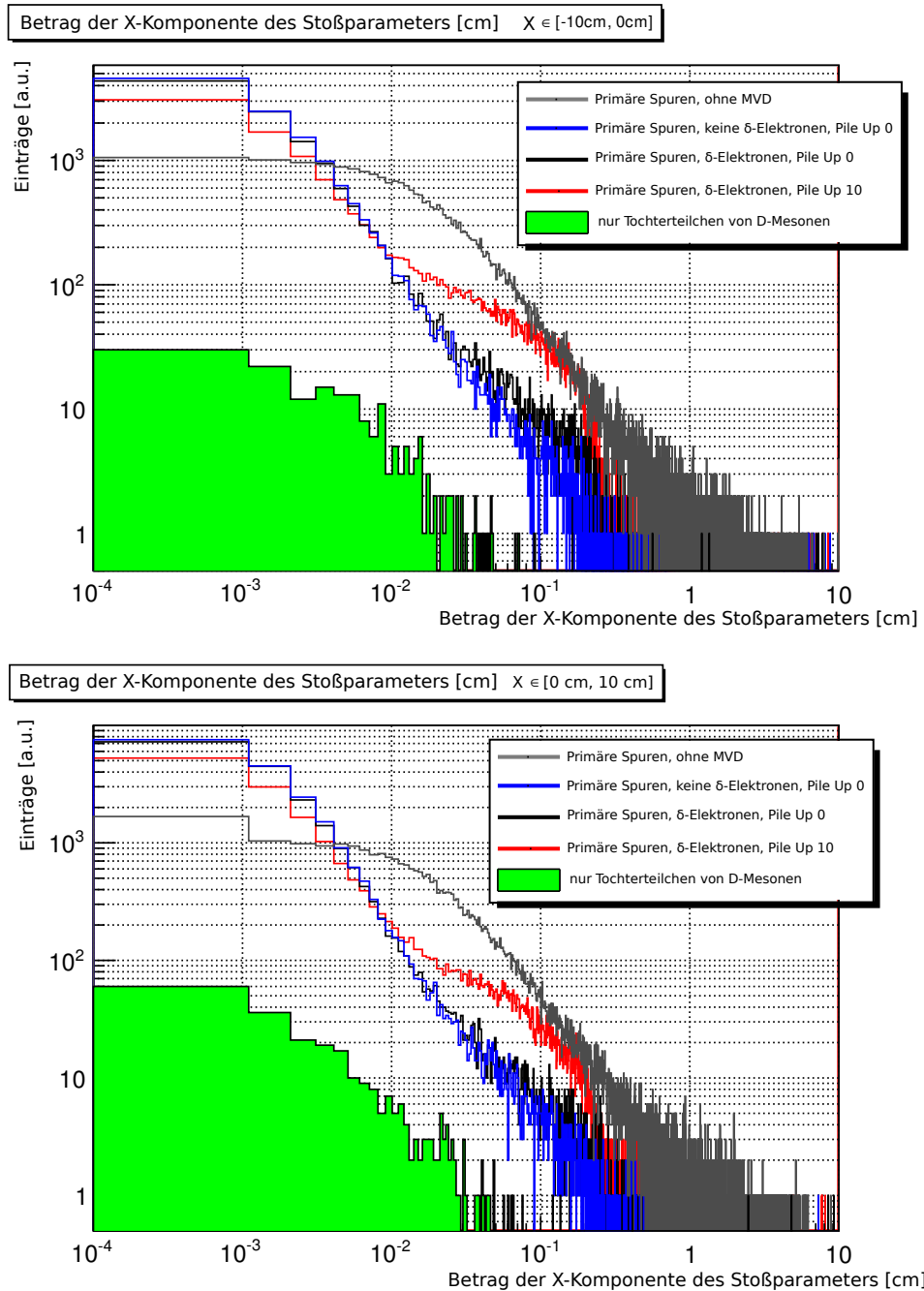


Abbildung 3.1: Verteilung der X-Komponente des Stoßparameters der fünf verschiedenen Simulationsszenarien. Wegen der Verwendung einer doppellogarithmischen Darstellung wurden oben die positiven und unten die negativen Bereiche der Verteilung dargestellt.

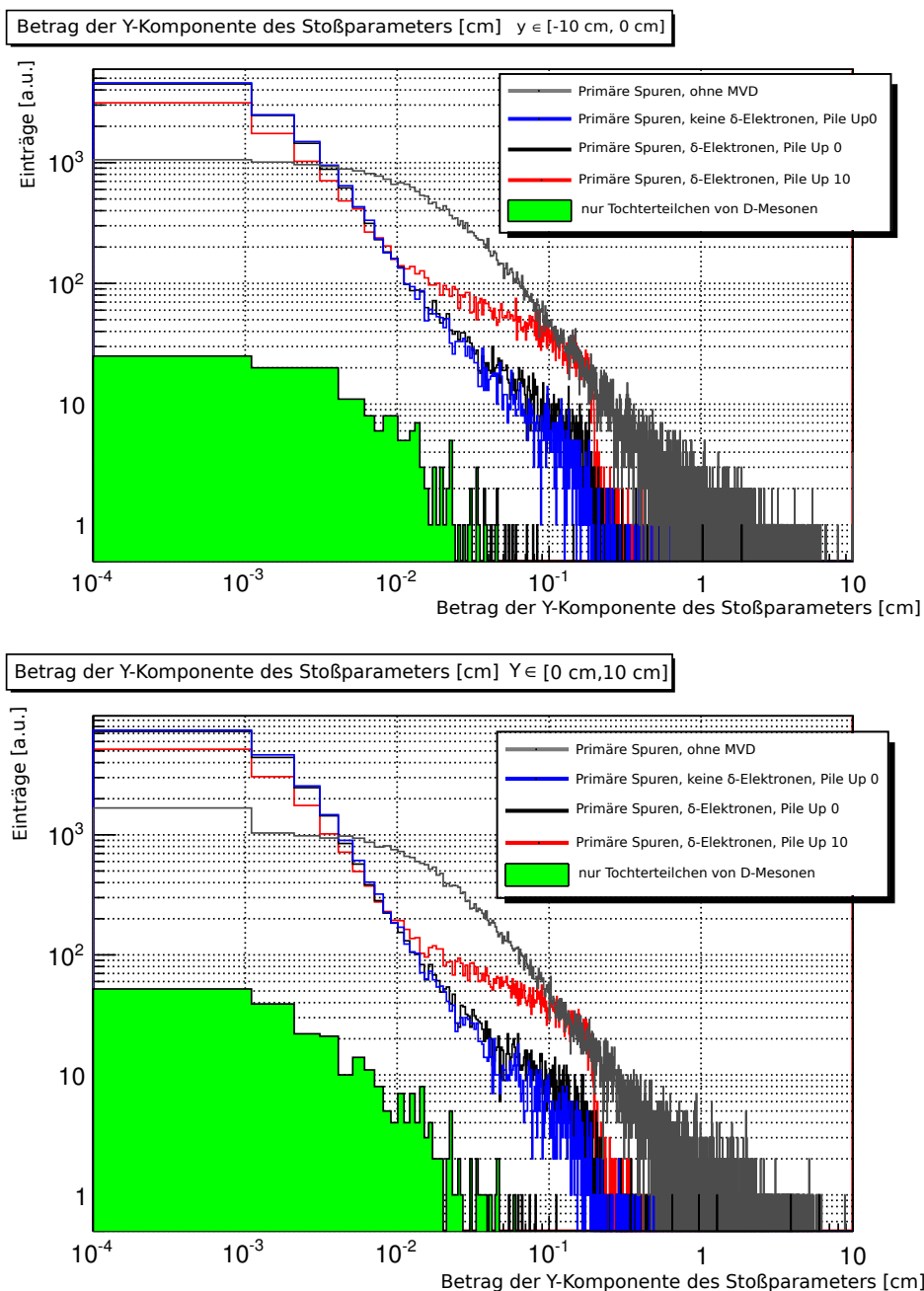


Abbildung 3.2: Verteilung der Y-Komponente des Stoßparameters der fünf verschiedenen Simulationsszenarien. Wegen der Verwendung einer doppellogarithmischen Darstellung wurden oben die positiven und unten die negativen Bereiche der Verteilung dargestellt.

eindeutig vom Hintergrund zu trennen.

Abbildung 3.2 enthält die auf die Y-Achse projizierten Stoßparameterverteilungen der fünf Simulationsstudien. Der Vergleich zwischen Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2 der Verteilung der X- bzw. der Y-Komponente des Stoßparameters zeigt Unterschiede, damit ist die Rotationssymmetrie nicht gegeben. Man erkennt, dass die Auflösung des Detektors mit steigender Trefferdichte (d.h. für die Szenarien zwei bis vier) signifikant abnimmt. Dies unterstützt erläuterte Annahme, dass die höhere Trefferdichte die Spurrekonstruktion erschwert und dadurch eine schlechtere Stoßparamterauflösung des Detektorsystems verursacht.

Szenario	RMS X-Komponente [μm]	RMS Y-Komponente [μm]
1	3833 ± 11	3447 ± 9
2	1401 ± 5	822 ± 3
3	1503 ± 5	857 ± 3
4	1687 ± 6	978 ± 3
5	75 ± 6	78 ± 6

Tabelle 3.2: Die Breiten (RMS-Werte) der Stoßparameterverteilungen aus den Szenarien eins bis fünf.

Die beobachteten Probleme in der Auflösung des Stoßparameters, bei hohen Trefferdichten, lassen sich durch Betrachtung der Funktionsweise der Spurrekonstruktion erklären. Dabei wird berücksichtigt, dass durch eine höhere Trefferdichte die Anzahl an Treffer zunehmen, die sich im Spurkegel (siehe Abschnitt 2.5) der Spurrekonstruktion befinden. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Spur ein falscher Treffer zugeordnet wird (Fehler in der Spurrekonstruktion). Um dieser Hypothese nach zugehen, wurden die Zahl an richtigen und falschen zugeordneten Treffern für verschiedene Pile Up-Werte auf der ersten und zweiten Station bestimmt. Diese ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Der Pile Up ist auf der X-Achse und die Zahl an den richtig bzw. falsch zugeordneten Treffer auf der Y-Achse aufgetragen. Wie zu erkennen ist, steigt die Zahl an falsch zugeordneten Treffern mit höheren Pile Up-Werten (Trefferdichte) und die Zahl an richtig zugeordneten Treffer sinkt. Es gibt offensichtlich eine Abhängigkeit von der Position und den Parameter der Station, aber die These wird durch die Abbildung bestätigt.

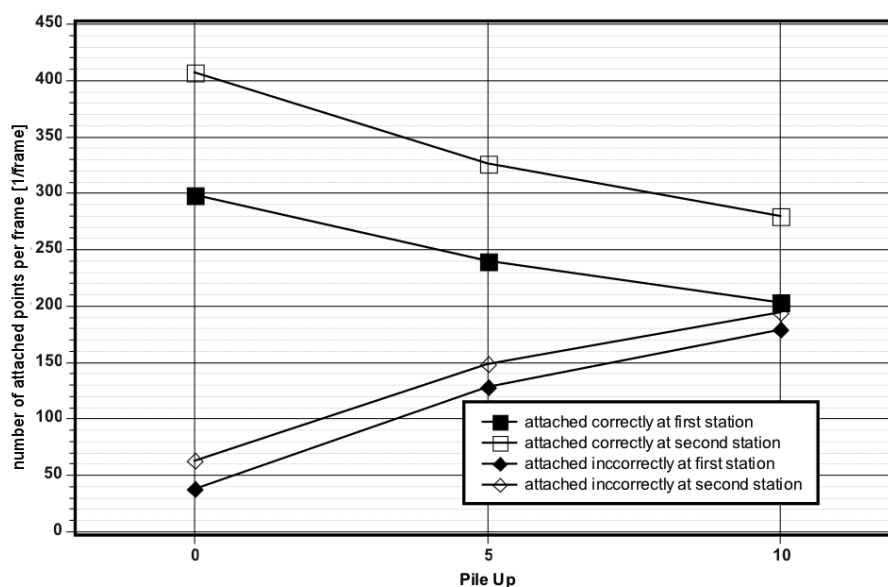


Abbildung 3.3: Zahl der richtig und falsch zugeordneten Treffer je Frame auf den beiden MVD-Stationen für unterschiedliche Pile Up-Werte.

3.2 Analyse der rekonstruierten Spuren

Die bisherige Untersuchung liefert nur einen indirekten Hinweis auf einen negativen Einfluss der Trefferdichte auf die Spurrekonstruktion. Um diesen Einfluss im Detail untersuchen zu können, ist es notwendig, die Qualität der Spurrekonstruktion im Detail zu betrachten. Der hierzu genutzte Ansatz orientiert sich an der Zuordnung von Treffern zu einer rekonstruierten Spur. Um diese zu prüfen, startet man von einer Spur, die im STS mit mindestens vier Spurpunkten rekonstruiert wurde. Die Forderung nach vier Spurpunkten im STS dient dazu Spuren auszuschließen, die ausschließlich Treffer im MVD enthalten. Nachfolgend wurde geprüft, ob die im MVD gemessenen Spurpunkte diesen Spuren korrekt zugeordnet wurden. Dieser Vergleich basiert darauf, dass CBMRoot zu jedem Treffer im Detektor auch die Identität des ihn verursachenden Teilchens abspeichert. Die Zuordnung des Treffers (im MVD) kann nun richtig (d.h. der Treffer wurde vom gleichen Teilchen verursacht, dass auch die im STS rekonstruierte Spur generiert hat) oder falsch sein. Ein einfacher Fall einer richtigen und einer falschen Zuordnung ist in Abbildung 3.4 schematisch gezeigt. Im linken Teil der Abbildung ist eine rekonstruierte Spur gezeigt, der nur richtige MVD-Treffer zugeordnet sind. Im rechten Teil der Abbildung ist eine rekonstruierte Spur gezeigt, der nur falsche MVD-Treffer zugeordnet sind. Spuren der letzteren Art werden im Folgenden als Geisterspuren bezeichnet. Die zwei Beispiele demonstrieren zwei Möglichkeiten von rekonstruierten Spuren. Bei diesen handelt es sich um zwei extreme Ergebnisse der Spurrekonstruktion. In der Realität existieren selbstverständlich auch Mischformen,

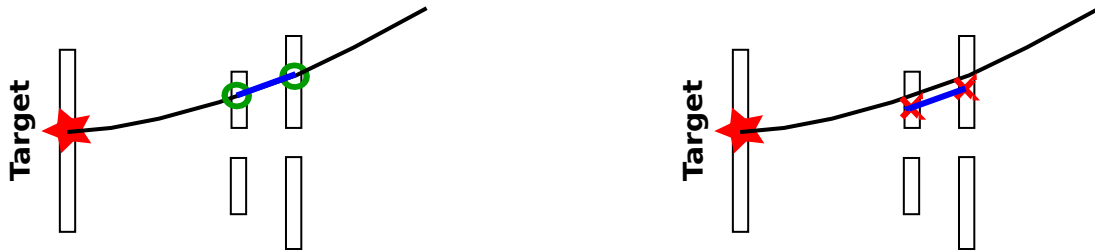


Abbildung 3.4: Zwei verschiedene Möglichkeiten der Rekonstruktionsgüte von Spuren. Bei dem linken Fall wurden (im MVD) alle Treffer richtig (○) und beim rechten Fall alle Treffer falsch zugeordnet (×). Beim ersten Fall spricht man von einer „ideal“ rekonstruierten Spur und beim zweiten von einer „Geisterspur“. Die originale Teilchenspur ist dabei als schwarze und die rekonstruierte als blaue Linie eingezeichnet.

z.B. eine Spur, in der ein Treffer falsch und ein Treffer richtig zugeordnet sind. Da es sich bei der Analyse der Art der zugeordneten Treffer um eine Angabe der Rekonstruktionsqualität handelt, wird diese im weiteren Verlauf der Arbeit auch als Rekonstruktionsgüte bezeichnet.

Ein wichtiger Teilaspekt der Studie zur Güte der Spurrekonstruktion ist die Frage, welche minimale Rekonstruktionsgüte eine Spur besitzen muss, um eine physikalische sinnvolle Messung zu ermöglichen. Das traditionell in CBM verwendete Kriterium fordert, dass mindestens 70 % der zu einer Spur zugeordneten Treffer richtig zugeordnet werden. Ist es erfüllt, gilt die Spur als hinreichend gut rekonstruiert, um eine brauchbare Messung des Teilchenimpulses zu ermöglichen. Dieses Kriterium wurde für den STS aufgestellt. Seine Gültigkeit für die Untersuchung der Abhängigkeit der Spurrekonstruktion von der MVD-Geometrie ist aus mehreren Gründen fraglich. Zum einen zielt der MVD nicht primär auf die Messung des Teilchenimpulses, ein geeignetes Kriterium sollte sich an der erreichten Vertexauflösung orientieren. Zum anderen führt dieses Kriterium in einem gemeinsamen Detektorsystem aus MVD und STS zu einer fragwürdigen Aussage: Beim bisher verwendeten Detektorlayout des MVD mit zwei Stationen und STS mit acht Stationen, existieren insgesamt zehn Detektorstationen. Damit fordert das Kriterium mindestens sieben richtig zugeordnete Treffer in jeder Spur mit zehn Punkten. Eine Spur kann im MVD aber maximal zwei Treffer erzeugen. Dadurch ist es theoretisch möglich, dass eine Spur im MVD nur schlechte oder auch gar keine Treffer besitzt und trotzdem als korrekt rekonstruiert gilt (siehe Abbildung 3.5).

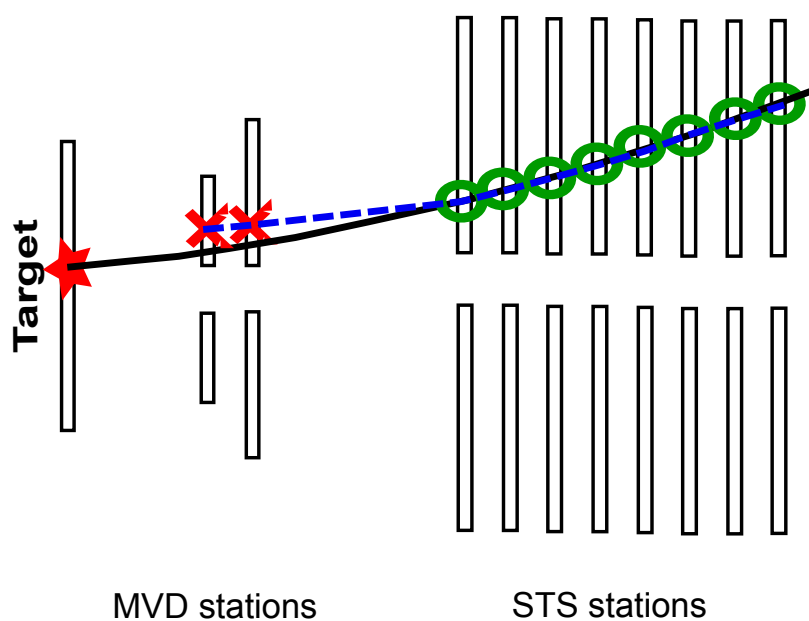


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung einer rekonstruierten Spur (gestrichelte Linie), bei der alle MVD-Spurpunkte falsch (X) zugeordnet wurden, die aber trotzdem das 70%-Kriterium erfüllt, da im STS genug Treffer richtig (O) zugeordnet wurden. Die Rekonstruktionsfehler werden den Impuls der rekonstruierten Spur nicht allzu sehr verfälschen, wohl aber den extrapolierten Stoßparameter.

3.2.1 Definition der MVD Spurklassen

Angesichts der Schwäche des 70%-Kriteriums wurde versucht, ein geeignetes Kriterium für eine gute Spurrekonstruktion im MVD zu entwickeln. Dieses basiert, wie das 70%-Kriterium, grundsätzlich auf Angaben darüber, ob die Treffer richtig oder falsch zu den Spuren zugeordnet wurden, allerdings speziell auf den MVD bezogen.

Um die notwendige Zahl an korrekt zugeordneten Treffern zu ermitteln, wurden verschiedene Spurklassen definiert. Diese sollen Spuren mit ähnlichen Eigenschaften zusammenfassen. Zur Aufstellung des Kriteriums wird gefordert, dass die Stoßparameterrauflösung der Spurklasse besser ist als die Stoßparameterrauflösung der Tochterteilchen des D^0 -Zerfalls. Ist dies erfüllt, wird die Spurklasse als zur Vertex-Rekonstruktion geeignet eingestuft und gilt damit als hinreichend gut rekonstruiert.

Die im letzten Abschnitt vorgestellte, vollständige richtige und falsche Zuordnung von Treffern, definiert ideal rekonstruierte Spuren und sogenannte Geisterspuren. Zusätzlich kann der Fall auftreten, dass rekonstruierte Spuren sowohl richtig als auch falsch zugeordnete Treffer besitzen. Dieser Fall wird im Folgenden als „gemischte Spuren“ bezeichnet. Damit ergeben sich bei der Betrachtung von richtig und falsch zugeordneten Treffern drei verschiedene Spurklassen (siehe Tabelle 3.3).

	richtig zugeordnet		falsch zugeordnet	
Ideale Teilchenspur	X			
Gemischte Teilchenspur	X	X		
Schlechte Teilchenspur			X	

Tabelle 3.3: Auflistung der Definitionen von drei einfachen Spurklassen. Diese beziehen sich ausschließlich auf die Zuordnungsart der Treffer zu den Spuren. Für die Zuordnungsart wurde zwischen „richtig“ und „falsch“ differenziert.

Diese Definition ist übersichtlich, aber noch unvollständig. Der Grund hierfür ist, dass neben der richtigen und falschen Zuordnung von Treffern zu Spuren auch noch die dritte Möglichkeit besteht, dass ein zu erwartender Treffer überhaupt nicht zur Spur zugeordnet wird. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe: Der entsprechende Treffer fand niemals statt, da das Teilchen die geometrische Akzeptanz des Detektors verfehlte oder, das es zwar in der Akzeptanz lag, aber wegen Detektorineffizienzen nicht detektiert wurde. Ein wichtiger Spezialfall der Detektorineffizienzen sind Verluste durch das im Abschnitt 2.4.1 eingeführte Clustermerging. Zur Unterscheidung zwischen nicht akzeptierten und nicht detektierten Teilchen wurde geprüft, ob die extrapolierte Spur eines Teilchens die geometrische Akzeptanz einer MVD-Station schneidet.

Unter Berücksichtigung der fehlenden Spurpunkte ergeben sich vier verschiedenen Fälle, die bei der Zuordnung von Treffern berücksichtigt werden müssen. Hierzu wird jede der drei bereits eingeführten Spurklassen (Tabelle 3.3) um die vier Untergruppen erweitert. Durch Kombination der zwei zusätzlichen Möglichkeiten, dass Teilchen nicht akzeptiert bzw. nicht detektiert werden ergeben sich insgesamt vier verschiedenen Kombinationen, die nachfolgend unterschieden werden. Für das Beispiel der ideal rekonstruierten Spur sind diese vier Möglichkeiten (siehe Abbildung 3.6):

1. Alle Treffer in einer rekonstruierten Teilchenspur wurden geometrisch akzeptiert, detektiert und nachfolgend richtig zugeordnet.
2. Einige Treffer in einer rekonstruierten Teilchenspur wurden nicht geometrisch akzeptiert, allen anderen wurden detektiert und richtig zugeordnet.
3. Alle Treffer in einer rekonstruierten Teilchenspur wurden geometrisch akzeptiert, einige wurden nicht detektiert. Die detektierten wurden richtig zugeordnet.
4. Einige Treffer in einer rekonstruierten Teilchenspur wurden nicht geometrisch akzeptiert, andere nicht detektiert. Die verbleibenden akzeptierten und detektierten Treffern wurden jedoch immer richtig zugeordnet.

Da diese vier Spurklassen auch den Verlust an Informationen berücksichtigen, ist die Bezeichnung „Ideale Spuren“ nicht mehr sinnvoll. Daher werden diese vier Spurklassen im Folgenden unter dem Begriff „Gute Spuren“ zusammengefasst.

Die Erweiterung der in Tabelle 3.3 aufgeführten Spurklassen lässt sich ebenfalls mit gemischten und den schlechten Teilchenspuren vollziehen. Dies führt zu zwölf Spurklassen, die in Tabelle 3.4 aufgeführt sind. Für eine eindeutige und strukturierte Kennzeichnung dieser zwölf Spurklassen wurde eine Bezeichnung gewählt, die sich aus zwei Teilen zusammensetzt. Der erste Teil ist der Name (Gute Teilchenspur, Gemischte Teilchenspur oder Schlechte Teilchenspur), der angibt ob Treffer ausschließlich richtig, falsch oder sowohl als auch zugeordnet wurden. Der zweite Bestandteil ist eine Nummer (eins bis vier), die angibt, ob es Verluste durch die

Spurart	Fall	○	×	□	■	Benötigte Stationen
Gute Spuren	1	X				1
	2	X		X		2
	3	X			X	2
	4	X		X	X	3
Gemischte Spuren	1	X	X			2
	2	X	X	X		3
	3	X	X		X	3
	4	X	X	X	X	4
Schlechte Spuren	1		X			1
	2		X	X		2
	3		X		X	2
	4		X	X	X	3

Zuordnung	Symbol
richtig	○
falsch	×
nicht zugeordnet (geometrische Akzeptanz)	□
nicht zugeordnet (Detektorineffizienzen)	■

Tabelle 3.4: Links sind die Definitionen der zwölf Spurklassen für den MVD aufgelistet. Auf der rechten Seite findet sich eine Tabelle, die die verwendeten Symbole erläutert. Die definierten zwölf Spurklassen lassen sich in drei Untergruppen aufteilen: Gute Spuren, Gemischte Spuren und Schlechte Spuren. Diese unterscheiden sich voneinander dadurch, ob sie Spuren mit richtig zugeordneten, falsch zugeordneten oder mit beiden Möglichkeiten enthalten. Die Fallnummer (zweite Spalte von links) indiziert ob Verluste (durch die geometrische Akzeptanz oder Detektorineffizienzen) in der Definition vorkommen. Die letzte Spalte rechts gibt die Zahl der minimal benötigten MVD-Stationen an.

geometrische Akzeptanz, Detektorineffizienzen oder beides gibt.

Die Spalte Anzahl an Stationen in der Tabelle gibt die Zahl der benötigten MVD-Stationen an. Dies ist wichtig, weil einige dieser Spurklassen erst auftreten können, wenn eine gewisse Zahl an Detektorstationen im MVD vorhanden sind. So sieht die Definition der Spurklasse Gute Spuren (4) beispielsweise eine Spur mit mindestens einen richtig zugeordneten, einen nie stattgefunden und einen nicht detektierten Treffer vor. Für die anderen drei Fälle der Guten Spuren werden hingegen keine drei Stationen benötigt. Dies ist in Abbildung 3.6 anschaulich dargestellt.

Der nächste Schritt besteht in der Ermittlung der Auflösung von primären Spuren der verschiedenen Spurklassen (Rekonstruktionsgüte). Dies geschieht getrennt für die X- bzw. Y-Komponente des Stoßparameters.

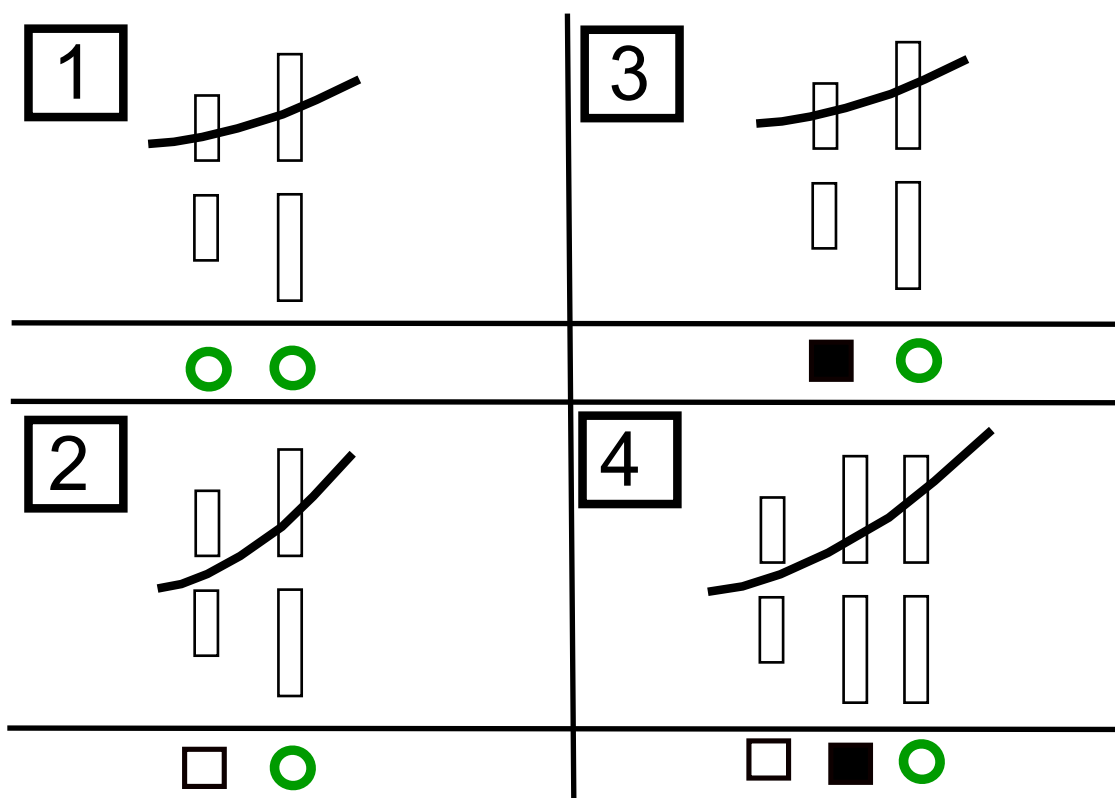


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der vier Spurklassen der Spurklassen Gute Spuren (1) bis Guten Spuren (4). Die Fallnummer ist dabei jeweils angegeben. Die Definitionen beinhalten richtig zugeordnete Treffer (○), Verluste durch die geometrische Akzeptanz (□) und durch Detektorineffizienzen des (■) Mikro-Vertex-Detektors.

Abbildung 3.7 zeigt die Daten für die X-Komponente des Stoßparameters und Abbildung 3.8 für dessen Y-Komponente. Darüber hinaus ist die aus Tabelle 3.2 bekannte Breite der Stoßparameterverteilung der Tochterpartikel aus D^0 -Zerfälle aufgeführt. Aus den Abbildungen lässt sich erkennen, dass nur für die Spurklassen Gute Spuren (1) und Gute Spuren (2) die Stoßparameterauflösungen für eine Rekonstruktion von D^0 -Mesonen hinreichend ist. Das heißt, dass nur ideal rekonstruierte Spuren (Gute Spuren (1)) und solche akzeptabel sind, die bis auf Verluste durch geometrische Akzeptanz ideal rekonstruiert wurden (Gute Spuren (2)). Treten falsch zugeordnete Treffer oder Verluste durch Detektorineffizienzen auf, können primäre und sekundäre Spuren nicht mehr unterschieden werden.

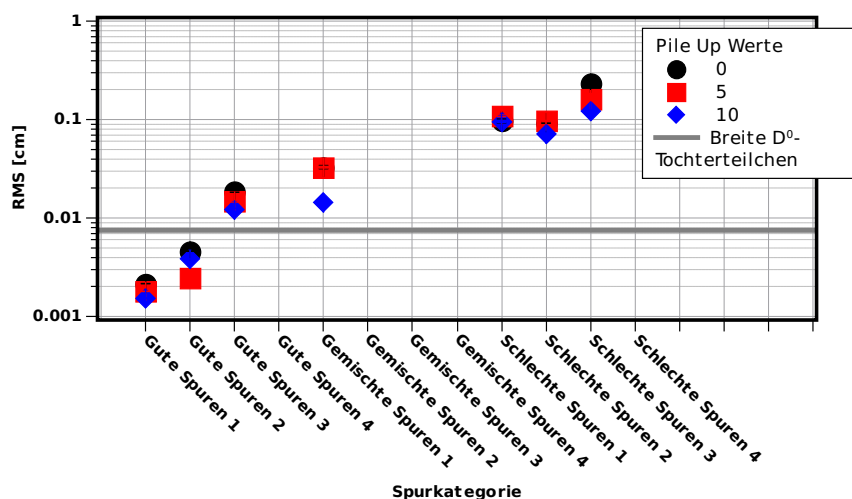


Abbildung 3.7: Breite der X-Komponente der Stoßparameterverteilung für Spuren der verschiedenen Spurklassen bei unterschiedlichen Pile Up-Szenarien. Die benötigte Breite („natürliche Breite“ der D^0 -Mesonen) ist als graue Linie eingezeichnet.

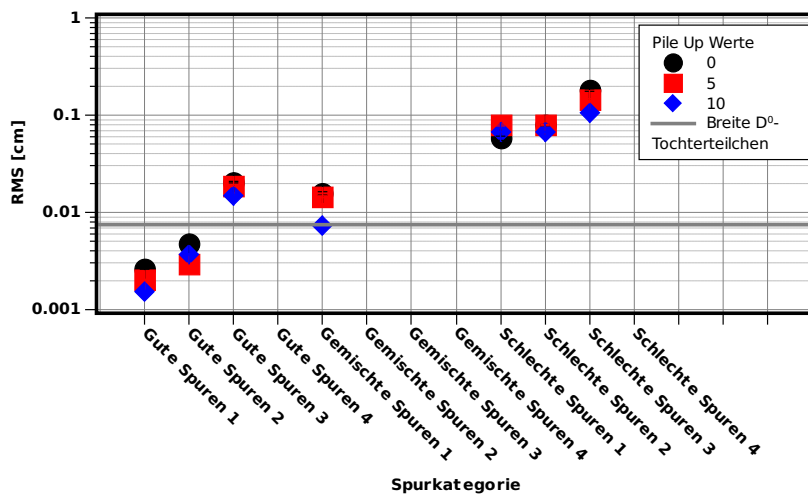


Abbildung 3.8: Breite der Y-Komponente der Stoßparameterverteilung für Spuren der verschiedenen Spurklassen bei unterschiedlichen Pile Up-Szenarien. Die benötigte Breite („natürliche Breite“ der D^0 -Mesonen) ist als graue Linie eingezeichnet.

3.3 Effizienz der Spurrekonstruktion

Um die Rekonstruktionseffizienz zu beurteilen, wurde in Abbildung 3.9 die Zahl der rekonstruierten Untergrundspuren für verschiedene Trefferdichte nach Spurklassen aufgeschlüsselt. Hierbei sind in Abbildung 3.9 diese Zahlen für sieben der zwölf Spurklassen für den MVD2 gezeigt. Die anderen fünf Spurklassen sind nur für drei bzw. für vier MVD-Stationen definiert. Ergänzt wurde die Zahl der Spuren eingetragen, die sich in der geometrischen Akzeptanz des STS aber nicht der des MVD befinden.

Es ist zu erkennen, dass etwa 30% der im STS rekonstruierten Spuren nicht in der geometrischen Akzeptanz des MVD liegen. Die Zahl der Guten Spuren nehmen durch einen höheren Pile Up ab, während hingegen die Anzahl der Schlechten Spuren und der Gemischten Spuren mit zunehmenden Pile Up zahlreicher werden. Hier zeigt sich wie erwartet, dass durch eine höhere Trefferdichte die Fehler in der Spurrekonstruktion zunehmen. Nicht bestätigt wird die Vermutung, dass durch die steigende Zahl der verschmolzenen Cluster eine größere Zahl von Spuren auftritt, bei denen einzelne Treffer nicht detektiert wurden (Spurklassen Gute Spuren (3) und Schlechte Spuren (3)). Dieses Ergebnis ist unintuitiv, da der Clustermerging-Anteil mit ansteigender Trefferdichte zunimmt (siehe Abschnitt 2.4.1). Erklären lässt sich dieser Effekt dadurch, dass neben der Clustermerging-Anteil auch die Menge der nicht zugeordneten Treffer, in der Nähe eines nicht registrierten Treffers, ansteigt. Dadurch findet der Spurrekonstruktionsalgorithmus offenkundig immer einen plausiblen aber falschen Treffer. Die steigende Anzahl der hierdurch entstehenden Spuren werden per Definition als Gemischte Spuren aufgeführt.

Im Folgenden wird die Effizienz der Spurrekonstruktion als Verhältnis der Zahl der erfolgreich rekonstruierten Spuren (d.h. Spuren der Kategorie Gute Spuren (1) und Gute Spuren (2)) zur Zahl der vom MVD geometrisch akzeptierten Spuren definiert. Diese Spurrekonstruktionseffizienz ist in der Abbildung 3.10 als Funktion des Pile Ups für einen MVD2 gezeigt. Sie sinkt mit steigendem Pile Up von ca. 83% auf ca. 52%.

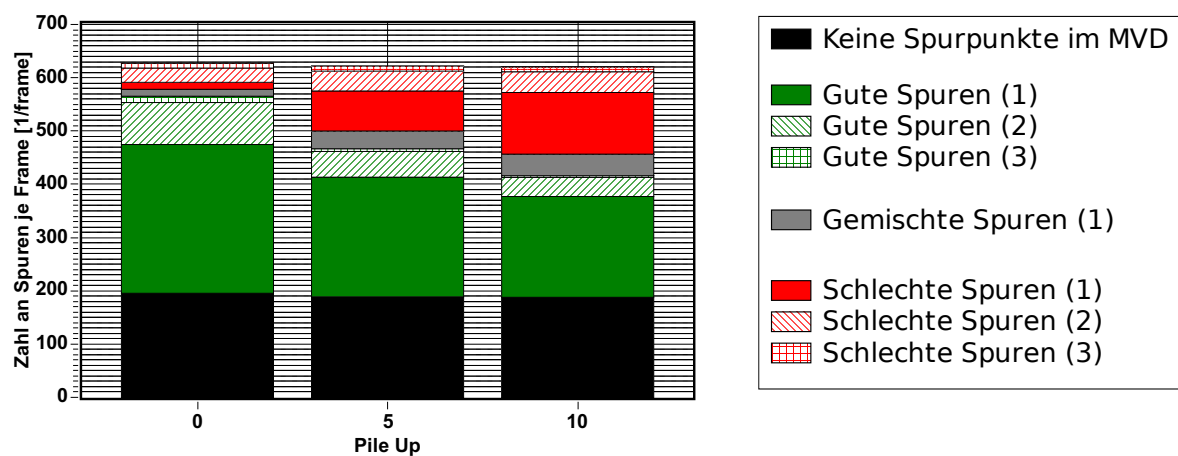


Abbildung 3.9: Zahl der rekonstruierten Untergrundspuren, aufgeschlüsselt nach Spurklassen, für verschiedene Pile Up-Szenarien.

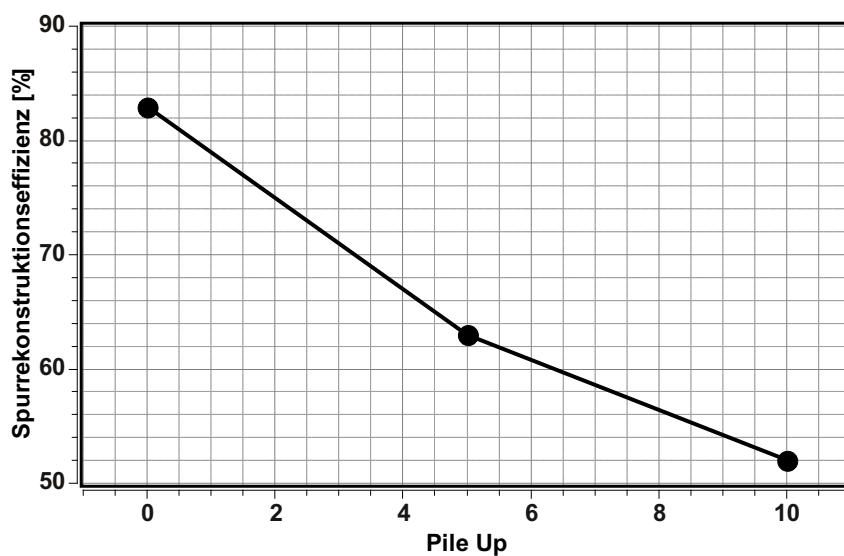


Abbildung 3.10: Spurrekonstruktionseffizienz für den MVD2 bei verschiedenen Pile Up-Szenarien. Hierbei ist die Spurrekonstruktionseffizienz als Prozentsatz der Zahl der rekonstruierten Untergrundspuren in den Spurklassen Gute Spuren (1) und Gute Spuren (2) definiert. Da die Fehlerbalken kleiner als die Datenpunkte sind, wurden diese nicht eingezeichnet.

3.4 Effizienz der Untergrundunterdrückung

Zu den primären Aufgaben des MVD gehört die Unterdrückung des Untergrundes im Rahmen der der Open-Charms Messung. Als Untergrund definiert werden Spuren, die von den in den Rekonstruktionsalgorithmen vorhandenen Auswahlverfahren irrtümlich als Open-Charms-Teilchen eingestuft wurden. Wie in Abschnitt 2.1.1 im Detail ausgeführt, werden in der Open-Charms-Analyse Auswahlverfahren auf Basis der Eigenschaften einzelner Spuren sowie solche auf Basis der Eigenschaften von Spurpaaren eingesetzt. Diese Arbeit beschränkt sich aus technischen Gründen auf die Betrachtung der Einzelspur-Auswahlverfahren. Hierbei handelt es sich insbesondere um ein Auswahlverfahren auf den Teilchenimpuls (typischerweise $p > 1 \text{ GeV}/c$ sowie $p_t > 0,3 \text{ GeV}/c$) und um ein Auswahlverfahren auf den Stoßparameter. Das Spurauswahlverfahren auf den Stoßparameter berücksichtigt die statistische Unsicherheit der Spurrekonstruktion σ_{IP} . Für den Stoßparameter einer Teilchenbahn r_{IP} wird typischerweise gefordert, dass

$$\frac{r_{IP}}{\sigma_{ip}} > 6,5 \quad (3.1)$$

Zusätzlich wurde ein weiteres Auswahlverfahren auf Stoßparameter angewandt $r_{IP} < 600 \mu\text{m}$.

Erfüllen Spuren diese Bedingungen, werden sie als Kandidat für ein Tochterteilchen eines Open-Charms-Zerfalls akzeptiert. Um eine effiziente Untergrundunterdrückung im Gesamtsystem zu gewährleisten, wurde die Unterdrückungseffizienz der Spurauswahlverfahren als Funktion der Spurklassen und des Pile Up studiert. Hierbei wird die Unterdrückungseffizienz P als die Zahl der korrekt verworfenen Spuren definiert. Die Wahrscheinlichkeit für ein irrtümliches Akzeptieren der rekonstruierten Spur liegt folglich bei $1 - P$. Die absolute Zahl der falsch akzeptierten Spuren je Frame aufgeschlüsselt nach Spurklassen ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

Insgesamt lässt sich beobachten, dass die Zahl der falsch akzeptierten Spuren durch höhere Trefferdichten zunimmt. Der größte Teil der nicht entfernten Untergrundspuren besitzen keinen Spurpunkt innerhalb des Mikro-Vertex-Detektors und kann durch einen zusätzlichen Auswahlverfahren leicht entfernt werden. Die restlichen der falsch akzeptierten Spuren bestehen hauptsächlich, aus solchen mit Rekonstruktionsfehler (Gemischte Spuren (1) und (Schlechte Spuren (1) bis Schlechte Spuren (3)). Korrekt rekonstruierte Spuren mit Verlusten durch geometrische Akzeptanz bzw. durch Detektorineffizienzen wurden fast vollständig (weniger als 0,1 Spuren je Frame) entfernt. Dies zeigt, dass eine schlechte Spurrekonstruktion, das dominierende Problem in der Untergrundunterdrückung ist.

Die Abhängigkeit der Unterdrückungseffizienz des MVD für die verschiedenen Spurklassen ist in Abbildung 3.12 für die drei Pile Up-Szenarien dargestellt. Die Unterdrückungseffizienz für Spuren der Spurklasse Gute Spuren (3) steigt als einzige für höhere Pile Up-Werten an. Dies lässt sich durch die verringerte Zahl an Spuren dieser Spurklasse vor den Auswahlverfahren bei

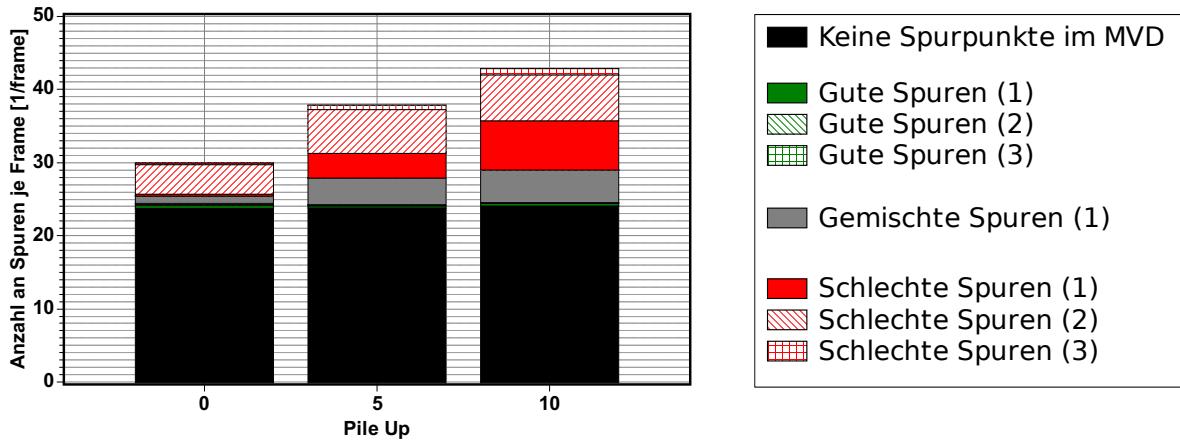


Abbildung 3.11: Von den Einzelspur-Auswahlverfahren nicht entfernten Untergrundspuren für verschiedene Pile Up-Szenarien bei dem verwendeten MVD2. Die Untergrundspuren sind dabei nach ihrer Spurklasse aufgeschlüsselt.

höheren Pile Up-Werten verstehen. Die Unterdrückungseffizienzen für die anderen Spurklassen sinken mit höheren Pile Up-Werte oder bleiben im Rahmen ihrer Fehler gleich.

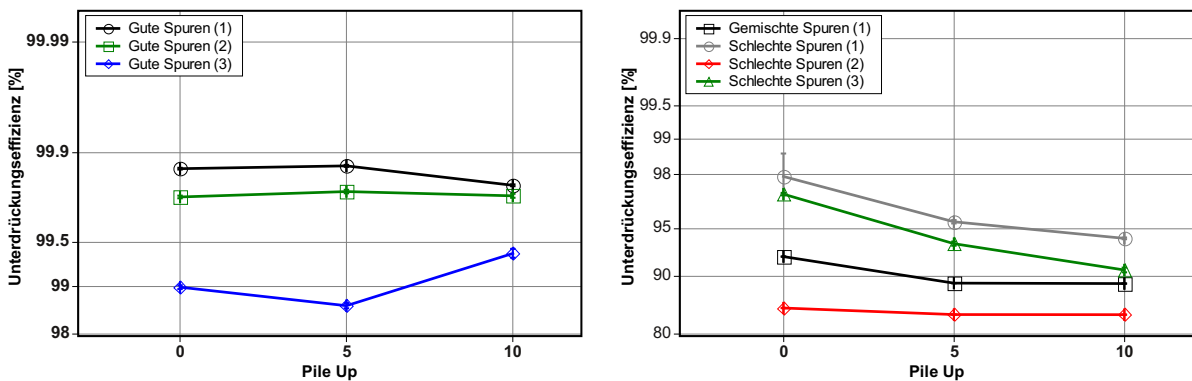


Abbildung 3.12: Unterdrückungseffizienzen der Untergrundspuren für verschiedenen Pile Up-Szenarien, aufgeschlüsselt nach den Spurklassen. Unterdrückungseffizienzen für Spurklassen ohne Rekonstruktionsfehler sind dabei links und die für Spurklassen mit Rekonstruktionsfehler rechts abgebildet.

Kapitel 4

Spurrekonstruktion mit zusätzlichen MVD-Stationen

In diesem Kapitel wird der Einfluss von weiteren MVD-Stationen auf die Spurrekonstruktion untersucht. Durch zusätzliche MVD-Stationen würde neben weiteren potentiellen Spurpunkten vor allem die Lücke zwischen MVD und STS verringert. Bei der Geometrie MVD2, welche im letzten Kapitel untersucht wurde beträgt diese 20 cm und ist damit sehr groß. Die beiden noch zu untersuchenden Geometrien MVD3 und MVD4 besitzen dagegen einen Abstand zwischen MVD und STS von 15 cm bzw. 10 cm. Ziel der Untersuchung war es zu prüfen, ob diese Verringerung des Abstandes die Zahl der falsch rekonstruierten Spuren verringern kann. Dabei wurde davon ausgegangen, dass durch den geringeren Abstand der Stationen der Spurkanus der Spurrekonstruktion (siehe Abschnitt 2.5) verkleinert wird, wodurch die Wahrscheinlichkeit sinkt, einen falschen Treffer innerhalb dieses Spurkanus aufzufassen.

4.1 Auswirkungen auf die Stoßparameterauflösung

Um die Auswirkungen von zusätzlichen MVD-Stationen auf die Stoßparameterauflösung für primäre Spuren zu untersuchen, wurden für die zwei weiteren MVD-Geometrien (MVD3 und MVD4) in der Tabelle 2.1 Simulationsstudien durchgeführt. Für jede dieser MVD-Geometrien wurde jeweils eine Simulationsstudie bei einem Pile Up von zehn durchgeführt und die Stoßparameterverteilung bestimmt. Analog zur Vorgehensweise im Abschnitt 3.1 wurden auch die Stoßparameterverteilungen für primäre Spuren im Fall eines abwesenden MVD sowie die für die Tochterteilchen von D^0 -Zerfällen im Fall eines MVD mit zwei Detektorstationen aufgetragen.

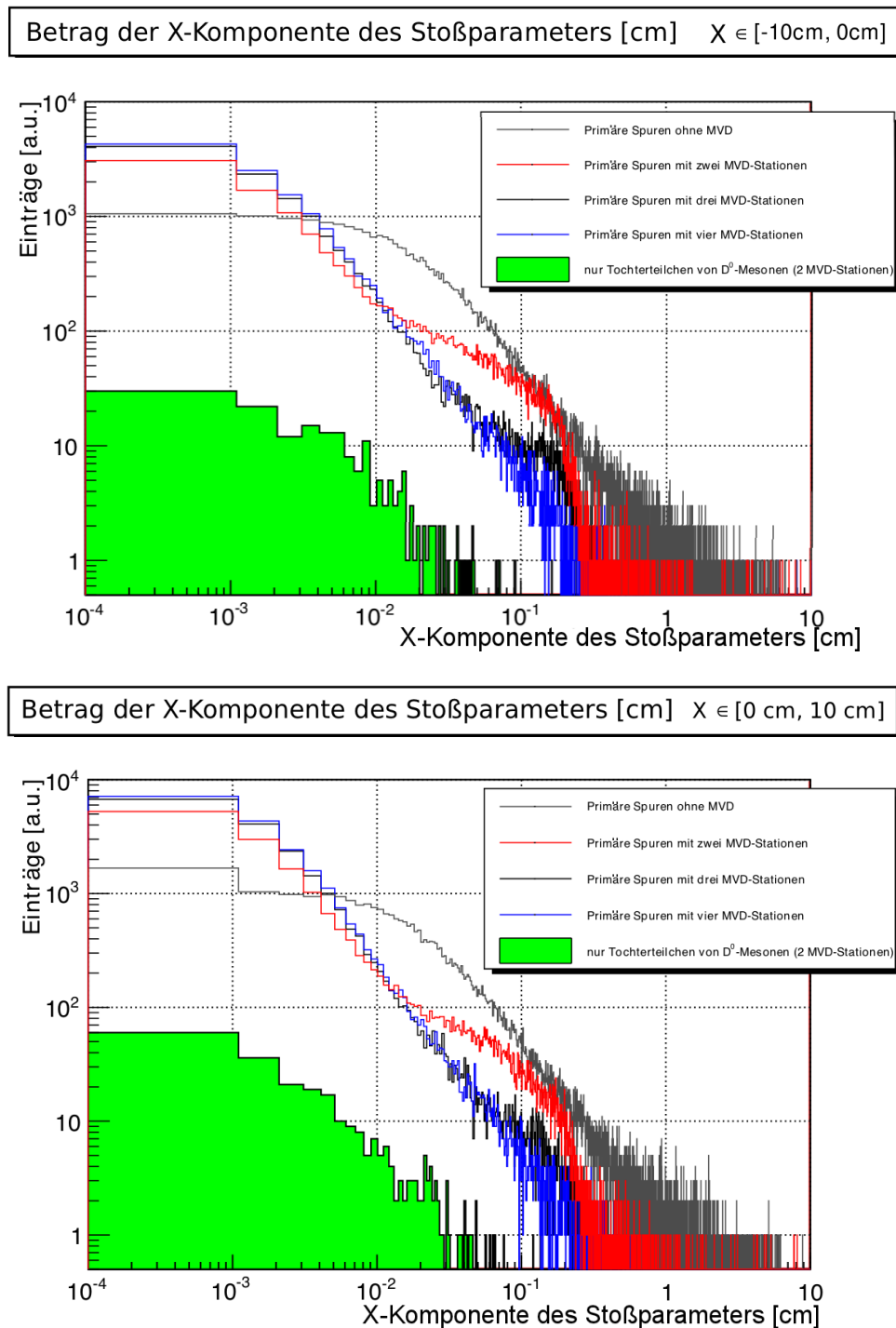
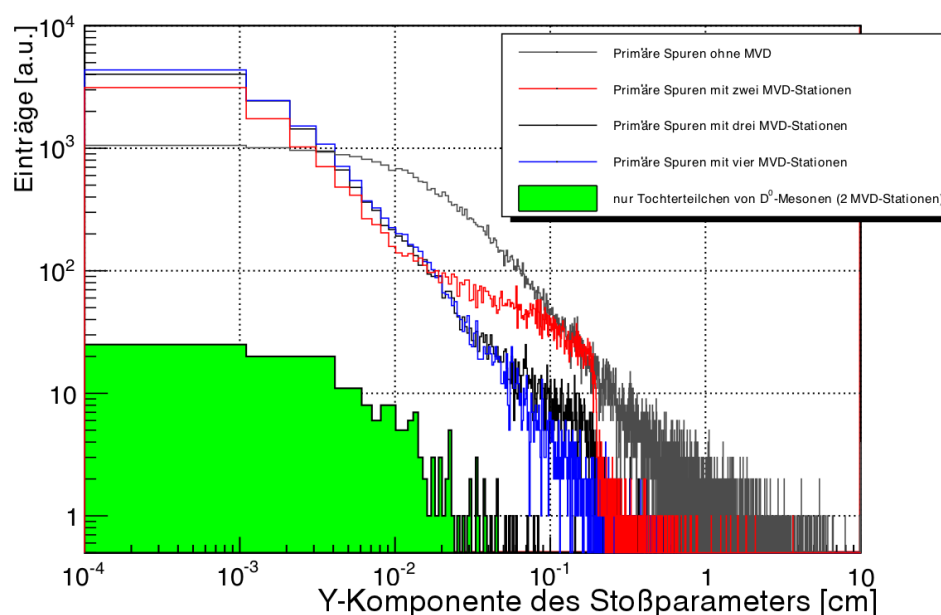


Abbildung 4.1: Verteilung der X-Komponente des Stoßparameters der rekonstruierten Untergrundspuren (ausschließlich primäre Spuren) für die MVD-Geometrien MVD2 (in rot), MVD3 (in schwarz), MVD4 (in blau). Diese drei Verteilungen beruhen auf Simulationen bei denen δ -Elektronen und ein Pile Up von zehn berücksichtigt wurden. Vervollständigt wird dies durch die Verteilung der X-Komponente des Stoßparameters für primäre Spuren bei dem kein MVD (in grau) vorhanden war und für die Verteilung Tochterteilchen von D^0 -Zerfälle (in grün) für den MVD2.

Betrag der Y-Komponente des Stoßparameters [cm] $y \in [-10 \text{ cm}, 0 \text{ cm}]$



Betrag der Y-Komponente des Stoßparameters [cm] $Y \in [0 \text{ cm}, 10 \text{ cm}]$

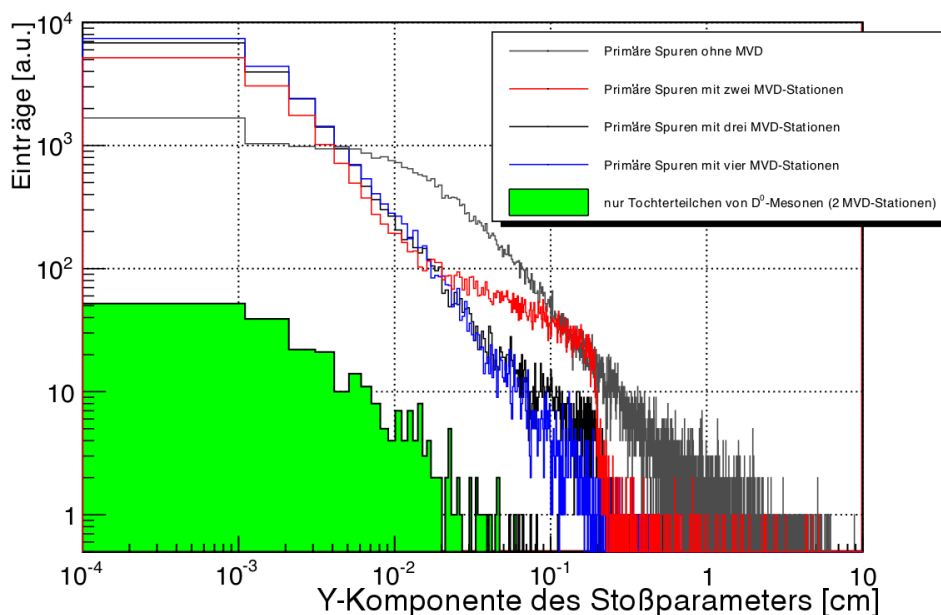


Abbildung 4.2: Verteilung der Y-Komponente des Stoßparameters der rekonstruierten Untergrundspuren (ausschließlich primäre Spuren) für die MVD-Geometrien MVD2 (in rot), MVD3 (in schwarz), MVD4 (in blau). Diese drei Verteilungen beruhen auf Simulationen bei denen δ -Elektronen und ein Pile Up von zehn berücksichtigt wurden. Vervollständigt wird dies durch die Verteilung der Y-Komponente des Stoßparameters für primäre Spuren bei dem kein MVD (in grau) vorhanden war und für die Verteilung Tochterteilchen von D^0 -Zerfälle (in grün) für den MVD2.

In Abbildung 4.1 sind jeweils die Verteilungen für positive und negative X-Komponenten des Stoßparameters abgebildet. Es ist zu erkennen, dass durch zusätzliche MVD-Stationen der in Abbildung 3.1 bereits beobachtete „Buckel“ (im Bereich zwischen $2 \cdot 10^{-2}$ cm und 1 cm) entfernt wird. Dies lässt sich sowohl für die positiven als auch für negativen Bereiche der auf die X- und die Y-Achse projizierten Stoßparameterverteilung feststellen. Aus Abschnitt 3.2.1 ist bekannt, dass bei einem MVD mit zwei Stationen nur schlecht rekonstruierte Spuren eine Breite in dem Bereich des „Buckel“ besitzen. Die Beobachtung liefert daher einen ersten Hinweis darauf, dass zusätzliche MVD-Stationen die Zahl von schlecht rekonstruierten Spuren reduzieren. Trotz des Fortschritts bleibt die Stoßparameterverteilung der Kaonen/Pionen vollständig in den anderen Verteilungen eingebettet. Ein Auswahlverfahren auf den Stoßparameter alleine ist daher unabhängig von der MVD-Geometrie nicht hinreichend, um D^0 -Zerfälle zweifelsfrei zu isolieren.

Anzahl MVD-Stationen	RMS (X) [μm]	RMS (Y) [μm]	Teilchen
-	3833 ± 11	3447 ± 10	primär
2	1687 ± 6	978 ± 3	primär
3	709 ± 3	526 ± 2	primär
4	851 ± 11	408 ± 9	primär
2	75 ± 6	78 ± 6	D^0

Tabelle 4.1: Die Breiten (RMS) der Verteilungen der X- bzw. Y-Komponente der Stoßparameter aus den Szenarien eins bis fünf ohne Spurauswahlverfahren. In der Spalte Teilchen ist vermerkt ob in der Simulation nur primäre Teilchen (Untergrundspuren) oder Tochterpartikel aus D^0 -Zerfälle berücksichtigt wurden.

4.2 Stoßparameterauflösung verschiedener Spurklassen

Aus dem vorherigen Abschnitt ist bekannt, dass durch zusätzliche MVD-Stationen die Zahl an Spuren mit größeren Stoßparameter verringert wird. Dies kann durch eine Änderung der Stoßparameterauflösung der einzelnen Spurklassen (siehe Abschnitt 3.2.1) oder durch eine Änderung der Zahl der Spuren in den verschiedenen Spurklassen verursacht sein. In diesem Abschnitt wird die erste der beiden Möglichkeiten geprüft. Hierfür werden die Breiten der Stoßparameterverteilungen der primären Spuren Spurklassen und der Anzahl der MVD-Stationen betrachtet. Diese Betrachtung wird für einen Pile Up von zehn vollzogen. Wie bereits in Abschnitt 3.1 werden die Ergebnisse mit der „natürlichen Breite“ der Pionen/Kaonen aus D^0 -Zerfällen gegenübergestellt.

Man erkennt, dass sich die Auflösung von Spuren der selben Spurklasse durch zusätzliche MVD-Stationen nicht mehr als um ca. einen Faktor zwei verändert. Ein systematischer Zusammenhang zwischen der Zahl der MVD-Stationen und den Abweichungen der Auflösung ist

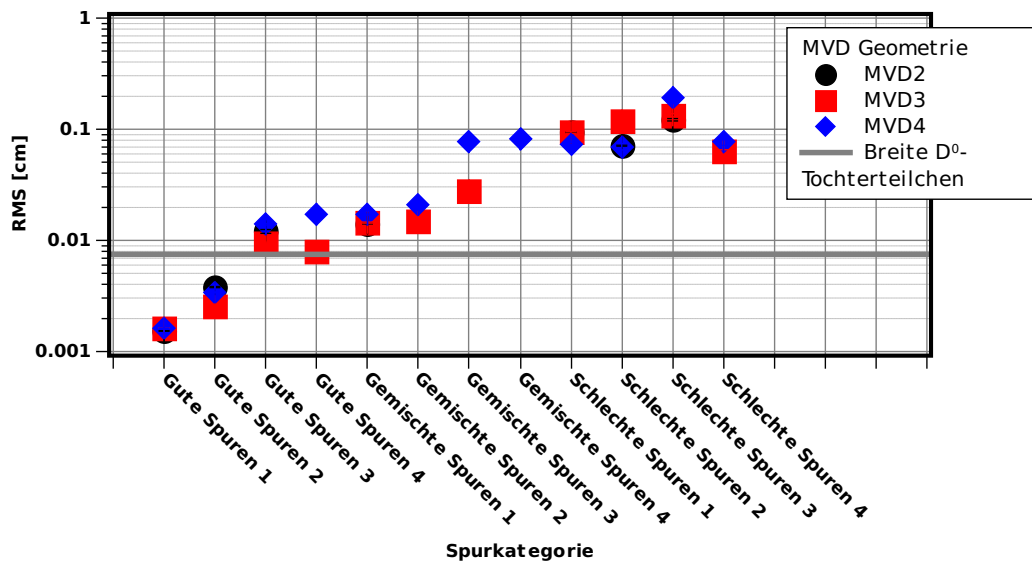


Abbildung 4.3: Breite der X-Komponente der Stoßparameterverteilung der unterschiedlichen Spurklassen bei einem Pile Up-Wert von zehn. Die benötigte Auflösung ist als graue Linie eingezeichnet.

nicht zu erkennen. Wie schon bei den im Abschnitt 3.2.1 gezeigten Ergebnissen, werden die größten Abweichungen bei Datenpunkte mit einer sehr geringen Statistik zu beobachtet. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Zahl MVD-Stationen und der Stoßparameterauflösung der verschiedenen Spurklassen kann deshalb nicht gezeigt werden. Aufgrund der beobachteten Schwankungen von bis zu einem Faktor zwei und der relativ geringen Statistik der Studie (100 Frames je Simulationsstudie), sollte ein schwacher Zusammenhang auch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Dennoch erscheint die Stoßparameterauflösung des Systems vorwiegend von der Rekonstruktionsgüte (Spurklasse) abhängig, während die Zahl der MVD-Stationen von nachgeordneter Bedeutung ist. Diese Schlussfolgerungen lassen sich uneingeschränkt auf die in Abbildung 4.4 gezeigten Y-Komponente der Stoßparameterverteilung übertragen.

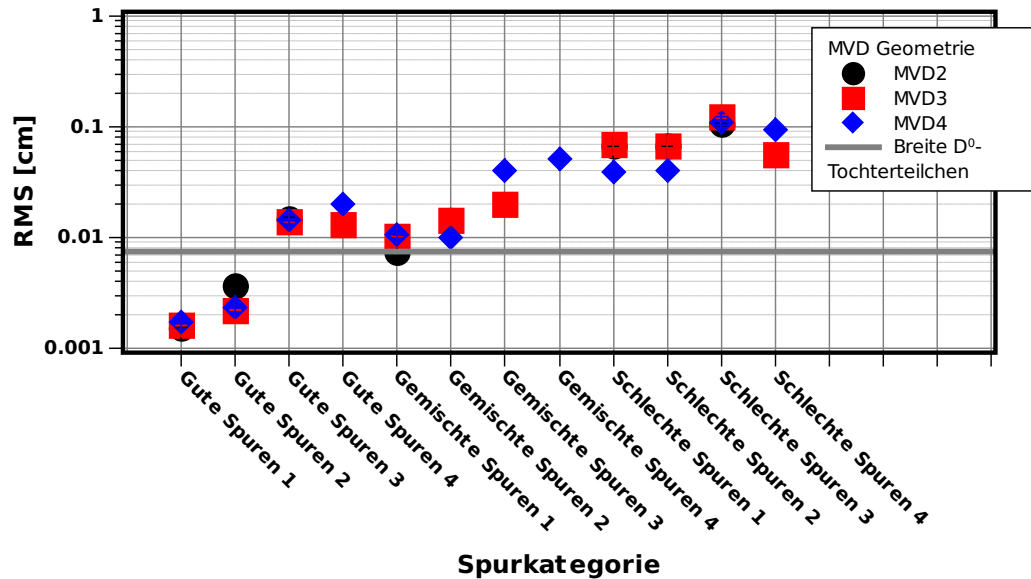


Abbildung 4.4: Breite der Y-Komponente der Stoßparameterverteilung der unterschiedlichen Spurklassen bei einem Pile Up Wert von zehn. Die benötigte Auflösung ist als graue Linie eingezeichnet.

4.3 Effizienz der Spurrekonstruktion

Da die Stoßparameterrauflösung der einzelnen Spurklassen nicht von der Zahl der vorhandenen MVD-Stationen abhängt, liegt es nahe, die beobachteten Verbesserungen der Auflösung in der Spurrekonstruktionseffizienz des Systems zu suchen. Um diese beurteilen zu können, wurden die rekonstruierten Untergrundspuren für verschiedene MVD-Geometrien und in Abhängigkeit vom Pile Up nach Spurklassen aufgeschlüsselt. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abbildung 4.5, einer Erweiterung der Abbildung 3.9, dargestellt. In dieser Abbildung finden sich insgesamt neun Balken gruppiert in drei Gruppen. Die Erste Gruppe zeigt die Zahl an rekonstruierten Spuren je Frame der verschiedenen Spurklassen für zwei, drei und vier MVD-Stationen bei Pile Up von null. Die zweite und dritte Gruppe zeigt die Daten für die drei unterschiedlichen MVD-Geometrien für die Pile Up-Werte von fünf und zehn. Die Zahl der Spuren ohne Treffer im MVD nimmt für die Simulation ohne Pile Up bei einer steigenden Zahl an MVD-Stationen leicht ab. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass manche Spuren, die ursprünglich einen sehr geringen Winkel relativ zum Strahl aufweisen, vom Magnetfeld in die geometrische Akzeptanz der hinteren MVD-Stationen gelenkt werden. Die Zahl der ideal rekonstruierten Spuren (Gute Spuren (1)) lässt sich offenbar bei geringen Trefferdichten nicht durch zusätzliche MVD-Stationen erhöhen. Die Zahl der unvollständig akzeptierten Spuren der Klasse Gute Spuren (2) nimmt hingegen durch Verwenden von drei anstatt zwei Stationen zu. Dies lässt sich auch für die

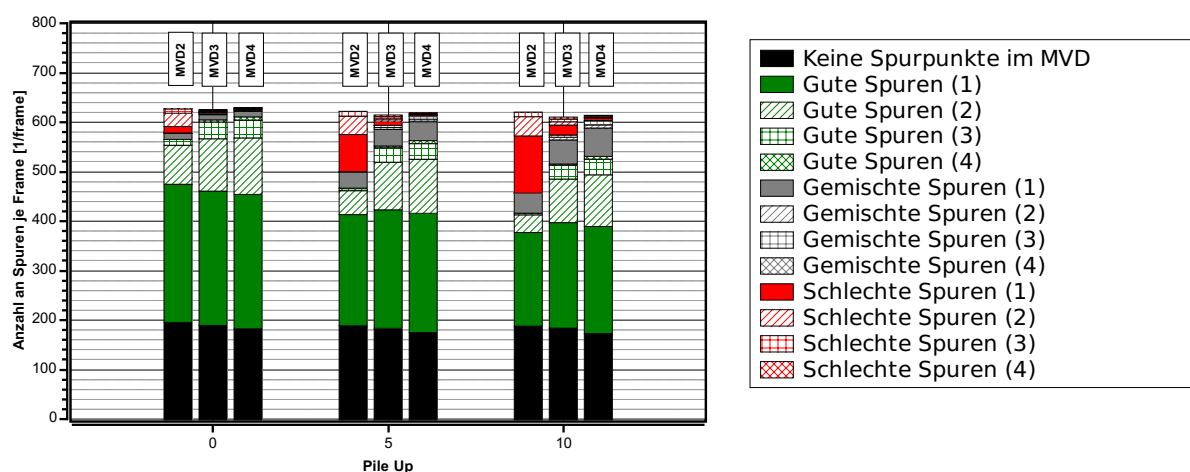


Abbildung 4.5: Zahl der pro Frame rekonstruierten Untergrundspuren für verschiedene Pile Up-Szenarien, aufgeschlüsselt nach Spurklasse.

Spuren mit nicht detektierten Treffern der Klasse Gute Spuren (3) beobachten. Diese Gewinne erfolgen praktisch ausschließlich auf Kosten der „schlechten Spuren“ sowie durch die bereits erwähnte leichte Steigerung der geometrischen Akzeptanz.

Diese restlichen Spuren sind vor allem die Gemischten Spuren (1), deren Zahl sich durch zusätzliche Stationen kaum verändern. Die im MVD mit zwei Stationen nicht definierten Spurklassen Gute Spuren (4), Gemischte Spuren (2) bis Gemischte Spuren (4) und Schlechte Spuren (4) treten generell nur in sehr geringer Zahl auf. Diese fünf Spurklassen beschreiben jeweils rekonstruierte Spuren, die Verluste durch die geometrische Akzeptanzabdeckung und Detektionsineffizienzen des MVD beinhalten und scheinen selbst bei hohen Trefferdichten eher die Ausnahme unter den rekonstruierten Spuren zu bilden. Insgesamt kann man daher festhalten, dass durch die zusätzlichen MVD-Stationen die vollständig falsche Rekonstruktion von Spuren im MVD deutlich unterdrückt wird. Die zusätzlichen Stationen sind jedoch nicht geeignet, die Zuordnung einzelner falscher Spurpunkte im MVD zu verhindern.

Bei steigendem Pile Up bleiben die beobachteten Trends erhalten. Jedoch nimmt die Zahl der Rekonstruktionsfehler erwartungsgemäß zu. Dies gilt insbesondere für den Fall der falsch rekonstruierten Spuren im MVD mit zwei Stationen. Bei einem Pile Up von zehn und zwei MVD-Stationen macht diese Gruppe über 35% aller rekonstruierten Spuren aus. Diese Zahl wird durch die Anwesenheit einer dritten MVD-Station auf 3% und keine vierte Station auf nahezu 0% reduziert.

In Abbildung 4.6 wurde die Rekonstruktionseffizienz der Spuren im MVD aufgetragen. Wie bereits in Abschnitt 3.4 wurden Spuren als erfolgreich Rekonstruiert betrachtet, sofern sie

den Spurkategorien Gute Spuren (1) oder Gute Spuren (2) zugeordnet werden können. In der linken Darstellung wird die Zahl der erfolgreich rekonstruierten Spuren in Relation zu den im MVD geometrisch akzeptierten Spuren dargestellt. Im rechten Diagramm wurde auf die Zahl der im STS rekonstruierten Spuren mit mindestens vier Spurpunkten normalisiert. Es ist zu erkennen, dass die erste zusätzliche Station die Rekonstruktionseffizienz bedeutend verbessert. Nach Hinzufügen der zweiten zus

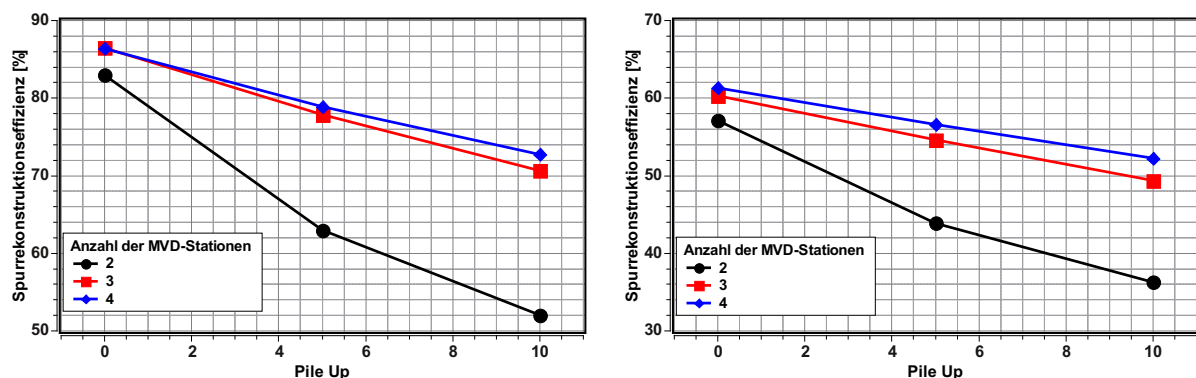


Abbildung 4.6: Spurrekonstruktionseffizienzen für die MVD-Geometrien bei verschiedenen Pile Up-Szenarien. Hierbei ist die Spurrekonstruktionseffizienz als Prozentsatz der Zahl der rekonstruierten Untergrundspuren in den Spurklassen Gute Spuren (1) und Gute Spuren (2) definiert. Auf der linken Seite der Darstellung wurden nur solche Untergrundspuren in Betracht gezogen, die im MVD mindestens einen Treffer besitzen, während auf der rechten Seite alle Untergrundspuren berücksichtigt wurden. Da die Fehlerbalken kleiner als die Datenpunkte sind, wurden diese nicht eingezeichnet.

4.4 Effizienz der Untergrundunterdrückung

Aus Abschnitt 3.3 ist bekannt, dass bei einem MVD mit zwei Stationen durch Anwendung der Einzelspur-Auswahlverfahren deutlich mehr als 99,5% der rekonstruierten Untergrundspuren in den Spurklassen Gute Spuren (1) oder Gute Spuren (2) erkannt und entfernt werden. Die Unterdrückung von Untergrundspuren in den verbleibenden Spurklassen der Gemischten Spuren (1) und Schlechte Spuren (1) bis Schlechte Spuren (3) lag im Bereich von etwa 80% bis 99,5%, was einer Steigerung der Zahl der falsch akzeptierten Spuren um ein bis zwei Größenordnungen entspricht. Aufgrund ihrer großen Zahl wurde der Löwenanteil der falsch akzeptierten Spuren von den rekonstruierten Spuren der Spurklassen Schlechte Spuren (1) bis Schlechte Spuren (3) gestellt. Da gerade die Zahl dieser Spuren durch zusätzliche MVD-Stationen deutlich reduziert wird, kann man dadurch erwarten, dass fast alle Untergrundspuren von den Einzelspur-

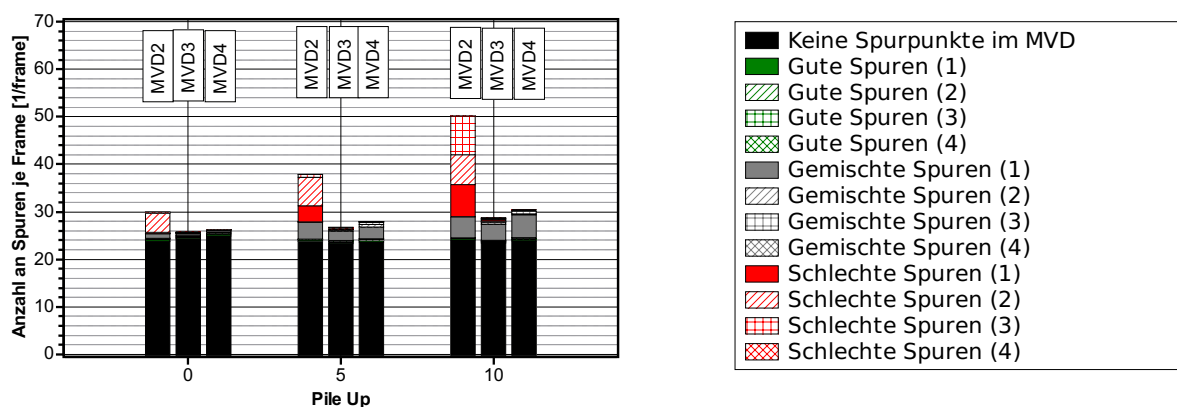


Abbildung 4.7: Anzahl der nicht durch die Einzelspur-Auswahlverfahren verworfenen Untergrundspuren für verschiedene MVD-Geometrien und Pile Up-Szenarien gezeigt.

Auswahlverfahren korrekt als solche erkannt und verworfen werden. Diese Annahme wird durch Abbildung 4.7 bestätigt, die die Zahl der Untergrundspuren der verschiedenen Spurklassen in den verschiedenen Szenarien bei verwendeten Einzelspur-Auswahlverfahren zeigt. Werden die Untergrundspuren ohne Treffer im MVD vernachlässigt, werden bei einem Pile Up von zehn und zwei MVD-Stationen ca. 25 Untergrundspuren je Frame falsch akzeptiert. Bei drei MVD-Stationen sinkt diese Zahl auf ca. vier und bei vier MVD-Stationen auf ca. fünf akzeptierte Untergrundspuren je Frame. Werden die noch verbliebenen Spuren analysiert, so zeigt sich das diese hauptsächlich aus Spuren der Klasse Gemischte Spuren (1) und kleineren Beiträgen anderer Spurklasse besteht. Diese Spuren lassen sich also weder durch die Einzelspur-Auswahlverfahren noch durch zusätzlich Stationen unterdrücken und stellen damit mutmaßlich die Untergrundquelle für die Open-Charm Rekonstruktion dar. Die größere Gruppe der Spuren ohne Treffer im MVD kann hingegen unmittelbar durch ein zusätzliches Auswahlverfahren beseitigt werden, welches überprüft, ob Spuren mindestens einen Treffer auf den MVD-Stationen besitzen.

Abbildung 4.8 zeigt diese Unterdrückungseffizienz für die verschiedenen Spurklassen ohne Rekonstruktionsfehler (links) und für die Spurklassen mit Rekonstruktionsfehler (rechts) in Abhängigkeit der Anzahl an MVD-Stationen. Es werden in beiden Graphen ausschließlich die sieben Spurklassen bei einem Pile Up von zehn verglichen, die bei allen drei MVD-Geometrien definiert sind.

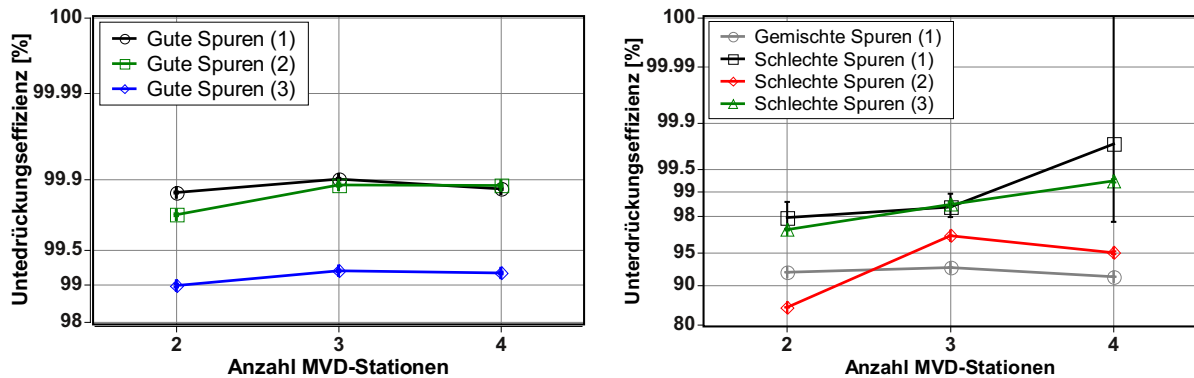


Abbildung 4.8: Gezeigt ist die Unterdrückungseffizienz der Untergrund-Spurklassen durch die vier Einzelspur-Auswahlverfahren für die unterschiedlichen MVD-Geometrien und einem festen Pile Up von zehn. Es werden ausschließlich die Daten der sieben Spurklassen gezeigt, die bei allen drei MVD-Geometrien definiert sind. Auf der linken Seite sind dabei die Werte der Spurklassen ohne Fehler und rechts die mit Fehler in der Spurrekonstruktion gezeigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der zentrale Vorteil an zusätzlichen Stationen in der Verbesserung der Spurrekonstruktionseffizienz. Dies hat zur Folge, dass bei zusätzlich berücksichtigten Einzelspur-Auswahlverfahren durch zwei weitere MVD-Stationen fast alle Untergrundspuren als solche erkannt und verworfen werden. Dieser Vorteil ist unabhängig vom Pile Up zu erkennen, kommt jedoch bei hohen Pile Up-Werten besonders zur Geltung. Damit ist gezeigt, dass sich die Leistungsfähigkeit des MVD durch den Einsatz von zusätzlichen Stationen deutlich verbessern lässt. Bei der Verwendung von zwei zusätzlichen MVD-Stationen besteht der verbleibende Untergrund hauptsächlich aus Spuren der Klasse Gemischte Spuren (1).

Kapitel 5

Zusammenfassung

Das CBM-Experiment an der zukünftigen FAIR Beschleunigeranlage zielt unter anderem darauf, Open-Charms-Teilchen zu rekonstruieren, die in Schwerionenkollisionen im Energiebereich von 10 bis 40 AGeV erzeugt werden. Ein für diese Teilchenrekonstruktion essentieller Detektor ist der Mikro-Vertex-Detektor (MVD).

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten für diesen Detektor werden regelmäßig Detektorsimulationen durchgeführt. Bei einer dieser Simulationen [CAD11], wurden nach Einführung eines verbesserten Simulationsmodells des Detektors, Einbrüche in Rekonstruktionseffizienz für Open-Charms-Teilchen festgestellt. Als mögliche Ursache wurde eine Überlastung der Software für die Spurrekonstruktion von CBM vermutet, die erstmals mit realistischen Trefferdichten auf den MVD-Stationen konfrontiert war. Zusätzlich wurde in der Simulation die Geometrie eines MVD mit nur zwei Detektorebenen verwendet. Auch der durch die kleine Anzahl an MVD-Stationen große Abstand zwischen MVD und STS (Silicon-Tracking-System) und dessen potentiell ungünstiger Einfluss auf die Spurrekonstruktion konnte als Ursache für den beobachteten Einbruch der Rekonstruktionseffizienz nicht ausgeschlossen werden.

Die Aufgabe dieser Arbeit bestand in der Prüfung, ob der beobachtete Einbruch der Rekonstruktionseffizienz des Detektorsystems tatsächlich auf eine Überlastung der Spurrekonstruktionssoftware zurückzuführen ist. Darüber hinaus sollte festgestellt werden, ob mögliche konstruktive Verbesserungen im MVD (zusätzliche Detektorstationen) diesem Effekt entgegen wirken können.

Für die erste Aufgabe musste ein Kriterium für die erfolgreiche Spurrekonstruktion definiert werden. Hierbei war zu berücksichtigen, dass neben einer idealen auch eine unvollständige bzw. verfälschte Spurrekonstruktion für die angestrebten Messungen hinreichend sein kann. Für die Erarbeitung dieses Kriteriums, wurden rekonstruierten Spuren in Gruppen (sogenannte Spurklassen) eingeteilt. Grundlage für die Einteilung der rekonstruierten Spuren in diese Spurklassen war

der Erfolg der Spurrekonstruktionssoftware bei der Zuordnung der im MVD registrierten Treffer. Hierbei wurden die Treffer in die Kategorien „richtig“, „falsch“ oder nicht zugeordnet eingestuft. Im letzteren Fall wurde zusätzlich der Grund für die nicht erfolgte Zuordnung berücksichtigt: Es wurde zwischen nicht vorhandenen Treffern aufgrund unzureichender geometrische Akzeptanz des Detektors und nicht detektierten Treffern (Detektorineffizienzen) differenziert. Für die Einstufung der zugeordneten Treffer in richtig, falsch oder verloren (aus beiden Gründen) war möglich, da im Simulationsprozess die Identität des ursächlichen Teilchens sowohl in der rekonstruierten Spur als auch in den Treffern gespeichert wird. Wurde ein erwarteter Spurpunkt nicht aufgefunden, wurde die Teilchenspur auf die entsprechende MVD-Station extrapoliert. Durchlief die Teilchenspur die geometrischen Akzeptanz der entsprechenden Detektorstation, wurde auf einen Verlust durch eine Detektorineffizienz geschlossen.

Nachfolgend wurde die Stoßparameterauflösung für jede Spurklasse separat ermittelt und mit der Breite der Stoßparameterverteilung der Zerfallsprodukte von D^0 -Mesonen verglichen. Es zeigte sich, dass nur ideal rekonstruierte Spuren sowie Spuren mit leichten Verlusten durch unzureichende geometrische Akzeptanz des Detektors diese Verteilung auflösen können. Da das Auflösen der Verteilung für die Teilchenrekonstruktion notwendig ist, bzw. trotz Anwendung zusätzlicher Spurauswahlverfahren im Rekonstruktionsprozess erstrebenswert bleibt, wurden nur diese beiden Spurklassen als hinreichend gut rekonstruiert betrachtet. Alle anderen Spuren wurden als „nicht rekonstruiert“ eingestuft.

Bei der Betrachtung der Rekonstruktionseffizienz mit einem MVD mit zwei Stationen wurde festgestellt, dass die geometrische Akzeptanz bei ungefähr 70% der im STS rekonstruierten Spuren liegt. Die Rekonstruktionseffizienz der Spurrekonstruktionssoftware im MVD, bei einem Pile Up von zehn, liegt bei 52% und bei einer zeitlich eindeutig aufgelösten Kollisionen (Pile Up von null) lediglich bei 83% der im MVD geometrisch akzeptierten Spuren. Der überwiegende Anteil der unzureichend rekonstruierten Spuren sind „Geisterspuren“, denen im MVD kein einziger richtiger Treffer zugeordnet wurde. Die Unterdrückungseffizienz der Untergrundspuren, durch die in CBM verwendeten Auswahlverfahren für Einzelspuren, zeigte eine Abhängigkeit von der konkreten Spurklasse und vom Pile Up. Gut rekonstruierte Untergrundspuren werden mit einer Effizienz von besser als 99.5% unterdrückt und fallen daher nach Anwendung der Auswahlverfahren nicht mehr ins Gewicht. Die Unterdrückungseffizienz des Detektors für die zahlreichen unzureichend rekonstruierten Spuren liegt mit ca. 90% deutlich schlechter, wodurch die Wahrscheinlichkeit, dass eine solche Spur falsch akzeptiert wird um mehr als eine Größenordnung steigt. Hierdurch entsteht ein bedeutender Untergrund, der als Ursache für den in [CAD11] beobachteten Einbruch der Rekonstruktionseffizienz der D^0 -Mesonen ist.

Wie bereits erwähnt handelt es sich beim größten Teil der unzureichend rekonstruierten Spuren im MVD um Geisterspuren, denen kein korrekter Punkt zugeordnet wurde. Eine naheliegende Ursache hierfür besteht darin, dass der Rekonstruktionsalgorithmus daran scheitert, die im STS rekonstruierten Spuren über den weiten Abstand von 20 cm (bei einem MVD mit zwei

Detektorstationen) in den MVD zu extrapolieren und nachfolgend zwei mehr oder weniger plausible MVD-Treffer zuordnen. Stimmt diese Vermutung, müsste sich dieses Problem durch eine Verkürzung der Extrapolationsstrecke mittels der Installation von zusätzliche Detektorstationen zwischen dem MVD und STS verbessern lassen. Dabei sollte es sich um Pixeldetektorstationen (MVD-Stationen) handeln, da nur diese über die benötigte Granularität verfügen.

Um die Wirksamkeit dieses Vorgehens zu beurteilen war es notwendig, zusätzliche MVD-Geometrien mit drei und vier Detektorstationen zu entwerfen. Bei diesen Ergänzungen wurden die Parameter der schon bestehenden Stationen nicht verändert. Dadurch konnten Veränderungen in der Spurrekonstruktion direkt auf die veränderte Zahl der Detektorstationen und den verringerten Abstand zwischen MVD und STS zurück geführt werden.

Für beide neue MVD-Geometrien wurden die am ursprünglichen MVD durchgeführten Studien wiederholt und mit den vorherigen Ergebnissen verglichen. Für die Stoßparameterrauflösung der Spuren innerhalb der verschiedenen Spurklassen konnte keine systematische Abhängigkeit von der MVD-Geometrie nachgewiesen werden. Hingegen stieg die Spurrekonstruktionseffizienz, bezüglich der im MVD geometrische akzeptierten Spuren, deutlich von 83% auf 85% (bei einem Pile Up von null) bzw. von 52% auf 71% (Pile Up von zehn), während die Zahl der Geisterspuren deutlich abnahm. Die Unterdrückungseffizienz für die einzelnen Spurklassen durch die Spurauswahlverfahren erwies sich als weitgehend unabhängig von der Zahl der MVD-Stationen. Die verringerte Zahl an unzureichend rekonstruierten Untergrundspuren führte zu einer Verkleinerung der nicht entfernten Untergrundspuren je Frame. Diese sank von ca. 25 Spuren je Frame für einen MVD mit zwei Stationen auf ca. 8 Spuren je Frame für einen MVD mit vier Stationen. Hervorzuheben ist, dass der Beitrag der Geisterspuren zu diesem Untergrund durch Einführung der zusätzlichen Stationen praktisch eliminiert wurde.

Beim verbleibenden Untergrund handelt es sich vorwiegend um Spuren mit einzelnen falsch zugeordneten Treffern. Die Zahl dieser Rekonstruktionsfehler wurden von den zusätzlichen MVD-Stationen kaum beeinflusst. Die Ursache dieser Rekonstruktionsfehler, die Natur und Wirksamkeit möglicher Gegenmaßnahmen konnten aus Zeitgründen in dieser Arbeit nicht mehr geklärt werden.

Schlussfolgerung und Ausblick

Der verwendete MVD mit zwei Detektorstationen zeigte bedeutende Schwächen im Hinblick auf die Spurrekonstruktion. Es liegt nahe, diese mit den beobachteten Performance-Problemen in [CAD11] in Zusammenhang zu bringen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Erweiterung der MVD-Geometrie (mit zwei Detektorstationen) um mindestens eine zusätzliche Station und der damit verkürzte Abstand zwischen MVD und STS eine deutlich effizientere Untergrundunterdrückung zur Folge hat. Weitere Studien sollten den Einfluss von zusätzlichen Detektorstationen und einem verkleinerten Abstand zwischen MVD und STS unabhängig voneinander untersuchen.

Anhang A

Anhang

A.1 Anforderungen an einen Mikro-Vertex-Detektor

Die Position, Ortsauflösungen der einzelnen Detektorebenen sowie das Magnetfeld sind neben der Vielfachstreuung die ausschlaggebenden Größen in der Bestimmung des Stoßparameters. Diese Größe kommt einer besonderen Bedeutung bei, da sie einerseits als Kriterium von zwei der vier Einzelspur-Auswahlverfahren verwendet wird und andererseits da sie hauptsächlich durch den Mikro-Vertex-Detektor rekonstruiert wird. In diesem Abschnitt soll daher die Auflösung dieser Größe an einem einfachen Beispiel berechnet werden. Hierfür wird eine MVD-Geometrie mit zwei Stationen bei $z_1 = 5$ cm und $z_2 = 10$ cm verwendet, die somit die Ortskoordinaten (y_1, z_1) und (y'_2, z_2) liefern. Die Positionen der Detektorstationen werden als beliebig genau bekannt angenommen (Alignment), sodass nur die Ortsinformationen auf den Stationen mit den Fehlern $(\Delta y_1, 0)$ und $(\Delta y_2, 0)$ behaftet sind. Auf der ersten Station wird zudem das Auftreten von Vielfachstreuung um den Winkel $\theta_{Vielfach}$ berücksichtigt. Ein Magnetfeld wird in dieser Rechnung vernachlässigt. Dieses Beispiel ist in Abbildung A.1 gezeigt. Da die Teilchenspur ohne Magnetfeld geradlinig ist, lässt sich diese durch die Formel A.1 beschreiben. Damit lässt sich die folgende Gleichung aufstellen

$$y(z) = \frac{y'_2 - y_1}{z_2 - z_1} \cdot (z - z_1) + y_1 \quad (\text{A.1})$$

Durch die Vielfachstreuung wird der Treffer auf der zweiten Station allerdings nicht bei y'_2, z_2 , sondern bei y_2, z_2 erwartet. Wird berücksichtigt, dass der MVD später nur die Treffer y_1, z_1 und y_2, z_2 liefert und integriert es in die Gleichung, so ergibt sich:

$$y(z) = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \cdot [y_2 - (z_2 - z_1) \cdot [\tan(\Delta\theta_{Vielfach} + \alpha) - \tan(\alpha)] - y_1] + y_1 \quad (\text{A.2})$$

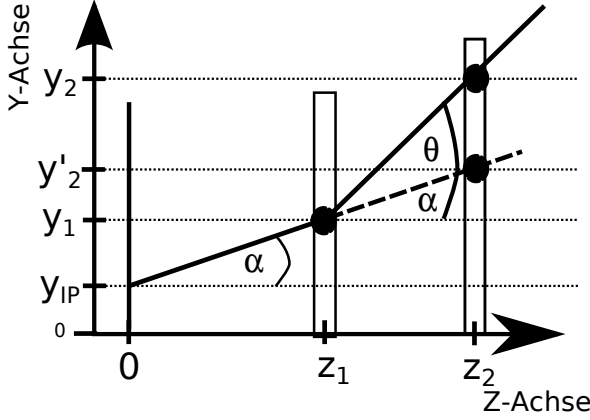


Abbildung A.1: Skizze zur Bestimmung der Auflösung für den Stoßparameter y_{IP} . In der Abbildungen sind zwei MVD-Stationen (Rechtecke) sowie die tatsächliche (durchgezogene Linie) und die extrapolierte (gestrichelte Linie) Flugbahn eines Teilchens eingezeichnet. Als Fehlerquellen werden die Ortspositionen auf den Stationen sowie das Auftreten von Vielfachstreuung in der ersten Stationen berücksichtigt. Der Detektor liefert die Koordinaten (z_1, y_1) und (z_2, y_2) . Dabei wird noch die Vielfachstreuung in der ersten Station berücksichtigt, sodass die Koordinate y'_2 bestimmt wird.

Der Stoßparameter dieser Spur ergibt sich per Definition auf der Targetebene ($z = 0$ cm)

$$y_{IP} = -\frac{z_1}{z_2 - z_1} \cdot [y_2 - (z_2 - z_1) \cdot [\tan(\Delta\theta_{Vielfach} + \alpha) - \tan(\alpha)] - y_1] + y_1 \quad (\text{A.3})$$

Damit ist der Wert des Stoßparameters bekannt. Dessen Fehler lässt sich nun mittels Gauß'scher Fehlerfortpflanzung über Gleichung A.4 berechnen.

$$\Delta y_{IP} = \sqrt{\left(\frac{\partial y_{IP}}{\partial y_1} \cdot \Delta y_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y_{IP}}{\partial y_2} \cdot \Delta y_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y_{IP}}{\partial \theta_{Vielfach}} \cdot \theta_{MSC}\right)^2} \quad (\text{A.4})$$

$$(\Delta y_{IP})^2 = \frac{z_2^2 \cdot (\Delta y_1)^2 + z_1^2 \cdot (\Delta y_2)^2}{(z_2 - z_1)^2} + \frac{z_1^2 \cdot (\Delta\theta_{Vielfach})^2}{\cos^4 \Delta\theta_{Vielfach}} \quad (\text{A.5})$$

Mit dieser Formel lässt sich die Auflösung des Stoßparameters in Abhängigkeit der Auflösungen der Sensoren, der Geometrie sowie der Vielfachstreuung berechnen. Für die Auflösung der Sensoren wird ein Wert von $5 \mu\text{m}$ [DAD⁺09] und für die Positionen der Stationen die Werte $z_1 = 5$ cm, $z_2 = 10$ cm gewählt. Die Größe des Ablenkungswinkels durch die Vielfachstreuung lässt sich durch Formel A.6 berechnen. In dieser Formel gehen der Impuls p eines Teilchens, das Materialbudget x , sowie die Strahlungslänge X_0 ein. Die Bestimmung der Strahlungslänge gelingt durch Gleichung A.7. Dort fließen die Kernladungszahl Z und die Massenzahl A des Materials der Detektorstation ein (Silizium). Damit lässt sich die Auflösung des Stoßparameters berechnen.

$$\theta_{MSC} = \frac{15 \text{ MeV}}{pc} \cdot \sqrt{\frac{x}{X_0}} \quad (\text{A.6})$$

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ gcm}^{-2} \cdot A}{Z \cdot (Z + 1) \left[\ln\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right) \right]} \quad (\text{A.7})$$

Größe	Formelzeichen	Wert
Sensorauflösung	$\Delta y_1, \Delta y_2$	5 μm
Position erste Station	z_1	5 cm
Position zweite Station	z_2	10 cm
Materialbudget	x	0.5% $\cdot X_0$
Streuwinkel	$\Delta\theta_{MSC}$	$1.06066 \cdot 10^{-3^\circ}$

Tabelle A.1: Die für die Berechnung der Auflösung des Stoßparameters verwendeten Größen mit Zahlenwerten.

Mit den in Tabelle A.1 noch einmal zusammengefassten Werte ergibt sich eine Auflösung von 55.11 μm für den Stoßparameter.

A.2 Zeitbedarf in den Rekonstruktionsimulationen

Für die Spurrekonstruktion wurde in dieser Arbeit der L1 CA Algorithmus verwendet. Es stellte sich heraus, dass dieser für simulierte MVD-Stationen mit hohen Pile Up-Werten hohe Rechenzeiten benötigt. Die benötigten Rechenzeiten für die Spurrekonstruktion sind für verschiedenen Simulationsszenarien in Abbildung A.2 als Funktion des verwendeten Pile Ups eingetragen. Des Weiteren sind dort die Daten für MVD-Geometrien mit unterschiedlicher Zahl an MVD-Stationen sowie für unterschiedliche CBMRoot-Versionen berücksichtigt.

Die Rechenzeit für die Rekonstruktion steigt mit höherem Pile Up und zusätzlichen MVD-Stationen an. Die größte beobachtete Rechenzeit kam bei einem Pile Up 10 und drei MVD-Stationen zustande. Dort betrug die Rechenzeit annähernd eine Stunde je Frame. Diese hohe Rechenzeiten stellen nicht nur für diese Arbeit ein Zeitproblem dar, so dass sich mittlerweile ein alternativer Rekonstruktionsalgorithmus LIT-Track [LOJ08] etabliert.

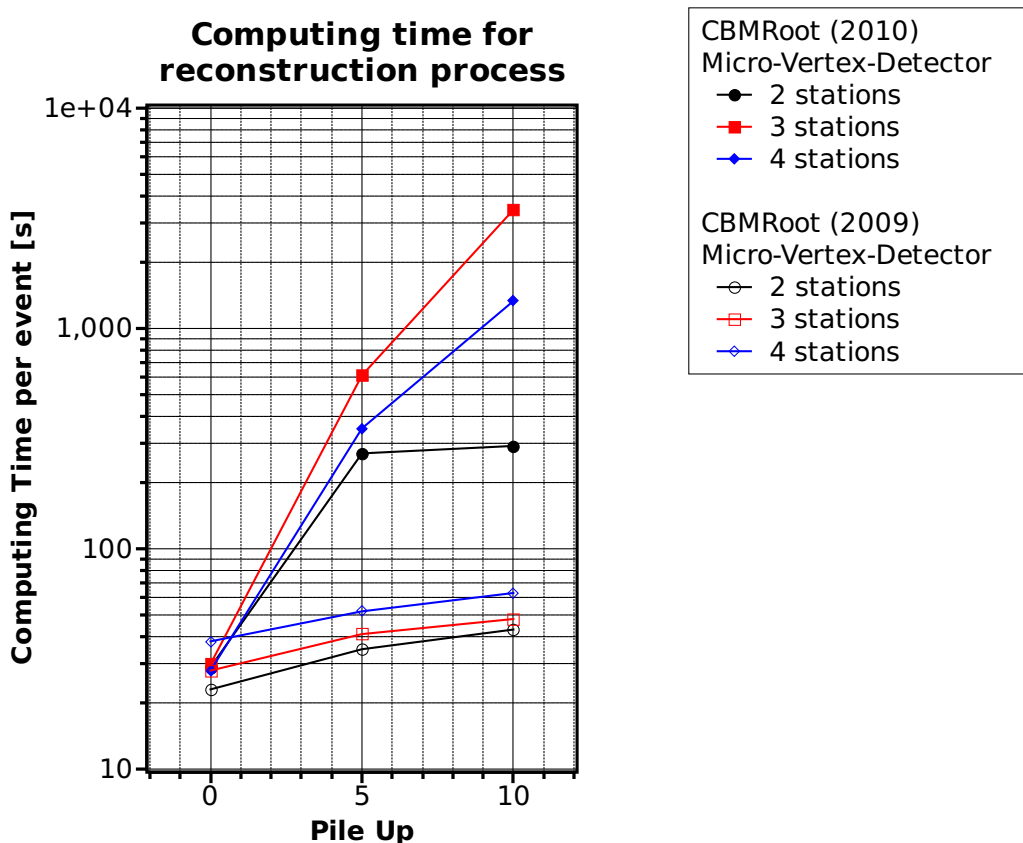


Abbildung A.2: Es ist die benötigte Rechenzeit pro Frame für die Rekonstruktion von Teilchenspuren für verschiedene Pile Up-Szenarien, MVD-Geometrien und CBMRoot-Versionen gezeigt. Es wurde immer der offizielle L1 CA-Algorithmus verwendet.

A.3 Ortsverteilung der richtig/falsch zugefügten Treffer

Es wurde vermutet, dass im Bereich der Auftrefforte der δ -Elektronen auf den MVD-Stationen überproportional viele Treffer falsch zugewiesen werden. Hierfür spricht die erhöhte Trefferdichte und dessen Effekt auf die Spurrekonstruktion.

In Abbildung A.3 sind für ein Pile Up von 0 für die erste (erste Zeile) und zweite (zweite Zeile) MVD-Station die Positionen der richtig (linke Spalte) und falsch (rechte Spalte) zugefügten Treffer auf den Stationen gezeigt. Der Bereich in dem die δ -Elektronen auftreffen befindet sich dabei auf der linken Detektorstation. Für die erste Station ist zu erkennen, dass richtig zugeordnete Treffer gleichmäßig über die gesamte Station verteilt sind. Falsch zugefügte Treffer sind hingegen besonders auf der linken Seite der Detektorebene zu finden. Da es bei geringen Trefferdichten auch nicht viele falsch zugefügte Treffer gibt, ist es nicht überraschend, dass richtig zugeordnete Treffer gleichmäßig verteilt sind. Das lässt sich auch für die zweite Station erkennen (zweite Zeile).

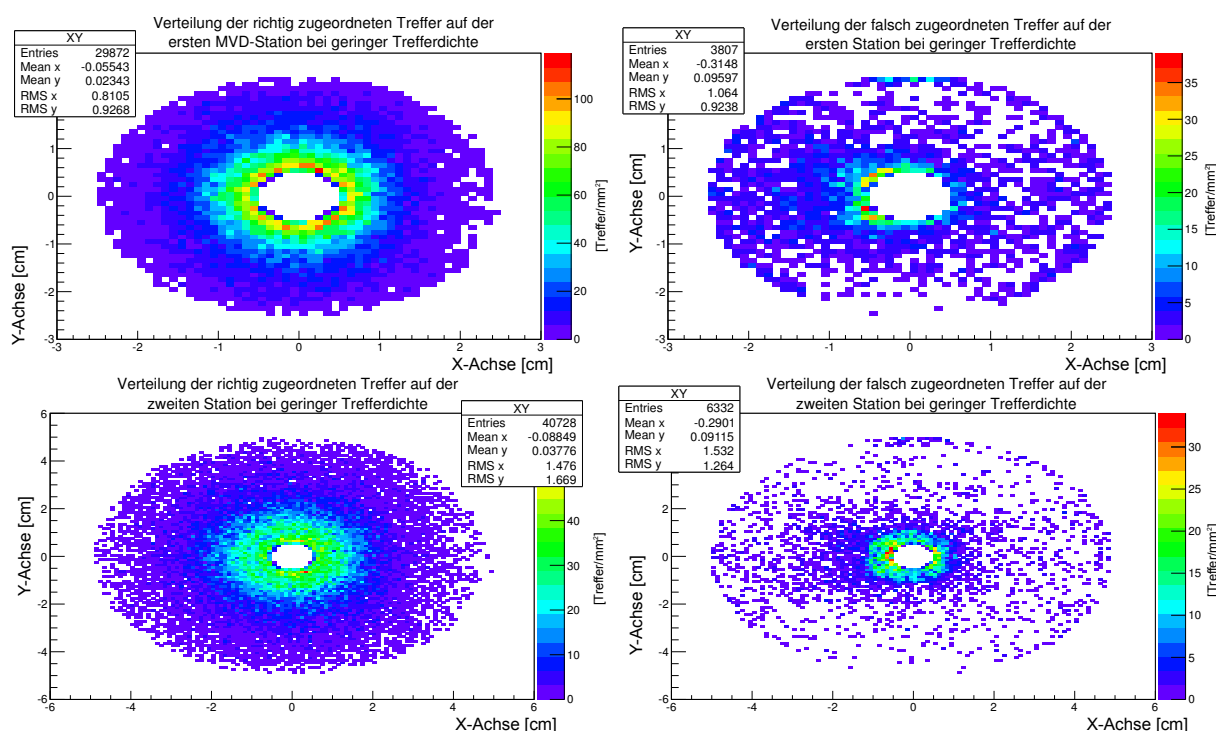


Abbildung A.3: Ortsverteilung der richtig und falsch zugefügten Treffer auf den MVD-Stationen bei geringer Trefferdichte (Pile Up 0). Die vier Histogramme sind in zwei Spalten mit zwei Reihen angeordnet. In der linken Spalten sind die Ortsverteilungen der richtig zugeordneten Treffer und in der rechten Spalte die Ortsverteilungen der falsch zugefügten Treffer aufgelistet. Die Ortsverteilungen auf der ersten MVD-Station ($z = 5$ cm) befinden sich dabei in der oberen und die auf der zweiten MVD-Station ($z = 10$ cm) in der unteren Zeile.

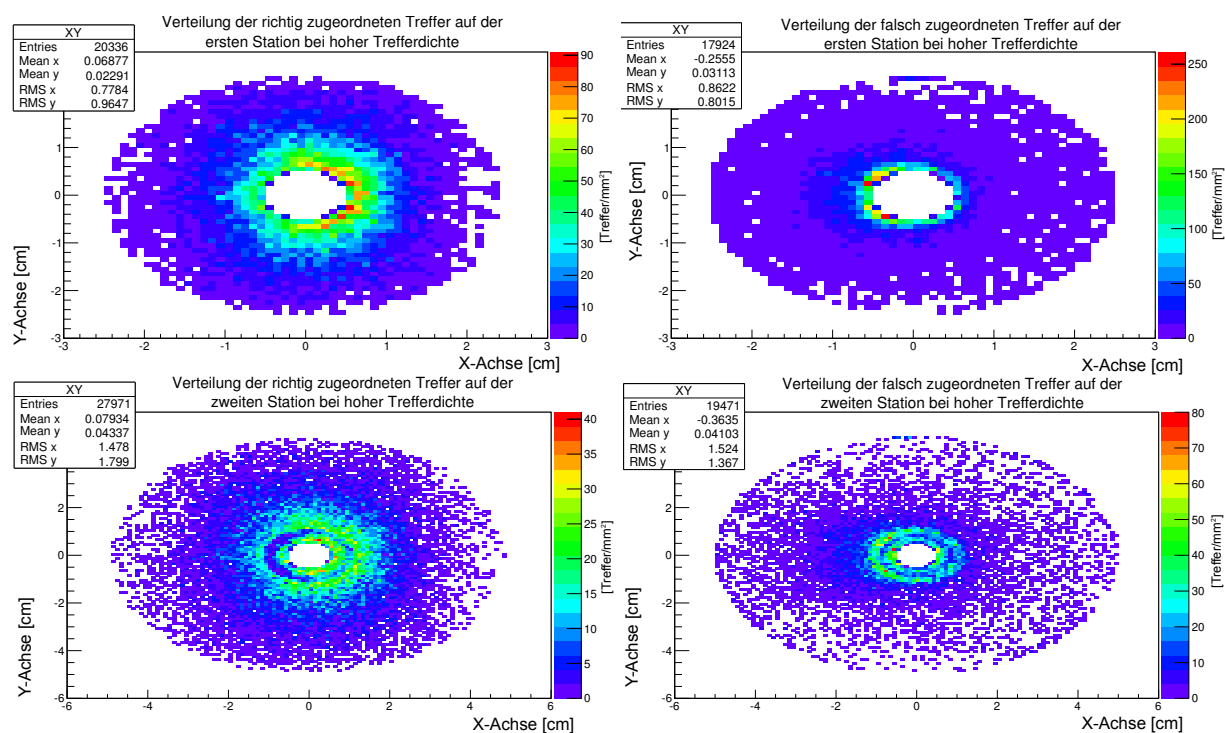


Abbildung A.4: Ortsverteilung der richtig und falsch zugefügten Treffer auf den MVD-Stationen bei hoher Trefferdichte (Pile Up 10). Die vier Histogramme sind in zwei Spalten mit zwei Reihen angeordnet. In der linken Spalten sind die Ortsverteilungen der richtig zugeordneten Treffer und in der rechten Spalte die Ortsverteilungen der falsch zugefügten Treffer aufgelistet. Die Ortsverteilungen auf der ersten MVD-Station ($z = 5$ cm) befinden sich dabei in der oberen und die auf der zweiten MVD-Station ($z = 10$ cm) in der unteren Zeile.

Zumindest für die falsch zugefügten Treffer lässt sich aber erkennen, dass die Vermutung durch die Verteilung gestützt wird. In Abbildung A.4 werden nun die Positionen für die richtig/falsch zugefügten Treffer bei einer hohen Trefferdichte untersucht. Es ist zu erwarten, dass sich durch die größere Zahl an falsch zugefügten Treffern hier eine Ortsabhängigkeit in der Verteilung der richtig zugefügten Treffern ergibt. Dass diese Erwartung erfüllt wird, verrät ein Blick auf die Abbildung A.4 oben links, wo die Verteilung der richtig zugefügten Treffer zu sehen sind. Diese Verteilung ist unsymmetrisch und auf der rechten Seite der Station verschoben. Die Verteilung der falsch zugefügten (oben rechts) Treffer ist wiederum asymmetrisch und nach links verschoben. Interessant wird es bei einem Blick in die zweite Zeile, in der die Verteilung der richtig/falsch zugefügten Treffer auf der zweiten Station dargestellt sind. Dort lassen sich zwar auch die asymmetrischen Verteilungen erkennen, jedoch ergeben sich hier zusätzlich Ringmuster in den Verteilungen. Es wurde in dieser Arbeit nicht weiter geklärt woher diese kommen.

Zusammenfassend scheint die These gerechtfertigt zu sein, dass im Auftreffbereich der δ -Elektronen, in dem die Trefferdichte hoch ist auch überdurchschnittlich viele Treffer falsch zugefügt werden. Dadurch kommt es zu unsymmetrischen Verteilungen der richtig und falsch zugefügten Treffern auf den MVD-Stationen.

Literaturverzeichnis

- [ACIG06] Andrey Lebedev, Claudia Höhne, Ivan Kisel, and Gennady Ososkov. Track reconstruction algorithms for the CBM experiment at FAIR. *ScienceDirect*, 2006.
- [Ann11] Anna Kotynia. Performance simulations with the realistic STS model. Vortrag, April 2011.
- [BCJ⁺09] B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp, and P. Senger, editors. *The CBM Physics Book*. Springer, 2009.
- [C. 11] C. Dritsa. persönliches Gespräch, 2011.
- [CAD11] Christina Anna Dritsa. *Design of the Micro Vertex Detector of the CBM experiment: Development of a detector response model and feasibility studies of open charm measurement*. PhD thesis, IPHC Strasbourg, Goethe Uni Frankfurt, 2011.
- [CER93] CERN Collaboration. *Offizielle GEANT Internetseite*. CERN, 1993. <http://wwwinfo.cern.ch/asdoc/pdfdir/geant.pdf>.
- [CER98] CERN Collaboration. *Offizielle GEANT Internetseite*. CERN, 1998. <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant/>.
- [CER11] CERN Collaboration. *ROOT User's Guide*. CERN, 2011. <http://root.cern.ch/download/doc/ROOTUsersGuide.pdf>.
- [Chr09] Christian Trageser. MVD Simulations with Digitizer. Vortrag, April 2009.
- [Chr11] Christian Trageser. Tracking studies on different MVD geometries. Vortrag, April 2011.
- [Col01] CBM Collaboration. Conceptual design report cbm, 2001. <http://www.gsi.de/GSI-Future/cdr>.
- [Col05] CBM Collaboration. Compressed Baryonic Matter Experiment - Technical Status Report, 01 2005. <https://www.gsi.de/documents/DOC-2005-Feb-447.html>.

- [Col09] Collaboration, CBM. CBM Progress Report 2009, 04 2009. <https://www.gsi.de/documents/DOC-2010-Apr-17.html>.
- [CT08] Christian Trageser. *Simulation der Multiplizitätsverteilung auf den Detektorstationen des MVD am CBM Experiment*. Bachelorarbeit, Goethe Uni-Frankfurt, 2008.
- [DAD⁺09] M. Deveaux, S. Amar-Youcef, C. Dritsa, I. Froehlich, C. Muentz, S. Seddiki, J. Stroth, T. Tischler, and C. Trageser. Design considerations for the Micro Vertex Detector of the Compressed Baryonic Matter experiment. *ArXiv e-prints*, June 2009. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009arXiv0906.1301D>.
- [DD10] Dennis Doering. *Eine Ausheilstudie an bestrahlten Monolithic Active Pixel Sensoren*. Masterarbeit, Goethe Uni-Frankfurt, 2010.
- [Doe11] D. Doering. persönliches Gespräch, 2011.
- [eFS11] Volker (eds.) Friese and Christian [CBM] Sturm. CBM Progress Report 2010, 03 2011. <https://www.gsi.de/documents/DOC-2011-Mar-235.html>.
- [FAI11] FAIRRoot Collaboration. *FAIRRoot*. FAIR, 2011. <http://fairroot.gsi.de/?q=node/51>.
- [Fri02] Darmstadt] Friese, Volker [GSI]. Feasibility of the detection of D0 mesons in the CBM experiment, 07 2002. <https://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2005-Aug-36.html>.
- [Fri11] V. Friese. persönliches Gespräch, 2011.
- [Heu11] Heuser, Johann and Chatterji, Sudeep and Lymanets, Anton and Kotynia, Anna and Sorokin, Iouri and Singla, Minni and Balog, Tomas and Niebur, Wolfgang and Mueller, W.F.J. [GSI, Frankfurt Univ., KINR Kiev]. Development of the CBM Silicon Tracking System, 03 2011. <https://www.gsi.de/documents/DOC-2011-Mar-26.html>.
- [IPH11] IPHC, editor. *Mimosa26 User Manual (Preliminary version)*. 2011.
- [J. 09] J. Markert. *Untersuchung zum Ansprechverhalten der Vieldraht-Driftkammern niedriger Massenbelegung des HADES Experimentes*. PhD thesis, Goethe Uni Frankfurt, 2009.
- [Kie02] I. Kiesel. CATS: a cellular automaton for tracking in silicon for the HERA-B vertex detector. *Nuclear instruments methods in physics research*, 2002.
- [Kie10] I. Kiesel. Event reconstruction in the CBM experiment. *IOPscience*, 2010.

- [Kis08] Ivan Kisel. *Reconstruction of Tracks in high energy physics experiments*. Habilitation, Ruprecht-Kaiser-Universität Heidelberg, 2008.
- [Kis11] I. Kisel. persönliches Gespräch, 2011.
- [Kon05] Konrad Kleinknecht. *Detektoren für Teilchenstrahlung*. Teubner, 2005.
- [Kul11] I. Kulakov. persönliches Gespräch, 2011.
- [Leb11] A. Lebedev. persönliches Gespräch, 2011.
- [LOJ08] Andrey Lebedev, Darmstadt Ososkov, Gennady [GSI, and Dubna] JINR. LIT Track Propagation for CBM, 12 2008. <https://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2008-Dec-182.html>.
- [Mar11] J. Markert. persönliches Gespräch, 2011.
- [MD02] Michael Deveaux. *Untersuchung zur Strahlenhärte von Monolithic Active Pixel Sensorsoren*. Diplomarbeit, Universität Kaiserslautern, 2002.
- [MD08] Michael Deveaux. *Development of fast and radiation hard Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS) optimized for open charm meson detection with the CBM - vertex detector*. PhD thesis, IPHC Strasbourg, Goethe Uni Frankfurt, 2008.
- [M.D11] M.Deveaux. persönliches Gespräch, 2011.
- [Mü11] C. Müntz. persönliches Gespräch, 2011.
- [Par] Partha Pratim Bhaduri. Di-muon measurements with the CBM experiment at FAIR. Vortrag.
- [P.G11] P.G. Akishin and A.V. Alfeev and V.S. Alfeev and V.V. Ivanov and P.K. Kurilkin and V.P.Ladygin and E.I. Litvinenko and A.I. Malakhov and E.A.Matyushevsky and W.F.J.Müller and Yu.A.Murin and P.Senger . Status of the CBM Superconducting Dipole Magnet. Vortrag, April 2011.
- [Pro98] Prog.Part.Nucl.Phys.41:255-369,1998; Prog.Part.Nucl.Phys.41:225-370,1998 S. A. Bass and M. Belkacem and M. Bleicher and M. Brandstetter and L. Bravina and C. Ernst and L. Gerland and M. Hofmann and S. Hofmann and J. Konopka and G. Mao and L. Neise and S. Soff and C. Spieles and H. Weber and L. A. Winkelmann and H. Stöcker and W. Greiner and Ch. Hartnack and J. Aichelin and N. Amelin. Microscopic Models for Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions. *ArXiv e-prints*, March 1998. <http://xxx.lanl.gov/abs/nucl-th/9803035>.
- [PRSZ06] Povh, Rith, Scholz, and Zetsche. *Teilchen und Kerne*. Springer, 2006.

- [R. 10] J. Baudot G. Bertolone A. Brogna N. Chon-Sen G. Claus C. Colledani Y. Degerli M. Deveaux A. Dorokhov G. Dozière W. Dulinski M. Gelin M. Goffe J.C. Fontaine Ch. Hu-Guo A. Himmi K. Jaaskelainen M. Koziel F. Morel C. Müntz F. Orsini C. Santos C. Schrader M. Specht J. Stroth I. Valina G. Voutsinas F.M. Wagner M. Winte R. De Masi, S. Amar-Youcef. Towards a thin and high resolution pixelated CMOS sensor system for future vertex detectors. *sciencedirect*, 2010.
- [Sam11] Samir Amar-Youcef. *Design and performance studies of the Micro-Vertex-Detector for the CBM experiment at FAIR*. PhD thesis, Goethe Uni Frankfurt, 2011.
- [SC11] P. Senger and Friese. V [CBM]. Nuclear Matter Physics at SIS-100, 08 2011. <https://www.gsi.de/documents/DOC-2011-Aug-29.html>.
- [Str05] J. Stroth. The future at gsi and fair. *Nuclear Physics A*, 755:209 – 218, 2005. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TVB-4G8DV9T-Y/2/34951021ddf0c9321619d4973a8a2a41>.
- [Str11] J. Stroth. persönliches Gespräch, 2011.
- [SUI⁺07] Gorbunov S., Kebschull U., Kiesel I., Lindenstruth V., and Müller W.F.J. Fast SIMDized Kalman Filter based track fit. *CBM-Soft-note*, 2007.
- [T. 86] T. MATSUI and H. SATZ. *J/Psi* SUPPRESSION BY QUARK-GLUON PLASMA FORMATION. *PHYSICS LETTERS B*, October 1986. Volume 178, number 4.
- [T. 09] T. Galatyuk. *Di-electron spectroscopy in HADES and CBM: from p + p and n + p collisions at GSI to Au + Au collisions at FAIR*. PhD thesis, Goethe Uni Frankfurt, 2009.
- [Tis10] Tobias Tischler. *Untersuchungen zu Materialien und Haltestrukturen für den CBM MVD Demonstrator*. PhD thesis, 04 2010. <https://www.gsi.de/documents/DOC-2010-May-52.html>.
- [Uhl10] Uhlig, Florian and Al-Turany, Mohammad and Bertini, Denis and Karabowicz, Radek [GSI, Darmstadt]. Software Development Infrastructure for the FAIR Experiments, 10 2010. <https://www.gsi.de/documents/DOC-2010-Nov-199.html>.
- [Uhl11] F. Uhlig. persönliches Gespräch, 2011.
- [UrQ98] UrQMD Collaboration. *Offizielle UrQMD Internetseite*. Goethe Uni Frankfurt, 1998. <http://urqmd.org/>.
- [Y. 08] Y. Pachmayer. *Dielektronenproduktion in 12C + 12C Kollisionen bei 1 GeV pro Nukleon*. PhD thesis, Goethe Uni Frankfurt, 2008.
- [Zyz11] M. Zyzak. persönliches Gespräch, 2011.

Erklärung

Erklärung nach §30(11) Ordnung des FB Physiks an der Goethe-Universität für den BA- und MA-Studiengang

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderen fremden Texten entnommen worden, sind von mir als solche kenntlich gemacht worden. Ferner erkläre ich, dass die Arbeit nicht - auch nicht auszugsweise- für eine andere Prüfung verwendet wurde.

Frankfurt am Main, den 16. August 2012

Christian Trageser