

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG



KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von

Jan de Cuveland
aus Hamburg

September 2003

Entwicklung der globalen Spurrekonstruktionseinheit für den ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor am LHC (CERN)

Ein systolischer Triggerprozessor zur Rekonstruktion
von bis zu 20 000 Spursegmenten in $1,5 \mu\text{s}$

Jan de Cuveland

Die Diplomarbeit wurde ausgeführt am

Kirchhoff-Institut für Physik

unter der Betreuung von

Herrn Prof. Dr. Volker Lindenstruth

Entwicklung der globalen Spurrekonstruktionseinheit für den ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor am LHC (CERN):

Eine große Herausforderung der experimentellen Schwerionenphysik ist der Nachweis und die Auswertung der großen Anzahl an Teilchen, die bei hochenergetischen Stößen zwischen Atomkernen entstehen. Im geplanten Experiment ALICE spielt dabei der Übergangsstrahlungsdetektor eine wichtige Rolle, da er mit seinem Triggersystem hilft, die Auswertung auf relevante Ereignisse zu konzentrieren und damit die Gesamteffizienz zu steigern. In dieser Arbeit wird der Entwurf einer Spurrekonstruktionseinheit vorgestellt, die einen Teil dieses Triggersystems bildet. Die Einheit setzt die in den Driftkammern des Detektors nachgewiesenen Teilchenspurabschnitte dreidimensional zusammen, ermittelt aus dem Verlauf der so rekonstruierten Spuren den Impuls der erzeugenden Teilchen und trifft schließlich die Triggerentscheidung. Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Beschreibung einer Hardwarearchitektur, mit der durch massive Parallelisierung der Verarbeitung die notwendigen Berechnungen innerhalb von weniger als $2\ \mu\text{s}$ durchgeführt werden können. Die Untersuchungen konzentrieren sich besonders auf eine effiziente Implementierung in Hinblick auf die verwendete FPGA-Technik bei gleichzeitig hoher Nachweiseffizienz und Rekonstruktionsgenauigkeit für relevante Teilchen. Die Ergebnisse zeigen, wie eine Spurrekonstruktionseinheit, die die Echtzeitanforderungen des Experiments erfüllt, real aufgebaut werden kann.

Development of the Global Tracking Unit for the ALICE Transition Radiation Detector at the LHC (CERN):

The detection and analysis of the large number of particles emerging from high energy collisions between atomic nuclei is a major challenge in experimental heavy ion physics. In the upcoming ALICE experiment, the Transition Radiation Detector plays an important role, as its trigger system helps to focus the analysis on relevant events and thus increases the overall efficiency. In this thesis, the design of a Global Tracking Unit is presented, which represents the final part of this trigger system. This unit three-dimensionally reassembles the track segments found in the detector's drift chambers, calculates the momentum of the originating particles from the course of the reconstructed tracks, and finally brings about the trigger decision. The objective of this thesis is to describe a hardware architecture which is able to perform the required calculations in less than $2\ \mu\text{s}$ by means of massive parallelism. The analysis focusses particularly on an efficient implementation with regard to the utilised FPGA technology, while retaining high detection efficiency and reconstruction precision for relevant particles. The results show how a Global Tracking Unit meeting the experiment's real-time requirements can be realised.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Das Experiment	17
2.1	Der Beschleuniger LHC	17
2.2	Das Experiment ALICE	19
2.2.1	Die Detektoren	19
2.2.2	Das Triggersystem	21
2.3	Der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD)	22
2.3.1	Funktionsweise und Aufbau des Detektors	22
2.3.2	Das TRD-Triggersystem	25
3	Technische Aspekte der GTU-Entwicklung	33
3.1	Simulation mit Root/AliRoot	33
3.1.1	Verwendete Ereignisdatensätze	34
3.2	Die Hardwarebeschreibung in VHDL	35
4	Schnittstelle zur GTU	37
4.1	Schnittstelle zwischen LTUs und GTU	37
4.1.1	Aufteilung der Berechnungen	38
4.1.2	Inhalt der übertragenen Datenworte	40
4.2	Berechnungen in den LTUs	42
4.2.1	Korrektur der Ablenkung um den Lorentzwinkel	42
4.2.2	Korrektur der Ablenkung um den Einfluss der ‚tilted Pads‘	43
4.2.3	Vergleich mit einem Schwellwert	45
5	Kombination der Spursegmente zu Spuren	51
5.1	Grundlagen	51
5.1.1	Projektion auf die Mittelebene	51
5.1.2	Fensterkriterium	53
5.1.3	Hardwareumsetzung	53
5.2	Aufbau der Spurvereinigungseinheiten (TMUs)	54
5.3	Eingangseinheit	56
5.3.1	Format der Eingangsdaten	56
5.3.2	Eingangssteuereinheit	58
5.3.3	Zusammenfügen der Daten der beiden Eingänge	58
5.3.4	Berechnung des Ablenkwinkels	59

5.3.5	Projektion der y-Koordinate	60
5.3.6	Berechnungen und Zwischenspeicherung der Rekonstruktionsparameter	61
5.4	Z-Kanal-Einheit	62
5.4.1	Z-Kanäle	62
5.4.2	Aufbau einer Z-Kanal-Einheit	65
5.4.3	Z-Kanal-Auswahltabelle	66
5.4.4	Sortierer und Zwischenspeicher	67
5.5	Spurfindeeinheit	70
5.5.1	Funktionsweise	70
5.5.2	Kombinationslogik	73
5.6	Zusammenführungseinheit	76
5.6.1	Zusammenführen der Spuren von verschiedenen Referenzebenen	78
5.6.2	Eindeutigkeitsmodul („Uniquifier“)	78
5.6.3	Zusammenführen der Spuren aus verschiedenen Z-Kanälen	79
6	Rekonstruktion des Transversalimpulses	83
6.1	Anpassung einer Geraden an die Spursegmente	83
6.1.1	Abschätzung der Schnittpunkte zwischen Gerade und Kreisbahn	87
6.2	Berechnung des Bahnradius	88
6.2.1	Mögliche Vereinfachungen bei der Berechnung	89
6.3	Architektur der Rekonstruktionseinheit	91
7	Ergebnisse	97
7.1	Ergebnisse der Simulation in Root	97
7.1.1	Nachweiseffizienz	97
7.1.2	Hintergrundrate	100
7.1.3	Auflösung des rekonstruierten Transversalimpulses	101
7.1.4	Analyse des gesamten Detektorsystems	103
7.2	Analyse der Hardwareimplementierung	105
7.2.1	Bearbeitungsdauer	105
7.3	Synthese für FPGAs	107
8	Zusammenfassung und Ausblick	109
A	Die Klassen der GTU-Simulation	111
B	Inhalt der DVD-ROM	113
	Literaturverzeichnis	115

Abbildungsverzeichnis

1.1	Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie	15
2.1	LHC-Beschleunigersystem	18
2.2	Detektoren des ALICE-Experiments	20
2.3	Funktionsweise des Detektors in x - z -Ebene	23
2.4	Funktionsweise des Detektors in x - y -Ebene	23
2.5	Aufbau des Detektors	24
2.6	Mittlere Pulshöhen für Elektronen und Pionen	25
2.7	Pulshöhenverlauf über die Driftzeit	26
2.8	Datenverarbeitung in einem Mehrchipmodul (MCM)	27
2.9	Aufbau der GTU	28
2.10	Zusammenfügen von Spursegmenten in der GTU	29
2.11	Vereinfachtes Blockdiagramm einer TMU	30
2.12	Zeitlicher Verlauf der Triggerauslese	31
4.1	Definition von y -Position und Ablenkung	39
4.2	Korrektur der Ablenkung um den Lorentzwinkel	42
4.3	Schematische Darstellung der ‚tilted Pads‘	43
4.4	Teilchenspur in der x - z -Ebene, Ablenkung Δz	45
4.5	Winkel α eines Spursegments und Radius r der Teilchenbahn	46
4.6	Ablenkung d_y und Winkel α eines Spursegments	47
4.7	Schwellwerte für die Ablenkung auf LTU-Ebene	48
5.1	Projektion der Spursegmente auf eine Mittelebene	52
5.2	Aufbau einer TMU	55
5.3	Aufbau einer Eingangseinheit	57
5.4	Zusammensetzung der übertragenen Datenworte	57
5.5	Zeitverhalten der Eingangssignale	58
5.6	Anzahl der Spursegmente pro optischer Verbindung	59
5.7	Aufbau der Berechnungseinheit für den Ablenkwinkel	60
5.8	Aufbau der Berechnungseinheit für die y -Projektion	61
5.9	Anzahl der Spursegmente pro Detektormodul	62
5.10	Querschnitt durch einen Modulstapel, Prinzip der Z-Kanäle	63
5.11	Zuweisung der Spursegmente zu Z-Kanälen	64
5.12	Aufbau einer Z-Kanal-Einheit	65
5.13	Anzahl der Spursegmente pro Z-Kanal	66

5.14	Aufbau des Sortierers	67
5.15	Aufbau einer Sortierzelle	68
5.16	Entscheidungsbaum der Auswahllogik in der Sortierzelle	69
5.17	Funktionsweise einer Spurfindereinheit	71
5.18	Aufbau einer Spurfindereinheit	72
5.19	Aufbau der Zusammenführungseinheit	77
5.20	Aufbau eines Uniquifiers	79
5.21	Beispiel für das Eliminieren doppelter Spuren beim Zusammenführen	81
6.1	Anpassung einer Geraden durch die Spursegmente	84
6.2	Bestimmung der Schnittpunkte x_1, x_2	88
6.3	Skizze zur Berechnung des Transversalimpulses	89
6.4	Aufbau der Rekonstruktionseinheit (Teil 1)	92
6.5	Aufbau der Rekonstruktionseinheit (Teil 2)	94
7.1	Nachweiseffizienz der GTU	99
7.2	Rekonstruierter Transversalimpuls für Hintergrundteilchen	101
7.3	Auflösung der Transversalimpuls-Rekonstruktion	102
7.4	Effizienz des gesamten Detektorsystems ausschließlich der GTU	104
7.5	Effizienz des gesamten Detektorsystems	104
7.6	Bearbeitungsdauer der TMUs	105
7.7	Bearbeitungsdauer der GTU	106

Tabellenverzeichnis

1.1	Fundamentale Teilchen	13
1.2	Fundamentale Wechselwirkungen	14
2.1	Kenngößen des LHC-Beschleunigers	19
3.1	Ereignisdatensätze der Simulation	35
4.1	Inhalt des übertragenen Datenwortes	41
5.1	Zahlenwerte für das GTU-Fensterkriterium	53
5.2	Beispiel für die Funktionsweise des Sortierers	69
5.3	Anzahl der Spursegmente innerhalb des y -Fensters	71
5.4	Zahlenwerte für das GTU-Fensterkriterium im Hardwaremodell	73
5.5	Sortierschlüssel für die Zusammenführung der Spuren	80
6.1	Koeffizienten a_{ki} für die lineare Regression	86
6.2	Koeffizienten b_{ki} für die lineare Regression	86
6.3	Kennzahlen für die möglichen Ebenenkombinationen	93
6.4	Werte für die Konstante $c1$	93
7.1	Simulationsergebnisse für das Erkennen von Teilchenspuren in der GTU	98
7.2	Hintergrundteilchen pro Ereignis auf LTU- und GTU-Ebene	100
7.3	Effizienz des gesamten Detektorsystems ausschließlich der GTU	103
7.4	Ergebnisse der Synthese für ein FPGA	107
7.5	Größe der einzelnen TMU-Entwurfseinheiten nach der Synthese	108

1 Einleitung

Die Untersuchung des grundlegenden Aufbaus der Materie beschäftigt schon seit langer Zeit die physikalische Forschung. Durch immer bessere experimentelle Möglichkeiten ist es gelungen, bei der Erforschung der elementaren Strukturen in immer kleinere Bereiche vorzudringen. Dabei ist heutzutage vor allem die Hochenergiephysik sehr erfolgreich. Durch eine Vielzahl von Experimenten ist mittlerweile eine Theorie bestätigt, nach der die Materie aus zwei Klassen von Elementarteilchen aufgebaut ist, *Quarks* und *Leptonen*.

Die Kräfte zwischen diesen Teilchen lassen sich auf vier fundamentale Wechselwirkungen zurückführen. Sie wirken über Austauschteilchen, die für die jeweilige Wechselwirkung charakteristisch sind. Zwischen Leptonen wirken die elektromagnetische Kraft mit Photonen als Austauschteilchen und die *schwache Wechselwirkung*, die von W- und Z-Bosonen vermittelt wird. Die Kräfte zwischen den Leptonen werden in der *elektroschwachen Theorie* mit hoher Präzision beschrieben. Auf Quarks wirkt zusätzlich die von Gluonen übertragene *starke Wechselwirkung*. Die Gravitation wirkt mit ihren bislang nicht nachgewiesenen Austauschteilchen, den Gravitonen, auf alle Teilchen, spielt aber wegen ihrer geringen Stärke hier keine Rolle. Die 12 bekannten Elementarteilchen sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. In Tabelle 1.2 werden die fundamentalen Wechselwirkungen mit den zugehörigen Austauschteilchen und ihren typischen Reichweiten und relativen Stärken zusammengefasst.

Die starke Wechselwirkung wird durch die Theorie der Farbkraft, die *Quantenchromodynamik* (QCD), beschrieben. Die Quarks erhalten hier neben ihrer elektrischen Ladung eine weitere Eigenschaft, die Farbladung. Sie kann die Werte rot, grün, blau und die entsprechenden Antifarben annehmen. Die Gluonen besitzen dabei selbst eine Farbladung, so dass sie untereinander wechselwirken können. Im Gegensatz zu den anderen Kräften nimmt die Stärke der Wechselwirkung zwischen den Quarks mit der Entfernung zu. Diese Eigenschaft hat zur Folge, dass in der Natur nur farbneutrale Teilchen auftreten. Dazu wird nach dem *Standardmodell* entweder aus drei Quarks verschiedener Farben ein *Baryon* gebildet, oder

	Quarks	Q/e	Leptonen	Q/e
1. Generation	d (down)	$-1/3$	Elektron-Neutrino ν_e	0
	u (up)	$+2/3$	Elektron e	-1
2. Generation	s (strange)	$-1/3$	Myon-Neutrino ν_μ	0
	c (charme)	$+2/3$	Myon μ	-1
3. Generation	b (bottom)	$-1/3$	Tau-Neutrino ν_τ	0
	t (top)	$+2/3$	Tau τ	-1

Tabelle 1.1: Die 12 fundamentalen Teilchen. Sie werden in drei Generationen nach aufsteigender Masse eingeteilt. Aus ihnen und ihren Antiteilchen ist alle bekannte Materie aufgebaut.

Wechselwirkung	koppelt an	Austausch- teilchen	Stärke (relativ)	Reich- weite (m)
starke W.	Farbladung	Gluonen (g)	1	$\approx 10^{-15}$
elektromagn. W.	el. Ladung	Photonen (γ)	10^{-2}	∞
schwache W.	schw. Ladung	W^\pm -, Z^0 -Bosonen	10^{-14}	$\approx 2 \cdot 10^{-18}$
Gravitation	Masse	Gravitonen?	10^{-38}	∞

Tabelle 1.2: Die vier fundamentalen Wechselwirkungen, die die heute bekannte Welt vollständig beschreiben [Stö00].

aus einem Quark und seinem Antiquark entsteht ein *Meson*, in dem sich Farbe und Antifarbe neutralisieren. Das Quarkeinschluss oder *Confinement* genannte Verhalten der starken Wechselwirkung verhindert die Isolierung einzelner freier Quarks.

Da das Confinement ein Zerlegen der Hadronen¹ in Quarks verhindert, liegt es nahe, die Eigenschaften der starken Wechselwirkung in einem System vieler Teilchen zu studieren, das mit den Mitteln der Thermodynamik beschrieben werden kann. Näherungsrechnungen der QCD für solche thermodynamischen Systeme sagen voraus, dass das Confinement bei hohen Temperaturen oder Dichten aufgehoben wird. Dieser Zustand, in dem sich Quarks und Gluonen als quasi-freie Teilchen über ein ausgedehntes Gebiet bewegen können, wird als *Quark-Gluon-Plasma* (QGP) bezeichnet. Aus dem theoretisch vorhergesagten Übergang folgt eine drastische Erhöhung der Freiheitsgrade, was auf einen Phasenübergang zwischen Confinement und Deconfinement hindeutet [KKZ97]. Das Studium dieses Phasenüberganges, sowie des neuen Aggregatzustands, des Quark-Gluon-Plasmas, spielt eine wichtige Rolle für das Verständnis stark wechselwirkender Materie.

Die verschiedenen Phasen stark wechselwirkender Materie sind in Abbildung 1.1 zusammengefasst. Kalte Atomkerne befinden sich im Phasendiagramm bei der Dichte ρ_0 und der Temperatur $kT = 0$. Wird ein solcher Kern etwa um das zehnfache verdichtet, so überlappen die einzelnen Nukleonen, so dass sich Quarks und Gluonen quasi-frei im Kernvolumen bewegen können. Dieser Zustand kalten Plasmas könnte in sehr dichten Neutronensternen herrschen [PRSZ01]. Erhöht man andererseits die Temperatur bei geringer Baryonendichte, so entsteht ab einer Temperatur von etwa $kT_c \approx 200 \text{ MeV}$ ebenfalls QGP. Dieser Phasenübergang hat eine besondere Bedeutung für die Kosmologie, da sich nach dem Urknallmodell in einer Frühphase des Universums die heiße Materie abgekühlt hat und sie dabei den Phasenübergang vom Quark-Gluon-Plasma zum Hadronengas durchlief. Falls es sich bei diesem Phasenübergang um einen Übergang 1. Ordnung handelt, d. h., dass beide Phasen nebeneinander existieren, so kann es zu signifikanten Inhomogenitäten in der Baryonendichte kommen. Die *inhomogene Nukleosynthese* stellt eine Möglichkeit dar, bestimmte Aspekte der Verteilung der Isotope im Universum zu erklären [KKZ97]. Die experimentelle Untersuchung des Phasenüberganges kann daher auch zum Verständnis der Elemententstehung im Urknallmodell beitragen.

In ultrarelativistischen Schwerionenstößen versucht man seit einiger Zeit, den Zustand des Quark-Gluon-Plasmas zu erzeugen, um das Phänomen experimentell untersuchen zu

¹Baryonen und Mesonen

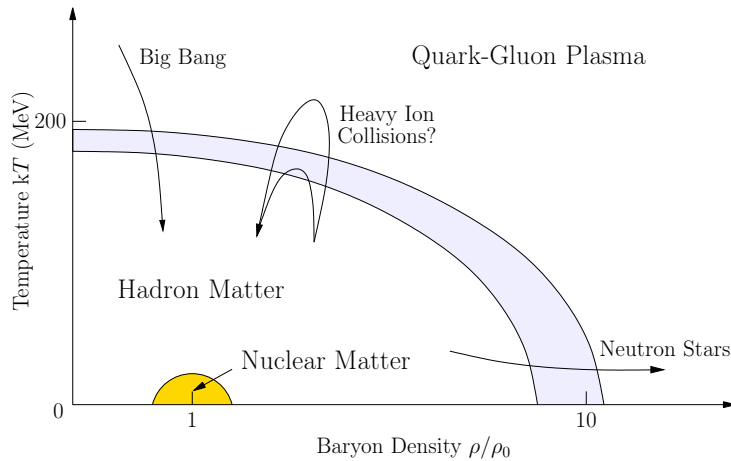


Abbildung 1.1: Das Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie. Der Bereich der Kernmaterie ist farbig markiert. Nach: [Won94, A L]

können. Dabei werden zwei schwere Atomkerne bei hohen Energien zur Kollision gebracht, um einen Bereich hoher Temperatur und Dichte zu erzeugen. Nachdem QGP in früheren Experimenten Hinweisen zufolge bereits erzeugt wurde, soll es nun im Experiment ALICE bei wesentlich höherer Energie erneut nachgewiesen und detailliert untersucht werden.

Ultrarelativistische Schwerionenreaktionen stellen eine große experimentelle Herausforderung dar. Die experimentellen Techniken sind denen der Elementarteilchenphysik sehr ähnlich, doch entstehen in Schwerionenreaktionen wesentlich mehr Teilchen. Das stellt deutlich höhere Ansprüche an das Auflösungsvermögen der Detektoren. Sie produzieren in kurzer Zeit riesige Datenmengen. Da nicht alle Daten in Echtzeit ausgelesen und gespeichert werden können, trifft man mit Hilfe eines Triggersystems während der Laufzeit eine Vorauswahl der physikalisch interessanten Ereignisse für die dauerhafte Speicherung. Die Funktionsweise des Triggers bestimmt mit über die Qualität der Ergebnisse. Daher haben sich die Triggerlogiken zu immer komplexeren Systemen entwickelt. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit mit der globalen Spurrekonstruktionseinheit ein Teil eines Triggersystems vorgestellt, das in Echtzeit eine vollständige Vor-Auswertung der Teilchenspuren in einem Übergangsstrahlungsdetektor durchführt und damit zur Triggerentscheidung des Experiments ALICE beiträgt.

Im folgenden Kapitel werden der Beschleuniger LHC und das Experiment ALICE kurz vorgestellt. Es wird eine Einführung in den Übergangsstrahlungsdetektor und sein Triggersystem gegeben und die Anforderungen an die in dieser Arbeit entwickelte globale Spurrekonstruktionseinheit (GTU) werden erläutert. Im dritten Kapitel folgt eine kurze Beschreibung der Vorgehensweise bei der Entwicklung der GTU. Im vierten Kapitel wird die Schnittstelle zur GTU spezifiziert und es werden notwendige Berechnungen außerhalb der GTU dargestellt. Es folgt im fünften und sechsten Kapitel die Beschreibung der entwickelten Architektur und ihrer Entwurfseinheiten. Dabei konzentriert sich das fünfte Kapitel auf die Einheiten zum Zusammensetzen der Teilchenspuren, während die Rekonstruktion der Teilcheneigenschaften – speziell des Transversalimpulses – Gegenstand des sechsten

Kapitels ist. Die Analyse des Entwurfs und die Ergebnisse verschiedener Simulationen bilden schließlich den Inhalt des siebten Kapitels. Das achte Kapitel fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen.

2 Das Experiment

Im europäischen Labor für Teilchenphysik CERN¹ bei Genf in der Schweiz wird die Struktur der Materie und der Grundkräfte untersucht. Der CERN bietet die dafür notwendigen Beschleuniger, die Teilchen fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen und Detektoren, die die Teilchen sichtbar machen. Der CERN wurde 1954 gegründet und ist heute mit 20 Mitgliedstaaten und etwa 6500 Gastwissenschaftlern aus über 80 Staaten das weltgrößte Forschungszentrum für Teilchenphysik. Die Universität Heidelberg ist eine von 500 beteiligten Universitäten.

2.1 Der Beschleuniger LHC

Derzeit befindet sich am CERN ein neuer Teilchenbeschleuniger im Aufbau, der *Large Hadron Collider* (LHC). Er soll 2007 in Betrieb gehen und wird Protonen bei einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV zur Kollision bringen. Darüber hinaus können im Schwerionenbetriebsmodus schwere Atomkerne (Bleionen) beschleunigt werden, die bei einer Energie von 1150 TeV kollidieren.

Der LHC wird im Tunnel des Vorläuferexperiments LEP errichtet, der sich mit seinen 27 km Umfang in etwa 100 m Tiefe unter der Erde befindet. Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau des Beschleunigers schematisch. Die Teilchen werden in kleineren Anlagen wie dem SPS vorbeschleunigt und nach Erreichen einer Mindestenergie in den LHC-Speicherring eingeleitet. Hier werden sie in zwei Strahlen in entgegengesetzter Richtung weiter beschleunigt und schließlich an vier definierten Wechselwirkungspunkten, die sich innerhalb der Experimentanordnungen befinden, zur Kollision gebracht.

Die zur Ablenkung der Protonen bei diesen Energien notwendigen Magnetfelder von über 8 Tesla können nur von supraleitenden Magneten erreicht werden. Der LHC wird von über 1000 solcher supraleitender Magneten (jeweils 13 m lang) betrieben, die dazu auf eine Temperatur von 1,8 K (-271,2°C) gekühlt werden müssen.

Die Schwerpunktsenergie für Protonenkollisionen am LHC wird um eine Größenordnung über der bislang größten von 2 TeV liegen, die am Tevatron des Fermilab (Chicago) erreicht wird. Die Luminosität² wird sogar 100-mal größer sein als bei allen existierenden Experimenten. Im Schwerionenbetrieb wird die Schwerpunktsenergie des Schwerionenkollidierers

¹,Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire', [CER]

²Die Luminosität ist ein Maß für die Kollisionsrate. Bei zwei Teilchenstrahlen in einem Speicherring ist die Luminosität die Kollisionsrate der Teilchenpakete der beiden Strahlen, multipliziert mit den beiden Teilchenanzahlen pro Paket, bezogen auf den Strahlquerschnitt am Wechselwirkungspunkt [BV98].

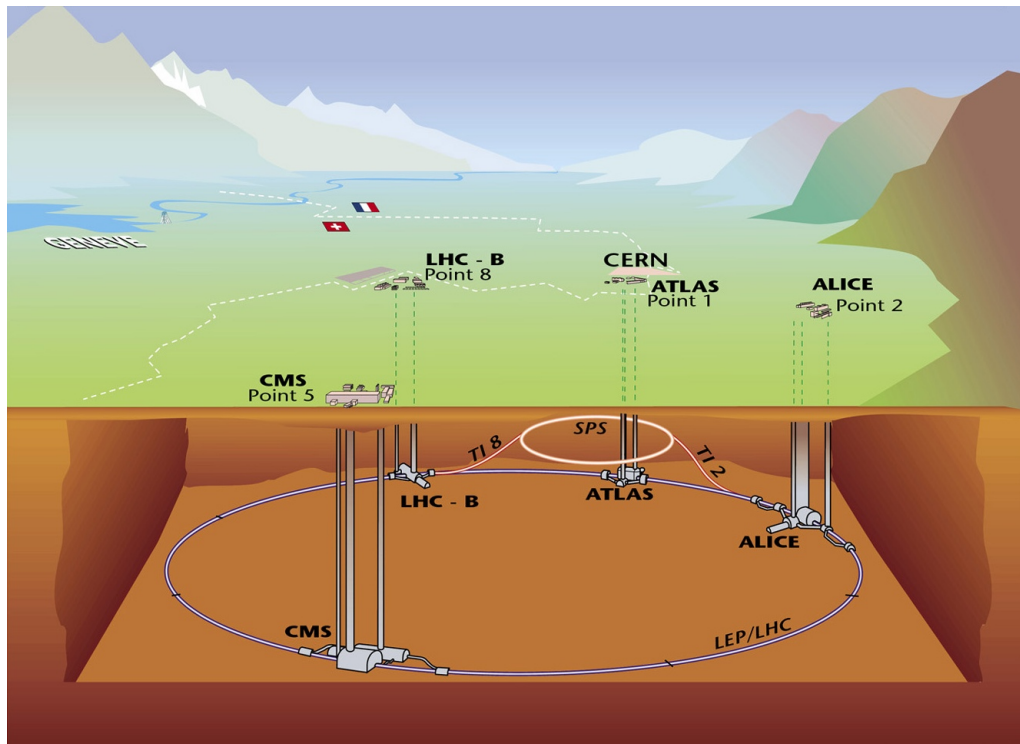


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des LHC-Beschleunigersystems mit den Experimenten und Vorbeschleunigern. Quelle: CERN

RHIC am Brookhaven National Laboratory um das 30-fache übertroffen. Der LHC wird durch die hohe Energie und Luminosität physikalische Experimente möglich machen, die noch tiefer als bisherige Experimente in die Struktur der Materie vordringen. Tabelle 2.1 fasst einige Kenngrößen des LHC zusammen.

Am LHC sind fünf Experimente geplant, von denen vier für den Proton-Proton-Betrieb ausgelegt sind. Das Experiment **ATLAS** (A Toroidal LHC ApparatuS) ist als Mehrzweckexperiment geplant. Ein Hauptziel ist die Untersuchung des Ursprungs der Masse im Bereich elektroschwacher Wechselwirkungen. Dafür soll das Higgs-Boson experimentell nachgewiesen bzw. eine obere Grenze für seine Masse bestimmt werden. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Erforschung der Physik jenseits des Standardmodells. Der **CMS** (Compact Muon Solenoid) ist ebenfalls als Mehrzweckdetektor ausgelegt. Mit einem sehr starken Magnetfeld von 4 Tesla ist er auf die Analyse von Myonen spezialisiert. Das **TOTEM**-Experiment wird unter anderem den totalen Wirkungsquerschnitt für Proton-Proton-Kollisionen bestimmen. Es ist baulich mit dem CMS verbunden. Im Experiment **LHCb** sollen die Eigenschaften von B-Mesonen³ untersucht werden. Insbesondere wird die CP-Verletzung beim Zerfall dieser B-Mesonen studiert.

Das Experiment **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment) ist als einziges der fünf Experimente am LHC speziell für den Schwerionenbetriebsmodus vorgesehen. Es wird erwartet,

³Ein B-Meson ist ein gebundener Zustand eines b-Quarks mit einem leichteren Quark, z. B. ($\bar{d}b$).

Allgemein	Impuls pro Proton bei Einleitung	450 GeV/c
	Impuls pro Proton bei Kollision	7 TeV/c
	Umlauffrequenz	11,245 kHz
	Dipolfeld bei 450 GeV	0,535 T
	Dipolfeld bei 7 TeV	8,33 T
	Umfang der Maschine	26658,883 m
	Abstand zwischen den Strahlachsen	194 mm
Bleiionenbetrieb	Kernladungszahl der Bleiionen	82
	Massenzahl der Bleiionen	208
	Energie pro Nukleon bei Einleitung	0,18 TeV/u
	Energie pro Nukleon bei Kollision	2,76 TeV/u
	Schwerpunktsenergie bei Kollision	1148 TeV
	Anzahl Ionen pro Teilchenpaket	$7,0 \cdot 10^7$
	Anzahl der Teilchenpakete	592
	Breite des Strahls am Wechselwirkungspunkt	15,9 μm
	Luminosität	$0,5 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
	Totaler Wirkungsquerschnitt	437 barn
	Strahlstrom	6,16 mA

Tabelle 2.1: Einige Kenngrößen des LHC-Beschleunigers und der verwendeten Teilchen.

dass in Kollisionen von Bleiionen (^{208}Pb) bei LHC-typischen Energien so genanntes Quark-Gluon-Plasma entsteht. Ziel von ALICE ist es, dieses Quark-Gluon-Plasma nachzuweisen und zu untersuchen.

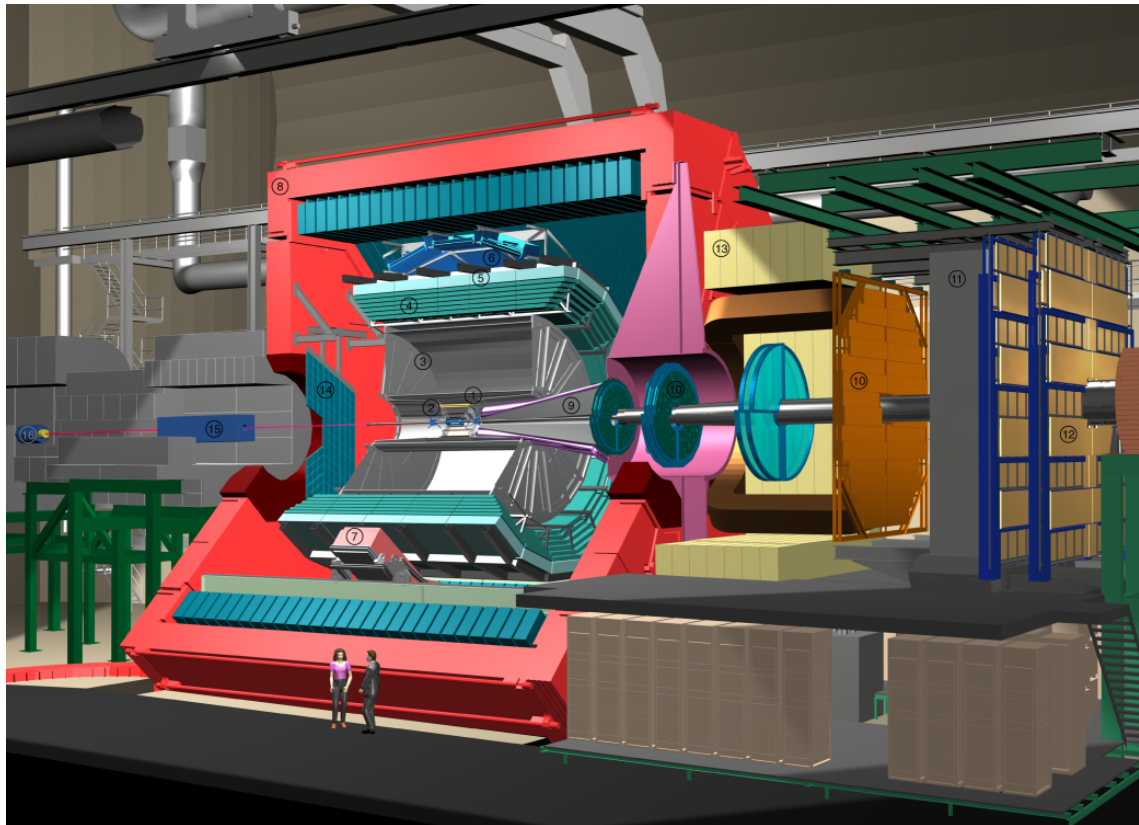
2.2 Das Experiment ALICE

In früheren Experimenten am CERN (in den 1980er und 90er Jahren) wurden bereits Sauerstoff-, Schwefel- und Bleiionen auf stationäre Ziele geschossen. Die Ergebnisse dieser Experimente enthalten Hinweise, dass dabei Quark-Gluon-Plasma (QGP) erzeugt wurde.

Im Experiment ALICE werden nun Bleiionen bei einer Schwerpunktsenergie von 1150 TeV zur Kollision gebracht – das ist um einen Faktor 300 höher als bei bisherigen Experimenten am CERN. Man erwartet, dass bei diesen Energien QGP entsteht, das von ALICE über seine Zerfallsprodukte untersucht werden kann. Damit Rückschlüsse auf Existenz und Eigenschaften des QGP gezogen werden können, muss ein großer Teil der bei jeder Kollision erzeugten mehreren tausend geladenen Teilchen nachgewiesen und identifiziert werden.

2.2.1 Die Detektoren

Im ALICE-Experiment werden mehrere einander ergänzende Detektoren verwendet. Einen Überblick über die räumliche Anordnung gibt Abbildung 2.2. Die Detektoren des Expe-



- | | |
|--|---|
| 1. ITS (Inner Tracking System) | 9. Absorber |
| 2. FMD (Forward Multiplicity Detector) | 10. Tracking Chambers |
| 3. TPC (Time Projection Chamber) | 11. Muon Filter |
| 4. TRD (Transition Radiation Detector) | 12. Trigger Chambers |
| 5. TOF (Time-of-Flight Detector) | 13. Dipole Magnet |
| 6. HMPID (High-Momentum Particle Identification Detector) | 14. PMD (Photon Multiplicity Detector) |
| 7. PHOS CPV (Photon Spectrometer Charged Particle Veto Detector) | 15. Compensator Magnet |
| 8. L3 Magnet | 16. CASTOR (CentauRO And STRange Object REsearch) |

Abbildung 2.2: Die Detektoren des ALICE-Experiments. Der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD, 4) ist die türkisfarbene dargestellte Komponente zwischen der TPC (3) und dem TOF (5). Quelle: CERN

riments werden zusammen 25 m lang und 15 m hoch sein und eine Masse von 10 000 t besitzen. Im Folgenden werden die Detektoren des Zentralbereichs kurz beschrieben.

Das innere Spurverfolgungssystem (*Inner Tracking System*, **ITS**) besteht aus sechs zylindrischen Lagen aus Siliziumwafern, die die Strahlachse im Zentralbereich – und damit den Kollisionspunkt – direkt umgeben (innerer Radius etwa 3 cm, äußerer Radius etwa 50 cm). Es besitzt eine besonders hohe Auflösung von bis zu $12\ \mu\text{m}$ zur Bestimmung von Teilchenpositionen bzw. Wechselwirkungspunkten.

Die Teilchenverfolgung wird außerhalb des ITS in einem größeren Detektor namens Zeit-Projektionskammer (*Time Projection Chamber*, **TPC**) fortgesetzt. Er ist 5,1 m lang und deckt in radialer Richtung (x -Richtung) den Bereich von $x = 0,57\ \text{m}$ bis $x = 2,78\ \text{m}$ ab. Die TPC ist mit einem Gas gefüllt, an das ein elektrisches Feld angelegt wird. Wenn ge-

ladene Teilchen das Gas passieren, schlagen sie Elektronen aus den Gasatomen, welche im elektrischen Feld driften. Durch Messung der Ankunftszeit der Ladungen auf Elektrodenplättchen (Pads) am Ende der Kammer rekonstruiert die TPC den Weg der ursprünglichen geladenen Teilchen.

Der Übergangsstrahlungsdetektor (*Transition Radiation Detector*, **TRD**) hat ebenfalls die Form eines Hohlzylinders, befindet sich im Bereich von $x = 2,94$ m bis $x = 3,69$ m und ist 7,0 m lang. Er besteht aus sechs Lagen von Driftkammern, die jeweils mit einer Schicht eines Radiatormaterials verbunden sind, das bei durchquerenden Elektronen die Entstehung von Übergangsstrahlung bewirken soll. In den Driftkammern wird sowohl die so erzeugte Übergangsstrahlung als auch die Bahn des Teilchens selbst detektiert. Eine Hauptaufgabe des TRD ist es, als Triggerdetektor über das Auslesen der TPC zu entscheiden.

Nach außen schließt direkt der Flugzeitdetektor (*Time Of Flight*, **TOF**) an, der mit 160 000 Parallelscheibenzählern die Flugzeit der Teilchen vom Kollisionspunkt bis zum 4 m entfernten Detektorzylinder auf 150 ps genau misst, um die Masse hochenergetischer Teilchen bestimmen zu können. Bei noch größeren Energien übernimmt ein kleinerer Detektor (14 m^2) namens **HMPID** (*High Momentum Particle Identification*) die Bestimmung der Teilchenmasse. Dieser Detektor basiert auf dem Nachweis von Cherenkov-Photonen, die von den Teilchen in einem dielektrischen Medium ausgesendet werden. Ganz außen befindet sich das Photon-Spektrometer (**PHOS**), das aus Blei-Wolfram-Kristallen aufgebaut ist. Es wurde entworfen, um die Temperatur von Kollisionen aufzuzeichnen, indem es dabei entstehende Photonen detektiert.

Der gesamte Zentralbereich wird vom L3-Magneten umschlossen, der ein homogenes Magnetfeld von 0,4 T parallel zur Strahlachse erzeugt. Dieses Magnetfeld lenkt geladene Teilchen in ihrer Flugbahn abhängig von ihrem Impuls ab, so dass in den Detektoren aus dem Radius der Teilchenbahn senkrecht zur Strahlrichtung auf den Impuls des Teilchens geschlossen werden kann.

2.2.2 Das Triggersystem

Die Detektorsysteme des ALICE erzeugen im Betrieb zusammen eine Datenrate von bis zu 20 TB/s. Dabei können sie bei weitem nicht alle der etwa 10 000 Kollisionsereignisse pro Sekunde erfassen, da die Ausleserate der meisten Detektoren zu gering ist. Die TPC beispielsweise, der Detektor mit dem größten Datenvolumen, hat eine Auslesezeit von etwa 5 ms – entsprechend einer Ausleserate von 200 Hz.

Andererseits sind nur relativ wenige der Kollisionsereignisse physikalisch besonders interessant. Ziel ist es daher, möglichst frühzeitig die uninteressanten Ereignisse herauszufiltern und die langsameren Detektoren nur bei relevanten Ereignissen auszulesen. Dafür werden so genannte Triggerdetektoren verwendet, die bereits kurz nach der Wechselwirkung eine Vor-Auswertung des Ereignisses liefern. Der TRD beispielsweise hat als Triggersystem eine Entscheidungszeit von nur 6 μs .

Das Triggersystem des Experiments ALICE gliedert sich nach dem zeitlichen Verlauf in vier Stufen. Für höhere Stufen werden dabei zusätzlich die Daten von Detektoren mit größerer Auslesezeit verarbeitet. Die Triggersignale werden von einem zentralen Triggerprozessor (CTP) aus den Informationen der einzelnen Teilsysteme erzeugt und verteilt.

1,2 μs nach der Kollision entscheidet der Vorwärts-Multiplizitätsdetektor (**FMD**) anhand der Multiplizität⁴, ob die erste Triggerstufe – der Level-0-Trigger (**L0**) – ausgelöst wird. Wird der L0 nicht ausgelöst, brechen die anderen Detektoren zu diesem Zeitpunkt die Verarbeitung ab. Nach 6 μs wird vom CTP entschieden, ob ein Level-1-Trigger (**L1**) ausgelöst wird. Für die Entscheidung werden die Ergebnisse des Null-Grad-Kalorimeters und des Myonenspektrometers bezüglich der Zentralität und Multiplizität des Ereignisses sowie das Ergebnis des TRD-Triggersystems verwendet, die bis zu diesem Zeitpunkt vorliegen.

Wird der L1 ausgelöst, so wird die TPC ausgelesen und die Daten weiterer Detektoren werden analysiert, um über das Auslösen des Level-2-Triggers (**L2**) zu entscheiden. Die letzte Stufe des Triggersystems bildet der High-Level-Trigger (**HLT**); die vollständigen Daten aus TPC und TRD werden analysiert und währenddessen bereits komprimiert. Dies geschieht bei einer Rate von maximal 1 kHz. Der HLT löst höchstens 30-mal pro Sekunde aus. Die kompletten Daten des Ereignisses werden dann gespeichert.

2.3 Der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD)

2.3.1 Funktionsweise und Aufbau des Detektors

Übergangsstrahlung entsteht, wenn bewegte Ladungen die Grenzfläche zwischen zwei Medien mit verschiedenem Brechungsindex durchqueren. Ein elektrisch geladenes Teilchen, das sich auf eine solche Grenzfläche zubewegt, bildet mit seiner Spiegelladung einen elektrischen Dipol, dessen Feldstärke sich mit der Annäherung des Teilchens ändert und bei seinem Eintritt verschwindet. Die zeitlich veränderliche Dipolfeldstärke führt zur Emission elektromagnetischer Strahlung. Die Übergangsstrahlung wird in einen engen, kegelförmigen Winkelbereich um die Flugrichtung der Teilchen emittiert. In diesem Experiment ist die Abweichung von der Flugrichtung vernachlässigbar klein. Die Wellenlänge der Übergangsstrahlung liegt im Röntgenbereich.

Die Gesamtenergie der Übergangsstrahlung wächst mit dem Lorentzfaktor $\gamma = \frac{E}{mc^2}$ des Teilchens [Gru93]. Durch die Abhängigkeit von der Masse kann dieser Effekt genutzt werden, um hochenergetische geladene Teilchen zu identifizieren.

Die Detektormodule des Übergangsstrahlungsdetektors sind in Schichten aufgebaut. Innenliegend befindet sich ein so genannter *Radiator*, eine Anordnung aus Rohacell-Schaum HF71 und Polypropylenfasern, die die Emission von Übergangsstrahlung auslöst. Durch die inhomogene Struktur des Materials durchquert jedes Teilchen viele Materialübergänge. Dies ist notwendig, um eine ausreichende Abstrahlungsintensität zu erzeugen.

⁴Anzahl (geladener) Teilchen, die bei einer Wechselwirkung produziert werden

2.3 Der Übergangstrahlungsdetektor (TRD)

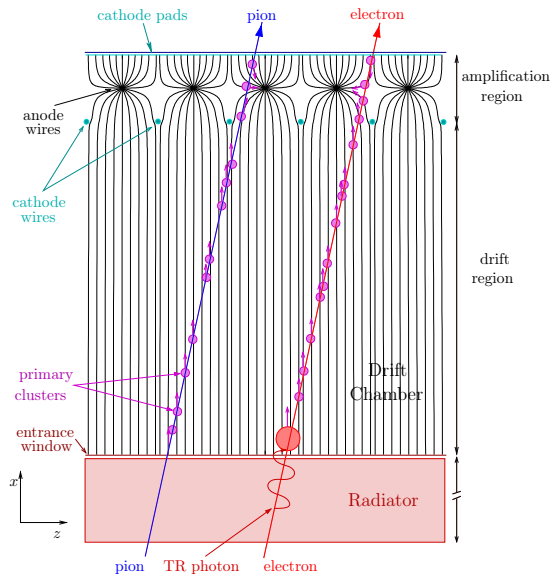


Abbildung 2.3: Projektion eines Modulteils auf die x - z -Ebene. Die von einem Elektron und einem Pion erzeugten Signale sind schematisch dargestellt. Aus: [ALI01]

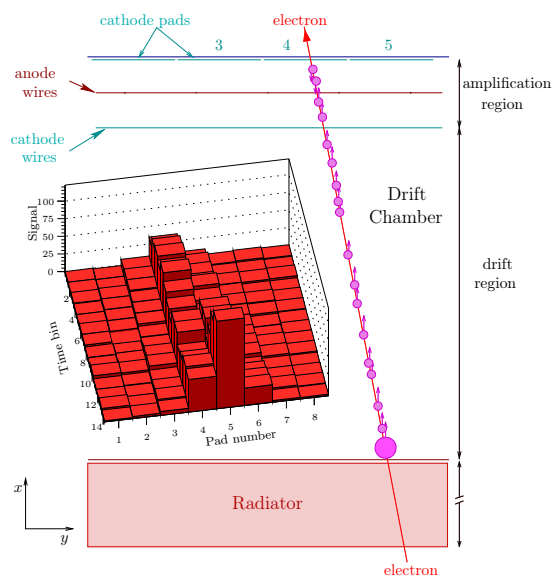


Abbildung 2.4: Projektion eines Modulteils auf die x - y -Ebene. Das eingefügte Histogramm zeigt die Pulshöhenverteilung auf Kathodenplättchen und Zeitpunkte innerhalb des Driftbereichs. Aus: [ALI01]

An den Radiator schließt sich die Driftkammer an, ein mit einem Gasgemisch (85 % Xenon, 15 % CO_2) gefülltes Volumen. In der Driftkammer erzeugen sowohl die durchquerenden Teilchen als auch die Übergangstrahlungsphotonen eine Ionisation. Während die Photonen ihre Energie schlagartig abgeben und ein räumlich eng begrenztes Ladungssignal entsteht, rufen die durchquerenden Elektronen und Pionen eine durchgehende Ionisationsspur hervor. Die ausgeschlagenen Elektronen driften in beiden Fällen im angelegten elektrischen Feld mit einer konstanten Geschwindigkeit auf die Kathodendrahtebene zu.

Die von einem ionisierenden Teilchen beim Durchqueren der Driftkammer freigesetzten Elektronen genügen nicht, um ohne weitere Verstärkung ein messbares Signal zu produzieren. Es wird deswegen im äußeren Bereich der Driftkammer eine Gasverstärkung erzeugt. Die Elektronen, die zwischen den geerdeten Kathodendrahten hindurch gedriftet sind, werden von einem starken elektrischen Feld durch eine Hochspannung (+1,4 kV) an den Anodendrahten beschleunigt, schlagen weitere Elektronen aus dem Gas frei und lösen so einen Lawineneffekt aus. Die Ladung wird dabei etwa um den Faktor 8000 verstärkt. Während die Elektronen rasch über die Anodendrahte abfließen, erzeugen die nur langsam aus der Verstärkungsregion driftenden Gasionen auf den Kathodenplättchen (Kathodenplättchen) am äußeren Ende der Kammer Induktionsladungen.

Aus dem zeitlichen Verlauf des Signals an den einzelnen Kathodenplättchen kann – konstante Driftgeschwindigkeit vorausgesetzt – auf den räumlichen Verlauf der ursprünglichen Spur rückgeschlossen werden. Der Zeitpunkt der Ankunft des Signals an der Kathode entspricht dabei (mit umgekehrtem Vorzeichen) der ursprünglichen x -Koordinate des Ladungshau-

fens. Die Abbildungen 2.3 und 2.4 illustrieren die Funktionsweise der Detektormodule.

Die auf den Kathodenpads induzierte Ladung wird von ladungsempfindlichen Vorverstärkern verstärkt und in ein Spannungssignal umgewandelt. Analog-Digital-Wandler (ADCs) erfassen das Signal und wandeln es in eine digitale Information um. Direkt auf den Kamern befindet sich in Form von so genannten *Mehrchipmodulen* (*Multi Chip Modules*, MCMs) auf Ausleseleiterplatten der erste Teil der Auswerteelektronik.

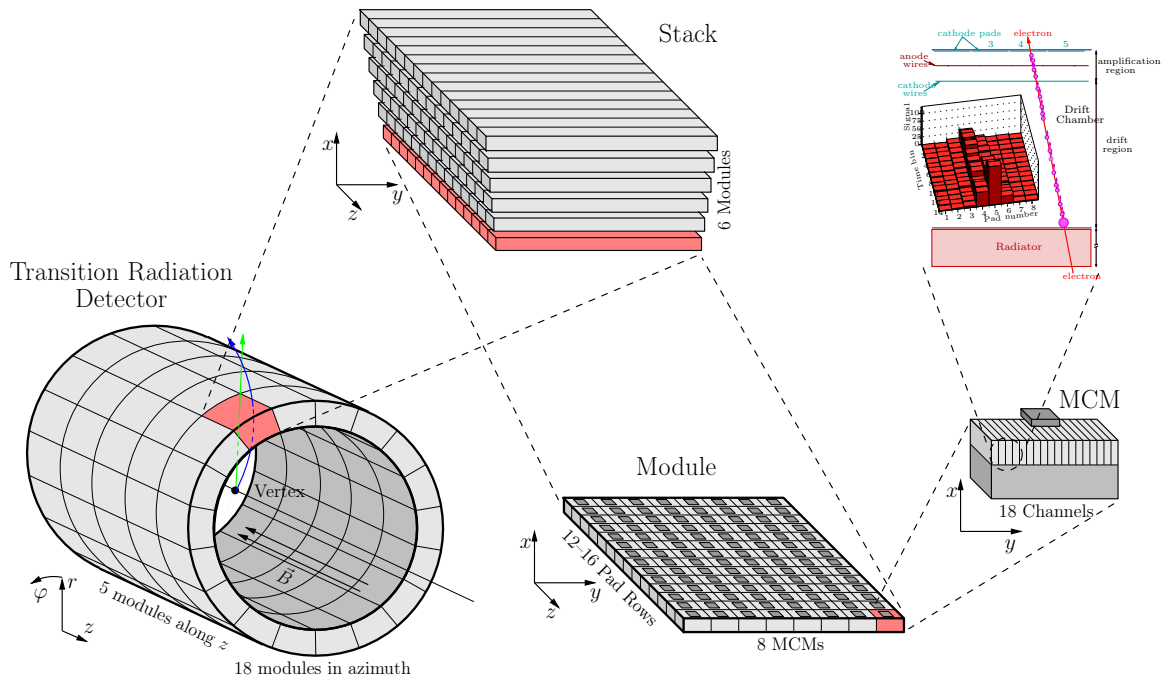


Abbildung 2.5: Aufbau des Detektors aus 540 Modulen, Nomenklatur der Detektorbestandteile.

Der TRD ist aus 540 Detektormodulen aufgebaut. Ein Modul besteht aus 12 bis 16 Padreihen zu je 144 Kanälen (verschiedenen Kathodenpads) und 96 bis 128 MCMs. Ein MCM verarbeitet dabei jeweils die Daten von 18 benachbarten Kanälen innerhalb einer Padreihe. Die Module sind in Form eines Hohlzylinders angeordnet, 18 in azimuthaler Richtung (φ), fünf Ringe in longitudinaler Richtung (z), und sechs Lagen in radialer Richtung (x). Abbildung 2.5 illustriert schematisch den Aufbau des Detektors. In dieser Arbeit werden die Bezeichnungen für die Detektorkomponenten verwendet, wie sie in [ALI01, S. 243] festgelegt sind. Ein *Modul* (*Module*) bezeichnet eine Einheit aus Radiator und Auslesekommer, eine *Lage* (*Layer*) besteht aus 5 Modulen in longitudinaler Richtung, ein *Stapel* (*Stack*) sind sechs Module in radialer Richtung. Eine *Ebene* (*Plane*) ist je eine Lage für alle Winkel φ , also 18·5 Module.

Der TRD ist sowohl für die Spurverfolgung zur späteren Analyse als auch als Triggersystem konzipiert. Da die Anwendung als Trigger die weitaus höheren Anforderungen an die Elektronik des Detektors stellt, stand diese bei deren Entwicklung im Mittelpunkt.

2.3.2 Das TRD-Triggersystem

Eine wichtige Möglichkeit zur Untersuchung der Eigenschaften des QGP ist die Analyse des Auftretens schwerer Vektormesonen (J/ψ , Υ) [ALI01, Vul01]. Interessant ist insbesondere die Abhängigkeit der Erzeugung von der Zentralität des Kollisionsereignisses. Da beispielsweise Υ -Resonanzen nur sehr selten erzeugt werden (etwa alle 10^5 Ereignisse), muss ihre Nachweisrate für eine ausreichende Statistik durch einen speziellen Trigger erhöht werden. Diese Aufgabe wird vom TRD übernommen. Υ -Teilchen können über ihren Zerfall in ein Elektron-Positron-Paar nachgewiesen werden, bei dem beide Teilchen einen hohen Transversalimpuls haben (typischerweise $p_t > 3 \text{ GeV}/c$). Hauptziel des TRD-Triggersystems ist es daher, Elektronen und Positronen mit hohem Transversalimpuls p_t nachzuweisen.

Teilchenbestimmung. Mit Hilfe der Übergangsstrahlung muss vor allem zwischen Elektronen und Pionen unterschieden werden, die im gleichen Transversalimpulsbereich in sehr viel größerer Zahl entstehen. Pionen haben im Vergleich zu Elektronen eine 273-mal so große Ruhemasse ($m_{\pi^\pm} = 140 \text{ MeV}/c^2$ gegenüber $m_{e^\pm} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$). Da Übergangsstrahlung effektiv erst ab einem Schwellwert von $\gamma \approx 1000$ entsteht, erzeugen Pionen mit Energien unterhalb von etwa 140 GeV keine Übergangsstrahlungsphotonen, sondern deponieren nur den Energieverlust durch Ionisation im Detektor [Gru93]. Bei Elektronen überlagert sich das Signal der Übergangsstrahlungsphotonen dem eigentlichen Ionisationssignal. Elektronen sind also durch eine im Mittel höhere gemessene Ladung zu erkennen. Der unterschiedliche Ionisationsverlust der Teilchen (beschrieben durch die Bethe-Bloch-Formel, [Per00]) verstärkt diesen Effekt zusätzlich.

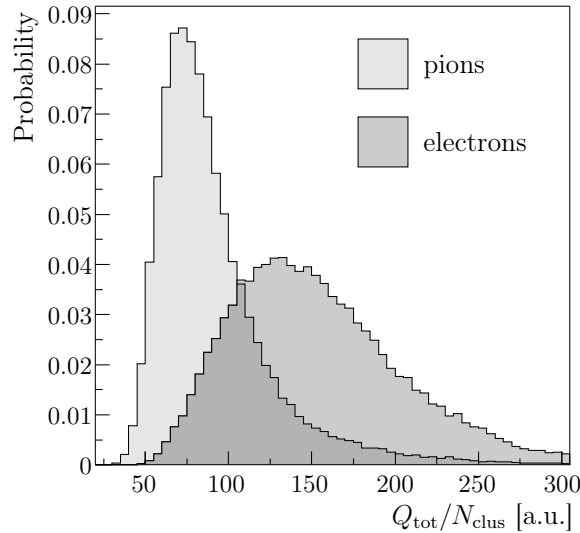


Abbildung 2.6: Pulshöhenverteilung für Elektronen und Pionen mit Transversalimpuls $p_t > 3 \text{ GeV}/c$, integriert über alle Messzeitpunkte einer Kammer. Nach: [ALI01, S. 102]

Abbildung 2.6 zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung, im Fall von Elektronen bzw. Pionen eine bestimmte Gesamtladungsmenge (Pulshöhe) zu messen. Der große Überschneidungsbereich der beiden Verteilungen macht deutlich, dass nur mit Hilfe der in einer Kammer gemessenen Gesamtladung nicht sicher zwischen Elektronen und Pionen unterschieden werden kann. Die Trennschärfe wächst deutlich, wenn die Messungen aller Detektorebenen kombiniert werden, weil die Spuren in den verschiedenen Modulen statistisch unabhängige Einzelmessungen darstellen [Vul03a]. Da die Übergangsstrahlungsphotonen mit höherer Wahrscheinlichkeit nahe am Radiator absorbiert werden, ist der Ladungsverlauf besonders für Zeitpunkte gegen Ende der Driftzeit unterschiedlich. Abbildung 2.7 zeigt, dass die mittlere gemessene Ladung für Elektronen insgesamt etwas höher liegt und gegen Ende der Driftzeit noch zunimmt. Bei der Spitze zu Beginn der Driftzeit handelt es sich um ein Artefakt des Verstärkungsbereichs in der Kammer.

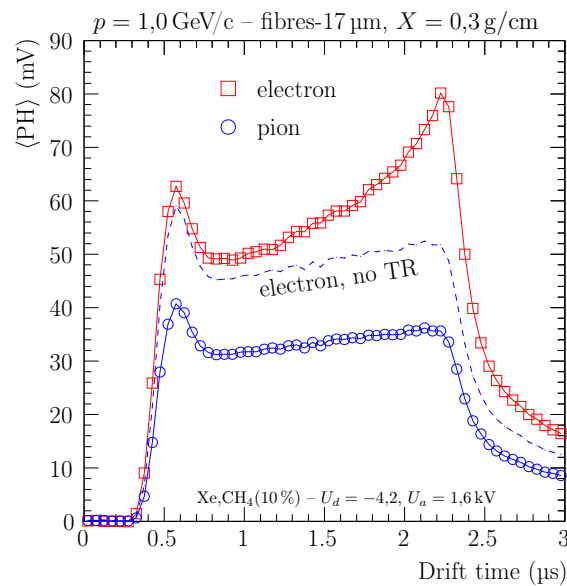


Abbildung 2.7: Pulshöhenverlauf für Elektronen und Pionen über die Driftzeit, integriert über viele Einzelmessungen. Nach: [ALI01]

Impulsmessung. Die Teilchen beschreiben in der beobachteten Ebene (x - y -Ebene) aufgrund des angelegten longitudinalen Magnetfeldes Kreisbahnen, deren Radien nach $r = \frac{p_t}{e \cdot B}$ vom Transversalimpuls der Teilchen abhängig sind. Um diesen zu erhalten, muss also die Krümmung der Teilchenbahn in der x - y -Ebene bestimmt werden.

Bei dem sehr hohen Transversalimpuls der Teilchen, die der TRD identifizieren soll ($p_t > 3 \text{ GeV}/c$), ist der Radius r der Kreisbahn sehr groß ($r = 25 \text{ m}$ bei $p_t = 3 \text{ GeV}/c$). Um die Krümmung direkt aus der Abweichung des Spurverlaufs von einer Geraden zu bestimmen, wäre bei den gegebenen großen Radien eine sehr präzise Messung des Spurverlaufs notwendig. Innerhalb der in x -Richtung nur 3 cm hohen Detektorkammern ist das nicht möglich – die Spurabschnitte erscheinen vielmehr in guter Näherung als Geradenabschnitte.

Um trotzdem bereits aus den Daten eines Detektormoduls eine erste Abschätzung für den Transversalimpuls zu bekommen, verwendet man eine Primärvertexannahme, man geht also davon aus, dass das Teilchen direkt aus der Strahlachse kommt. Es genügen dann zwei weitere Punkte, um den Radius des Kreises zu bestimmen – beziehungsweise, wenn die Bahn innerhalb des Detektormoduls als Gerade genähert und als Sekante des Kreises aufgefasst wird, deren Parameter Achsenabschnitt und Steigung. Nachteil dieser Methode ist, dass fälschlicherweise sekundäre Teilchen mit geringem Transversalimpuls als primäre Teilchen mit hohem Transversalimpuls aufgefasst werden können.

Um diese Unsicherheit zu überwinden und die Rekonstruktionsgenauigkeit zu erhöhen, ist es notwendig, die Daten der Detektormodule über alle Ebenen kombiniert zu betrachten. Die zentrale Einheit, die dies für den gesamten Detektor leistet, heißt *globale Spurreekonstruktionseinheit* (*Global Tracking Unit, GTU*). Der Entwurf eines Prototyps der GTU steht im Mittelpunkt dieser Arbeit.

Aufbau des Triggersystems

Die große Anzahl entstehender Teilchen führt zu einer hohen *Occupancy*⁵ von bis zu 34 % in den 1,2 Mio. Detektorkanälen. In Verbindung mit der geringen Zeit, die für die Triggerentscheidung zur Verfügung steht, ist es notwendig, die Verarbeitung bei der Triggerauslese massiv zu parallelisieren und die Daten so früh wie möglich zu reduzieren. Die Berechnungen werden daher möglichst weitgehend dezentral verteilt.

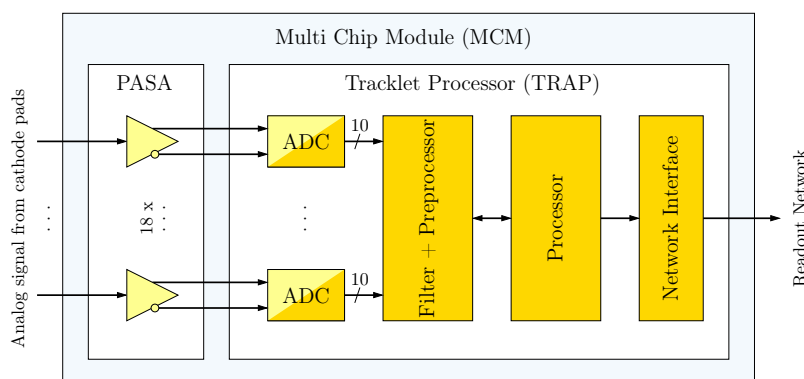


Abbildung 2.8: Datenverarbeitung in einem Mehrchipmodul (MCM). Gezeigt sind der schematische Aufbau und der Haupt-Datenfluss.

Die elektronische Verarbeitung der Signale beginnt direkt auf den Kammern in den Mehrchipmodulen (MCMs). Die MCMs bilden den ‚vorderen‘ Teil (*Front-End*) der Online-Spurverfolgung und werden in ihrer Funktion für das Triggersystem *Local Tracking Units* (LTUs) genannt. Die etwa 64 000 MCMs arbeiten parallel und bis zur Datenübertragung unabhängig voneinander. Sie enthalten die Vorverstärker (*Pre-Amplifier-Shaper, PASA*) und den *Tracklet Processor* (TRAP) [Les02, LAC⁺01]. Innerhalb des TRAP-Chips werden

⁵mittlere anteilige Belegung der Detektorkanäle mit Teilchenspuren zu einem Zeitpunkt

die Signale zunächst digitalisiert und digital gefiltert [Gut02]. Die ADCs arbeiten dabei mit einer Frequenz von 10 MHz, nehmen also über die Driftzeit von etwa $2\ \mu\text{s}$ zu 20 Zeitpunkten Datenwerte auf. Das entspricht einer Auflösung in x -Richtung (Driftrichtung) von $150\ \mu\text{m}$.

Über eine Schwellwertbedingung werden vom Präprozessor Ladungsanhäufungen erkannt. Um die zu einem Ladungshaufen gehörende y -Koordinate zu ermitteln, wird nicht nur die Position des Kathodenpads mit dem stärksten Signal betrachtet, sondern es wird auch die Ladungsverteilung auf die beiden benachbarten Pads berücksichtigt, so dass sich der Mittelpunkt eines Ladungshaufens auf etwa $400\ \mu\text{m}$ – weniger als ein Sechzehntel der Padbreite von etwa $7\ \text{mm}$ – genau bestimmen lässt. In z -Richtung ist das Auflösungsvermögen des Detektors sehr viel geringer, es wird hier innerhalb einzelner Lagen nur zwischen den $7,3\ \text{cm}$ bis $10,1\ \text{cm}$ breiten Padreihen unterschieden.

Aus den y -Positionen werden noch während der Driftzeit der Kammer Parameter für die Anpassung einer Ausgleichsgeraden an die Messwerte ermittelt. Nach Ende der Driftzeit berechnen die vier Prozessoren je MCM aus den vorberechneten Zwischenergebnissen parallel für maximal vier Spursegmente die Parameter Achsenabschnitt y_0 und Steigung $\frac{dy}{dx}$ durch eine lineare Regression. Daraus kann unter Primärvertexannahme eine Abschätzung für den Transversalimpuls gewonnen werden (siehe Abschnitt 4.2). Spursegmente, die auf einen Transversalimpuls von $p_t < 2,3\ \text{GeV}/c$ schließen lassen, werden an dieser Stelle verworfen. Die Daten der verbleibenden, ‚steifen‘ Spursegmente werden in parametrisierter Form an eine Netzwerkschnittstelle übergeben und über das Auslesenetzwerk ausgelesen [Sch03]. Die beschriebene Vorverarbeitung bewirkt eine Reduktion der Datenmenge um den Faktor 1000.

Die Konfiguration der Detektorelektronik erfolgt über ein speziell entwickeltes Netzwerk [Gar02]. Da die Berechnung in den LTUs vollständig konfigurierbar ist, kann die genaue

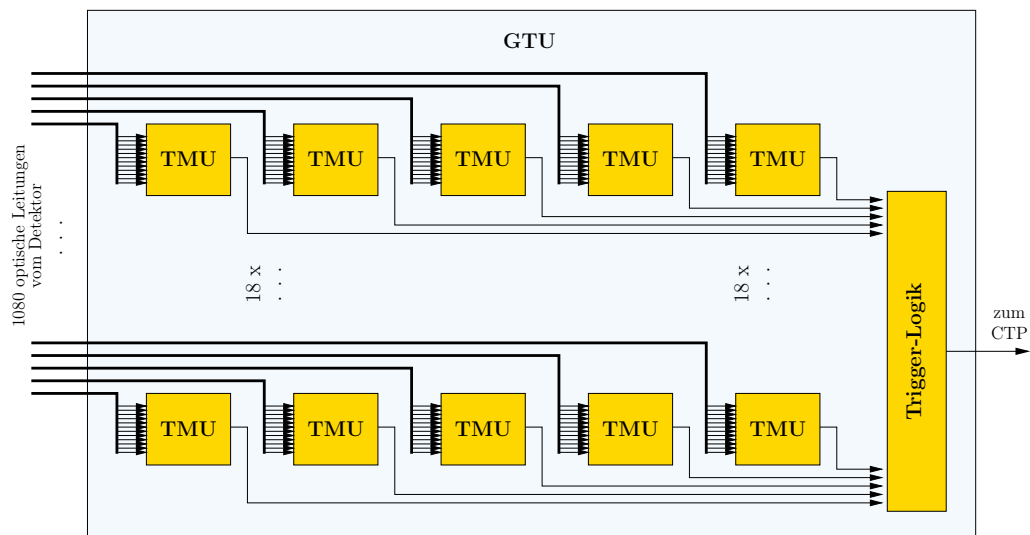


Abbildung 2.9: Aufbau der globalen Spurrekonstruktionseinheit (GTU) aus 90 TMUs.

Parametrisierung der Spursegmente noch festgelegt werden. Überlegungen dazu werden in Abschnitt 4.1 vorgestellt.

Bei der Auslese werden jeweils die Daten eines halben Moduls – also von maximal 16-4 LTUs – gesammelt und über eine optische Verbindung mit 2,4 GBit/s an die globale Spur-rekonstruktionseinheit (GTU) übertragen, die sich außerhalb des L3-Magneten befindet.

Die GTU, die über 1080 optische Leitungen die Spurdaten aller Detektorebenen des TRD empfängt, bildet den ‚hinteren‘ Teil (*Back-End*) der Online-Spurverfolgung. Sie besteht aus 90 so genannten *Spurvereinigungseinheiten* (*Track Matching Units*, TMUs), die jeweils unabhängig die Daten eines Detektorstapels verarbeiten. Da der Abstand zwischen den Stapeln im Vergleich zur Krümmung der gesuchten Teilchenspuren relativ groß ist und die Detektormodule in z -Richtung projektiv zum Wechselwirkungspunkt angeordnet sind, ist es nicht notwendig, Spuren über mehrere Detektorstapel hinweg zu verfolgen. Es werden jeweils die Daten eines halben Moduls über eine optische Verbindungsleitung übertragen, bei jeder TMU enden also zwölf dieser Leitungen, deren Daten über optische Empfänger wieder in elektrische Signale umgewandelt werden.

Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Aufbau der GTU. Die Zwischenergebnisse der 90 TMUs werden von einer Trigger-Logik analysiert. Sind bestimmte Kriterien für Anzahl und Position von Teilchen mit hohem Transversalimpuls ($p_t > 3,0 \text{ GeV}/c$) erfüllt, so wird ein positiver Triggerimpuls an den zentralen Triggerprozessor (CTP) gesendet.

Der CTP kann bei positivem Ausgang der Triggerberechnungen das Signal zur kompletten Auslese der Rohdaten des Detektors für die spätere (Offline-)Analyse senden. Die Rohdaten werden in diesem Fall über das gleiche Auslesenetzwerk übertragen und in Speicherblöcken innerhalb der GTU zwischengespeichert.

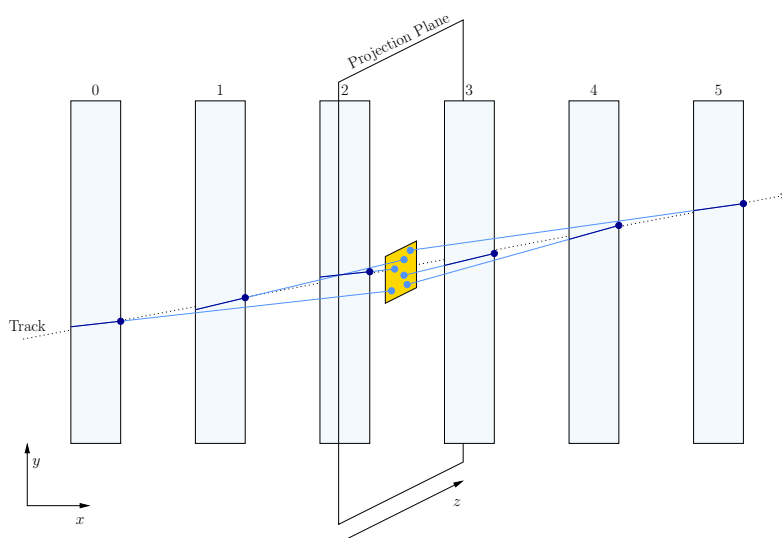


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung des Kriteriums für das Zusammenfügen von Spursegmenten in der GTU.

Die Rechenarbeit der TMUs gliedert sich in zwei Hauptabschnitte. Im ersten Abschnitt wird versucht, die zum selben Ursprungsteilchen gehörenden Spursegmente aus den verschiedenen Ebenen wieder zu einer Spur zuzusammenfügen. Dazu werden die Spursegmente aller Detektorebenen auf eine gemeinsame gedachte Mittelebene des Modulstapels projiziert (siehe Abbildung 2.10). Liegen mindestens vier Spursegmente aus verschiedenen Modulen auf dieser y - z -Ebene innerhalb eines Fensters von vorher festgelegter Größe und haben sie ähnliche Steigungen $\frac{dy}{dx}$, so stammen sie mit großer Wahrscheinlichkeit vom selben Ursprungsteilchen und werden daher von der GTU zu einer Spur vereinigt. Aus den zusammengesetzten Teilchenspuren werden im zweiten Abschnitt die Teilchenart und der Transversalimpuls genauer bestimmt, welcher schließlich mit einem vorher festgelegten Schwellwert verglichen wird.

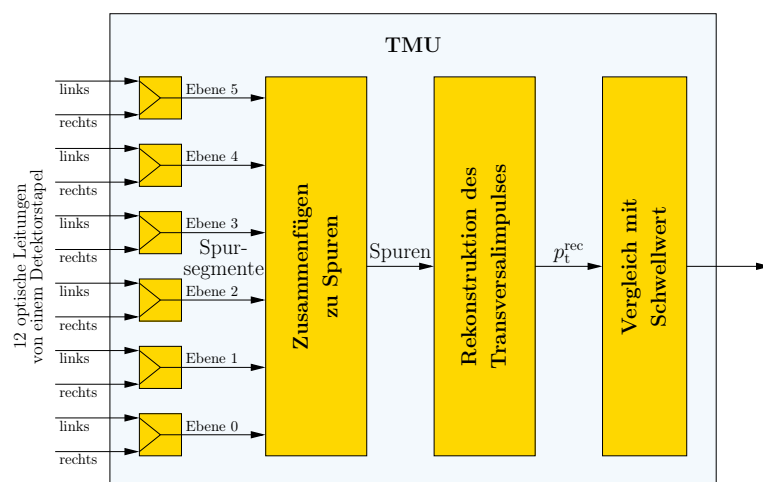


Abbildung 2.11: Vereinfachtes Blockdiagramm einer Spurvereinigungseinheit (TMU).

Die grobe Struktur einer TMU ist durch die Aufgabenstellung festgelegt und wird in Abbildung 2.11 dargestellt. Die TMUs werden auf Basis von programmierbaren Logikbausteinen aufgebaut, deren Funktionsweise durch eine so genannte Hardwarebeschreibung festgelegt werden kann. In den Kapiteln 5 und 6 wird eine solche Beschreibung für die TMUs vorgestellt.

Zeitlicher Verlauf der Triggerberechnung

Abbildung 2.12 zeigt den geplanten zeitlichen Verlauf der Triggerauslese. Die Driftzeit der Elektronen in der Kammer beträgt etwa $2\ \mu\text{s}$. Die Bearbeitungsdauer durch Präprozessor und Prozessor wird jeweils etwa $2\ \mu\text{s}$ betragen. Bei der Auslese und Datenübertragung entsteht es eine Latenz von $0,6\ \mu\text{s}$, wobei während der letzten $0,4\ \mu\text{s}$ der Übertragung mit der Verarbeitung der bereits eingetroffenen Spurdaten begonnen werden kann. Nach Abschluss der Datenübertragung verbleiben für die GTU bis zur Triggerentscheidung nach $6\ \mu\text{s}$ noch $1,4\ \mu\text{s}$. Innerhalb dieser kurzen Zeit müssen die Daten der 540 Detektormodule (jeweils bis zu 40 Spurabschnitte) verarbeitet werden.

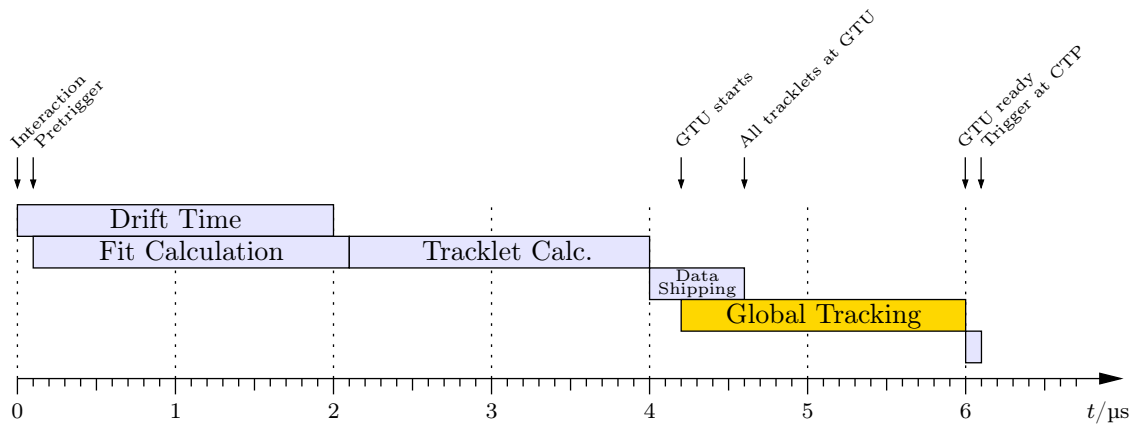


Abbildung 2.12: Zeitlicher Verlauf der Triggerauslese.

Die extrem kurze Zeitspanne, die für die Entscheidung zur Verfügung steht, stellt hohe Anforderungen an die Konzeption der GTU. Der Algorithmus muss soweit wie möglich parallelisiert und sorgfältig optimiert werden. Da die Berechnungen möglichst einfach gehalten werden müssen, ist die Auswahl an Berechnungsverfahren stark eingeschränkt. Um die Berechnungszeit zu optimieren, sollte außerdem das Zusammenwirken mit den anderen Komponenten der Ausleseketten berücksichtigt werden. In den folgenden Kapiteln werden diese Aspekte mit Hilfe von Simulationen untersucht.

3 Technische Aspekte der GTU-Entwicklung

In diesem Kapitel werden kurz die Vorgehensweise bei der Entwicklung des GTU-Entwurfs und die verwendeten Werkzeuge erläutert.

Vor der Implementierung der GTU als Hardwarebeschreibung müssen die Anforderungen genau spezifiziert und das prinzipielle Berechnungsverfahren ausgewählt werden. Es wird zunächst eine Simulation erstellt, in der die prinzipielle Anwendbarkeit eines Verfahrens überprüft und verschiedene Varianten der Berechnung auf einfache Weise verglichen werden können. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird auf die Implementierung der Simulation in der Programmierumgebung Root eingegangen.

Von der Simulation ausgehend wird ein entsprechendes Hardwaremodell der GTU entwickelt. Dafür wird das zuvor simulierte Berechnungsverfahren in eine möglichst effiziente Hardwarebeschreibung umgesetzt. Die Form der Hardwarebeschreibung ist Inhalt des zweiten Abschnitts dieses Kapitels.

3.1 Simulation mit Root/AliRoot

Die Detektorsysteme des Experiments ALICE verwenden eine Programmierumgebung namens *AliRoot* zur Simulation, Rekonstruktion und Analyse. AliRoot nutzt das *Root*-System¹ als Grundlage für alle Anwendungen, indem es die Funktionalität und Geometrie der ALICE-Detektoren auf Root-Klassen abbildet. Root ist eine auf C++ basierende objekt-orientierte Programmierumgebung zur Datenanalyse und Simulation. Es ist speziell auf die beim LHC anfallenden großen Datenmengen ausgelegt. Durch den eingebauten C++-Interpreter kann C++ nicht nur als Programmiersprache für eigene Klassen, sondern auch als schnelle Skriptsprache verwendet werden. Die zahlreichen Root-Klassen sind in [BR03] dokumentiert.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulation umfasst einen Teil der Berechnungen der LTUs und die Datenübertragung (siehe Kapitel 4) sowie die gesamte Funktionalität der GTU (Kapitel 5 und 6).

Bei der Implementierung der Simulation wurde der Analyse-Code soweit wie möglich von der eigentlichen Funktionalität getrennt.

¹Root ist frei verfügbar und kann unter <http://root.cern.ch> im Quelltext und für diverse Systeme vorkompiliert heruntergeladen werden.

Die Funktionalität wurde in Form von elf C++-Klassen implementiert, die von der Basis-klasse `TObject` des Frameworks abgeleitet sind. Die Klassen werden in Anhang A jeweils kurz beschrieben. Darüber hinaus steht auf der DVD-ROM (siehe Anhang B) eine automatisch generierte Dokumentation im HTML-Format zu Verfügung. Die elf Klassen haben im Quelltext zusammen einen Umfang von 4030 Zeilen. Sie werden in eine Bibliothek kompiliert, die vom C++-Interpreter CINT des Root-Systems eingebunden werden kann.

Der Analyse-Code wurde in Form von C++-Skripten für den Interpreter CINT erstellt, die jeweils eine bestimmte Fragestellung untersuchen. Die Skripte erzeugen entweder eine textuelle Ausgabe, eine Root-Datendatei oder direkt Grafiken im PostScript-Format.

Eine dritte Gruppe von Programmen nutzt die Geometriedaten des Detektors, um bestimmte Wertetabellen für die Hardwareimplementierung zu erstellen (siehe Kapitel 5 und 6). Insgesamt umfasst die Simulation etwa 7500 Quelltextzeilen.

Die erstellten Klassen sind in die Root-Umgebung integriert und bei der Programmierung wurden die detaillierten Stilvorgaben (*Coding Conventions*) des AliRoot-Projekts [Hri00] berücksichtigt. Die Klassen sind aber (derzeit) kein Teil von AliRoot. Sie verwenden stattdessen Simulationsdatensätze, die in der AliRoot-Simulation erzeugt und als Root-Datei abgespeichert wurden. Dieses Vorgehen bietet den großen Vorteil, dass die Simulation unabhängig von den kurzfristigen Änderungen der AliRoot-Umgebung entwickelt werden kann. Der Nachteil besteht darin, dass die verwendeten Daten veraltet sein können. Da die Simulation in diesem Stadium vor allem dem konzeptionellen Entwurf dient, ist die von AliRoot abgekoppelte Entwicklung sinnvoll. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die quantitativen Ergebnisse, die in diesem Kapitel präsentiert werden, unter Verwendung der neuesten Daten geringfügig veränderten. Hinsichtlich der Detektorgeometrie verwendet die Simulation den Stand des technischen Entwurfsberichts [ALI01]. In Kapitel 8 wird kurz auf einige Änderungen eingegangen, die sich zwischenzeitlich in der Planung des Detektors ergeben haben.

3.1.1 Verwendete Ereignisdatensätze

Die Simulation arbeitet nach dem Monte-Carlo-Verfahren mit den Daten zufälliger Kollisionsereignisse. Da sich Beschleuniger und Detektor noch im Aufbau befinden, muss auf synthetisch generierte Ereignisse zurückgegriffen werden.

Die verwendeten Ereignisdateien stammen aus einem HIJING²-Ereignisgenerator, der unter Verwendung von Zufallswerten für ein Kollisionsereignis die entstehenden Teilchen und ihre Impulse generiert. Ein Parameter für die Generierung ist die Multiplizitätsdichte³

²„Heavy Ion Jet Interaction Generator“

³Die *Multiplizitätsdichte* $\frac{dN_{ch}}{d\eta}$ gibt an, wie viele geladene Teilchen dN_{ch} bei der Kollision innerhalb eines Pseudorapiditätsintervalls $d\eta$ erzeugt werden. Die Pseudorapidität ist eine Funktion des Produktionswinkels θ zur Strahlachse. Sie ist definiert als $\eta = -\ln(\tan(\frac{1}{2}\theta))$ und ist für relativistische Teilchen eine gute Näherung für die Rapidität [BV98]. Die Rapidität ist das einheitenlose relativistische Geschwindigkeitsmaß $\tanh^{-1}\beta$, wobei $\beta = \frac{v}{c}$ mit Teilchengeschwindigkeit v und Lichtgeschwindigkeit c ist. Der Winkelbereich, den der TRD abdeckt, entspricht einem Pseudorapiditätsbereich von etwa $-0,9 \leq \eta \leq 0,9$. Bei einer mittleren Multiplizitätsdichte von $\frac{dN_{ch}}{d\eta} = 8000$ würden also etwa 14 400 geladene Teilchen in den Raumwinkel des Detektors erzeugt.

$\frac{dN_{ch}}{d\eta}$ des Ereignisses. Da sich die theoretischen Vorhersagen für die zu erwartende Multiplizitätsdichte unterscheiden und zugleich die Effizienz des Triggers entscheidend von der Multiplizitätsdichte abhängt, werden Ereignisdateien für verschiedene Multiplizitätsdichtewerte verwendet (siehe Tabelle 3.1).

Multiplizitätsdichte $\frac{dN_{ch}}{d\eta}$	0	2000	4000	8000
Hinzugefügte e ⁺ /e ⁻ -Paare	50	50	50	50
Anzahl Ereignisse	100	40	40	40
Bezeichner	signal	quarter	half	full

Tabelle 3.1: Die Ereignisdatensätze der Simulation.

Die für den Trigger interessanten Spuren sind in den HIJING-Daten noch nicht enthalten. Die Ereignisse sind deshalb für die Simulation der GTU jeweils um 50 Υ -Teilchen angereichert, die jeweils in ein Paar aus hochenergetischem Elektron und Positron zerfallen, welches detektiert werden kann. Die Anzahl gesuchter Teilchen liegt damit in der Simulation weit über der erwarteten Anzahl; tatsächlich wird nur bei sehr wenigen Ereignissen überhaupt eine interessante Spur erwartet. Nur auf diese Weise kann bereits mit der geringen Anzahl Ereignisdateien die Nachweiswahrscheinlichkeit statistisch untersucht werden.

Die Ereignisdateien wurden aus einer abstrakteren ‚theoretischen‘ Simulation des Detektors von Dr. B. Vulpescu übernommen. Sie enthalten bereits die Informationen über rohe Spursegmente auf LTU-Ebene, wobei die Steigung noch nicht um den Einfluss der *tilted Pads* korrigiert ist (siehe Abschnitt 4.2.2). Für jedes Spursegment sind u. a. die Nummer des Detektormoduls, die Nummer der Padreihe, die Schnittpunkte y_0 und y_1 mit der Driftkammer⁴ und zur Kontrolle Informationen über das verursachende Teilchen enthalten. Die komprimierten Dateien der insgesamt 220 Testereignisse haben zusammen eine Größe von 6,4 GByte. Sie bilden als Referenzdatensatz die Grundlage für alle vorgestellten Simulationsergebnisse.

3.2 Die Hardwarebeschreibung in VHDL

Von der Root-Simulation ausgehend wird in dieser Arbeit eine Hardwarerealisierung der GTU entwickelt. Zur Definition der Architektur wird dabei die Hardwarebeschreibungssprache VHDL⁵ verwendet. Mit Hilfe von VHDL können die einzelnen Funktionsblöcke

⁴Als Achsenabschnitt eines Spursegments wird von den LTUs die y -Koordinate an der Driftkammeraußenseite verwendet. Sie hat daher eine höhere Genauigkeit als die mit Hilfe der Steigung daraus berechnete Koordinate an der Innenseite der Kammer. In den verwendeten Spursegmentdateien weist dagegen die y -Koordinate an der Kammerinnenseite eine größere Genauigkeit auf. Der Grund dafür liegt nicht in der Physik des Detektors, sondern in der Erstellung der Spursegmentdateien. Um diese Abweichung zu kompensieren, werden in der Simulation an bestimmten Stellen ebenfalls die Koordinaten der Kammerinnenseiten verwendet, ohne dass im Folgenden ausdrücklich darauf hingewiesen wird.

⁵‚Very high-speed integrated circuit Hardware Description Language‘

eines Schaltplans auf verschiedenen Abstraktionsebenen eindeutig beschrieben werden. Als Einführung in VHDL sowie als Referenz bietet sich [LWS94] an.

Die im Rahmen der Arbeit erstellte VHDL-Beschreibung besteht aus 22 Modulen mit insgesamt 8019 Quelltextzeilen. Zusammen mit den Prüfstanddateien zur Verifikation der einzelnen Module wurden knapp über 10 000 Zeilen VHDL-Quelltext erstellt.

Die einzelnen Funktionsblöcke des Entwurfs sowie das Gesamtmodell wurden mit Hilfe von *ModelSim* des Herstellers *Model Technology* auf funktionaler Ebene simuliert.

Aus der Hardwarebeschreibung in VHDL können außerdem die Konfigurationsdaten für einen programmierbaren Logikbaustein erzeugt werden (*Synthese*). Die 90 Spurvereinigungseinheiten (TMUs), aus denen die GTU besteht (vgl. Abschnitt 2.3.2), sollen aus programmierbaren Logikbausteinen aufgebaut werden; es ist dabei der Einsatz jeweils eines großen FPGAs pro TMU geplant.

Ein FPGA ist ein integrierter Schaltkreis, der im Inneren aus vielen Tausend identischen, programmierbaren Zellen – so genannten *Logikzellen* – aufgebaut ist, die in einer Matrix auf dem Chip platziert sind. In den Zwischenräumen liegen die *Routing Channels*, in denen mit Hilfe von sehr fein strukturierten Verbindungssegmenten die Verdrahtung der einzelnen Zellen stattfindet. Die Verbindung der einzelnen Segmente erfolgt über programmierbare Schalter. Jede der Logikzellen besteht typischerweise aus einer programmierbaren Wertetabelle, die vier Eingänge auf einen Ausgang abbildet, und einem D-Flip-Flop. Hinzu kommen Verbindungen zu Taktnetzwerken und zusätzliche Logik für spezielle Anwendungen. Neben den Logikzellen verfügen die meisten FPGAs über zusätzliche Systemeinheiten, die beispielsweise als Speicherblöcke eingebunden werden können. Nach dem Einschalten des FPGAs müssen zunächst die SRAM-Speicherelemente der Logikzellen und Verdrahtungen aus einem externen Speicher mit Konfigurationsdaten programmiert werden.

Um die Konfigurationsdaten für ein FPGA zu erzeugen, wird die VHDL-Systembeschreibung zunächst von einem Übersetzungsprogramm in eine elementare Logikbeschreibung umgewandelt. Diese elementare Beschreibung wird in eine Netzliste für das FPGA umgesetzt, die die Logikzellen und ihre Verbindungen untereinander enthält. Schließlich werden die Zellen platziert und verdrahtet und es kann ein Konfigurationsdatenstrom für das FPGA erzeugt werden.

Die Schritte laufen durch entsprechende Programme weitgehend automatisiert ab. Für die Umsetzung in Netzlisten für verschiedene FPGAs wurde *LeonardoSpectrum* der Firma *Mentor Graphics* verwendet. Mit *Quartus II* von *Altera* wurden die Zellen für FPGAs dieses Herstellers platziert und verdrahtet.

Der Inhalt der Hardwarebeschreibung wird in den Kapiteln 5 und 6 dargestellt. Kapitel 7 fasst schließlich die Ergebnisse sowohl der Root-Simulation als auch der funktionalen Simulation und der Synthese der Hardwarebeschreibung zusammen.

4 Schnittstelle zur GTU

Die im Rahmen der Arbeit erstellte Simulation der GTU umfasst auch Teile der Berechnungen in den LTUs sowie die Datenübertragung zur GTU. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird zunächst die Schnittstelle zwischen LTUs und GTU spezifiziert. Im zweiten Abschnitt werden die für die LTUs vorgesehenen Berechnungen dargestellt, wie sie der Simulation zugrunde liegen. Dabei wird insbesondere darauf geachtet, dass sich die Berechnungen in den CPUs effizient ausführen lassen.

4.1 Schnittstelle zwischen LTUs und GTU

Die Berechnungen in den LTUs werden von Mikroprozessoren ausgeführt, die frei programmierbar sind und über ein Assemblerprogramm im Rahmen der zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit beliebige Rechnungen ausführen können. Jede der etwa 250 000 Ausführungseinheiten (CPUs) kann dabei über das Konfigurationsnetzwerk des Detektors ein eigenes, unabhängiges Programm zugewiesen bekommen. Darüber hinaus stehen in den CPUs Register für numerische Konstanten zur Verfügung, die ebenfalls für jede CPU getrennt konfigurierbar sind.

Das Programm muss im Triggerauslesemodus die Summen, die während der Driftzeit vom Präprozessor vorberechnet wurden, auslesen und aus ihnen die Parameter Achsenabschnitt und Steigung der Ausgleichsgeraden berechnen. Diese Parameter müssen anschließend um bestimmte Effekte korrigiert werden (siehe Abschnitt 4.2). Aus der Steigung des Spursegments wird eine erste Abschätzung für den Transversalimpuls des Teilchens gewonnen. Für Spursegmente, deren abgeschätzter Transversalimpuls über einer festgelegten Schwelle von $p_{t,\min}^{\text{LTU}} = 2,3 \text{ GeV}/c$ liegt, werden die Parameter schließlich zu einem Datenwort zusammengestellt, das an die Netzwerkschnittstelle übergeben wird. Eine erste Version eines solchen Programms wurde von Dr. V. Angelov erstellt. Es ist auf die Angaben dieses Kapitels abgestimmt.

Für die Spezifikation der GTU ist es notwendig, die Zuständigkeiten für die Berechnungen zwischen LTUs und GTU zu klären und die Art der Parametrisierung und das Format des übertragenen Datenwortes festzulegen.

Die Überlegungen werden dabei von zwei Gesichtspunkten geleitet. Einerseits sollen möglichst viele Berechnungen dezentral in den LTUs erfolgen, um die Komplexität der GTU zu reduzieren. Die CPUs in den LTUs verfügen über Ausführungseinheiten für die Grundrechenarten, die genutzt werden können, um die GTU von Berechnungen zu entlasten, die für alle Spursegmente anfallen. Die CPUs sind etwa drei Mal so schnell getaktet wie die auf

FPGA-Technik basierende GTU, so dass eine Zeitersparnis hinzu kommen kann. Andererseits ist das Datenwort, das pro Spursegment übertragen wird, auf eine Breite von 32 Bit festgelegt. Alle für die globale Spurrekonstruktion wichtigen Daten müssen darin mit der notwendigen Genauigkeit kodiert werden können.

In der GTU werden folgende drei Größen als Kriterien für die Zusammengehörigkeit von Spursegmenten verwendet:

- die in Richtung zum Kollisionspunkt auf die Stapelmittlebene projizierte z -Koordinate
- die in Richtung zum Kollisionspunkt auf die Stapelmittlebene projizierte y -Koordinate
- der Winkel des Spursegments zur Vertexrichtung¹

Für die Rekonstruktion des Transversalimpulses und der Teilchenart werden folgende Größen verwendet:

- die unprojizierte y -Koordinate an der Kammeraußenfläche
- die aus der gemessenen Ladung ermittelte Wahrscheinlichkeit für ein Elektron bzw. Pion

Um zu klären, in welcher Form und Genauigkeit die Daten am besten übertragen werden, müssen zunächst die notwendigen Berechnungen in den LTUs bzw. in der GTU lokalisiert werden.

4.1.1 Aufteilung der Berechnungen

Nach Abschluss der linearen Regression erhält man in den LTUs zwei Werte: Die y -Koordinate des Schnittpunkts der Geraden mit der Kammeroberseite in Einheiten der Padbreite relativ zur Position der LTU und die Steigung $\frac{dy}{dx}$ der Geraden. Statt der Steigung $\frac{dy}{dx} = \frac{d_y}{d_x}$ wird im Folgenden die *Ablenkung* d_y innerhalb der Driftkammer betrachtet (siehe Abbildung 4.1). Dies ist äquivalent, da die Dicke $d_x = 3$ cm der Driftkammern konstant ist.

Für jedes Spursegment unabhängig sind insgesamt folgende Berechnungen notwendig:

1. Korrektur der Ablenkung um den Lorentzwinkel (siehe Abschnitt 4.2.1)
2. Korrektur der Ablenkung um den Einfluss der ‚tilted Pads‘ (siehe Abschnitt 4.2.2)
3. Vergleich des Winkels zwischen Teilchenspur und Vertexrichtung mit einem Schwellwert (siehe Abschnitt 4.2.3)
4. Umwandlung der gemessenen Ladung in eine Wahrscheinlichkeit für ein Elektron bzw. Pion

¹Als *Vertexrichtung* wird die Richtung von einem Messpunkt zum primären Wechselwirkungspunkt im Zentrum des Detektors bezeichnet. Es ist die Richtung, die die Spur eines Teilchens mit unendlich großem Transversalimpuls hätte.

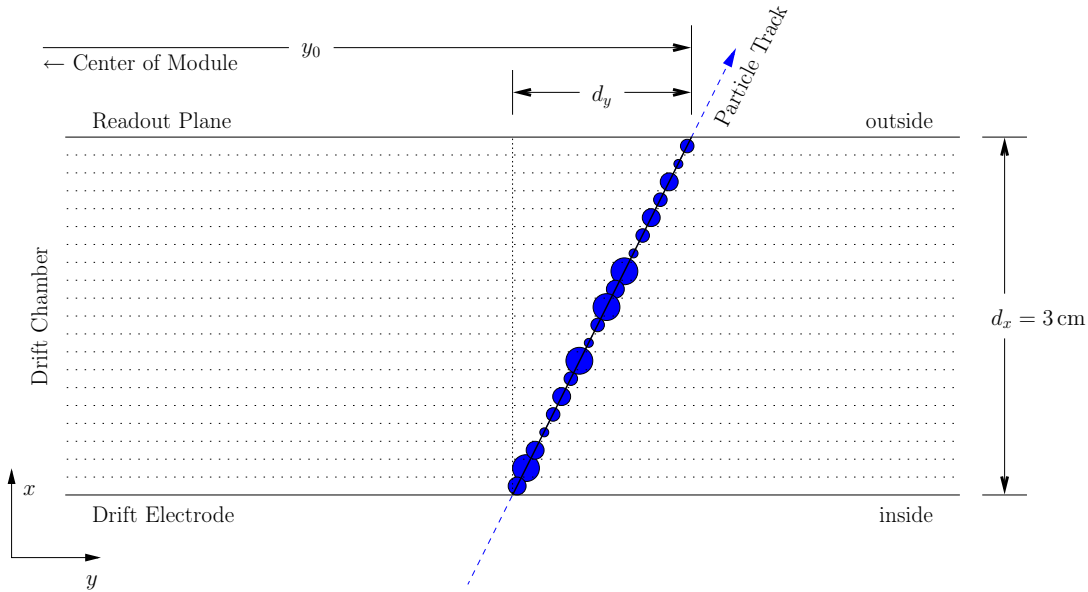


Abbildung 4.1: Definition von y -Position und Ablenkung in der Driftkammer.

5. Übersetzung der lokalen y -Werte in globale Detektorkoordinaten
6. Projektion des Spursegments auf eine Mittelebene (zur Vereinigung mit anderen Spursegmenten)
7. Berechnung des Winkels zwischen Teilchenspur und Vertexrichtung

Um bereits auf LTU-Ebene uninteressante Spuren verwerfen zu können, müssen die Punkte 1–3 direkt in den LTUs ausgeführt werden. Die restlichen Berechnungen könnten prinzipiell sowohl in den LTUs als auch in der GTU lokalisiert werden.

Bei der Umwandlung der gemessenen Ladung in eine Wahrscheinlichkeit für ein Elektron bzw. Pion (Punkt 4) handelt es sich im Wesentlichen um das Nachsehen in einer konstanten Wertetabelle, in der die Werte gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung (Abbildung 2.6) normiert abgelegt sind. Die Operation sollte in den LTUs ausgeführt werden, da die Abbildung stark nicht-linear ist und sonst – bei gleichbleibender Bitbreite des übertragenen Wertes – die Auflösung des Ergebnisses stark inhomogen über den Wertebereich verteilt wäre.

Abbildung 2.7 zeigt, dass die Abweichung zwischen den mittleren Pulshöhen für Elektronen und Pionen in der zweiten Hälfte der Driftzeit größer ist. Eventuell ist es daher sinnvoll, die Gesamtladungen in verschiedenen Teilbereichen der Driftzeit getrennt zu berücksichtigen. Die verschiedenen Möglichkeiten werden derzeit noch untersucht. Werden die Operationen in den LTUs implementiert und nur die resultierende Wahrscheinlichkeit übertragen, so sind Veränderungen des Verfahrens möglich, ohne die übertragene Bitbreite erhöhen müssen. Für die Wertetabellen steht den CPUs konfigurierbarer Speicher zur Verfügung.

Für die GTU ist die Zuordnung der einzelnen Kanäle zu den LTUs belanglos, entscheidend ist die absolute Position der Spur bezogen auf einen Modulstapel. Die notwendige Umwandlung in globale Koordinaten² (Punkt 5) sollte in den LTUs geschehen, da die GTU ohne große Nachteile von dieser Aufgabe entlastet werden kann. Statt der Position relativ zur Modulbreite oder der Nummer des MCMs in der Padreihe und der Position relativ zu den Kanälen des MCMs wird die y -Position in absoluten Längeneinheiten übertragen. Da die inneren Detektormodule weniger breit sind als die äußeren (Breite 95,6 cm in Ebene 0 gegenüber 117,8 cm in Ebene 5), ist der Bereich der auftretenden y -Koordinaten kleiner und es wird bei gleicher Skalierung bei der Übertragung nicht der volle Wertebereich ausgenutzt. Die Präzisionsverluste belaufen sich aber selbst für die innerste Ebene nur auf 18,8 % des Wertebereichs – entsprechend 0,30 Bit.

In der GTU werden sowohl die projizierten als auch die unprojizierten y -Koordinaten benötigt. Die unprojizierten Werte sind dabei für die Rekonstruktion mit höherer Genauigkeit erforderlich. Da der Platz im Datenwort nicht für die (redundante) Übertragung beider Werte ausreicht, liegt es nahe, die unprojizierte Position zu übertragen und die Projektion (Punkt 6) in der GTU zu berechnen.

Zur Projektion der y -Koordinate wird nun in der GTU die Steigung der Spursegmente benötigt, außerdem wird als Kriterium für das Zusammenfügen von Spursegmenten der Winkel gegen die Vertexrichtung verwendet, der aus Steigung (und y -Koordinate) berechnet werden kann. Da das Datenwort wiederum keinen Platz für die Übertragung beider Werte bietet, erfolgt die Berechnung des Winkels (Punkt 7) ebenfalls in der GTU.

4.1.2 Inhalt der übertragenen Datenworte

Welche Werte in den Datenworten übertragen werden, ergibt sich aus der Aufteilung der Berechnungen. Jedes Datenwort enthält folgende Werte:

- Die y -Position (in Meter) des Schnittpunkts der Spur mit der Kammeraußenseite, als vorzeichenbehafteter Abstand von der Kammermitte.
- Die absolute Ablenkung der Spur in der Kammer, d. h. den Unterschied (in Meter) zwischen der y -Position an der Kammeraußenseite und der an der Kammerinnenseite.
- Die z -Position (einheitenlos) als Nummer der Padreihe (0–15)
- Die Wahrscheinlichkeit (zwischen 0,0 und 1,0) aufgrund der gemessenen Ladung, dass es sich bei der Spur um die eines Elektrons handelt.

Eine wichtige Entscheidung ist die Wahl der Genauigkeiten, mit denen die Werte übertragen werden. Unter den gegebenen Voraussetzungen erscheint die Wahl in [ALI01, S. 111] nicht optimal.

Für die Übertragung sind Gleitkommazahlen aus Effizienzgründen ungeeignet. Um den Wertebereich optimal auszunutzen, werden stattdessen die Werte mit einer für jede Größe

²Der Begriff *globale Koordinate* bezieht sich nicht auf dem gesamten Detektor, sondern stets auf einen Modulstapel.

Bezeichnung	Symbol	Auflösung	Wertebereich	Bits
Achsenabschnitt	y	1/160 μm	-643,2 mm .. 643,2 mm	13
Ablenkung	d_y	1/140 μm	-8,8 mm .. 8,8 mm.	7
Padreihe	z	1	0 .. 15	4
e^- -Wahrscheinlichkeit	p	1/0,39 %	0 .. 1	8

Tabelle 4.1: Inhalt des Datenwortes, das für ein Spursegment an die GTU übertragen wird.

einzelnen festgelegten Auflösung multipliziert und für die Übertragung auf ganze Zahlen gerundet.

Die Genauigkeit der y -Positionen entscheidet über die p_t -Auflösung bei der Rekonstruktion. Es ist deswegen eine möglichst hohe Auflösung wünschenswert. Die maximale Genauigkeit des Detektors liegt bei etwa $\delta y_{\text{Detektor}} \approx 400 \mu\text{m}$. Damit der Quantisierungsfehler der Übertragung nicht überwiegt, könnte man eine Übertragungsauflösung von 1/200 μm wählen. Die Werte für die y -Position liegen geometriebedingt im Bereich³ $-64,32 \text{ cm} \leq y \leq 64,32 \text{ cm}$. Zur Übertragung des Wertes sind damit 13 Bit notwendig. Um den Wertebereich bei der Übertragung mit 13 Bit optimal auszunutzen, wird eine Auflösung von 1/160 μm gewählt.

Jede optische Verbindung überträgt die Spurdaten eines halben Moduls, wobei die Module in y -Richtung geteilt sind. Dadurch unterscheidet sich der tatsächliche Wertebereich für die beiden Leitungen eines Moduls. Allerdings überschneiden sich die beiden Wertebereiche in der Mitte der Kammer, so dass das Vorzeichen von y nicht implizit klar ist. Um der GTU die Rückrechnung zu ersparen, wird der Wertebereich nicht für die beiden verschiedenen Hälften einzeln angepasst.

Für $p_{t,\text{min}}^{\text{LTU}} = 2,3 \text{ GeV}/c$ und $B = 0,4 \text{ T}$ beträgt der maximale Ablenkwinkel $\alpha_{\text{max}} = 6,38^\circ$ (siehe Abschnitt 4.2.3). Zusammen mit dem maximalen Winkel zwischen Vertexrichtung und Kammernormale von $10,0^\circ$ ergibt sich für die Ablenkung ein maximaler Wertebereich von $-0,881 \text{ cm} \leq d_y \leq 0,881 \text{ cm}$. Die Ablenkung d_y wird nicht zur Rekonstruktion verwendet, sondern lediglich für die Projektion und das Fensterkriterium beim Vergleich von Spursegmenten. Würde man den Wert für $\delta\alpha$ dabei auf 10 % des Schwellwerts (siehe Abschnitt 5.1.2) genau angeben können wollen, benötigte man eine Genauigkeit von 157 μm – entsprechend 7 Bit. Die Genauigkeit des Detektors liegt wiederum nur bei etwa $\delta d_y \approx 400 \mu\text{m}$. Um den Wertebereich bei der Übertragung mit 7 Bit optimal auszunutzen, wird eine Auflösung von 1/140 μm gewählt.

Für die Nummer der Padreihe werden 4 Bit benötigt. Es bleiben von den 32 Bit also noch 8 Bit übrig, um die Elektron-Wahrscheinlichkeit eines Spursegments in 256 Abstufungen zu kodieren. Tabelle 4.1 fasst die Ergebnisse zusammen.

³Der Unterschied zur oben angegebenen Breite des äußeren Detektormoduls ergibt sich dadurch, dass an dieser Stelle der Abstand zwischen den Modulen vernachlässigt wird, um das Übertragungsformat unabhängig von minimalen Änderungen an der Kammergeometrie zu halten.

4.2 Berechnungen in den LTUs

Aus der Anpassung einer Geraden an die ADC-Werte erhält man zunächst den Schnittpunkt y_0 mit der Kammeraußenseite und die Ablenkung in y -Richtung $d_{y, \text{raw}}$. Die Berechnungen, die für die Ausführung im Anschluss daran in den LTUs vorgesehen sind, werden in den folgenden Unterabschnitten dargestellt. Insbesondere wird gezeigt, wie sich die Operationen auf effiziente Weise implementieren lassen.

4.2.1 Korrektur der Ablenkung um den Lorentzwinkel

Das homogene \vec{B} -Feld, das den Detektor in longitudinaler Richtung durchdringt, beeinflusst auch den Drift der Ionisationselektronen in der Kammer.

In Gegenwart des \vec{B} -Feldes verläuft die Driftrichtung nicht mehr entlang des elektrischen Feldes, sondern die Elektronen werden auf ihrem Weg zu den Pads in y -Richtung abgelenkt. Dabei wird die Driftgeschwindigkeit der Elektronen verringert. Abbildung 4.2 illustriert den Effekt. Der Driftwinkel Ψ_L wird *Lorentzwinkel* genannt. Stehen \vec{E} und \vec{B} senkrecht aufeinander, ist er durch

$$\tan(\Psi_L) = \frac{e\tau B}{m}$$

gegeben (vgl. [Kle92]). Dabei ist τ die mittlere Zeit zwischen zwei Stößen mit Gasmolekülen. Der Lorentzwinkel ist über τ abhängig von der Zusammensetzung des Gasgemischs und der Stärke des \vec{E} -Feldes; im Experiment beträgt er voraussichtlich $\Psi_L = 7^\circ$.

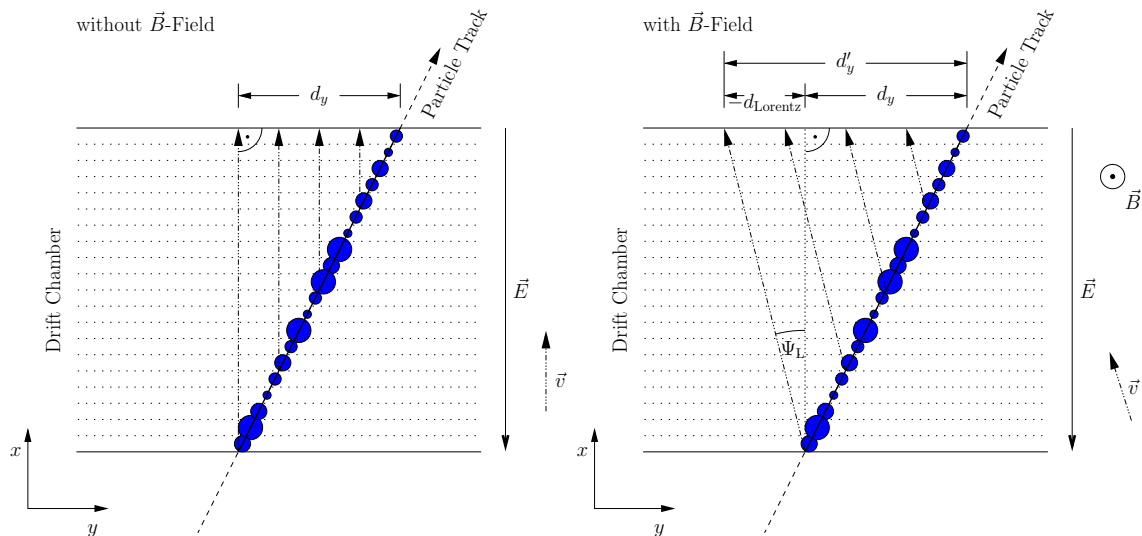


Abbildung 4.2: Driftrichtung der Elektronen in der Kammer ohne (links) und mit (rechts) \vec{B} -Feld. Das zusätzliche Feld verändert die Richtung um den Lorentzwinkel Ψ_L und damit die gemessene Ablenkung um die Strecke d_{Lorentz} .

Während die gemessene y -Position an der Außenseite der Kammer durch den Effekt kaum verfälscht wird, muss die gemessene Ablenkung d_y korrigiert werden. Ein Ladungshaufen von der Kammerinnenseite erreicht die Padreihe an der Außenseite um

$$d_{\text{Lorentz}} = -\tan(\Psi_L) \cdot d_x = -3,68 \text{ mm} \quad (4.1)$$

versetzt. Ein Ladungshaufen an der Kammeraußenseite wird nicht abgelenkt. Um den Effekt zu korrigieren, muss in den LTUs zu jeder gemessenen Ablenkung unabhängig von ihrem Betrag der konstante Wert d_{Lorentz} hinzuaddiert werden:

$$d'_y = d_{y, \text{raw}} + d_{\text{Lorentz}}$$

Es handelt sich bei der Lorentzwinkel-Korrektur also um eine Korrektur der Ablenkung bzw. Steigung des Spursegments.

Für die Korrektur der Ablenkung ist ohne Belang, dass sich durch die Lorentzkraft die Driftgeschwindigkeit der Elektronen verringert und die Länge der Driftstrecke vergrößert, solange die Driftzeit von den LTUs entsprechend gewählt bzw. die Steigung skaliert wird.

4.2.2 Korrektur der Ablenkung um den Einfluss der ‚tilted Pads‘

Die Kathodenpads auf der Kammeraußenseite sind nicht exakt rechteckig, sondern auf den verschiedenen Detektorebenen gegenläufig bewusst leicht zu Parallelogrammen verschoben (‚tilted Pads‘). Der Kippwinkel beträgt $\beta_{\text{tilt}} = 2^\circ$ (siehe Abbildung 4.3). Durch diese Anordnung wird der späteren Datenanalyse erlaubt, durch Kombination mehrerer Ebenen die Auflösung in z -Richtung für durchlaufende Spuren zu verbessern. Ohne die ‚tilted Pads‘ könnte der Spurverlauf in z -Richtung bei ideal projektiver Geometrie nicht genauer als auf die Breite einer Padreihe ($d \approx 10 \text{ cm}$) bestimmt werden.

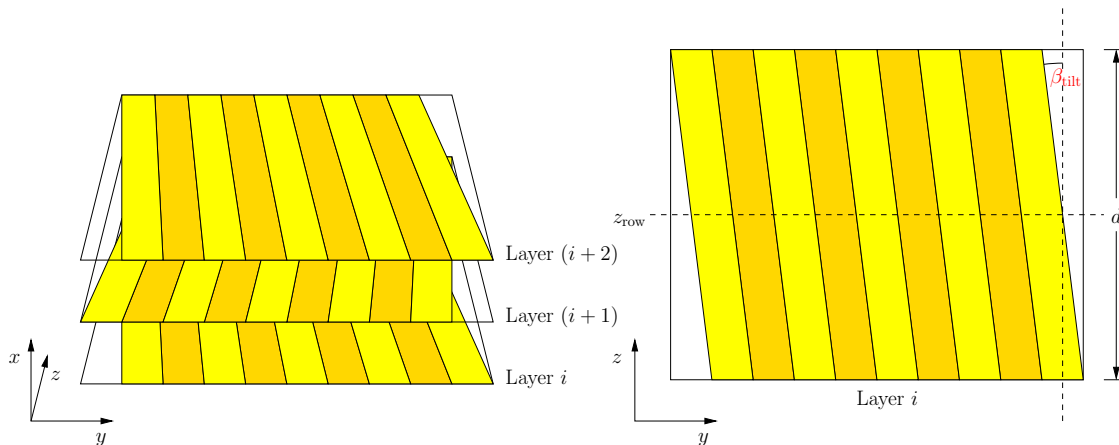


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Kathodenpads für drei übereinanderliegende Padreihen. Zur Erhöhung der Ortsauflösung in z -Richtung sind die Pads in den verschiedenen Lagen abwechselnd um einen Winkel von $\pm 2^\circ$ gekippt (‚tilted Pads‘).

Bei der Online-Analyse (Triggerberechnung) kann wegen der geringen zur Verfügung stehenden Berechnungszeit aus den ‚tilted Pads‘ kein Nutzen gezogen werden. Die Geometrie der Pads muss aber trotzdem in den Berechnungen berücksichtigt werden, da sie die Messwerte y -Position und Ablenkung verfälscht.

Die Verfälschung der y -Position entsteht, weil Ladungen im Grenzbereich zwischen zwei Pads bei gleicher tatsächlicher y -Koordinate je nach z -Position auf das eine oder andere Pad projiziert werden. Der Fehler in y beträgt maximal $\pm \frac{d}{2} \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}) \approx 1,8 \text{ mm}$ und kann auf LTU-Ebene nicht korrigiert werden, da die genaue z -Position unbekannt ist.

Weil die gemessene y -Position mit ‚tilted Pads‘ nicht mehr unabhängig von der z -Position ist, verändert sich auch die gemessene Steigung $\frac{dy}{dx}$. Mit Hilfe der Vertexannahme lässt sich dieser Effekt aber in den LTUs korrigieren [Vul03b].

Statt der tatsächlichen y -Koordinate misst man mit ‚tilted Pads‘ den Wert

$$y' = y \pm (z - z_{\text{row}}) \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}). \quad (4.2)$$

Dabei ist z_{row} die z -Koordinate in der Mitte der Padreihe. Statt $d_y = y_{\text{außen}} - y_{\text{innen}}$ misst man entsprechend

$$\begin{aligned} d'_y &= y'_{\text{außen}} - y'_{\text{innen}} \\ &= d_y \pm (z_{\text{außen}} - z_{\text{innen}}) \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}) \\ &= d_y \pm \Delta z \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Unter Verwendung der Primärvertexannahme lässt sich nach Abbildung 4.4 Δz in guter Näherung aus der Position der Padreihe als

$$\Delta z = \frac{z_{\text{row}} \cdot d_x}{x_0}$$

bestimmen.

Für jede Padreihe des Detektors wird der Wert

$$\begin{aligned} d_{\text{Pad-Korrektur}} &= \pm \frac{z_{\text{row}} \cdot d_x}{x_0} \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}) \\ &= \pm 1,048 \text{ mm} \cdot \frac{z_{\text{row}}}{x_0} \end{aligned} \quad (4.4)$$

mit

$$\begin{aligned} x_0, z_{\text{row}} &: \text{Koordinaten der Padreihe} \\ d_x &: \text{Dicke einer Kammer (3,0 cm)} \\ \beta_{\text{tilt}} &: \text{Winkel der Pads gegen die } z\text{-Achse} \end{aligned}$$

vorberechnet und als Summe zusammen mit d_{Lorentz} in den LTUs dieser Reihe gespeichert. Bei der Triggerauslese addieren die LTUs als Korrektur stets den konstanten Wert zur gemessenen Ablenkung hinzu. Zusammen ergeben sich zwei (lokal konstante) Korrekturterme:

$$d_y = d_{y, \text{raw}} + d_{\text{Lorentz}} + d_{\text{Pad-Korrektur}} \quad (4.5)$$

Es lassen sich also beide Korrekturen auf die Addition bzw. Subtraktion einer geeigneten gemeinsamen Konstanten zurückführen.

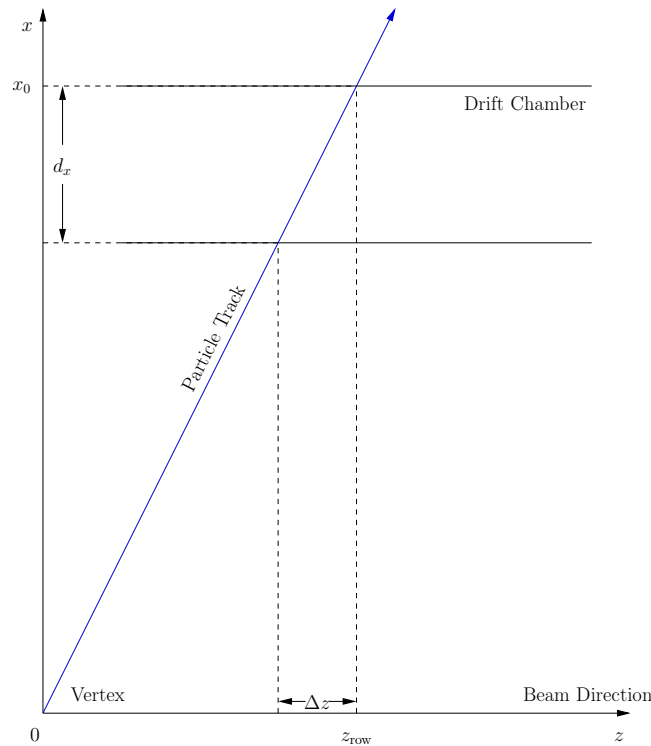


Abbildung 4.4: In der x - z -Ebene verlaufen die Teilchenspuren gerade. Für Teilchen, die direkt aus dem primären Vertex kommen, lässt sich die Ablenkung Δz in der Kammer direkt aus den Koordinaten x_0 , z_{row} der Padreihe berechnen.

4.2.3 Vergleich des Winkels zwischen Teilchenspur und Vertexrichtung mit einem Schwellwert

Es sollen nur Spursegmente mit hinreichend großem Transversalimpuls bzw. hinreichend geringer Ablenkung gegen die Ursprungsrichtung weitergeleitet werden. Hierfür ist es nicht notwendig, den Winkel gegen die Ursprungsrichtung direkt auszurechnen. Stattdessen wird der maximale Ablenkwinkel α_{max} in eine minimale und eine maximale Ablenkung $d_{y, \text{min}}$ bzw. $d_{y, \text{max}}$ umgerechnet.

Zusammenhang zwischen Ablenkwinkel und Transversalimpuls

Abbildung 4.5 illustriert zunächst den Zusammenhang zwischen dem Winkel α des Spursegments gegen die Vertexrichtung und dem Radius r der kreisförmigen Teilchenbahn. Im oberen rechtwinkligen Dreieck gilt

$$r = \frac{d/2}{\sin(\alpha)} \quad (4.6)$$

mit der Entfernung zwischen Spursegment und Strahl $d = \sqrt{x_m^2 + y_m^2}$.

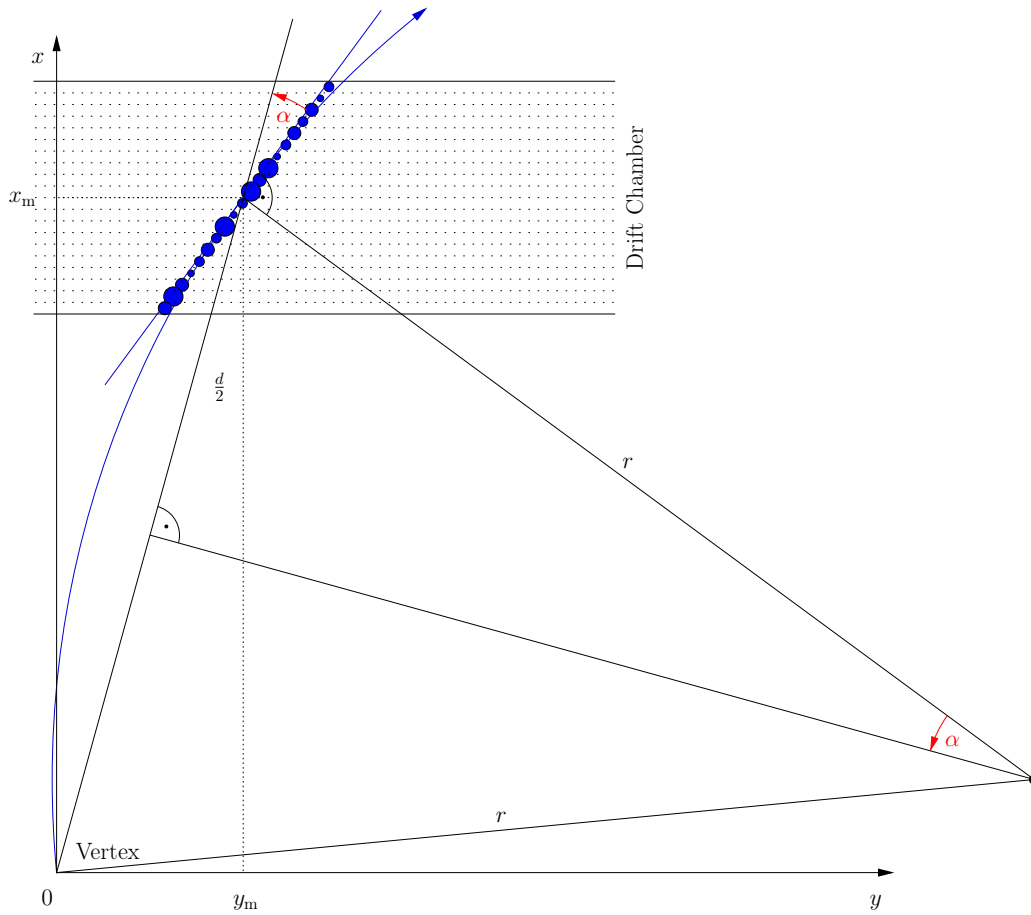


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der kreisförmigen Teilchenbahn in Bezug auf ein Detektormodul. Aus dem Winkel α des Spursegments gegen die Vertexrichtung kann auf den Radius r der Teilchenbahn geschlossen werden.

Der Transversalimpuls p_t des Teilchens ergibt sich bei bekannter magnetischer Induktion B aus dem Radius der Teilchenbahn in der x - y -Ebene als⁴

$$p_t = e \cdot r \cdot B = 0,30 \text{ GeV}/c \cdot \frac{r}{\text{m}} \cdot \frac{B}{\text{T}}. \quad (4.7)$$

mit der Elementarladung e in der Schreibweise $e = 0,30 \frac{\text{GeV}/c}{\text{m}\cdot\text{T}}$, die sich in diesem Zusammenhang anbietet.

Der maximale Ablenkwinkel α_{\max} berechnet sich also aus dem minimalen Transversalimpuls $p_{t,\min}^{\text{LTU}}$ nach

$$\alpha_{\max} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{x_m^2 + y_m^2} \cdot eB}{2 \cdot p_{t,\min}^{\text{LTU}}} \right). \quad (4.8)$$

⁴Vgl. [Gre00]. Der Zusammenhang ist direkt einsehbar durch Gleichsetzen der Lorentzkraft auf ein einfach geladenes freies Teilchen, das sich senkrecht zum \vec{B} -Feld bewegt, und der Zentripetalkraft.

In der Simulation wird der Wert $p_{t,\min}^{\text{LTU}} = 2,3 \text{ GeV}/c$ verwendet; damit ergibt sich beispielsweise für ein außen liegendes Pad der maximale Ablenkwinkel $\alpha_{\max} = 5,47^\circ$.

Zusammenhang zwischen Ablenkung und Ablenkwinkel

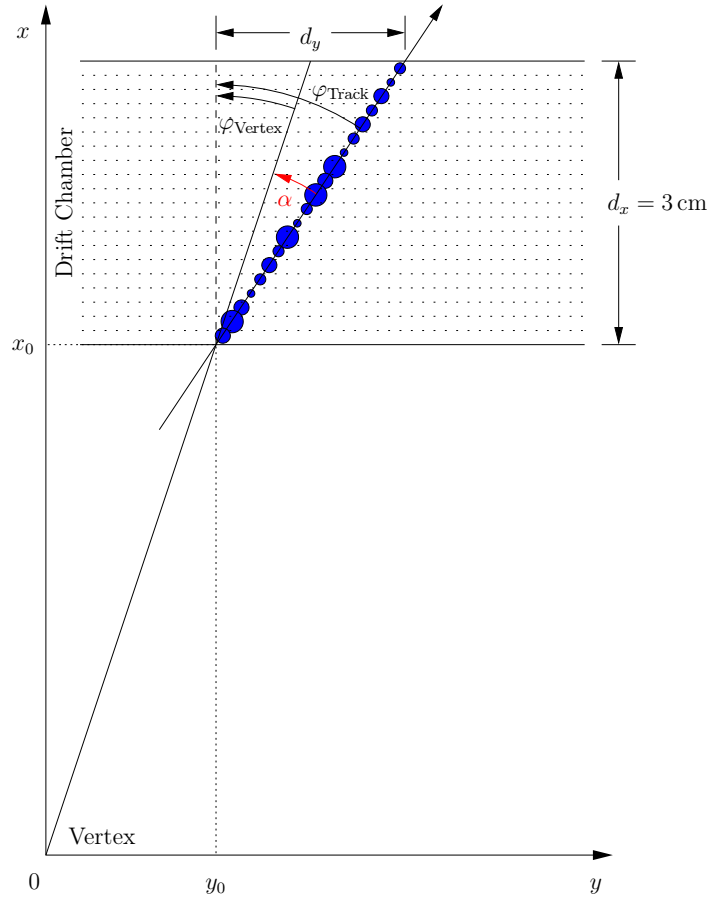


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der Teilchenbahn durch ein Detektormodul. Aus der Ablenkung d_y kann auf den Winkel α des Spursegments zur Vertexrichtung geschlossen werden.

Um aus der Ablenkung d_y den Winkel α zur Vertexrichtung zu berechnen, wird die x -Position der Kammer und die y -Position des Spursegments benötigt (siehe Abbildung 4.6). Es gilt

$$\begin{aligned} \tan(\varphi_{\text{Vertex}}) &= \frac{y_0}{x_0} & \tan(\varphi_{\text{Track}}) &= \frac{d_y}{d_x} \\ \alpha = \varphi_{\text{Track}} - \varphi_{\text{Vertex}} &= \arctan\left(\frac{d_y}{d_x}\right) - \arctan\left(\frac{y_0}{x_0}\right). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Die Größen x_0 und d_x sind für jede Kammer konstant, y_0 wird im Rahmen der notwendigen Auflösung abschnittsweise als konstant angesehen. Es lässt sich dann mit Hilfe der

Gleichungen (4.6), (4.7) und (4.9) der Transversalimpuls p_t als eindeutig umkehrbare Funktion der Ablenkung d_y schreiben. Statt der Bedingung $|p_t| \geq p_{t, \min}^{\text{LTU}}$ kann bei entsprechend gewählten Schwellwerten $d_{y, \min}, d_{y, \max}$ auf die Bedingung

$$d_{y, \min} \leq d_y \leq d_{y, \max}$$

überprüft werden (siehe Abbildung 4.7).

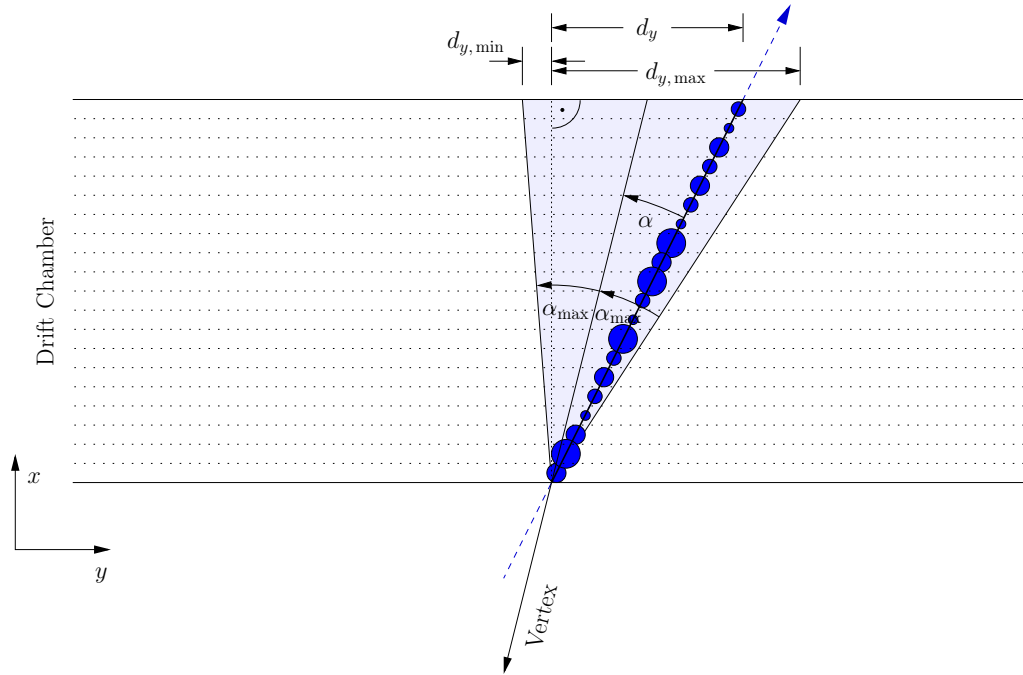


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Schwellwerte für die minimale bzw. maximale Ablenkung. Statt α mit α_{\max} kann direkt d_y mit $d_{y, \min}$ und $d_{y, \max}$ verglichen werden.

Die minimale und maximale Ablenkung $d_{y, \min}$ bzw. $d_{y, \max}$ ergeben sich also aus dem maximalen Ablenkwinkel α_{\max} nach

$$\begin{aligned} d_{y, \min} &= d_x \cdot \tan \left(\arctan \left(\frac{y_0}{x_0} \right) - \alpha_{\max} \right) \\ d_{y, \max} &= d_x \cdot \tan \left(\arctan \left(\frac{y_0}{x_0} \right) + \alpha_{\max} \right). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Die Schwellwerte $d_{y, \min}, d_{y, \max}$ werden für jede LTU einzeln für ihre Position und einige verschiedene y_0 -Werte in ihrem y -Bereich nach den Gleichungen (4.8) und (4.10) vorberechnet und als Wertetabelle im Speicher der LTU abgelegt. Bei der Bearbeitung eines Spuresegments werden zur vorliegenden y -Position aus der Tabelle die entsprechenden Schwellwerte ausgelesen; die Vergleiche mit der gemessenen Ablenkung d_y ergeben, ob das Spuresegment an das Auslesenetzwerk übergeben oder verworfen wird.

Die beiden vorgestellten Korrekturen und das Auswahlverfahren lassen sich sehr effizient in den CPUs der LTUs implementieren, da die Berechnungen nur aus drei Additionen bzw. Vergleichen bestehen. Die Beschreibung der in Abschnitt 4.1.1 in die GTU verlagerten Berechnungen ist Teil des folgenden Kapitels.

5 Kombination der Spursegmente zu Spuren

In diesem und dem folgenden Kapitel werden für verschiedene funktionale Teile der GTU Rechenverfahren entwickelt und anschließend in eine Hardwarebeschreibung umgesetzt. Die Verfahren werden so gewählt, dass sie sich effizient in Hardware realisieren lassen. Dabei ist wegen der geringen verfügbaren Berechnungszeit insbesondere die Parallelisierbarkeit ein entscheidendes Kriterium. Sequentielle bzw. iterative Algorithmen sollten vermieden werden. Speziell aufwändige Methoden wie die Kalman-Filterung sind für die Umsetzung des Triggers ungeeignet.

Inhalt dieses Kapitels ist das Zusammenfügen der Spursegmente des Detektors zu Teilchen Spuren. Im ersten Abschnitt wird dazu ein grundlegendes Verfahren vorgestellt, dessen Anwendbarkeit sich in der Root-Simulation zeigt. Ausgehend von der Simulation wird in den weiteren Abschnitten eine möglichst schnelle und effiziente Hardwareumsetzung entwickelt. Dabei wird das grundlegende Berechnungsverfahren variiert und optimiert.

5.1 Grundlagen

Es wird ein einfach zu überprüfendes Kriterium benötigt, das anhand der Daten mehrerer Spursegmente angibt, ob diese vermutlich zur selben Spur gehören oder nicht.

Verschiedene Spursegmente des gleichen Teilchens haben einen ähnlichen Winkel α zur Vertexrichtung, ihre z -Positionen liegen in der x - z -Ebene auf einer Geraden mit dem Kollisionspunkt und ihre y -Positionen liegen in der x - y -Ebene näherungsweise auf einer Geraden, deren Steigung $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ gleich derer der einzelnen Spursegmente ist.

5.1.1 Projektion auf die Mittelebene

Eine einfache Möglichkeit, die Bedingungen zu überprüfen, besteht darin, die Spursegmente auf eine gemeinsame gedachte Ebene senkrecht zur x -Achse zu projizieren. Dabei wird in y -Richtung für die Projektion die Steigung des Spursegments verwendet, in z -Richtung wird in Vertexrichtung projiziert. Um die Fehler der projizierten Position möglichst klein und für Spursegmente aus allen Ebenen möglichst ähnlich zu halten, wird als Projektionsebene die Mittelebene eines Modulstapels verwendet. Abbildung 5.1 zeigt die Projektion in der x - y -Ebene.

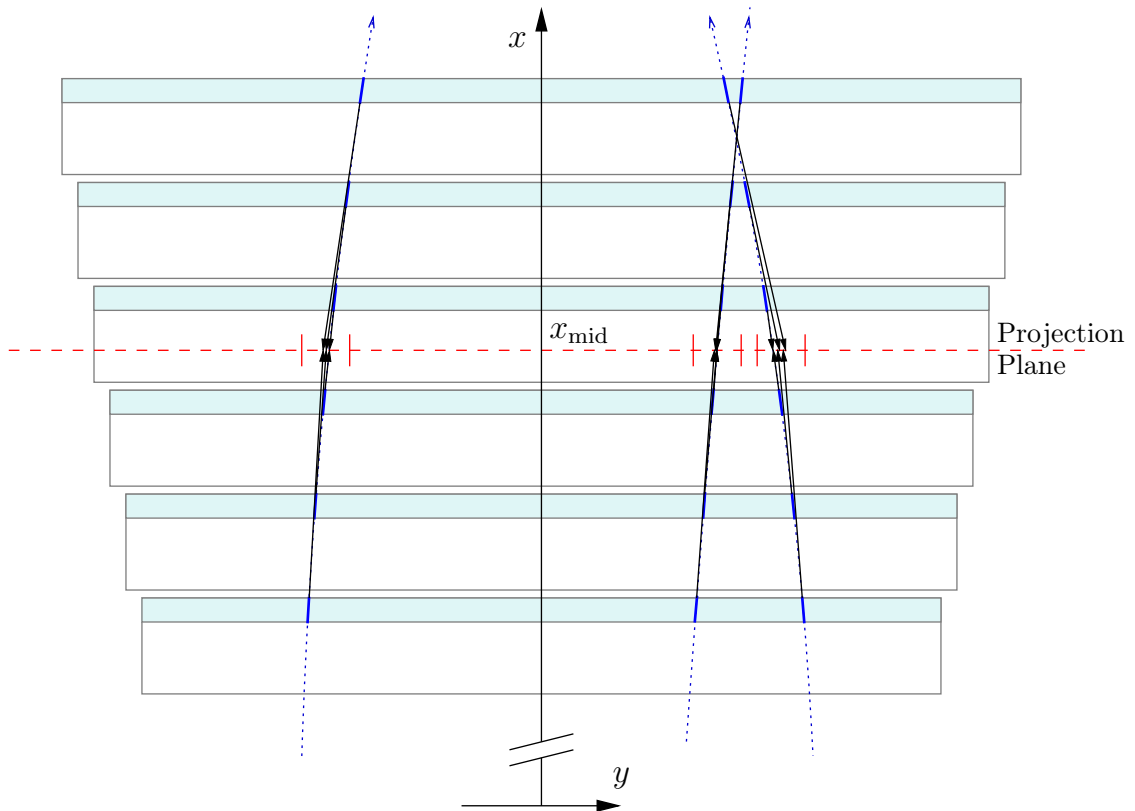


Abbildung 5.1: Die Spursegmente werden auf eine gedachte Mittelebene projiziert.

Berechnungen für jedes Spursegment

Für jedes Spursegment werden folgende Vergleichsgrößen berechnet:

1. Die in Richtung zum Kollisionspunkt auf die Stapelmittelebene projizierte y -Koordinate

$$y_{\text{proj}} = y + d_y \cdot d_i \quad (5.1)$$

mit der Konstanten:

$$d_i = x_i - x_{\text{mid}}$$

x_i : x -Koordinate der Kammeraußenseite in Ebene i

x_{mid} : mittlerer Radius des Detektors (3,334 m)

i : Ursprungsebene des Spursegments

2. Die in Richtung zum Kollisionspunkt auf die Stapelmittelebene projizierte z -Koordinate

$$z_{\text{proj}} = z \cdot \frac{x_{\text{mid}}}{x_i} \quad (\text{nach dem Strahlensatz})$$

3. Der Ablenkwinkel α des Spursegments gegen die Vertexrichtung. Statt

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_y}{d_x}\right) - \arctan\left(\frac{y}{x_i}\right)$$

kann man näherungsweise

$$\alpha = \frac{d_y}{d_x} - \frac{y}{x_i} \quad (5.2)$$

verwenden. Da die Werte für das Argument des Arcustangens sehr klein sind, ist der Fehler hier vernachlässigbar.¹ d_x ist dabei die Dicke einer Kammer (3,0 cm).

5.1.2 Fensterkriterium

Zusammengehörende Spursegmente zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Projektionen in der gemeinsamen Ebene eng beieinander liegen und im Winkel α nahezu übereinstimmen. Spursegmente, die sich in den berechneten drei Größen nur wenig unterscheiden, werden daher zu einem Kandidaten vereinigt. Die Grenzwerte, die in der Simulation dafür verwendet werden, sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.² Die GTU geht von einer gefundenen

Größe	max. Abweichung
y_{proj}	11,625 mm
z_{proj}	100 mm
α	0,05 rad = 2,86°

Tabelle 5.1: Die Zahlenwerte für das GTU-Fensterkriterium.

Teilchenspur aus, wenn innerhalb des dreidimensionalen Fensters mindestens vier Spursegmente aus verschiedenen Ebenen zu liegen kommen.

5.1.3 Hardwareumsetzung

Bei einer Bearbeitungsdauer von 1,4 μs und einer angepeilten Taktrate von 40 MHz stehen insgesamt 56 Rechentakte zur Verfügung, wovon etwa die Hälfte für das Vereinigen der Spursegmente zu veranschlagen ist. Wollte man jedes der bis zu 40 Spursegmente pro Modul (siehe Abb. 5.9) nacheinander mit allen Spursegmenten der anderen Ebenen vergleichen, müssten in jeder TMU bis zu $\frac{40 \cdot 5 \cdot 40 \cdot 6}{2} = 24\,000$ Paarvergleiche sequentiell ausgeführt werden. Das würde etwa die 1000fache zur Verfügung stehende Zeit beanspruchen.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Spursegmente in ein dreidimensionales Histogramm einzutragen und darin nach Häufungspunkten zu suchen. Das Eintragen kann direkt während der Datenübertragung stattfinden. Sehr aufwändig ist aber das Finden der Häufungspunkte. Zu den Segmentanzahlen in den Histogrammzellen müssen jeweils die Anzahl Spursegmente in den umliegenden Zellen hinzuaddiert werden, damit auch Spursegmente gefunden werden, die auf den Grenzbereich von zwei Zellen abgebildet werden. Werden in drei Dimensionen auch diagonale Nachbarschaften berücksichtigt, müssen jeweils 26 Nachbarzellen einbezogen werden.

¹Bei einer Genauigkeit von 1/200 rad ergibt die vereinfachte Rechnung in der Simulation in 81 % der Fälle exakt dasselbe Ergebnis, in den anderen Fällen beträgt die Abweichung ± 1 Bit.

²Die Werte sind etwas größer als jene in [ALI01, S. 100]. Sie werden in Anlehnung an die ‚theoretische‘ Simulation von Dr. B. Vulpescu gewählt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein anderes Verfahren verwendet. Die vorgestellte Lösung macht sich zunutze, dass die drei Vergleichsgrößen in Bezug auf Genauigkeit und Wertebereich sehr verschieden geartet sind. Außerdem berücksichtigt es die Reihenfolge der Spursegmente bei der Datenübertragung, so dass bereits während der Übertragungsdauer mit der Verarbeitung begonnen werden kann.

Die Spursegmente werden aus jedem halben Modul in einer festen Reihenfolge ausgelesen. Sie sind bei der Übertragung zunächst nach der Padreihennummer z in aufsteigender Reihenfolge sortiert, Spursegmente mit gleichem z werden in Reihenfolge aufsteigender y -Koordinate übertragen. Durch die Projektion der y -Koordinate auf die Mittelebene in der GTU wird diese Untersortierung allerdings teilweise zerstört.

Sind die Spursegmente in einer der drei Variablen sortiert, so müssen zur Überprüfung des Vereinigungskriteriums in dieser Variablen nicht alle, sondern nur aufeinander folgende Spursegmente betrachtet werden.

Wie stark die Kennzeichnungskraft einer Variablen für die Spurvereinigung ist, kann durch Vergleich der Fensterbreite mit dem Wertebereich der Variablen ermittelt werden. Die (projizierte) y -Koordinate hat mit Abstand die höchste Kennzeichnungskraft. Die verwendete Fensterbreite beträgt lediglich etwa $\frac{1}{110}$ des Wertebereichs. Der Ablenkwinkel α besitzt mit etwa $\frac{1}{5}$ des Wertebereichs die geringste Kennzeichnungskraft. Bei der z -Position beträgt der Anteil etwa $\frac{1}{16}$.

Um die Sortierung bei der Übertragung zu nutzen, werden zunächst die z -Werte der Spursegmente verglichen. Die Nummer der Padreihe z weist die Besonderheit auf, dass ihr Bereich nur 16 mögliche Werte umfasst. Das explizite Vergleichen der (projizierten) z -Koordinaten kann daher implizit durch parallele Betrachtung aller Möglichkeiten realisiert werden. Das Vorgehen wird in Abschnitt 5.4.1 dargestellt.

Da die (projizierte) y -Koordinate die höchste Kennzeichnungskraft besitzt, bildet sie im Anschluss das Hauptkriterium für die Spurvereinigung. Werden Spursegmente gefunden, die in z und y ausreichend übereinstimmen, wird schließlich noch der Winkel α der Spursegmente verglichen.

5.2 Aufbau der Spurvereinigungseinheiten (TMUs)

In den folgenden Abschnitten wird eine der 90 identischen TMUs beschrieben, aus denen die GTU besteht und die eigenständig die Daten eines Detektorstapels verarbeitet (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Abbildung 5.2 gibt einen Überblick über den Aufbau einer TMU, wie sie im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. In den Eingangseinheiten werden die parametrisierten Spursegmente aus den LTUs der sechs Ebenen empfangen und es werden weitere Parameter für das Zusammenfügen zu Spuren vorberechnet. Die Z-Kanal-Einheiten überprüfen anschließend implizit die Übereinstimmung der Spursegmente in z -Richtung und sortieren sie nach

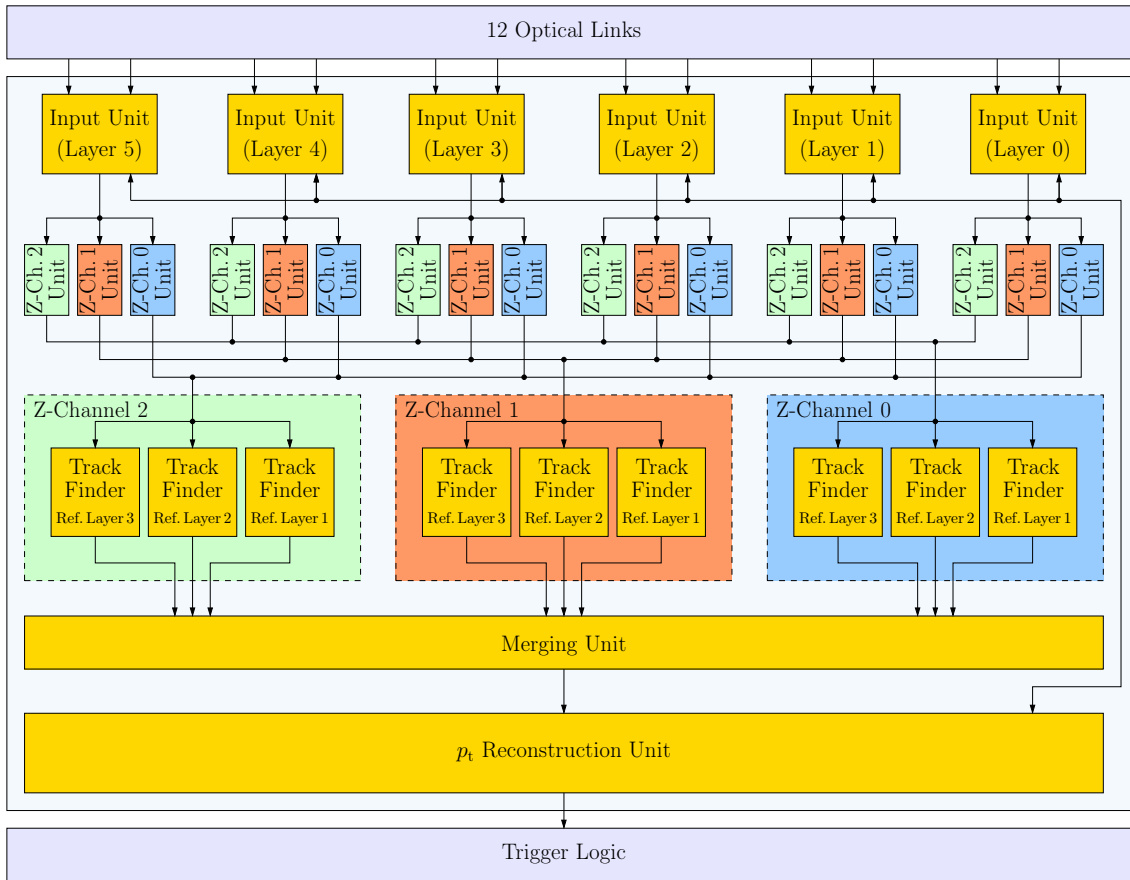


Abbildung 5.2: Der Aufbau einer TMU. Die TMU empfängt die Spursegmentdaten von einem Modulstapel, fügt sie in mehreren Stufen zu Spuren zusammen und rekonstruiert den Transversalimpuls der erzeugenden Teilchen. Die Daten der gefundenen Spuren werden an eine einfache GTU-interne Triggerlogik übermittelt, die die Daten aller 90 TMUs empfängt und zusammenfasst.

ihrer y -Koordinate. In den Spurfindeeinheiten werden die Spursegmente der verschiedenen Ebenen unter Vergleich ihrer y -Koordinaten und Ablenkwinkel zu Spuren kombiniert. Die Ergebnisse der Spurfindeeinheiten werden zu einem Datenstrom gefundener Spuren zusammengefasst. Für jede Spur wird schließlich in der Rekonstruktionseinheit der Transversalimpuls p_t des erzeugenden Teilchens berechnet.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die einzelnen Entwurfseinheiten der TMU erläutert. Bei der Entwicklung der Einheiten wurden bestimmte gemeinsame Grundsätze berücksichtigt:

- Ausnutzung der Übertragungszeit
Die Verarbeitung der Spursegmente beginnt bereits während der Übertragung. Ziel ist, dass die Berechnung stets so weit fortgeschritten ist, wie es mit den vorhandenen Daten möglich ist.

- **Parallelisierung**
Berechnungen, die unabhängig voneinander gleichzeitig möglich sind, werden in der Regel nicht sequentiell ausgeführt, sondern durch Vervielfachung der entsprechenden Ausführungseinheit parallelisiert.
- **geringe Verzögerungszeit (Latenz)**
In allen Entwurfseinheiten wird besonders auf eine geringe Latenz geachtet. Die Einheiten puffern Daten nur so lange wie unbedingt nötig. Stehen Zwischenergebnisse fest, werden sie unverzüglich an die nächste Einheit weitergeleitet.
- **kein Handshaking**
Zwischen den einzelnen Entwurfseinheiten findet kein Handshaking statt, d. h. eine Einheit darf zu jeder Zeit Daten an die nächste weitergeben und muss selbst auch in jedem Takt Daten akzeptieren können. Gegebenenfalls muss dies durch Pufferspeicher gewährleistet werden. Zu jedem Datensignal existiert ein Kontrollsignal, welches pro Takt angibt, ob ein Datenwort übertragen wird.
- **Bit-optimierte Signale**
Die Datensignale, die physikalische Größen repräsentieren, werden als Ganzzahlen mit minimaler Bitbreite implementiert, indem für jedes Signal die notwendige Auflösung und der Wertebereich bestimmt werden. Die Zahlen sind in der Regel vorzeichenbehaftet und werden in Zweierkomplementdarstellung realisiert.
- **generisches Design**
Die Bitbreiten und Genauigkeiten aller Datensignale werden aus wenigen konstanten Parametern abgeleitet. Soll beispielsweise die Zusammensetzung des Übertragungsdatenworts geändert werden, sind so nur an einer Stelle des Entwurfs Änderungen notwendig.

5.3 Eingangseinheit

Jede Eingangseinheit fasst die Daten von zwei optischen Empfängern zusammen und berechnet verschiedene Parameter für die Spurrekonstruktion in den folgenden Einheiten. Erst später benötigte Werte werden in einem Speicher abgelegt und in Form ihrer Speicheradresse weitergeleitet. Abbildung 5.3 zeigt die Eingangseinheit als Blockschaltbild.

5.3.1 Format der Eingangsdaten

Die Daten der Spursegmente werden von den LTUs als 32-Bit-Worte an die GTU übertragen. Die Netzwerkschnittstelle behandelt die Datenworte intern jeweils als zwei 16-Bit-Worte, wobei das niederwertigere Halbwort zuerst übertragen wird. Der Abschluss der Übertragung wird von der Netzwerkschnittstelle durch ein 16 Bit breites Endwort gekennzeichnet, das frei konfigurierbar ist. Es muss so definiert werden, dass es als untere Hälfte eines Datenworts interpretiert einem für die Anwendung unmöglichen Wert entspricht. In

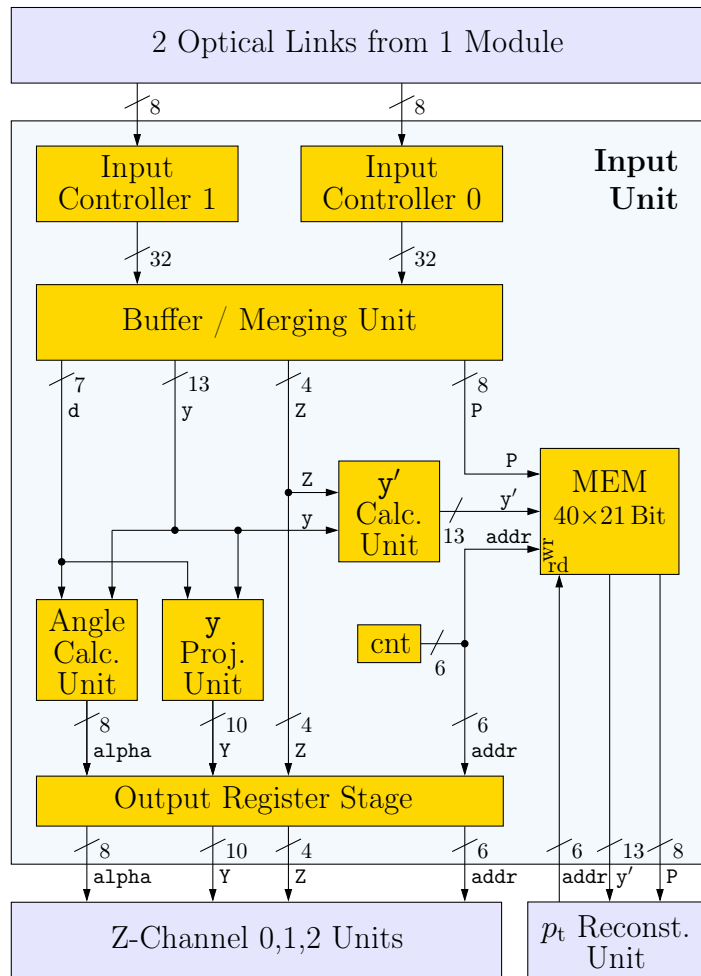


Abbildung 5.3: Der Aufbau einer Eingangseinheit als Blockschaltbild. Die Eingangseinheit empfängt die Spursegmentdaten von einem Detektormodul und führt die Berechnungen aus, die für jedes Segment unabhängig durchgeführt werden können.

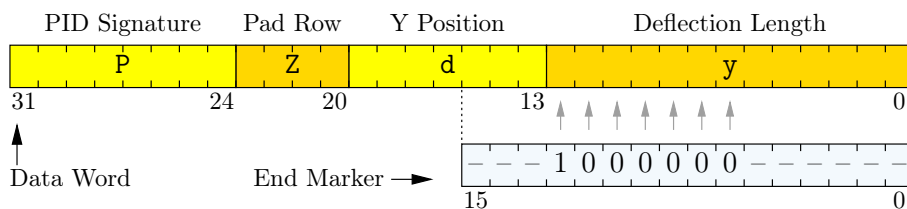


Abbildung 5.4: Zusammensetzung der 32-Bit-Datenworte, die an die GTU übertragen werden. Das Endwort umfasst nur 16 Bit und wird durch die angegebenen Ziffern gekennzeichnet.

Abbildung 5.4 sind der Aufbau des Datenworts und das gewählte Endwort dargestellt. Die GTU überprüft im Endwort lediglich die angegebenen Stellen.

Für die Hardware-Implementierung wird entsprechend Tabelle 4.1 mit Ganzzahlen gerechnet:

$$y := \frac{y}{160 \mu\text{m}}, \quad d := \frac{d_y}{140 \mu\text{m}}. \quad (5.3)$$

Im Folgenden werden die einzelnen Bauelemente der Eingangseinheit beschrieben.

5.3.2 Eingangssteuereinheit

Die Eingangssteuereinheiten (Input Controllers) setzen die einzelnen Bytes des Übertragungsnetzwerks, die bei 120 MHz und doppelter Datenrate (*Double Data Rate*, DDR) ankommen, wieder zu 32-Bit-Worten zusammen.

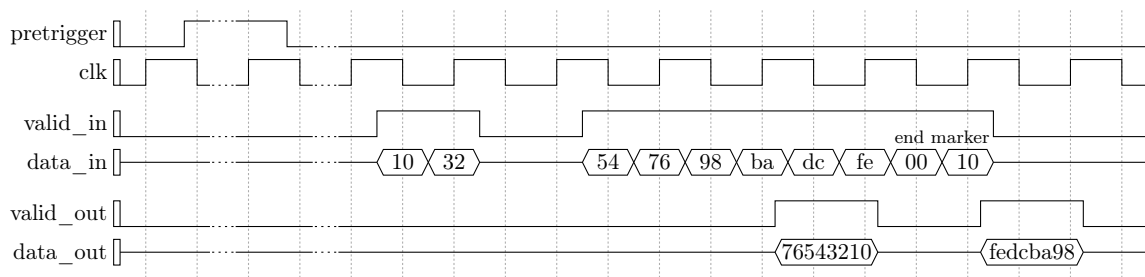


Abbildung 5.5: Beispiel für das von einer TMU erwartete Zeitverhalten der DDR-Eingangssignale und die Reihenfolge der Teilworte. Es werden hier zwei Spursegmente übertragen. Zwischen den beiden 8-Bit-Daten innerhalb eines Takts darf die Übertragung nicht unterbrochen werden, zwischen den 16-Bit-Halbworten sind beliebige Pausen zulässig.

In Abbildung 5.5 ist das Verhalten der der Eingangssteuereinheit für eine Beispielübertragung dargestellt. Durch das **pretrigger**-Signal wird die Steuereinheit zum Datenempfang bereit geschaltet. Es werden jeweils zwei 8-Bit-Worte in einem Takt übertragen, wobei jeweils die Daten, die zur fallenden und zur darauffolgenden steigenden Taktflanke anliegen, zusammengehören und zu 16-Bit-Worten zusammengesetzt werden. Zwischen den 16-Bit-Worten sind Unterbrechungen möglich, gültige Daten werden durch das Signal **valid_in** angezeigt. Jeweils zwei aufeinander folgende 16-Bit-Worte werden zu einem 32-Bit-Wort vereinigt, das ein Spursegment repräsentiert und an die nächste Verarbeitungseinheit weitergegeben wird. Durch das 16-Bit-Endwort `0x1000` (vgl. Abbildung 5.4) wird das Ende der Übertragung angezeigt. Weitere Datenworte werden von der Eingangssteuereinheit ignoriert.

5.3.3 Zusammenfügen der Daten der beiden Eingänge

In der nächsten Einheit (Buffer/Merging Unit) werden die 32-Bit-Worte der beiden Eingangssteuereinheiten zu einem Datenstrom vereinigt. Die Daten werden in zwei FIFO-

Speichern³ zwischengespeichert. Nach aufsteigender z -Koordinate wird jeweils aus einem der beiden FIFOs ein Datenwort ausgelesen und in seine Bestandteile aufgetrennt ausgegeben.

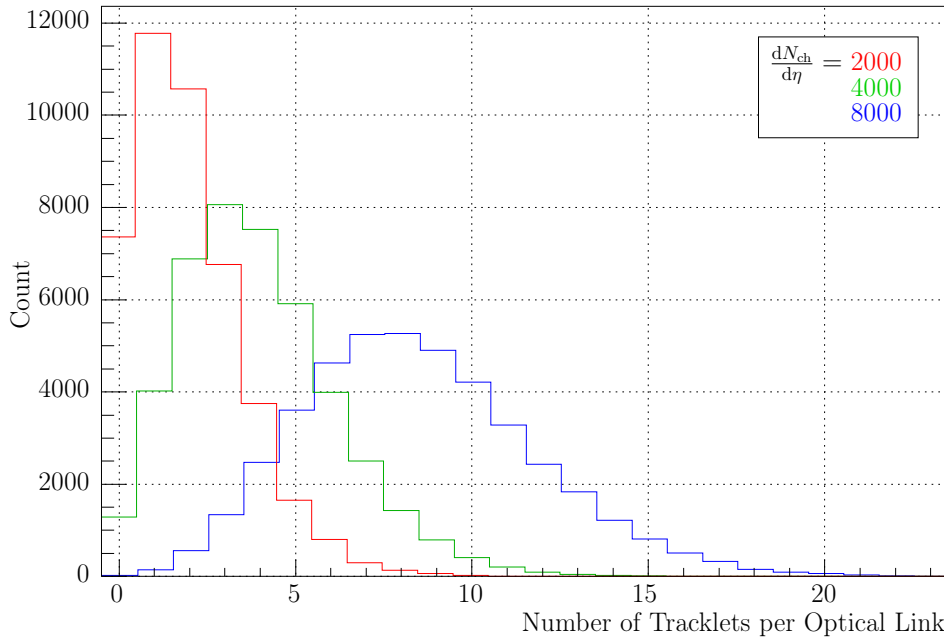


Abbildung 5.6: Verteilung der Anzahl der Spursegmente pro optischer Verbindung für verschiedene Multiplizitätsdichten. Die maximale Anzahl akzeptierter Spursegmente legt u. a. fest, wie viel Zeit für die Datenübertragung vorgesehen werden muss; es ist dabei ein Wert von 20 vorgesehen.

Für die benötigte Größe der Zwischenspeicher ist die maximale Anzahl Spursegmente pro optischer Verbindung pro Ereignis wichtig. Abbildung 5.6 zeigt die Verteilung als Ergebnis der Simulation. Selbst bei der höchsten Multiplizität treten äußerst selten mehr als 20 Spursegmente pro Modulhälfte auf. Diese Zahl stellt auch das Maximum dar, das durch die Beschränkung der Übertragungsdauer festgelegt ist.

5.3.4 Berechnung des Ablenkungswinkels

Die in Abbildung 5.7 dargestellte Winkelberechnungseinheit rechnet die Ablenkung d_y in den Ablenkungswinkel α gegen die Vertexrichtung um. Sie implementiert Gleichung (5.2) als⁴

$$\alpha = \left[d + \frac{1}{2} \cdot \left[\left\lfloor \frac{y}{2^4} \right\rfloor \cdot \frac{C_i}{2^{10}} \right] + \frac{1}{2} \right] \approx d + \frac{C_i}{2^{15}} \cdot y, \quad (5.4)$$

wobei die Ablenkung d nicht skaliert wird, so dass eine Addition und eine Multiplikation mit einer Konstanten zur Berechnung ausreichen. Die von der Ebene i abhängige Konstante

³FIFO: first-in, first-out

⁴Die Zeichen $\lfloor \cdot \rfloor$ sind die unteren Gaußklammern, durch die eine Zahl zur nächsten Ganzzahl abgerundet wird.

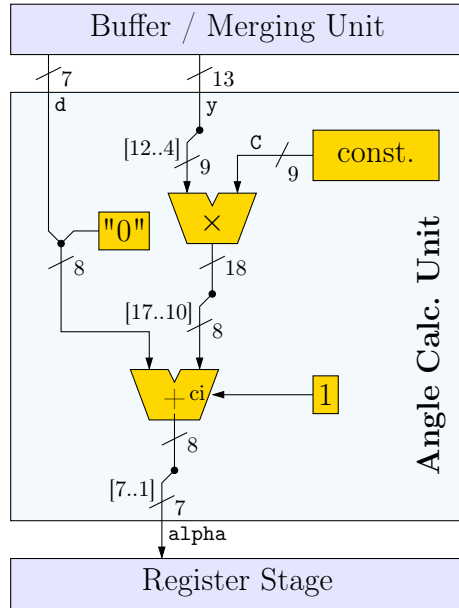


Abbildung 5.7: Der Aufbau der Recheneinheit für den Ablenkwinkel. Durch Addition der entsprechend der Detektorebene geeignet skalierten y -Koordinate wird aus der Ablenkung des Spursegments in guter Näherung der Ablenkwinkel gegen die Vertexrichtung.

ist definiert als

$$C_i := -\frac{3 \text{ cm}}{x_i} \cdot \frac{160 \mu\text{m}}{140 \mu\text{m}} \cdot 2^{15}. \quad (5.5)$$

Die Einheit des Winkels α ist damit durch das Verhältnis $\frac{140 \mu\text{m}}{3 \text{ cm}}$ festgelegt:

$$\alpha = \frac{\alpha}{0,0046 \text{ rad}} \quad (5.6)$$

5.3.5 Projektion der y -Koordinate

In Abbildung 5.8 ist die Projektionseinheit dargestellt, die die y -Koordinate auf die gedachte Mittelebene projiziert. Sie implementiert Gleichung (5.1) als

$$Y = \left[\frac{1}{2} \left[\frac{1}{2^2} y + \frac{1}{2^2} \left[\frac{C_i}{2^2} d \right] \right] + \frac{1}{2} \right] \approx \frac{1}{2^3} \cdot y + \frac{C_i}{2^5} \cdot d \quad (5.7)$$

mit der von der Ebene i abhängigen Konstanten

$$C_i = -\frac{x_i - x_{\text{mid}}}{3 \text{ cm}} \cdot \frac{140 \mu\text{m}}{160 \mu\text{m}} \cdot 2^2. \quad (5.8)$$

Das Ergebnis ist die projizierte y -Koordinate

$$Y = \frac{y_{\text{proj}}}{1,28 \text{ mm}}. \quad (5.9)$$

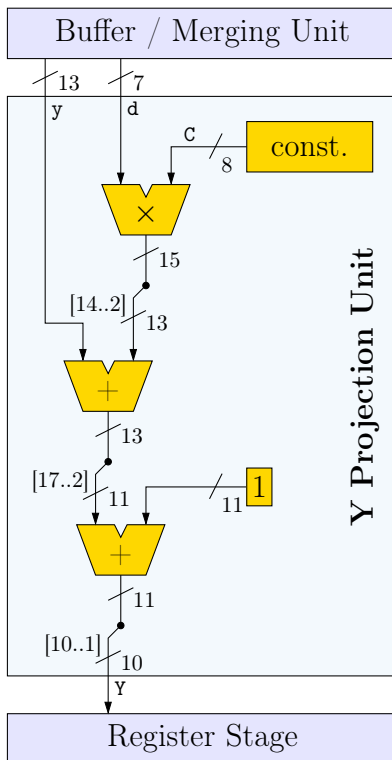


Abbildung 5.8: Der Aufbau der Berechnungseinheit für die y -Projektion. Zur y -Koordinate wird ein geeignetes Vielfaches der Ablenkung – abhängig von der Detektorebene – hinzuzaddiert. Die zweite Addition und das Abschneiden der hinteren Binärstellen bewirken eine Rundung des projizierten y -Wertes.

5.3.6 Berechnungen und Zwischenspeicherung der Rekonstruktionsparameter

Für die Berechnung der Ausgleichsgeraden durch die Spursegmente nach Gleichung (6.8) wird der Wert y'_i entsprechend (6.4) benötigt. Dafür wird in der y' -Berechnungseinheit zur unprojizierten y -Koordinate y ein von der Ebene i und von Z abhängiger Tabellenwert hinzuzaddiert:

$$y' = y + C_{i,z}.$$

Die Tabellenwerte $C_{i,z}$ ergeben sich aus der Geometrie des Detektors durch Vergleich mit Gleichung (6.4).

Für jedes Spursegment wird der Wert von y' zusammen mit der Elektronwahrscheinlichkeit P in einem Speicher abgelegt. Die benötigte Größe des Speichers ergibt sich wiederum aus der Simulation. In Abbildung 5.9 ist die Verteilung der Anzahl der Spursegmente pro Modul – was zwei optischen Verbindungen entspricht – dargestellt.⁵ Um auch bei hoher Multiplizität alle Spursegmente speichern zu können, wird die Tiefe des Speichers auf 40 Einträge festgelegt. Die Speicheradresse kommt aus einem 6-Bit-Zähler, der durch das *pretrigger*-Signal auf Null gesetzt wird und sich für jedes Spursegment um eins erhöht.

⁵Dabei werden alle zur Übertragung vorgesehenen Spursegmente gezählt; es wird nicht berücksichtigt, dass durch die weiter oben erwähnte Einschränkung auf 20 Spursegmente pro optischer Verbindung einige Segmente wegfallen.

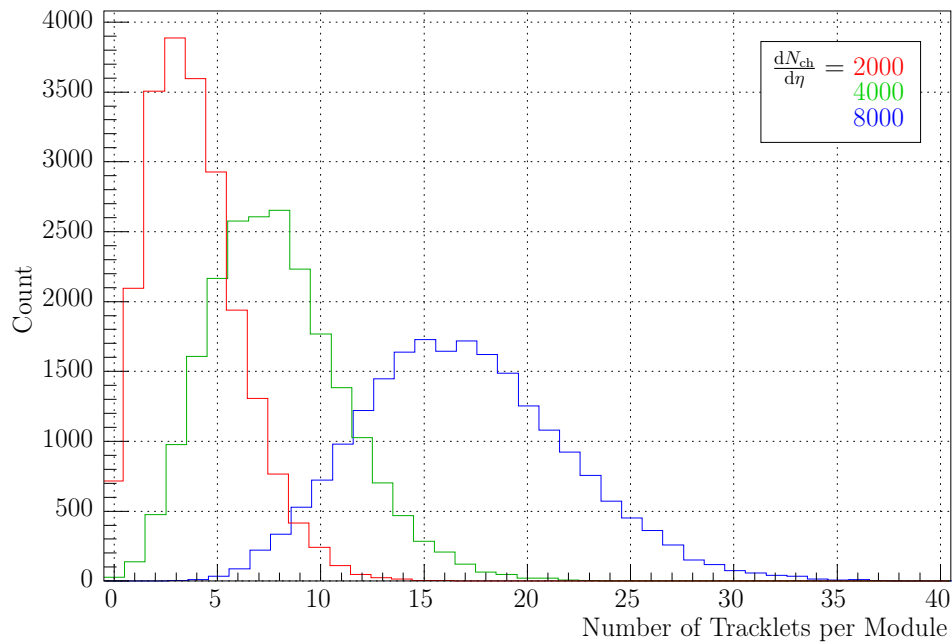


Abbildung 5.9: Verteilung der Anzahl der Spursegmente pro Detektormodul für verschiedene Multiplizitätsdichten. Die maximale Anzahl Spursegmente pro Modul legt fest, wie groß die Speicher in den Eingangseinheiten sein müssen.

Die im Speicher abgelegten Werte werden am Ende zur Rekonstruktion des Transversalimpulses und der Teilchenart einer Spur benötigt. Für die Kombination der Spursegmente zu Spuren sind sie zunächst nicht erforderlich. Indem statt der 21 Bit breiten Rekonstruktionsdaten lediglich deren 6-Bit-Adresse weitergereicht wird, können zahlreiche Register eingespart werden.

5.4 Z-Kanal-Einheit

5.4.1 Z-Kanäle

Da für die Nummer der Padreihe nur 16 verschiedene Möglichkeiten existieren, bietet es sich an, die Berechnungen an dieser Stelle zu parallelisieren.

Anstatt die z -Koordinate der Spursegmente auf eine gedachte Mittelebene zu projizieren und die Abstände zwischen den Segmenten auf dieser Ebene mit der halben Fensterbreite zu vergleichen, wird umgekehrt das Fenster auf die Ebenen der sechs Detektormodule projiziert und dort direkt mit den z -Koordinaten verglichen. Dabei wird als Ursprungsebene für die Projektion nicht die gedachte exakte Mittelebene verwendet, sondern eine der existierenden Detektorebenen. Welche Ebene dabei ausgewählt wird, ist prinzipiell beliebig. Es empfiehlt sich jedoch, eine der beiden mittleren Ebenen als Ursprungsebene zu verwenden, da so der Überschneidungsbereich der Projektionen minimiert wird. Wie sich

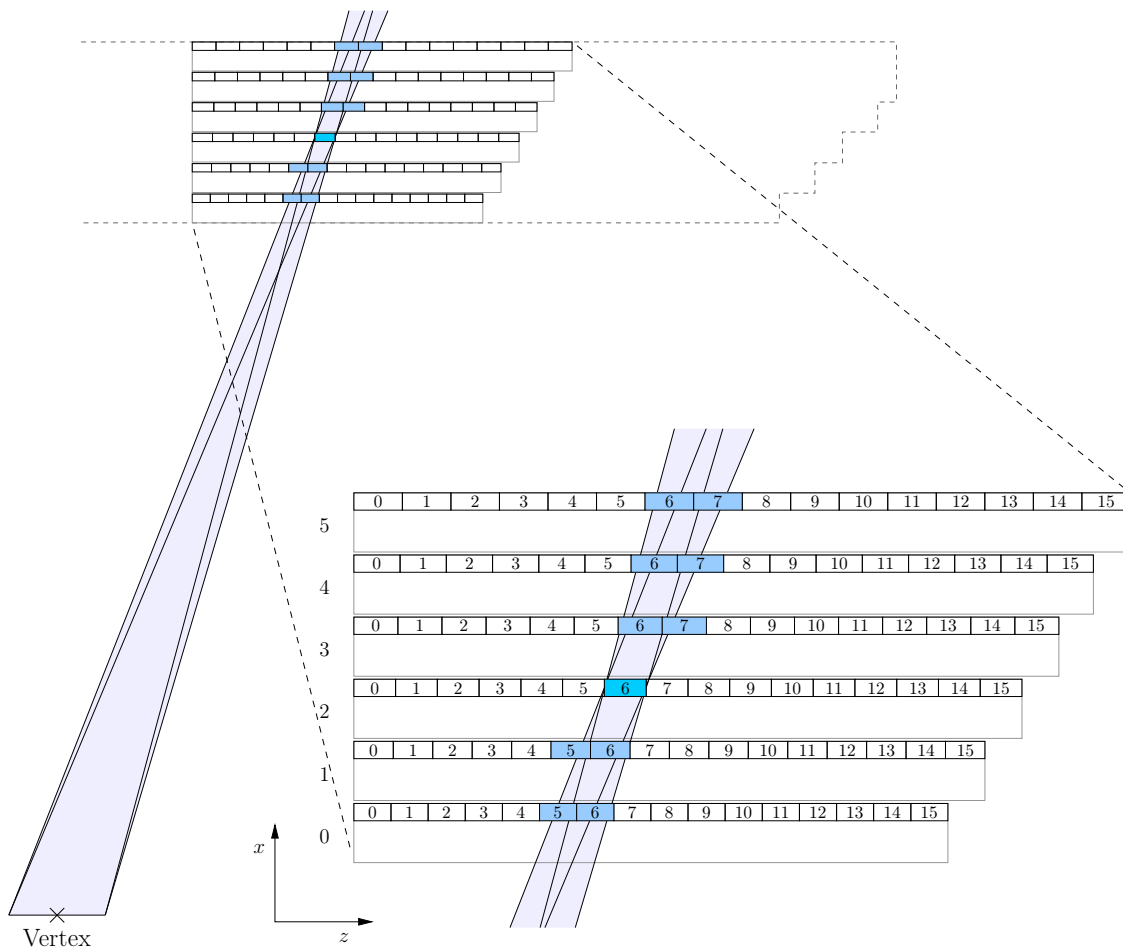


Abbildung 5.10: Querschnitt durch einen Modulstapel. Eine Teilchenspur kann die Detektormodule der verschiedenen Ebenen in verschiedenen Padreihen durchlaufen. Der markierte Bereich kennzeichnet beispielhaft die Padreihen, die ein Teilchen aus dem Vertex erreichen kann, dass in Ebene 2 die Padreihe 6 durchquert.

im Folgenden zeigen wird, ermöglicht dies eine besonders effiziente Implementierung. Für die weitere Entwicklung wird Ebene 2 ausgewählt.

Abbildung 5.10 zeigt das Prinzip der Rückprojektion in Form eines Beispiels. Ein Teilchen, dessen Bahn in Ebene 2 die Padreihe 6 (blau markiert) durchquert, kann – wenn es aus dem Kollisionspunkt kommt – aufgrund der Geometrie des Detektors in Ebene 3 nur entweder die Padreihe 6 oder die Padreihe 7 durchqueren. Für die anderen Ebenen gelten entsprechende Aussagen. Bei der Projektion wird eine Ortsunsicherheit des primären Vertex (Kollisionspunkt) in z -Richtung von ± 20 cm berücksichtigt.

Würden also von allen Spursegmenten dieses Stapels nur diejenigen berücksichtigt, die in den in Abbildung 5.10 blau markierten Padreihen liegen, so müsste die z -Koordinate nicht weiter verglichen werden. Es ist bereits durch die Auswahl der Spursegmente klar, dass sie in ihrer projizierten z -Koordinate ausreichend übereinstimmen. Allerdings würden nur

Spuren gefunden, die in Ebene 2 durch Padreihe 6 verlaufen – wobei es unerheblich ist, ob in dieser Ebene auch tatsächlich ein Spursegment gefunden wird.

Um alle Spuren zu finden, wird die beschriebene Auswahl nun für alle 16 Padreihen der Ursprungsebene parallel durchgeführt. Es ist dafür allerdings nicht notwendig, 16 komplett unabhängige Einheiten vorzusehen. Aus der Geometrie und der angenommenen Unsicherheit der Vertexposition ergibt sich, dass der Projektionsbereich in den anderen Ebenen höchstens drei Padreihen umfasst und dass sich die Projektionsbereiche von um drei Einheiten entfernten Padreihen nicht überlappen. Da die Spursegmente in z -Richtung sortiert an der GTU ankommen, kann dieselbe Einheit zunächst die Projektion der ersten Padreihe und danach die der vierten, siebten (usw.) Padreihe bearbeiten. Statt 16 unabhängiger Einheiten genügt es, drei Einheiten zu verwenden, die sich jeweils die Daten jedes dritten Projektionsbereichs zur Bearbeitung auswählen.

Die Daten der drei Einheiten werden im Folgenden als Z -Kanäle 0, 1 und 2 bezeichnet. Der Z -Kanal j enthält die Spursegmente aus dem Projektionsbereich der Padreihen k mit

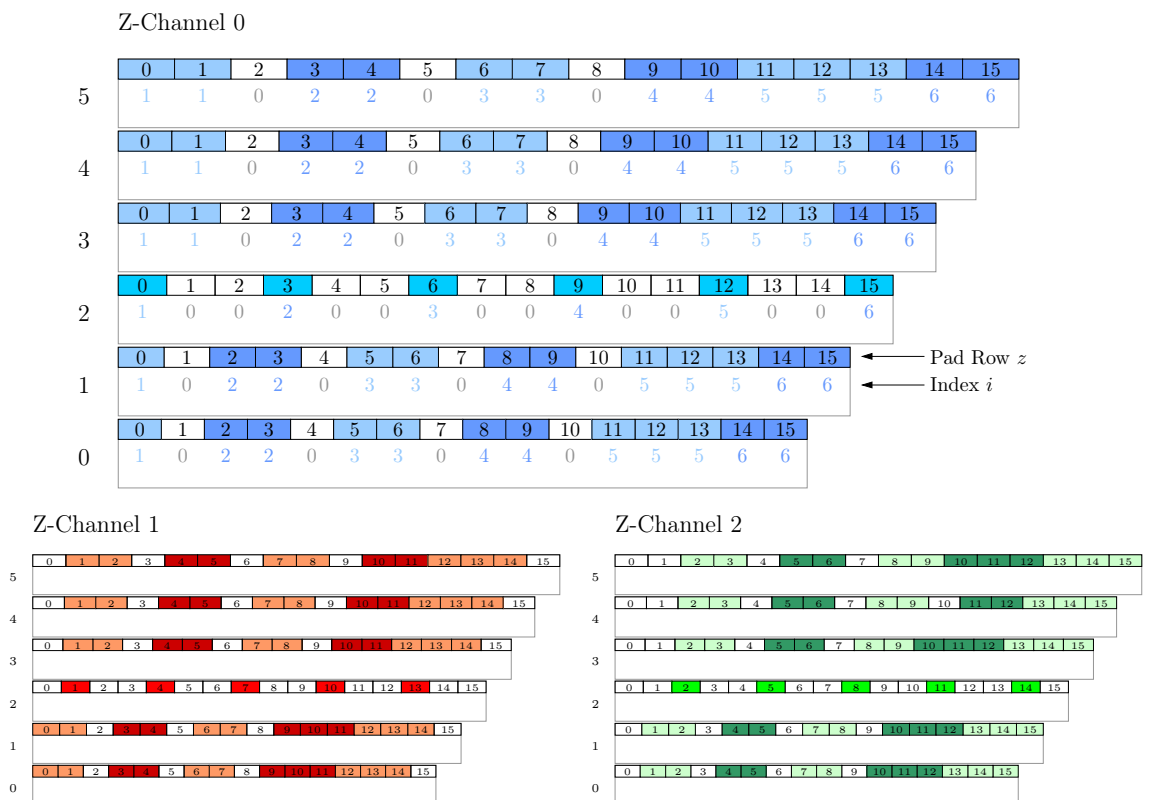


Abbildung 5.11: Verteilung der Spursegmente in die drei Z -Kanäle am Beispiel eines Detektorstapels. Die Spursegmente werden Z -Kanälen zugewiesen, die jeweils bestimmte Winkelbereiche abdecken. Entsprechend dem Winkelbereich erhält das Segment innerhalb des Kanals einen Unterkanalindex i . Kommt ein Spursegment in einem Z -Kanal nicht vor, wird dies durch $i = 0$ gekennzeichnet.

$j \equiv k \pmod{3}$. Innerhalb eines Z-Kanals bezeichnet der *Index* beginnend mit eins⁶ die laufende Nummer der Projektion (Unterkanal).

Abbildung 5.11 zeigt die Zuordnung der Spursegmente zu den drei Z-Kanälen für einen Detektorstapel. Die Aufteilung lässt sich am besten an Hand eines Beispiels erläutern: Kommt ein Spursegment von Ebene 4 aus Padreihe 3 in der GTU an, so wird ihm in Z-Kanal 0 (blau) der Index 2 zugewiesen. In Z-Kanal 1 (rot) kommt es nicht vor und in Kanal 2 (grün) erhält es den Index 1.

Indem die Daten der drei Z-Kanäle vollständig getrennt parallel verarbeitet werden und innerhalb der Kanäle nur Spursegmente mit gleichem Index zu Spuren vereinigt werden, ist die Übereinstimmung in der z -Position sichergestellt und die z -Koordinaten müssen in der weiteren Rechnung nicht mehr berücksichtigt werden. Es verdreifacht sich zwar durch dieses Vorgehen die weitere Vereinigungslogik, da aber nun nur noch in zwei Dimensionen verglichen werden muss, wird die Komplexität des Problems deutlich reduziert.

5.4.2 Aufbau einer Z-Kanal-Einheit

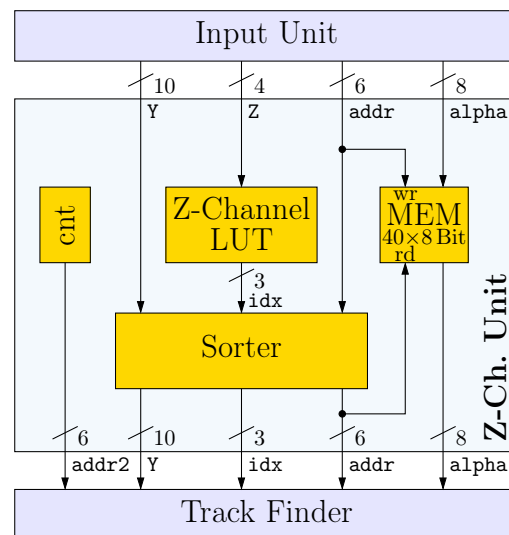


Abbildung 5.12: Der Aufbau einer Z-Kanal-Einheit als Blockschaltbild. Die Einheit erhält alle Spursegmentdaten einer Ebene. Mit Hilfe einer Wertetabelle (LUT) werden die Segmente für diesen Z-Kanal ausgewählt und über einen Index den Unterkänälen zugewiesen. Die Segmente jedes Unterkanaals werden nach ihrer y -Koordinate sortiert und an die Spurfindereinheiten weitergegeben.

Der Aufbau der Z-Kanal-Einheit ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Die insgesamt $6 \cdot 3 = 18$ Z-Kanal-Einheiten bearbeiten jeweils für eine Detektorebene einen der drei Z-Kanäle. Durch Vergleich des Z -Wertes mit einer Tabelle (*Look-up Table*, LUT) wird zunächst für jedes Spursegment entschieden ob und – falls ja – mit welchem Unterkanalindex idx es zu diesem

⁶Für einen Z-Kanal irrelevante Padreihen werden in der Hardwarebeschreibung durch den Index 0 beschrieben.

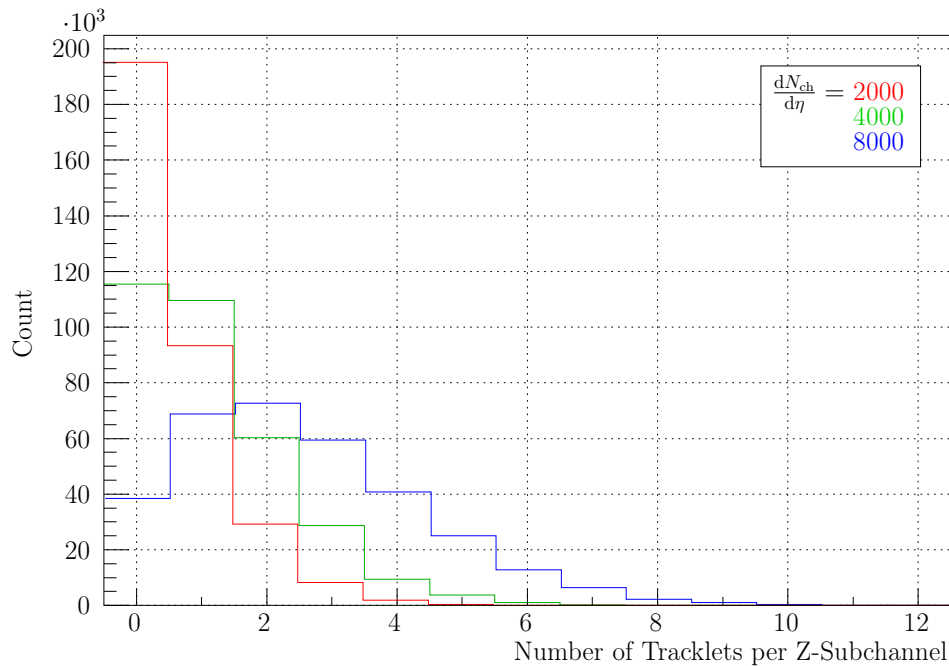


Abbildung 5.13: Verteilung der Anzahl der Spursegmente pro Z-Kanal für verschiedene Multiplizitätsdichten. Durch die maximale Anzahl wird festgelegt, wie groß der Pufferspeicher des Sortierers sein muss.

Z-Kanal gehört. Spursegmente mit gleichem Index werden anschließend im Sortierer nach ihrer projizierten y -Koordinate sortiert.

Im parallel zum Sortierer angeordneten Speicher (vgl. Abbildung 5.12) werden die `alpha`-Werte der Spursegmente abgelegt, die für die Sortierung nicht benötigt werden. Sie werden mit der zugehörigen Adresse `addr` nach dem Sortiervorgang wieder abgerufen. Es werden damit jeweils 8 Bit Speicherplatz in den aus Flip-Flops aufgebauten Sortierzellen gespart.

Da die ursprünglichen Speicheradressen `addr` nach der Sortierung nicht mehr fortlaufend aufsteigend sind, wird in einem weiteren Zähler eine zusätzliche Zahl `addr2` generiert, die die Spursegmente in der neuen Reihenfolge aufsteigend durchnummeriert. Sie wird von den nachfolgenden Speichern in der Spurfindeeinheit als Schreibadresse verwendet.

5.4.3 Z-Kanal-Auswahltabelle

Die Auswahltabelle gibt für jedes Spursegment an, ob es zu einem bestimmten Z-Kanal gehört und falls ja, welchen Unterkanalindex es darin hat. Sie implementiert die Zuordnung, wie sie in Abbildung 5.11 beispielhaft dargestellt ist. Für den angegebenen Z-Kanal 0 lautet die Wertetabelle beispielsweise in Ebene 5:

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<code>idx</code>	1	1	0	2	2	0	3	3	0	4	4	5	5	5	6	6

Der Index Null bedeutet, dass das Segment in diesem Z-Kanal nicht auftritt.

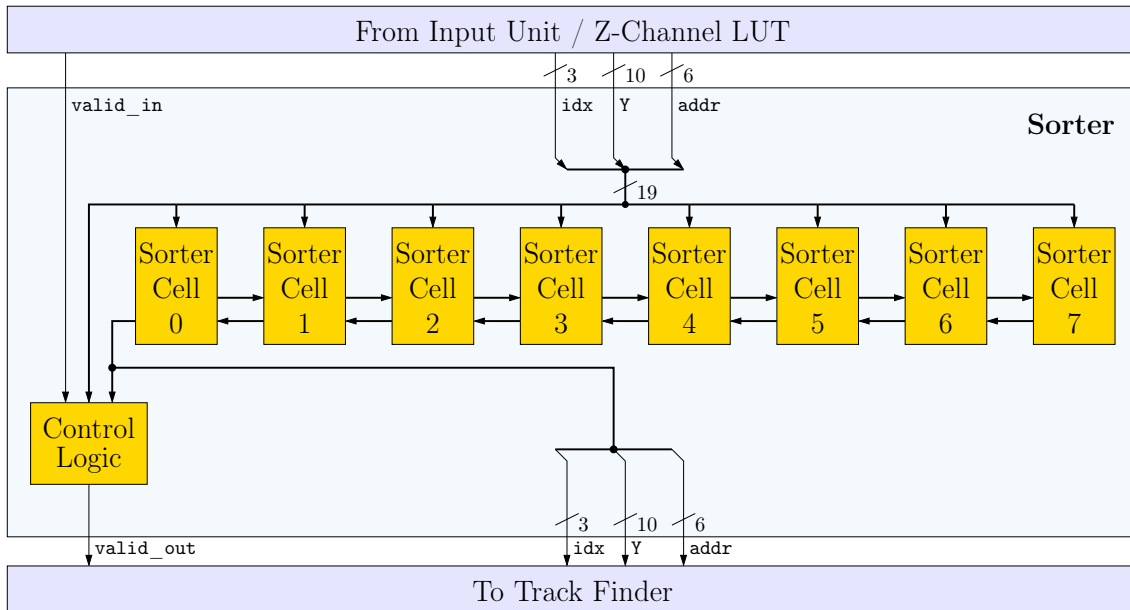


Abbildung 5.14: Der Aufbau des Sortierers als Blockschaltbild. Er besteht aus acht identischen Sortierzellen und einer Kontrolllogik. Eintreffende Spursegmente werden direkt in einer der Sortierzellen gespeichert, so dass die Segmente der Zellen stets aufsteigend sortiert sind. Über Querverbindungen können die Spursegmente zwischen benachbarten Sortierzellen verschoben werden. Befinden sich zu einem Index alle Segmente im Sortierer, werden sie nach y sortiert nacheinander ausgegeben.

5.4.4 Sortierer und Zwischenspeicher

Die ursprünglich innerhalb einer Padreihe nach y -Koordinate sortierten Spursegmente sind durch die Projektion auf die Mittelebene und durch das Zusammenfassen der Segmente aus bis zu drei Padreihen nicht mehr sortiert. Der verwendete Kombinationsalgorithmus der Spurfindeeinheit setzt aber Sortierung voraus, um nicht alle Spursegmente mit allen anderen vergleichen zu müssen.

Für die Auslegung des notwendigen Sortierers ist wichtig, wie viele Spursegmente mit gleichem Index innerhalb eines Z-Kanals auf einer Ebene tatsächlich auftreten. Abbildung 5.13 zeigt die Verteilung in der Simulation. Selbst bei maximaler Multiplizität finden sich äußerst selten mehr als acht Segmente im selben Z-Kanal, so dass die Zahl acht als maximale Tiefe des Sortierers gewählt wird.

Der Sortierer ist auf minimale Latenz optimiert. Nachdem das letzte zu vergleichende Spursegment für einen Index eingetroffen ist, beginnt bereits im folgenden Takt die Ausgabe des kleinsten Elements. Um dies zu erreichen, ist er entsprechend Abbildung 5.14 aus parallel geschalteten Sortierzellen aufgebaut. Jede Zelle speichert ein Datenwort.

Der Sortierer kann unabhängig von seinem Zustand in jedem Takt ein Datenwort übernehmen. Neue Einträge werden gleichzeitig parallel mit allen vorhandenen Einträgen verglichen

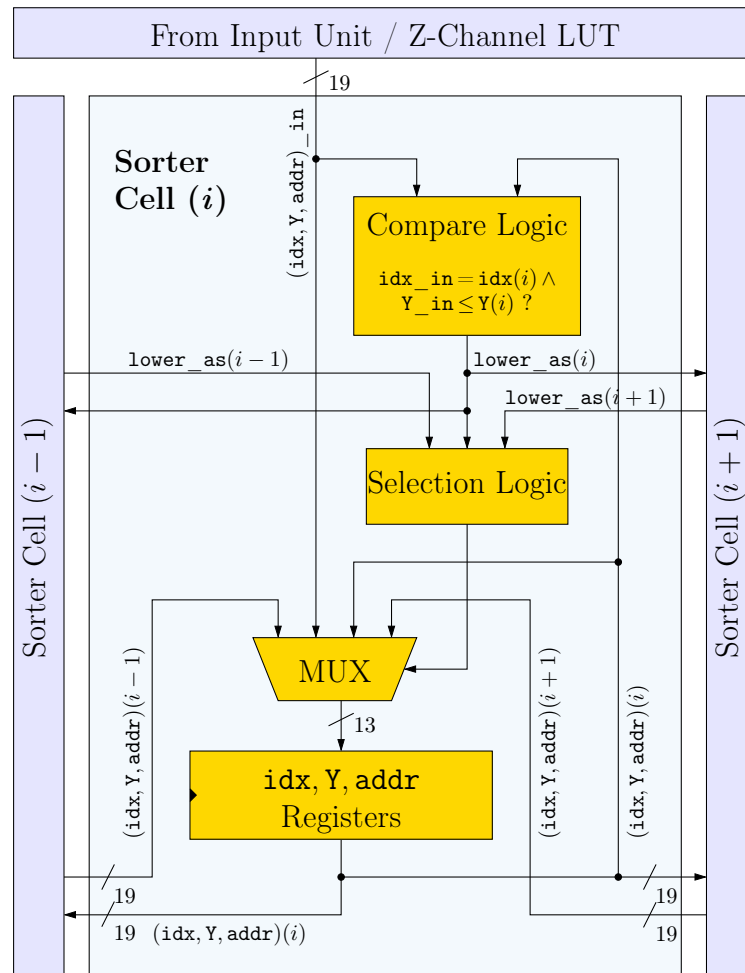


Abbildung 5.15: Der Aufbau einer Sortierzelle. Im Register werden die relevanten Daten eines Spursegments gespeichert. In jedem Takt kann das am Eingang anliegende neue Datenwort oder das Datenwort aus einer benachbarten Sortierzelle übernommen werden. Die Entscheidung wird von der Auswahllogik auf der Basis von Wertevergleichen in dieser und den angrenzenden beiden Zellen getroffen.

Schritt	Zelle 0 (idx,Y)	Zelle 1 (idx,Y)	Zelle 2 (idx,Y)	Zelle 3 (idx,Y)	Eingang gültig	Eingang (idx,Y)	Ausgang gültig
⋮							
4	(1, -372)	(1, 89)	leer	leer	1	(1, 74)	0
5	(1, -372)	(1, 74)	(1, 89)	leer	0	–	0
6	(1, -372)	(1, 74)	(1, 89)	leer	1	(3, -141)	1
7	(1, 74)	(1, 89)	(3, -141)	leer	0	–	1
8	(1, 89)	(3, -141)	leer	leer	1	(3, -268)	1
9	(3, -268)	(3, -141)	leer	leer	1	(4, 221)	1
⋮							

Tabelle 5.2: Beispiel für die Funktionsweise des Sortierers. In der Tabelle ist ein Ausschnitt aus einem fiktiven Sortiervorgang dargestellt. Der neue Wert am Eingang wird direkt in die richtige Zelle eingefügt, so dass die Werte im Sortierer stets aufsteigend sortiert sind. Sind zu einem Index idx alle Datenwerte im Sortierer, wird in jedem Takt ein Wort ausgegeben. Je nach Konstellation werden die einzelnen Werte im Sortierer um eine Zelle nach rechts oder links verschoben oder behalten ihre Position.

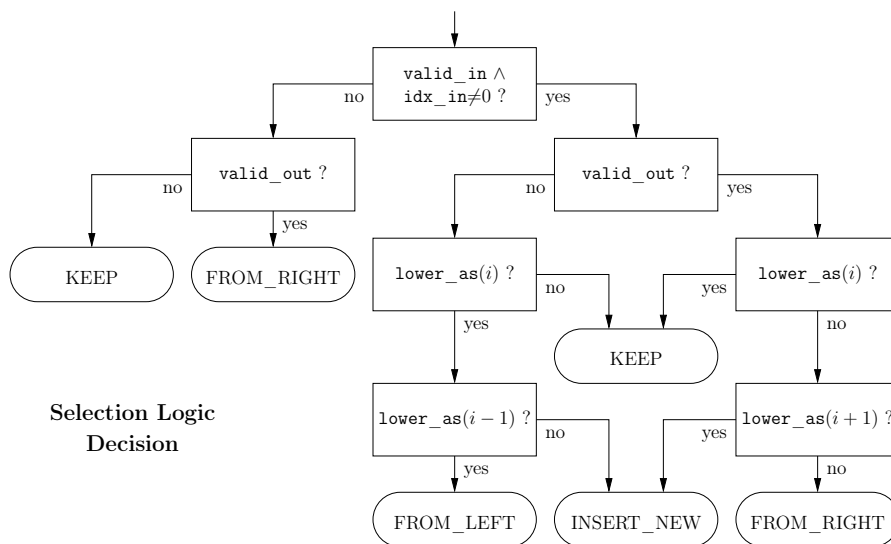


Abbildung 5.16: Der Entscheidungsbaum der Auswahllogik in der Sortierzelle. Welches Spursegment übernommen wird, hängt davon ab, ob ein neues Segment anliegt ($valid_in$), ob eines ausgegeben wird ($valid_out$) und was die Vergleiche ($lower_as$) in dieser und den Nachbarzellen ergeben.

und direkt an die richtige Stelle eingefügt. Tabelle 5.2 illustriert die Arbeitsweise des Sortierers an einem Beispiel. Es sind die Inhalte der ersten vier Sortierzellen und der Wert am Eingang angegeben. Am Ausgang liegt stets das Datenwort aus Zelle 0 an. Der Ausgang wird durch das Signal `valid_out` für die nachfolgenden Einheiten als gültig gekennzeichnet, falls das zuletzt eingetroffene Spursegment einen abweichenden Index hatte und sich also alle Spursegmente mit gleichem Index bereits im Sortierer befinden.

Abbildung 5.15 zeigt der Aufbau der Sortierzellen. Die Vergleichslogik bestimmt, ob der neue Wert links oder rechts vom aktuellen Wert einzufügen ist. Über eine Auswahllogik wird dann entschieden, ob im nächsten Takt der Eingangswert übernommen, der aktuelle Eintrag behalten oder der Eintrag der links oder rechts anschließenden Zelle übernommen wird. Der Entscheidungsbaum der Auswahllogik ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

5.5 Spurfindeeinheit

Die Spurfindeeinheiten betrachten die Spursegmente jeweils eines Z-Kanals über alle Ebenen und fügen sie zu Spuren zusammen. Dazu vergleichen sie zunächst den Y -Wert und bei Übereinstimmung zusätzlich den Wert des Winkels `alpha`.

5.5.1 Funktionsweise

Es werden nicht alle Spursegmente paarweise verglichen, sondern aus jeder Ebene wird nur ein kleiner Ausschnitt der nach y -Koordinate sortierten Werte betrachtet, der sukzessive zu größeren Werten hin verschoben wird. Aus Effizienzgründen wird von einer willkürlich gewählten Referenzebene ausgegangen, mit deren Spursegmenten die Segmente der anderen Ebenen verglichen werden. Es können so allerdings nur Spuren gefunden werden, die in der Referenzebene ein beitragendes Spursegment haben. Diese Einschränkung wird umgangen, indem die gesamte Einheit dreifach parallel aufgebaut wird, wobei jeweils eine unterschiedliche Referenzebene festgelegt wird. So ist gewährleistet, dass Spuren, die in mindestens vier der sechs Ebenen ein Spursegment erzeugt haben, in mindestens einer der Einheiten gefunden werden. Als Referenzebenen für die Einheiten werden 1, 2 und 3 gewählt.

Größe des Vergleichsbereichs. Zwei Spuren, die die Projektionsebene unter verschiedenen Winkeln zufällig im selben Punkt schneiden, können sich in der nach y aufsteigend sortierten Folge überlagern. So genügt es nicht, aus jeder Ebene nur das in y am besten zum Referenzsegment auf der Referenzebene passende Spursegment zu betrachten. Es werden stattdessen zwei aufeinander folgende Spursegmente gleichzeitig verglichen. Ein Spursegment kann so (über seinen Winkel) auch richtig zugeordnet werden, wenn es ein fälschlicherweise in y ‚passenderes‘ Segment gibt.

Dass es genügt, sich auf die Betrachtung zweier in y passender Spursegmente zu beschränken, folgt aus der Simulation. In Tabelle 5.3 ist für gesuchte Spuren (Elektronen mit $p_t \geq 3,0 \text{ GeV}/c$) angegeben, wie viele Spursegmente sich von der Referenzebene aus

Anzahl Spur- segmente	Häufigkeit bei $dN_{\text{ch}}/d\eta =$			
	0	2000	4000	8000
1	99,273 %	98,662 %	97,893 %	95,983 %
2	0,721 %	1,332 %	2,084 %	3,908 %
3	0,006 %	0,006 %	0,022 %	0,107 %
4	–	–	–	0,003 %

Tabelle 5.3: Verteilung der Anzahl der Spursegmente, die sich in y -Richtung innerhalb des Übereinstimmungsfensters befinden, für verschiedene Multiplizitätsdichten. Da sich äußerst selten mehr als zwei Spursegmente innerhalb des y -Fensters befinden, kann man sich bei der Suche nach zusammenpassenden Spursegmenten darauf beschränken, die Übereinstimmung des Ablenkungswinkels nur für die ersten beiden in y passenden Segmente zu überprüfen.

gesehen auf den anderen Ebenen innerhalb des y -Vereinigungsfensters (vgl. Tabelle 5.4) befinden. Dabei sind nur die Ebenen berücksichtigt, auf denen tatsächlich ein passendes Spursegment zu finden ist. Bei einer Multiplizitätsdichte von $\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} = 2000$ beispielsweise ist in 98,662 % der Fälle das gesuchte Spursegment das einzige innerhalb des y -Fensters. In 1,332 % der Fälle finden sich zwei Spursegmente innerhalb der Fensterbreite, von denen genau eines das richtige ist. Nur in 0,006 % der Fälle befinden sich drei Segmente innerhalb der Fensterbreite.

Abbildung 5.17 illustriert die Funktionsweise der Spurfindeeinheit. Die sortierten Datenreihen der verschiedenen Ebenen werden so ausgerichtet, dass zusammengehörnde Spursegmente gemeinsam im Sichtbereich zu liegen kommen. Die Referenzebene s ist in der Abbildung farblich markiert.

Aufbau. Die Spurfindeeinheit besteht im Wesentlichen aus Speichern für die Datenreihen und einer rein kombinatorischen Logik, die über die Ausrichtung der Datenreihen

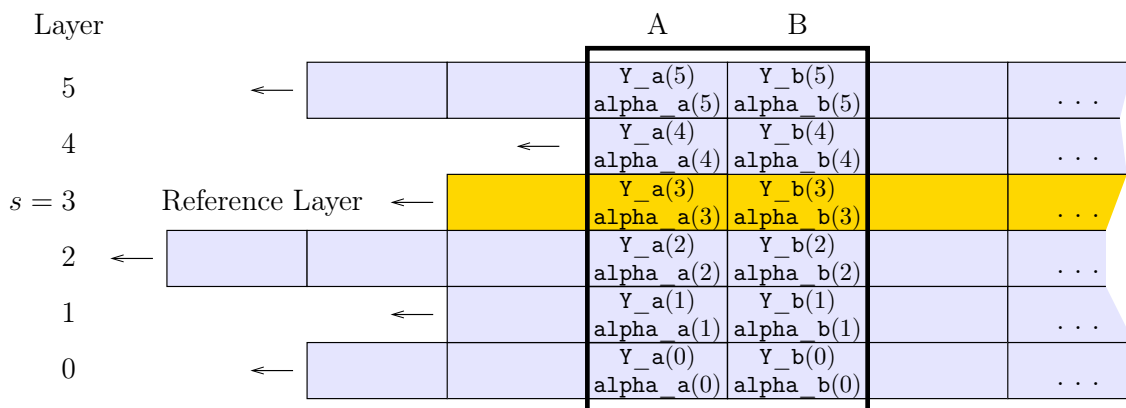


Abbildung 5.17: Die Spurfindeeinheit betrachtet aus jeder Ebene zwei aufeinanderfolgende Spursegmente. Sie richtet die Daten der verschiedenen Ebenen so aus, dass zusammengehörnde Spursegmente gemeinsam im Sichtbereich zu liegen kommen.

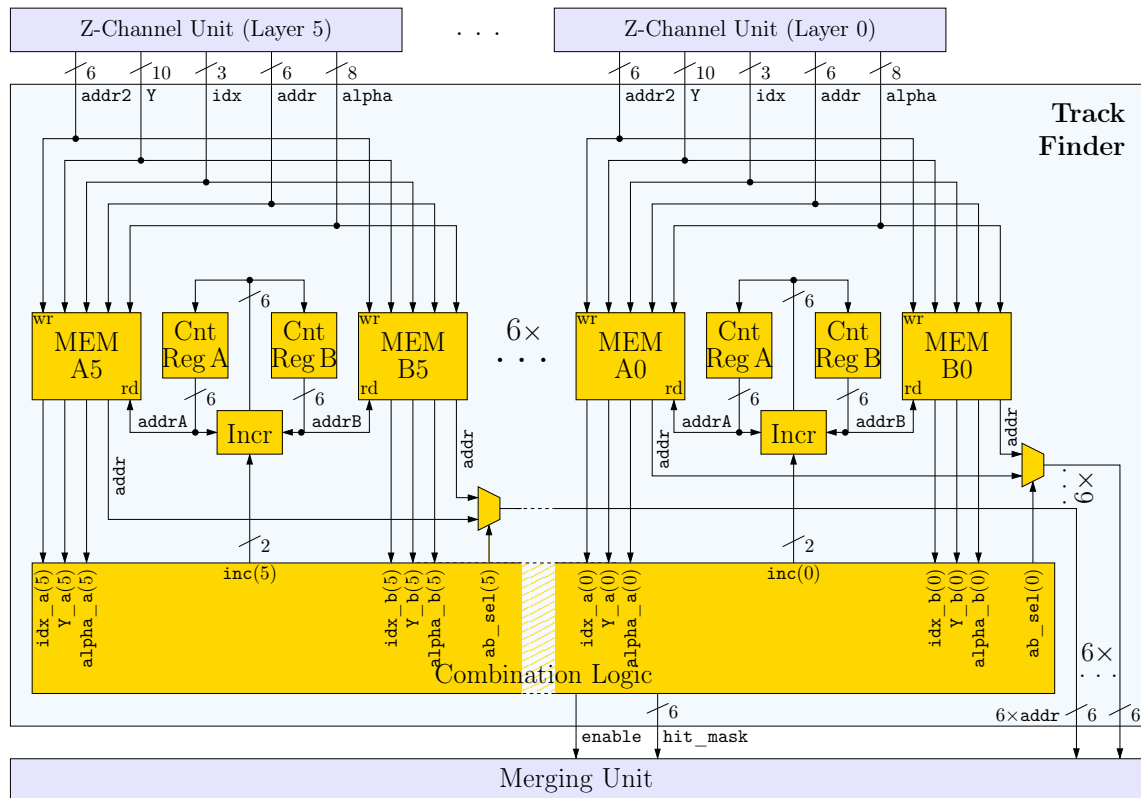


Abbildung 5.18: Der Aufbau einer Spurfindeeinheit. Es werden parallel die Spursegmentdaten aus allen sechs Ebenen übernommen und in jeweils zwei Speichern abgelegt. Pro Speicherblock existiert ein Zählerregister für die Leseadresse. Die Kombinationslogik vergleicht die aus den Speichern gelesenen Werte. Sie stellt fest, ob die Spursegmente gemeinsam eine Spur bilden und legt in jedem Takt die Erhöhung der Zählerregister fest.

entscheidet und die Erfüllung der Vereinigungskriterien überprüft. Der Aufbau ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Da aus jeder Datenreihe gleichzeitig zwei aufeinanderfolgende Datenworte betrachtet werden, werden Speicher mit zwei unabhängigen Leseports benötigt. Alternativ wird hier der Aufbau aus zwei unabhängigen Speichern dargestellt, die parallel beschrieben werden. Die Speicher erhalten ihre Daten jeweils direkt aus den Sortierern der entsprechenden Z-Kanal-Einheiten. Die Schreibadresse kommt für jede Ebene aus einem gemeinsamen Zähler, der für jedes Spursegment um eins erhöht wird. Die Leseadressen entsprechen der Position des betrachteten Bereichs (vgl. Abbildung 5.17). Mit Ausnahme der kompliziert zu behandelnden Start- und Endzustände, die hier nicht dargestellt werden sollen, gilt stets $\text{addrB} = \text{addrA} + 1$. In jedem Takt kann der Sichtbereich um ein oder sogar zwei Felder verschoben werden oder sich nicht bewegen. Entsprechend werden **addrA** und **addrB** abhängig vom Wert des Signals **inc** in jedem Takt um 0, 1 oder 2 erhöht. Die Kombinationslogik erhält aus jedem der zwölf Speicher die drei Werte **idx**, **Y** und **alpha**. Wird eine Spur gefunden (*Hit*), wird das **enable**-Signal für einen Takt aktiviert. Die **hit_mask** gibt an, auf welchen Ebenen sich beitragende Spursegmente befinden. Das Signal **ab_select** zeigt für jede Ebene an, ob das beitragende Spursegment an Stelle

Größe	Auflösung	max. Abweichung	Faktor	Bezeichnung
y_{proj}	1/1,28 mm	11,625 mm	9	ΔY
α	1/0,0046 rad	0,05 rad	11	$\Delta \alpha$

Tabelle 5.4: Die Zahlenwerte für das GTU-Fensterkriterium, wie sie im Hardwaremodell verwendet werden. Durch die Optimierung der Hardwarebeschreibung sind die Auflösungswerte nicht mehr glatt.

A oder B steht. Die Adressen der beitragenden Spursegmente werden zusammen mit der Treffermaske an die nächste Einheit weitergereicht. Zusätzlich werden zur Kennzeichnung der Spur noch – im Blockdiagramm nicht sichtbar – der Index $\text{id}x$ und die gerundete y -Koordinate $\text{approx_}y$ des Spursegments auf der Referenzebene weitergeleitet.

5.5.2 Kombinationslogik

Die Kombinationslogik verarbeitet die Signale⁷

$$Y_a(i), Y_b(i) \quad \text{und} \quad \alpha_a(i), \alpha_b(i) \quad (\text{mit } 0 \leq i < 6).$$

Ausgehend von Spursegment A der Referenzebene s werden mit den Zahlenwerten aus Tabelle 5.4 die Fenstergrenzen

$$\begin{aligned} Y^+ &= Y_a(s) + \Delta Y & \alpha^+ &= \alpha_a(s) + \Delta \alpha \\ Y^- &= Y_a(s) - \Delta Y & \alpha^- &= \alpha_a(s) - \Delta \alpha \end{aligned}$$

berechnet. Daraus werden die booleschen Variablen

$$\begin{aligned} b_{\text{Hit A}, i} &:= (Y^- < Y_a(i) < Y^+) \wedge (\alpha^- < \alpha_a(i) < \alpha^+) \\ b_{\text{Hit B}, i} &:= (Y^- < Y_b(i) < Y^+) \wedge (\alpha^- < \alpha_b(i) < \alpha^+) \end{aligned}$$

gebildet, die für jede Ebene i angeben, ob das Spursegment A bzw. B mit dem Referenzsegment vereinigt werden kann.

Sind beide Variablen für eine Ebene falsch, bedeutet das noch nicht, dass auf dieser Ebene kein passendes Segment existiert, denn es könnte lediglich nicht der richtige Ausschnitt der Ebene betrachtet worden sein. Um zu klären, ob der Betrachtungsbereich für eine Beurteilung schon weit genug fortgeschritten ist, wird

$$b_{\text{aligned}, i} := (Y^- < Y_a(i)) \vee (Y^+ < Y_b(i))$$

berechnet. Die Variable $b_{\text{aligned}, i}$ ist wahr, falls die Datenreihe der Ebene i bezogen auf die Referenzebene *ausgerichtet*, also schon weit genug fortgeschritten ist. Dies ist der Fall, wenn die y -Koordinate des Segments A nicht um mehr als die halbe Fensterbreite unter der des Referenzsegments liegt. Zusätzlich wird eine Ebene auch als ausgerichtet betrachtet, wenn

⁷Die $\text{id}x$ -Signale werden im Folgenden nicht explizit erwähnt. Ein Unterschied in $\text{id}x$ wird wie ein großer Unterschied in Y gewertet.

die y -Koordinate von Segment B bereits oberhalb der Fenstergrenze liegt, da in diesem Fall ein Verschieben der Ebene keine passenden Spursegmente ins Blickfeld rücken kann.

Es werden die Summen

$$N_{\text{Hits}} = \sum_{0 \leq i < 6} \mathbb{1}_{\{b_{\text{aligned}, i} \wedge (b_{\text{Hit A}, i} \vee b_{\text{Hit B}, i})\}}$$

$$N_{\text{uncertain}} = \sum_{0 \leq i < 6} \mathbb{1}_{\{\neg b_{\text{aligned}, i}\}}$$

berechnet⁸, so dass N_{Hits} die Anzahl sicherer Übereinstimmungen angibt und $N_{\text{uncertain}}$ die Ebenen zählt, für die noch keine sichere Aussage möglich ist. Eine Spur gilt als gefunden, wenn

$$\text{enable} := \mathbb{1}_{\{N_{\text{Hits}} \geq 4 \wedge N_{\text{uncertain}} = 0\}}$$

eins ist. Die Signale

$$\text{hit_mask}(i) := \mathbb{1}_{\{b_{\text{Hit A}, i} \vee b_{\text{Hit B}, i}\}}$$

$$\text{ab_select}(i) := \begin{cases} 0(A) & b_{\text{Hit A}, i} \\ 1(B) & \text{sonst} \end{cases}$$

zeigen dann für jede Ebene i an, ob ein Segment zur Spur beiträgt und, falls ja, ob dieses an Stelle A oder B steht. Es wird immer die erste Übereinstimmung verwendet. Die Alternative, bei einer zweifachen Übereinstimmung das ‚beste‘ der beiden Segmente auszuwählen, würde zusätzliche Vergleichslogik erfordern. Da zwei passende Segmente nur äußerst selten auftreten, wird an dieser Stelle auf die zusätzliche Komplexität verzichtet.

Verschiebung der Referenzreihe. Die Kombinationslogik muss nun für die Datenreihe jeder Ebene entscheiden, wie weit diese unter dem Sichtbereich ‚weitergeschoben‘ werden darf. Eine besondere Rolle nimmt dabei die Referenzebene ein. Ihre Datenreihe darf nur weitergeschoben werden, wenn eindeutig klar ist, ob zum aktuellen Segment an Position A eine Spur gefunden werden kann oder nicht. In speziellen Fällen kann die Referenzreihe sogar um zwei Felder verschoben werden. Es wird hierfür die Summe

$$N_{\text{way beyond}} = \sum_{0 \leq i < 6} \mathbb{1}_{\{Y_{\text{b}}(s) + \Delta Y < Y_{\text{a}}(i)\}}$$

berechnet. $N_{\text{way beyond}}$ gibt die Anzahl der Reihen an, die bereits so weit fortgeschritten sind, dass ihre Segmente sich selbst mit Segment B der Referenzebene nicht mehr zu einer Spur vereinigen lassen. Die Anzahl Elemente, um die die Referenzreihe weitergeschoben werden soll, $\text{inc}(s)$, ergibt sich damit aus dem folgenden Algorithmus:

⁸Das Symbol $\mathbb{1}$ bezeichnet die Indikatorfunktion, die eins ist, falls ihr Argument wahr ist, und sonst den Wert null annimmt.

```

if ( $N_{\text{uncertain}} \neq 0$ ) and ( $N_{\text{uncertain}} + N_{\text{Hits}} \geq 4$ ) then
  inc( $s$ ) := 0
elsif ( $N_{\text{way beyond}} \geq 3$ ) then
  inc( $s$ ) := 2
else
  inc( $s$ ) := 1
end if

```

Die Referenzreihe wird angehalten, falls eine der anderen Reihen noch nicht entsprechend ausgerichtet ist und gleichzeitig noch die Möglichkeit besteht, eine passende Spur zu finden, da die Anzahl sicherer Übereinstimmungen N_{Hits} und die Anzahl möglicher Übereinstimmungen $N_{\text{uncertain}}$ zusammen mindestens vier ergeben. Andernfalls kann die Referenzreihe weitergeschoben werden. Falls in mindestens drei anderen Reihen die Y -Werte bereits so hoch sind, dass eine Vereinigung mit Segment B der Referenzebene ausgeschlossen ist, kann auch dieses verworfen werden, indem die Leseadressen in der Referenzreihe um zwei erhöht werden. Ansonsten wird um eins erhöht, so dass im nächsten Takt nach Spuren zu diesem folgenden Segment gesucht wird.

Verschiebung der anderen Reihen. Nun muss entschieden werden, um wie viele Felder der Betrachtungsbereich in den anderen Reihen verschoben werden kann. Die Entscheidung ist von $\text{inc}(s)$, also dem Verhalten der Referenzreihe abhängig. Wird diese um ein Feld weitergeschoben ($\text{inc}(s) = 1$), so ergibt sich die Verschiebung in Reihe i durch Vergleich mit Segment B der Referenzebene, das im folgenden Takt Referenzsegment wird:

```

if ( $Y_{\text{b}}(i) < Y_{\text{b}}(s) - \Delta Y$ ) then
  inc'( $i$ ) := 2
elsif ( $Y_{\text{a}}(i) < Y_{\text{b}}(s) - \Delta Y$ ) then
  inc'( $i$ ) := 1
else
  inc'( $i$ ) := 0
end if

```

Wenn die y -Koordinate des Segments B der betrachteten Ebene zu klein ist, um mit Segment B der Referenzebene – dem nächsten Referenzsegment – vereinigt werden zu können, können beide Segmente der betrachteten Ebene verworfen werden. Erfüllt nur Segment A die Bedingung, so ist zumindest dieses im nächsten Takt irrelevant und die Reihe kann um ein Feld weitergeschoben werden. Andernfalls wird die Reihe angehalten, um im folgenden Takt komplett mit dem neuen Referenzsegment verglichen zu werden.

Wird die Referenzebene um zwei Felder weitergeschoben ($\text{inc}(s) = 2$), könnte statt mit Segment B der Referenzebene sogar mit einem fiktiven Segment C verglichen werden. Auf diese Erweiterung wird verzichtet und es wird auch in diesem Fall der oben bestimmte Wert $\text{inc}'(i)$ verwendet.

Insgesamt ergibt sich $\text{inc}(i)$ nach folgendem Algorithmus:

```
if (inc(s) ≠ 0) then
  inc(i) := inc'(i)
else
  if (Y_a- < Y_a(i) < Y_a+) then
    inc(i) := 0
  elsif (Y_b(i) < Y_a-) then
    inc(i) := 2
  elsif (Y_b(i) < Y_a+) then
    inc(i) := 1
  else
    inc(i) := inc'(i)
  end if
end if
```

Wird die Referenzreihe nicht bewegt, sollen die übrigen Reihen lediglich passend zum aktuellen Referenzsegment ausgerichtet werden. Passt Segment A hinsichtlich der y -Koordinate bereits zum Referenzsegment, bleibt die Reihe in ihrer aktuellen Position. Haben beide Segmente der aktuellen Reihe eine zu geringe y -Koordinate, so wird die Reihe um zwei Felder weitergeschoben. Passt Segment B, nicht jedoch A zum Referenzsegment, wird die Reihe um ein Feld verschoben. Trifft keiner der drei Fälle zu, d. h. weder Segment A noch B passt zum Referenzsegment und ihre y -Koordinaten sind nicht zu klein, so ist eine Übereinstimmung mit dem Referenzsegment für diese Ebene ausgeschlossen. Es wird dann verfahren, als ob die Referenzebene weitergeschoben würde, und wie oben beschrieben mit Segment B der Referenzebene verglichen.

Das Auswahlverfahren verfolgt das Ziel, in jedem Takt für jede Ebene die maximal mögliche Erhöhung der Leseadresse zu wählen, um die gesamte Latenz der Einheit zu minimieren. Durch die Möglichkeit, jede Reihe sogar um zwei Felder weiterschieben zu können, ist die Latenz der Spurvereinigung sehr gering.

Die Kombinationslogik ist ein komplexer kombinatorischer Teil des Entwurfs. Für die parallelen Wertevergleiche werden in jeder Einheit insgesamt 39 10-Bit-Addierer, 22 7-Bit-Addierer und 35 3-Bit-Addierer benötigt.

5.6 Zusammenführungseinheit

Durch die Aufteilung der Daten in Z-Kanäle und die parallele Spursuche mit verschiedenen Referenzebenen kann es unter bestimmten Umständen dazu kommen, dass dieselbe Spur mehrfach erkannt wird. Dieser Nachteil der Parallelisierung wird von der Zusammenführungseinheit behoben. Sie führt die Datenströme der neun Spurfindereinheiten zu einem zusammen und stellt dabei sicher, dass jede Spur nur einfach weitergeleitet wird.

Um nicht alle Spuren paarweise vergleichen zu müssen, wird wieder das Prinzip der Vortsortierung angewandt. In mehreren Zusammenführungsstufen (*Merging Stages*) werden die

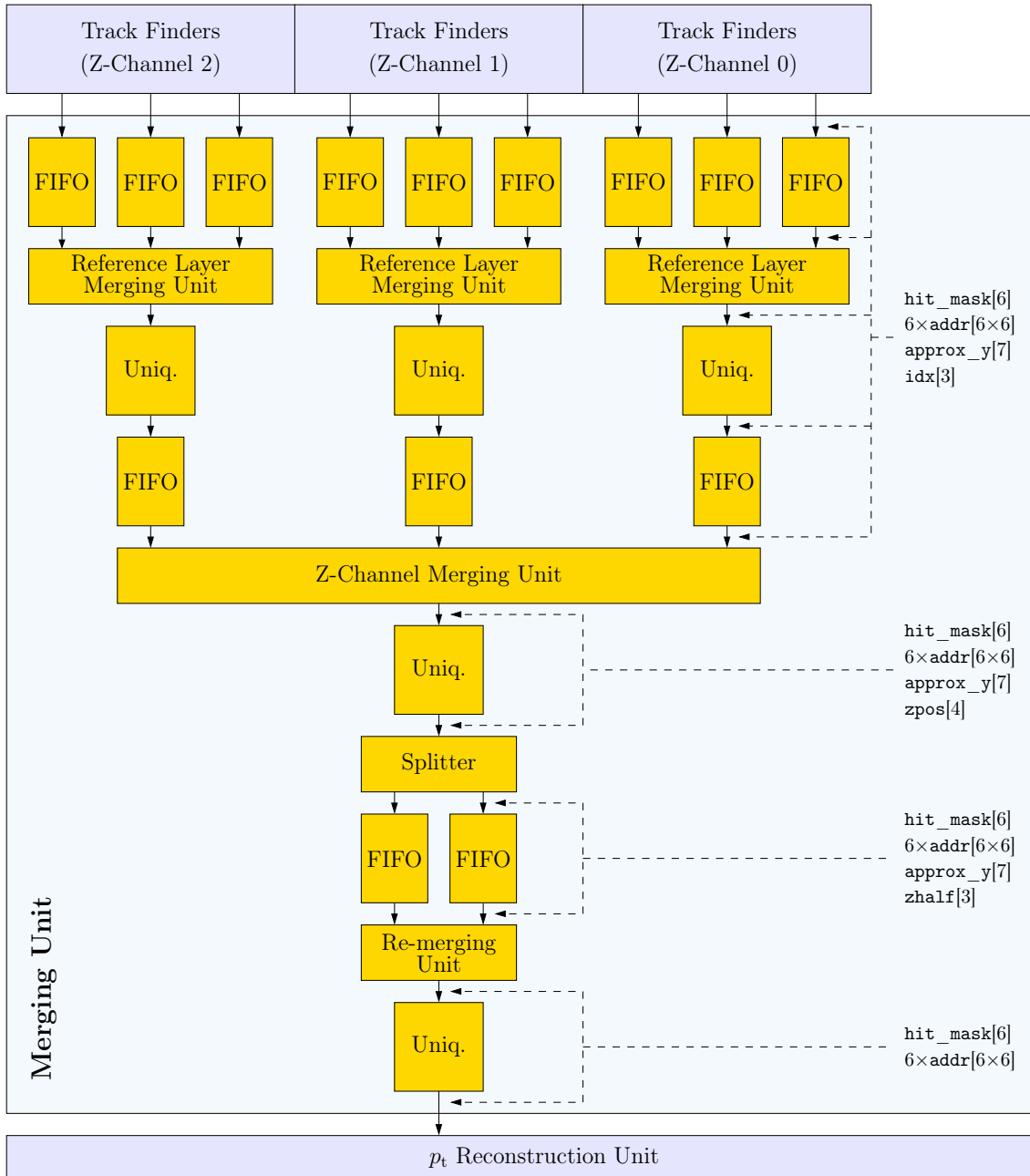


Abbildung 5.19: Der Aufbau der Zusammenführungseinheit. Die eintreffenden Datenströme werden in mehreren Stufen jeweils in FIFOs gepuffert und geordnet zusammengeführt. Dabei werden doppelte Einträge verworfen.

Datenströme so zusammengefasst, dass gleiche Spuren aufeinander folgen. Die so vorbereiteten Datenströme durchlaufen Eindeutigkeitsmodule (*Uniquifiers*), die gleiche Spuren in der Sequenz erkennen und doppelte Vorkommen verwerfen. Abbildung 5.19 zeigt den Aufbau als Blockdiagramm.

5.6.1 Zusammenführen der Spuren von verschiedenen Referenzebenen

Zunächst werden innerhalb der einzelnen Z-Kanäle die Spuren, die ausgehend von verschiedenen Referenzebenen gefunden wurden, zusammengeführt.

Durch eine einfache Maßnahme werden bereits auf Ebene der Spurfindeeinheiten die meisten Mehrfachfunde unterdrückt: Spuren der Spurfindeeinheit mit Referenzebene $s = 2$ werden nur weitergeleitet, wenn sie auf Ebene 3 kein beitragendes Spursegment haben, da diese bereits von der Spurfindeeinheit mit Referenzebene $s = 3$ erkannt werden. Entsprechend werden von der Spurfindeeinheit mit $s = 1$ nur Spuren akzeptiert, die weder auf Ebene 2 noch auf Ebene 3 ein Segment aufweisen. Trotzdem kann es durch Randeffekte zu Doppelfunden kommen, da die Fensterpositionen durch die verschiedenen Referenzebenen in den drei Einheiten leicht verschieden sind.

Die Spurdaten werden zunächst jeweils in Pufferspeichern (FIFOs) abgelegt. Die folgende Einheit vergleicht in jedem Takt die ältesten Werte der drei FIFOs und wählt den ‚kleinsten‘ aus, um ihn weiterzuleiten und aus dem Speicher zu entfernen. Als Ordnungskriterium wird dabei zunächst der Index idx und als zweites die ungefähre y -Koordinate $approx_y$ verwendet:

$$\begin{aligned} track_A < track_B & :\Leftrightarrow \\ & idx_A < idx_B \vee (idx_A = idx_B \wedge approx_y_A < approx_y_B). \end{aligned}$$

Die Spurdatensätze werden dadurch so sortiert, dass die Datensätze zu gleichen Spuren aufeinander folgen. So vorsortiert gelangen die Daten in den Uniquifier.

5.6.2 Eindeutigkeitsmodul (‚Uniquifier‘)

Abbildung 5.20 zeigt den Aufbau eines Uniquifiers. In den beiden Registerstufen werden zwei aufeinander folgende Spurdatensätze abgelegt. Die Vergleichslogik vergleicht beide und entscheidet, ob einer bzw. welcher der Spurdatensätze verworfen werden soll. Es wird an dieser Stelle ausschließlich auf den Adressen der Spursegmente gearbeitet. Zwei Spuren gelten als gleich, sobald sie ein gemeinsames Spursegment haben. Es wird dann die Spur verworfen, die weniger beitragende Spursegmente hat. Der Spurdatensatz aus Stufe 1 wird ausgegeben, sobald sich die Daten einer anderen Spur in Stufe 0 befinden oder das Ende des Datenstromes erreicht ist.

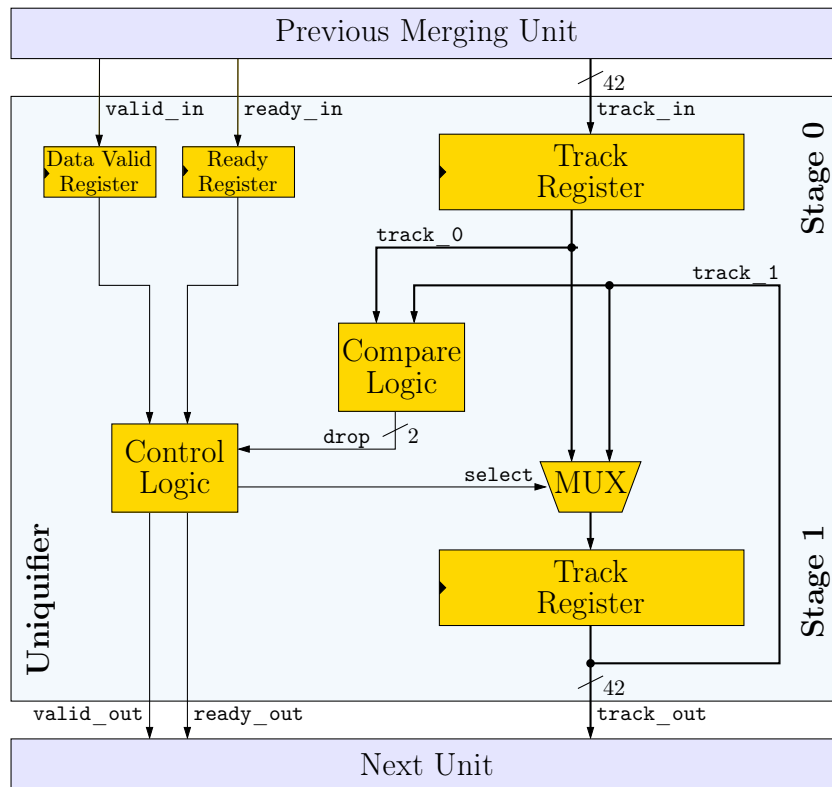


Abbildung 5.20: Der Aufbau eines Uniquifiers. Er speichert in zwei Registerstufen aufeinanderfolgende Spurdatenworte zum paarweisen Vergleich. Bei Übereinstimmung wird eines der beiden Worte verworfen, so dass mehrfach gefundene Spuren aus dem Datenstrom entfernt werden.

5.6.3 Zusammenführen der Spuren aus verschiedenen Z-Kanälen

Als nächstes müssen die Spuren aus den drei Z-Kanälen zusammengeführt werden.

Spuren aus sechs Segmenten können nur in einem Z-Kanal auch mit sechs Segmenten gefunden werden, da sich die Z-Kanäle in einer der Ebenen (Ebene 2) entsprechend ihrer Konstruktion nicht überschneiden (vgl. Abbildung 5.11). In den anderen Ebenen überschneiden sich die Bereiche der Z-Kanäle durch die Detektorgeometrie und die angenommene Ortsunsicherheit des Wechselwirkungspunkts aber durchaus, so dass die Spur in einem der beiden angrenzenden Z-Kanäle unter Umständen noch mit vier oder fünf Segmenten gefunden werden kann.

Die Zusammenführung ist etwas komplizierter, da sich durch einfaches Zusammenfügen keine Sortierung herstellen lässt, in der die Daten gleicher Spuren stets aufeinander folgen. Stattdessen ist ein zweistufiges Verfahren notwendig. Im ersten Schritt werden jeweils die Daten zweier benachbarter Z-Unterkanäle nach y -Koordinate `approx_y` sortiert zusammengefügt. Doppelte Werte werden aus dem Datenstrom entfernt. Die verbliebenen Werte werden anschließend wieder getrennt und die Daten jeweils zweier benachbarter Unterkanäle werden in der anderen möglichen Paarung erneut zusammengefügt. Wieder werden

idx	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
zch	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0
key	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8
zpos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
zhalf	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7

Tabelle 5.5: Sortierschlüssel für die Zusammenführung der Spuren. Die Tabelle listet für alle Z-Unterkanäle die Werte auf, nach denen in den einzelnen Schritten beim Zusammenfügen sortiert wird.

die doppelten Werte entfernt, so dass schließlich alle doppelt gefundenen Spuren getilgt sind.

Die Reihenfolge der Zusammenführung in den einzelnen Schritten wird durch das Ordnungskriterium festgelegt, nach dem jeweils das kleinste Element ausgewählt wird. Die Werte der Sortierschlüssel

$$\begin{aligned} \text{key} &:= \left\lfloor \frac{\text{zch} + 3 \cdot \text{idx}}{2} \right\rfloor - 1 \\ \text{zpos} &:= \text{zch} + 3 \cdot (\text{idx} - 1) \\ \text{zhalf} &:= \left\lfloor \frac{\text{zpos}}{2} \right\rfloor \end{aligned}$$

sind in Tabelle 5.5 angegeben. Im ersten Schritt wird nach **key** aufsteigend sortiert. Bei gleichem Wert wird stets die *y*-Koordinate **approx_y** verglichen:

$$\begin{aligned} \text{track_A} < \text{track_B} &:\Leftrightarrow \\ &\text{key_A} < \text{key_B} \vee (\text{key_A} = \text{key_B} \wedge \text{approx_y_A} < \text{approx_y_B}). \end{aligned}$$

Das Aufteilungsmodul (*Splitter*) teilt anschließend die Daten nach dem niederwertigsten Bit des Wertes **zpos** auf zwei FIFOs auf. Bei der erneuten Zusammenführung wird schließlich nach dem Wert von **zhalf** sortiert.

Beispiel

Das Vorgehen wird in Abbildung 5.21 an einem Beispiel erläutert. In der linken Hälfte ist die Projektionsebene schematisch dargestellt. Die Streifen kennzeichnen jeweils den Projektionsbereich eines Z-Unterkanals; die Überschneidungsbereiche benachbarter Unterkanäle sind kräftiger markiert. Die Punkte stehen für projizierte Spursegmente. Es sind die vier Spuren A, B, C und D zu finden. Spur A beispielsweise befindet sich mit 5 Spursegmenten im Bereich von Z-Kanal 1. Sie ist allerdings auch mit 4 Spursegmenten in Z-Kanal 0 zu finden. Spur D hingegen liegt ausschließlich in Z-Kanal 0, da die drei Spursegmente im Überschneidungsbereich zu Kanal 2 zum Nachweis nicht ausreichen.

In der rechten Hälfte der Abbildung 5.21 wird das stufenweise Vorgehen beim Zusammenführen der Spuren dargestellt. Zunächst werden sechs Spuren gefunden. Nach dem ersten

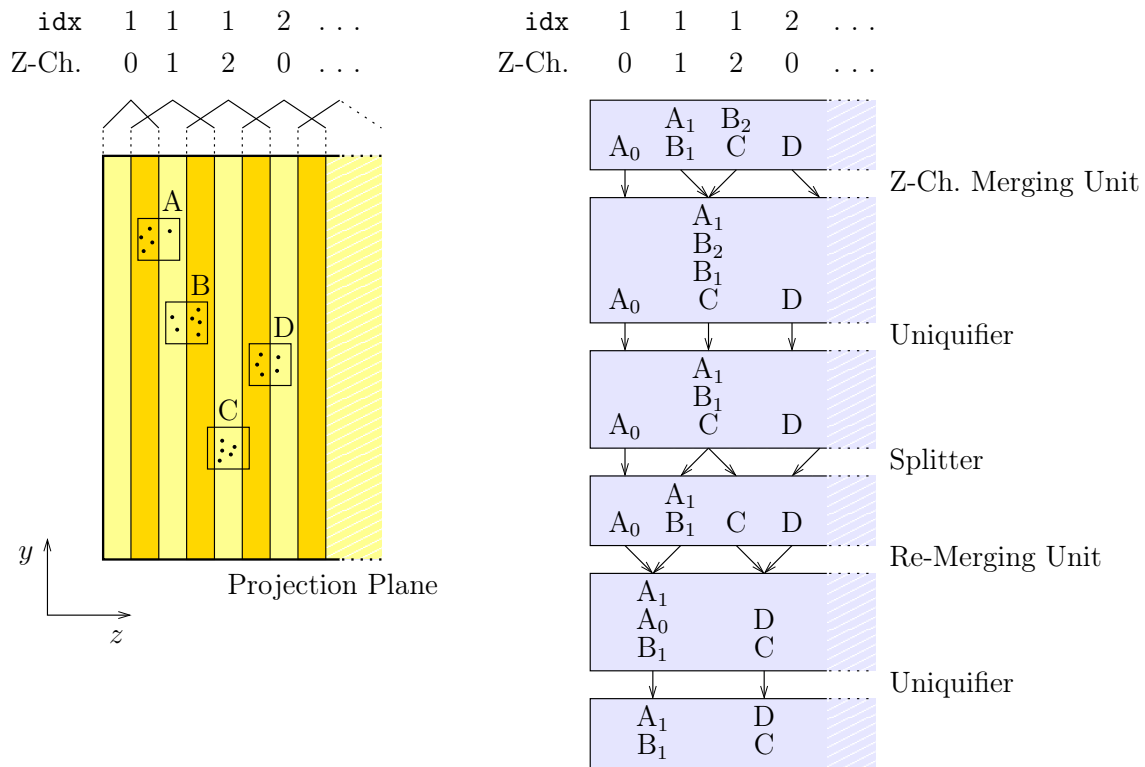


Abbildung 5.21: Beispiel für das Eliminieren doppelter Datensätze beim Zusammenführen der in den verschiedenen Z-Kanälen gefundenen Spuren (siehe Text).

Zusammenführungsschritt liegen die beiden Spuren B_1 und B_2 direkt hintereinander, so dass das Doppel von Spur B vom Uniquifier entfernt werden kann. Die Spuren werden wieder an ihre ursprünglichen Positionen verteilt. Im zweiten Zusammenführungsschritt (Re-Merging) liegen nun die beiden Datensätze von Spur A hintereinander, so dass auch hier derjenige mit weniger Spursegmenten vom Uniquifier entfernt werden kann. Schließlich bleiben für die vier Spuren genau vier Datensätze übrig.

6 Rekonstruktion des Transversalimpulses

Nachdem die Spursegmente in der GTU zu Spuren kombiniert wurden, soll aus dem Spurverlauf der Transversalimpuls p_t des erzeugenden Teilchens rekonstruiert werden. Die notwendigen Berechnungen sowie deren Hardwareumsetzung bilden den Inhalt dieses Kapitels.

Die Spursegmente eines Kandidaten liegen in der x - y -Ebene gemeinsam mit dem Vertex auf einem Kreisbogen, aus dessen Radius der Transversalimpuls berechnet werden kann. Von den verschiedenen Verfahren zur Anpassung einer Kreisbahn an Datenpunkte (siehe z. B. [FWSW03]) eignen sich die meisten wegen ihres hohen Rechenaufwands nicht für die Verwendung in der Triggerberechnung.

Am ehesten geeignet erscheint das *Conformal mapping*, bei dem durch Invertierung in der komplexen Zahlenebene ($u = \frac{x}{x^2+y^2}, v = \frac{y}{x^2+y^2}$) ein Kreis durch den Ursprung auf eine gerade Linie abgebildet wird. Der Stoßparameter der Linie ist dann umgekehrt proportional zum Radius des Kreises.

Doch selbst diese Methode ist wegen der notwendigen Divisionen relativ aufwändig zu berechnen. Andererseits sind die Radien der Kreisbahnen so groß, dass die Spuren selbst auf GTU-Ebene noch näherungsweise gerade sind. Die Simulation zeigt, dass es ausreicht, eine Gerade an die Spursegmente anzupassen und als Tangente bzw. Sekante des Kreisbogens aufzufassen. Man erhält so die Geradenparameter a und b (siehe Abbildung 6.1).

6.1 Anpassung einer Geraden an die Spursegmente

Ohne ‚tilted Pads‘ (vgl. Abschnitt 4.2.2) wäre die Ablenkung in z -Richtung egal, und es würde genügen, die Fehlerquadratsumme

$$\chi^2 = \sum_{i \in \mathcal{J}} (y_i - (a + b \cdot x_i))^2 \quad (6.1)$$

mit

y_i : y -Koordinate des Spursegments in Ebene i

x_i : x -Koordinate der Kammeraußenseite in Ebene i

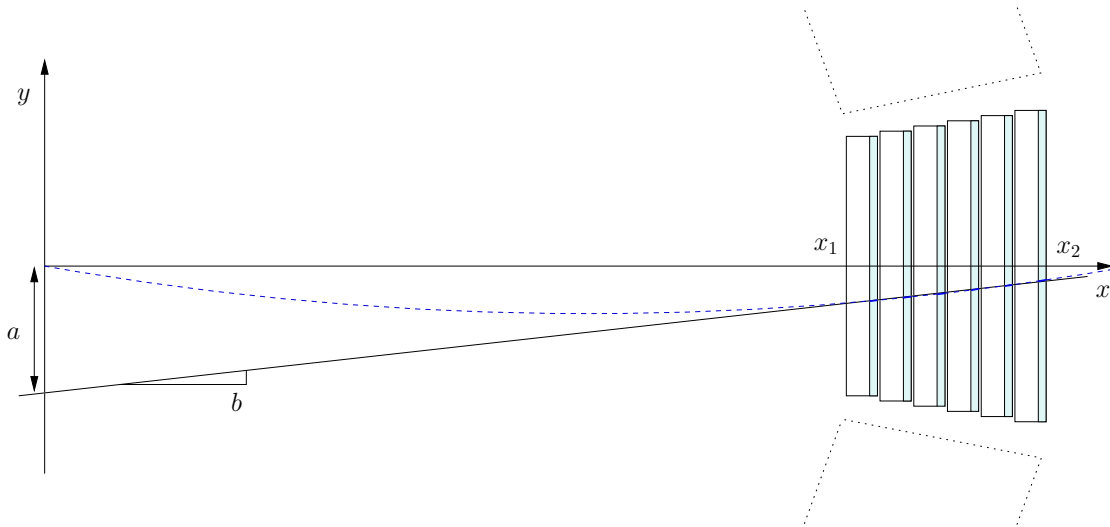


Abbildung 6.1: Anpassung einer Geraden durch die Spursegmente. Die Abstände sind in dieser Skizze maßstabsgetreu wiedergegeben.

zu minimieren. Die Menge \mathfrak{J} enthält dabei die Indizes $0 \leq i < 6$ der Detektorebenen, aus denen ein Spursegment zur Spur beiträgt. Es gilt $4 \leq |\mathfrak{J}| \leq 6$.

Mit ‚tilted Pads‘ ist y_i jedoch nicht mehr direkt messbar, sondern nach (4.2) leicht von der z -Position abhängig (vgl. Abschnitt 4.2.2):

$$y_i = y_{\text{mess},i} + (-1)^i \cdot (z_i - z_{i,\text{row}}) \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}) \quad (6.2)$$

z_i ist hierbei die ebenfalls nicht direkt messbare z -Position, $z_{i,\text{row}}$ ist die (bekannte) z -Koordinate der Mitte der Padreihe. Damit erhält man:

$$\chi^2 = \sum_{i \in \mathfrak{J}} \left(y_{\text{mess},i} + (-1)^i \cdot (z_i - z_{i,\text{row}}) \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}) - (a + b \cdot x_i) \right)^2 \quad (6.3)$$

Nimmt man an, dass die Teilchen in der x - z -Ebene aus dem Ursprung kommen, so gilt

$$z_i = c \cdot x_i$$

für eine Konstante c . Definiert man außerdem

$$\begin{aligned} y'_i &:= y_{\text{mess},i} - (-1)^i \cdot z_{i,\text{row}} \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}) \\ c' &:= c \cdot \tan(\beta_{\text{tilt}}), \end{aligned} \quad (6.4)$$

so erhält man:

$$\chi^2 = \sum_{i \in \mathfrak{J}} \left(-a - b \cdot x_i + c' \cdot (-1)^i \cdot x_i + y'_i \right)^2 \quad (6.5)$$

Durch die ‚tilted Pads‘ muss also statt einer zweidimensionalen eine dreidimensionale lineare Regression berechnet werden. Der Parameter c' wird dabei benötigt, um a und b

genau bestimmen zu können; sein Wert wird in den weiteren Berechnungen jedoch nicht verwendet.

Minimiert man χ^2 aus Gleichung (6.5) durch a , b und c' nach

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \chi^2}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \chi^2}{\partial c'} = 0,$$

ergibt sich ein lineares Gleichungssystem in den drei Variablen mit den Koeffizienten:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} \sum_i 1 & \sum_i x_i & -\sum_i (-1)^i x_i & \sum_i y'_i \\ \sum_i x_i & \sum_i x_i^2 & -\sum_i (-1)^i x_i^2 & \sum_i x_i y'_i \\ \sum_i (-1)^i x_i & \sum_i (-1)^i x_i^2 & -\sum_i x_i^2 & \sum_i (-1)^i x_i y'_i \end{array} \right)$$

Löst man nach a und b auf, so ergibt sich für die Koeffizienten

$$a = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} \sum_i y'_i & \sum_i x_i & -\sum_i (-1)^i x_i \\ \sum_i x_i y'_i & \sum_i x_i^2 & -\sum_i (-1)^i x_i^2 \\ \sum_i (-1)^i x_i y'_i & \sum_i (-1)^i x_i^2 & -\sum_i x_i^2 \end{vmatrix} \quad (6.6)$$

$$b = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} \sum_i 1 & \sum_i y'_i & -\sum_i (-1)^i x_i \\ \sum_i x_i & \sum_i x_i y'_i & -\sum_i (-1)^i x_i^2 \\ \sum_i (-1)^i x_i & \sum_i (-1)^i x_i y'_i & -\sum_i x_i^2 \end{vmatrix} \quad (6.7)$$

mit

$$D = \begin{vmatrix} \sum_i 1 & \sum_i x_i & -\sum_i (-1)^i x_i \\ \sum_i x_i & \sum_i x_i^2 & -\sum_i (-1)^i x_i^2 \\ \sum_i (-1)^i x_i & \sum_i (-1)^i x_i^2 & -\sum_i x_i^2 \end{vmatrix}$$

Während die Werte für y_i variabel und quasi-kontinuierlich sind, sind die x_i durch die Detektorgeometrie konstant festgelegt. Die Summen, die keine y_i enthalten, sind also nur von der Indexmenge \mathfrak{J} abhängig.

Die Zusammensetzung der Menge \mathfrak{J} kann durch eine Zahl k so kodiert werden, dass eine 1 an der n -ten Stelle der Binärdarstellung von k bedeutet, dass das Spursegment auf Ebene n vorhanden ist. Für $k = 23 = 010111_2$ ist also beispielsweise $\mathfrak{J}_{23} = (0, 1, 2, 4)$. Für einen gültigen Spur-Kandidaten werden mindestens vier der sechs Spursegmente gefordert. Daraus folgt durch kombinatorische Überlegungen, dass es 22 gültige Werte für k bzw. mögliche Mengen \mathfrak{J}_k gibt.

Von y_i unabhängige Terme können also vorberechnet und für alle Werte für k tabelliert werden. Umstellen von (6.6) und (6.7) ergibt

$$a = \sum_{i \in \mathfrak{J}_k} a_{ki} y'_i, \quad b = \sum_{i \in \mathfrak{J}_k} b_{ki} y'_i \quad (6.8)$$

Ebene $i =$	0	1	2	3	4	5
$a_{15,i} =$	-6,68	-6,41	6,16	5,93		
$a_{23,i} =$	-6,76	-0,00	-0,33		6,10	
$a_{27,i} =$	-5,54	-2,68		2,48	4,74	
$a_{29,i} =$	-6,76		-0,33	0,00	6,10	
$a_{30,i} =$		-6,93	-6,66	6,41	6,18	
$a_{31,i} =$	-5,41	-2,68	-0,27	2,48	4,87	
$a_{39,i} =$	-2,92	-5,55	2,69			4,78
$a_{43,i} =$	0,00	-7,01		-0,33		6,35
$a_{45,i} =$	-7,16		6,60	-6,36		5,92
$a_{46,i} =$		-7,01	0,00	-0,33		6,35
$a_{47,i} =$	-2,91	-5,42	2,68	-0,26		4,91
$a_{51,i} =$	-3,60	-3,45			3,08	2,97
$a_{53,i} =$	-6,76		-0,33		6,10	-0,00
$a_{54,i} =$		-5,74	-2,78		2,58	4,94
$a_{55,i} =$	-3,51	-3,45	-0,17		3,17	2,97
$a_{57,i} =$	-5,70			-2,55	4,87	2,37
$a_{58,i} =$		-7,01		-0,33	-0,00	6,35
$a_{59,i} =$	-3,59	-3,38		-0,16	3,07	3,06
$a_{60,i} =$			-7,18	-6,92	6,66	6,43
$a_{61,i} =$	-5,56		-0,27	-2,55	5,01	2,37
$a_{62,i} =$		-5,61	-2,78	-0,27	2,58	5,07
$a_{63,i} =$	-3,51	-3,37	-0,17	-0,16	3,16	3,05

Tabelle 6.1: Die Koeffizienten a_{ki} für die lineare Regression. Die Werte sind einheitenlos.

Ebene $i =$	0	1	2	3	4	5
$b_{15,i} =$	2,02	1,94	-2,02	-1,95		
$b_{23,i} =$	2,08	-0,16	0,05		-1,97	
$b_{27,i} =$	1,63	0,75		-0,84	-1,54	
$b_{29,i} =$	2,00		0,05	-0,15	-1,90	
$b_{30,i} =$		2,02	1,94	-2,02	-1,95	
$b_{31,i} =$	1,62	0,75	0,03	-0,84	-1,56	
$b_{39,i} =$	0,82	1,64	-0,91			-1,55
$b_{43,i} =$	-0,17	2,17		0,06		-2,05
$b_{45,i} =$	2,09		-2,09	1,86		-1,87
$b_{46,i} =$		2,07	-0,15	0,05		-1,97
$b_{47,i} =$	0,82	1,63	-0,91	0,03		-1,57
$b_{51,i} =$	1,01	0,97			-1,01	-0,97
$b_{53,i} =$	1,93		0,05		-1,83	-0,14
$b_{54,i} =$		1,63	0,75		-0,84	-1,54
$b_{55,i} =$	1,01	0,97	0,00		-1,01	-0,97
$b_{57,i} =$	1,62			0,69	-1,53	-0,78
$b_{58,i} =$		2,00		0,05	-0,14	-1,90
$b_{59,i} =$	1,01	0,97		-0,00	-1,01	-0,97
$b_{60,i} =$			2,02	1,95	-2,02	-1,95
$b_{61,i} =$	1,60		0,03	0,69	-1,54	-0,78
$b_{62,i} =$		1,62	0,75	0,03	-0,84	-1,56
$b_{63,i} =$	1,01	0,97	0,00	-0,00	-1,01	-0,97

Tabelle 6.2: Die Koeffizienten b_{ki} für die lineare Regression. Die Werte sind in der Einheit m^{-1} angegeben.

mit

$$\begin{aligned}
 a_{ki} &= \frac{1}{D} \left[\left(\sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j^2 \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j^2 - \sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j^2 \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j^2 \right) \right. \\
 &\quad + \left(\sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j^2 - \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j^2 \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j \right) \cdot x_i \\
 &\quad \left. + \left(\sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j^2 \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j - \sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j^2 \right) \cdot (-1)^i \cdot x_i \right] \\
 b_{ki} &= \frac{1}{D} \left[\left(\sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j^2 \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j - \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j^2 \right) \right. \\
 &\quad + \left(\sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j - \sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j^2 \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} 1 \right) \cdot x_i \\
 &\quad \left. + \left(\sum_{j \in \mathcal{J}_k} 1 \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j^2 - \sum_{j \in \mathcal{J}_k} x_j \cdot \sum_{j \in \mathcal{J}_k} (-1)^j x_j \right) \cdot (-1)^i \cdot x_i \right]
 \end{aligned}$$

Für die 22 Möglichkeiten werden nun die Koeffizienten a_{ki} und b_{ki} vorberechnet. Die Werte sind den Tabellen 6.1 und 6.2 zu entnehmen. Damit berechnen sich die Werte für die Koeffizienten a und b aus den y'_i nach (6.8) durch jeweils höchstens sechs Multiplikationen und fünf Additionen.

6.1.1 Abschätzung der Schnittpunkte zwischen Gerade und Kreisbahn

Eine Quelle der Ungenauigkeit bei diesem Verfahren ist, dass die angepasste Gerade weder exakt eine Tangente noch eine Sekante ist. Sie liegt vielmehr zwischen diesen beiden Linien (vgl. Abbildung 6.2). Für die präzise Rekonstruktion des Kreises wäre es daher notwendig, die x -Koordinaten der Schnittpunkte zwischen angepasster Gerade und Kreisbahn zu kennen. Die ‚richtige‘ Wahl der Punkte x_1, x_2 ist nicht nur davon abhängig, aus welchen Ebenen Spursegmente für die Rechnung herangezogen werden können, sondern auch vom Radius der Kreisbahn. Die Punkte können daher nicht auf triviale Weise bestimmt werden. In der Simulation werden gute Ergebnisse mit den beiden experimentellen Näherungsformeln

$$x_1 = x_{\text{Layer } j} + x_d \cdot \frac{n_{\text{Hits}} - 1}{6} \qquad x_2 = x_{\text{Layer } k} - x_d \cdot \frac{n_{\text{Hits}} - 1}{6} \qquad (6.9)$$

mit

j : Detektorebene des innersten verwendeten Spursegments

k : Detektorebene des äußersten verwendeten Spursegments

n_{Hits} : Anzahl verwendeter Spursegmente

$x_{\text{Layer } i}$: x -Koordinate der Driftkammeraußenseite in Ebene i

x_d : Abstand zwischen zwei Driftkammeraußenseiten

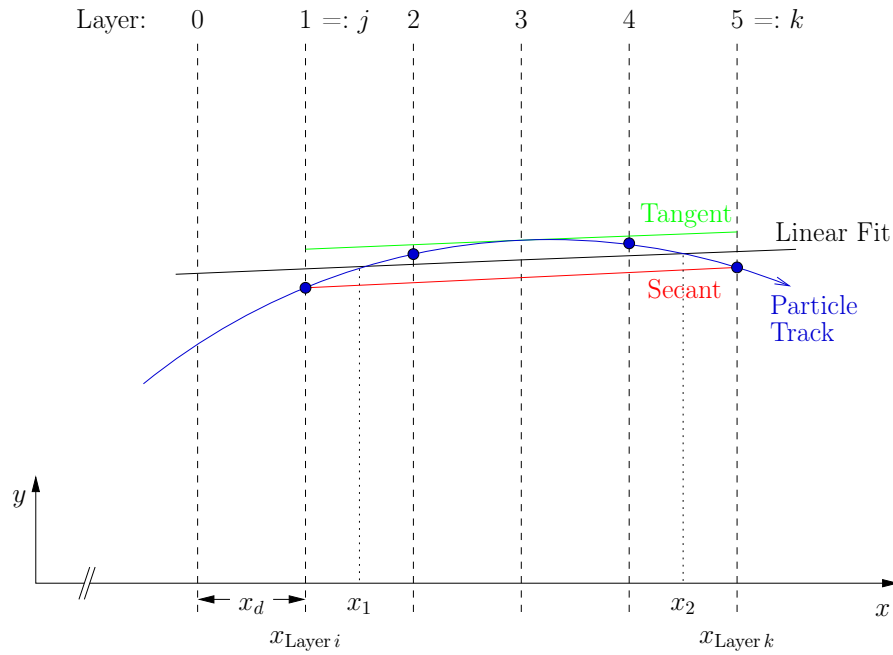


Abbildung 6.2: Die Ausgleichsgerade durch die Spursegmente liegt zwischen Tangente und Sekante. Die ‚richtigen‘ Schnittpunkte x_1 , x_2 sind nicht auf triviale Weise zu bestimmen. Die Krümmung der Teilchenbahn ist zur Verdeutlichung stark übertrieben dargestellt.

erzielt. Da der Radius der Teilchenbahn sehr groß ist, ist der quantitative Einfluss der Wahl von x_1 und x_2 erwartungsgemäß nicht sehr stark. Verwendet man die angegebene Näherung statt der noch simpleren Abschätzung $x_1 = x_{\text{Layer } j}$, $x_2 = x_{\text{Layer } k}$, verbessert sich in der Simulation die p_t -Auflösung um 1,0% und die systematische Abweichung des Mittelwerts der Fehlerverteilung von Null verringert sich um 0,022 GeV/c (27%).

6.2 Berechnung des Bahnradius

Aus den drei Punkten $(0,0)$, (x_1, y_1) und (x_2, y_2) lässt sich der Radius der Kreisbahn bestimmen [Vul03b]. Es gilt nach Abbildung 6.3 (oberes rechtwinkliges Dreieck):

$$r = \frac{d_{12}/2}{\sin(\alpha)} \quad (6.10)$$

mit

$$\alpha = \varphi_2 - \varphi_1 = \arctan\left(\frac{y_2}{x_2}\right) - \arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right) \quad (6.11)$$

und

$$d_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (6.12)$$

$$y_1 = a + b \cdot x_1 \quad y_2 = a + b \cdot x_2$$

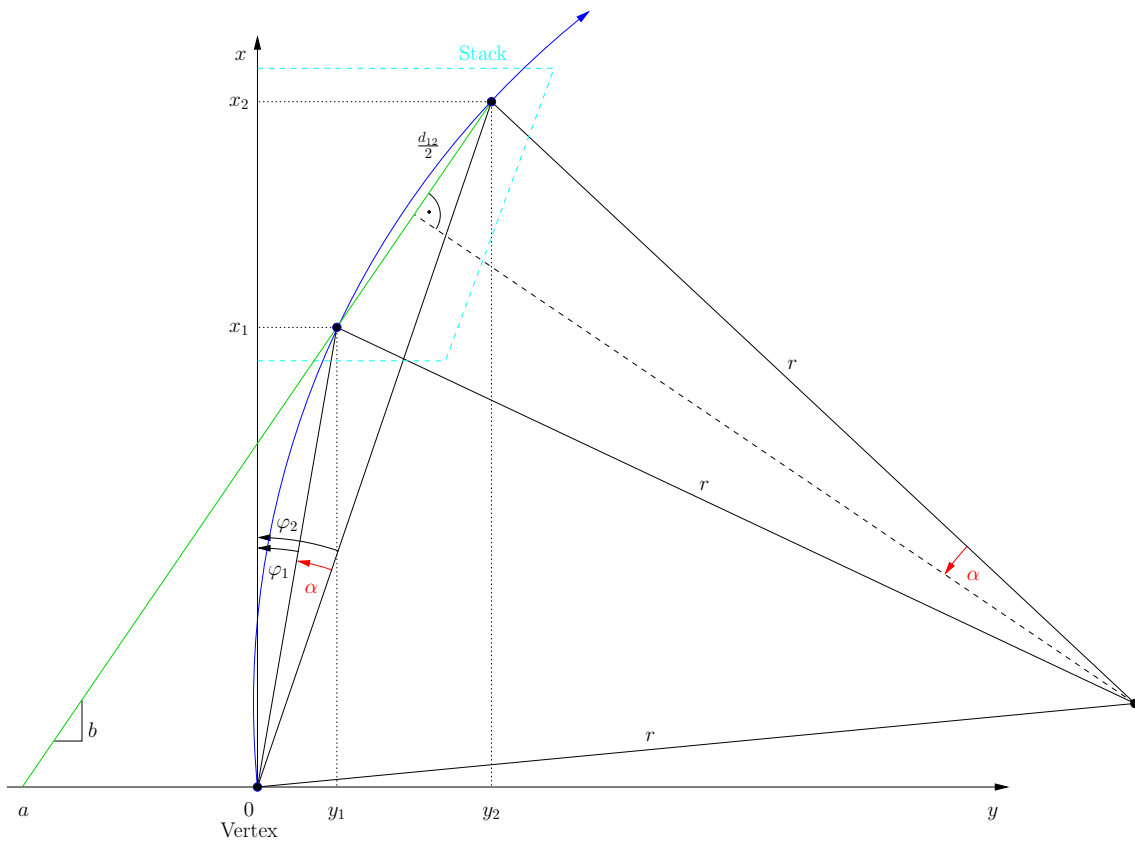


Abbildung 6.3: Skizze zur Berechnung des Transversalimpulses auf GTU-Ebene.

Mit Hilfe dieser Formeln lässt sich der Radius der Teilchenbahn aus den beiden Koeffizienten a und b rekonstruieren. Ist der Bahnradius r rekonstruiert, ergibt sich der Transversalimpuls p_t des Teilchens nach (4.7) durch Multiplikation mit einer Konstanten.

6.2.1 Mögliche Vereinfachungen bei der Berechnung

Die Berechnung des Bahnradius nach den angegebenen Formeln erscheint für eine Hardwareumsetzung mit den bestehenden Zeitvorgaben noch sehr aufwändig. Es wird daher untersucht, inwieweit die Berechnungen durch Näherungen vereinfacht werden können, ohne das Ergebnis deutlich zu verschlechtern.

Um die Verfahren zur Rekonstruktion des Transversalimpulses zu überprüfen, wurde für jede Veränderung die Simulation komplett durchlaufen und die Fehlerverteilung des rekonstruierten Transversalimpulses analysiert. Die Breite und der Mittelwert dieser Verteilung geben eine Abschätzung für die Genauigkeit bzw. eine systematische Verschiebung bei der Berechnung.

Die Distanz d_{12} lässt sich nach (6.12) schreiben als

$$d_{12} = \sqrt{1 + b^2} \cdot (x_2 - x_1)$$

Es entsteht fast kein Verlust an Genauigkeit, wenn die Wurzel nach

$$\sqrt{1 + x} \approx 1 + \frac{1}{2}x \quad (\text{für kleine } x)$$

entwickelt wird. Da der Winkel α im Experiment sehr klein ist, entsteht durch die Abschätzung

$$\sin(\alpha) \approx \alpha \quad (\text{für kleine } \alpha)$$

ebenfalls kaum Verlust. Die Rechnung lautet nun:

$$d'_{12} = (x_2 - x_1) \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \quad (6.13)$$

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{a}{x_1} + b\right) \quad \varphi_2 = \arctan\left(\frac{a}{x_2} + b\right) \quad (6.14)$$

$$r' = \frac{d'_{12}}{2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (6.15)$$

Bis zu dieser Stelle ist in der Simulation keine Verschlechterung der Ergebnisse zu erkennen.

Die Abschätzung $\arctan(x) \approx x$, die für sehr kleine x gilt, würde zwar zu einer radikalen Vereinfachung führen, erzeugt jedoch auch deutlich schlechtere Ergebnisse. Besser ist es, $\alpha = \varphi_2 - \varphi_1$ nach Taylor zu entwickeln. Es gilt:

$$\alpha = \varphi_2 - \varphi_1 = a(b^2 - 1) \cdot \frac{x_2 - x_1}{x_1 x_2} + a^2 b \cdot \frac{x_2^2 - x_1^2}{x_1^2 x_2^2} + \dots$$

Damit ergibt sich durch Umstellen der Rechenweg:

$$c_1 = \frac{x_1 x_2}{2} \quad c_2 = \frac{x_1 + x_2}{x_1 x_2} \quad (6.16)$$

$$r'' = c_1 \cdot \frac{\frac{b^2}{2} + 1}{a(b^2 - 1) + a^2 b c_2} \quad (6.17)$$

Die Konstanten c_1 und c_2 sind dabei nur von der Verteilung der Segmente auf die Ebenen abhängig. Die jeweils 22 möglichen Werte c_{1k} und c_{2k} werden tabelliert. Die Berechnung des Radius wird so auf die Rechenoperationen Addition und Multiplikation sowie eine Division zurückgeführt. Soll der Radius lediglich mit einem Schwellwert verglichen werden, so kann sogar die Division entfallen.

Es wird dennoch eine noch weitgehendere Vereinfachung untersucht. Die Werte für die Steigung b sind in der Simulation erwartungsgemäß relativ eng um den Wert Null verteilt. Vernachlässigt man die Steigung komplett, ergibt sich der einfache Zusammenhang:

$$r''' = \lim_{b \rightarrow 0} r'' = -\frac{c_1}{a} \quad (6.18)$$

Damit können die Wertetabellen für b_{ki} und c_{2k} komplett entfallen, die Berechnung ist neben den Multiplikationen zur Bestimmung von a aus den y_i auf wenige Tabellenoperationen reduziert.

Tatsächlich verschlechtert sich durch diese drastische Vereinfachung die p_t -Auflösung in der hardwarenahen Variante der Simulation lediglich um 5 % von 0,132 GeV/c auf 0,138 GeV/c. Es entsteht allerdings eine zusätzliche systematische Verschiebung des Fehlermittelwerts von $-0,073$ GeV/c zu $-0,125$ GeV/c, welche durch die Addition einer Konstanten im Mittel ausgeglichen werden kann.

In Hinblick auf die Triggerfunktion der GTU ist das Ergebnis angemessen. Es wird daher dieser Algorithmus für die Prototyp-Implementierung verwendet.

6.3 Architektur der Rekonstruktionseinheit

In der Rekonstruktionseinheit werden die in den vorigen Abschnitten dargestellten Berechnungen als eine Kombination aus arithmetischen Operationen und Tabellenzugriffen implementiert. Die Genauigkeiten bzw. Bitbreiten der Signale und Tabellenwerte werden dabei entsprechend der Simulation so gewählt, dass sich keine nachweisbare Verschlechterung der Ergebnisse zeigt.

Die Einheit besteht aus mehreren Pipelinestufen, die vollständig durch Register getrennt sind, so dass in jedem Takt eine Spur zur Bearbeitung übernommen werden kann. Die Tiefe der Pipeline hängt von der Art des gewünschten Ergebnisses ab. Abbildung 6.4 zeigt die ersten vier Pipelinestufen der Rekonstruktionseinheit.

In der ersten Pipelinestufe (Stufe 0) erhält die Rekonstruktionseinheit einen Spurdatenatz, der lediglich aus den Speicheradressen der beitragenden Spursegmente und einem Bitvektor `hit_mask` besteht, der angibt, welche der sechs Segmente tatsächlich zur Spur gehören. Die Segmentadressen werden an die Speicher in den Eingangseinheiten übermittelt, die die zu Anfang dort abgelegten Werte y' und P zurückliefern¹. Der 6-Bit-Vektor `hit_mask` kann nicht alle kombinatorisch möglichen 64 Werte annehmen, da mindestens vier Segmente für eine Spur gefordert werden. Der Vektor wird daher zunächst mit Hilfe einer konstanten Wertetabelle (siehe Tabelle 6.3) in eine Kennzahl `mask_id` umgewandelt, die nur die tatsächlich möglichen Kombinationen durchnummeriert. Das neue Signal `mask_id` ist lediglich 5 Bit breit und wird als Index für den Zugriff auf die größeren Wertetabellen (LUTs) benutzt. Noch im selben Takt liefert eine LUT für die sechs Ebenen die Werte $a_coeff(i)$. Es handelt sich dabei um die Koeffizienten für die lineare Regression entsprechend Tabelle 6.1, die nach

$$a_coeff(mask_id)(i) := 2^9 \cdot a_{ki}$$

¹Die Elektronenwahrscheinlichkeit P der Segmente wird im vorliegenden Prototyp-Design nicht verarbeitet, da die Details des Vorgehens bei der Teilchenidentifizierung noch nicht feststehen. Denkbar wäre, die Wahrscheinlichkeiten der beitragenden Segmente zu multiplizieren und mit einem zuvor festgelegten Schwellwert zu vergleichen.

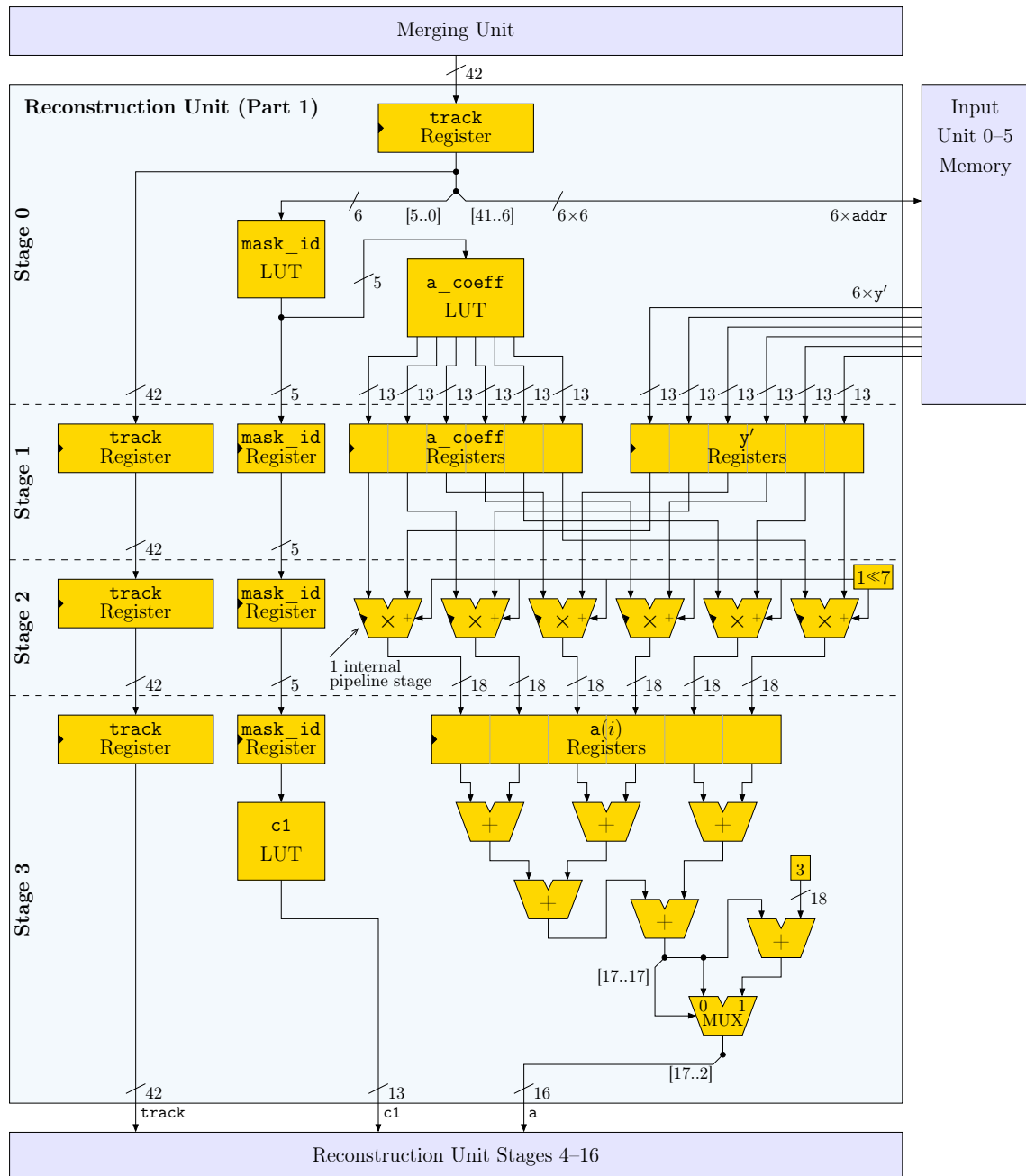


Abbildung 6.4: Der Aufbau der ersten vier Pipelinestufen der Rekonstruktionseinheit. Zu einem Spurdatsatz werden die entsprechenden Rekonstruktionsparameter aus den Eingangseinheiten abgerufen. Es wird der Parameter a errechnet, der dem Achsenabschnitt einer Ausgleichsgeraden durch die Spursegmente entspricht. Aus den Werten $c1$ und a kann der Transversalimpuls berechnet werden.

hit_mask	mask_id	hit_mask	mask_id
001111 ₂ (15)	0	110011 ₂ (51)	11
010111 ₂ (23)	1	110101 ₂ (53)	12
011011 ₂ (27)	2	110110 ₂ (54)	13
011101 ₂ (29)	3	110111 ₂ (55)	14
011110 ₂ (30)	4	111001 ₂ (57)	15
011111 ₂ (31)	5	111010 ₂ (58)	16
100111 ₂ (39)	6	111011 ₂ (59)	17
101011 ₂ (43)	7	111100 ₂ (60)	18
101101 ₂ (45)	8	111101 ₂ (61)	19
101110 ₂ (46)	9	111110 ₂ (62)	20
101111 ₂ (47)	10	111111 ₂ (63)	21

Tabelle 6.3: Die Abbildung der kombinatorisch möglichen Werte für den Bitvektor `hit_mask`, der die zu einer Spur beitragenden Detektorebenen angibt, auf eine fortlaufende Kennzahl.

skaliert und in 13-Bit-Ganzzahlen gewandelt wurden.

In den folgenden Pipelinestufen 1 und 2 werden die Produkte $\mathbf{a_coeff}(i) \cdot \mathbf{y}'(i)$ gebildet. Da die 13-Bit-Multiplikation mit der verwendeten Technik nicht in einem Takt zu berechnen ist, werden Multiplizierer mit einer internen Pipelinestufe verwendet. Vom Ergebnis werden nur die vorderen 18 Bit als $\mathbf{a}(i)$ verwendet. Vor dem Abschneiden der hinteren 8 Stellen wird an Position 7 eine Eins addiert, so dass aus dem Abschneiden der Nachkommastellen eine Rundung wird.

In Stufe 3 werden die soeben berechneten Produkte addiert. Die Rechnung entspricht Gleichung (6.8, links). Die Summe wird anschließend um die letzten beiden Stellen verkürzt. Zuvor wird die Zahl um drei erhöht, falls sie negativ ist. Dadurch wird verhindert, dass sich beim Abschneiden der hinteren beiden Stellen der Betrag der Zahl abhängig vom Vorzeichen ändert, was zu einer systematischen Verschiebung der Ergebnisse führen würde. Für die berechnete Summe \mathbf{a} gilt

$$\mathbf{a} = a \cdot \frac{2^9}{160 \mu\text{m} \cdot 2^8 \cdot 2^2} = \frac{a}{320 \mu\text{m}}$$

mit dem Achsenabschnitt a der Ausgleichsgeraden.

id	c1	id	c1	id	c1	id	c1
0	-1890	6	-2034	12	-2034	18	-2202
1	-1962	7	-2034	13	-2118	19	-2036
2	-1962	8	-2034	14	-2036	20	-2119
3	-1962	9	-2118	15	-2034	21	-2037
4	-2043	10	-2036	16	-2118		
5	-1963	11	-2034	17	-2036		

Tabelle 6.4: Die Werte für die Konstante `c1`, wie sie im Hardware-Entwurf verwendet werden. Der Wert ist ausschließlich von den beitragenden Detektorebenen abhängig.

Parallel dazu wird in Stufe 3 die 13-Bit-Konstante c_1 aus einer LUT (siehe Tabelle 6.4) ausgelesen, die nach

$$c_1(\text{mask_id}) := -\frac{e \cdot B}{320 \mu\text{m} \cdot \text{GeV}/c} \cdot c_1 = -\frac{375}{m^2} \cdot \frac{x_1 x_2}{2}$$

berechnet ist. Aus a und c_1 lässt sich der Transversalimpuls p_t nach

$$p_t = \frac{c_1}{a} \text{ GeV}/c$$

berechnen, wie durch Vergleich mit den Gleichungen (4.7) und (6.18) folgt.

Der Aufbau der folgenden Pipeline­stufen hängt von der Art des gewünschten Ergebnisses ab. Soll nur die Anzahl der Spuren registriert werden, deren Transversalimpuls über einem bestimmten Schwellwert liegt, ist die Ausführung der Division entbehrlich. Es kann dann der Wert von a mit dem konstanten Schwellwert multipliziert und das Ergebnis mit c_1 verglichen werden.

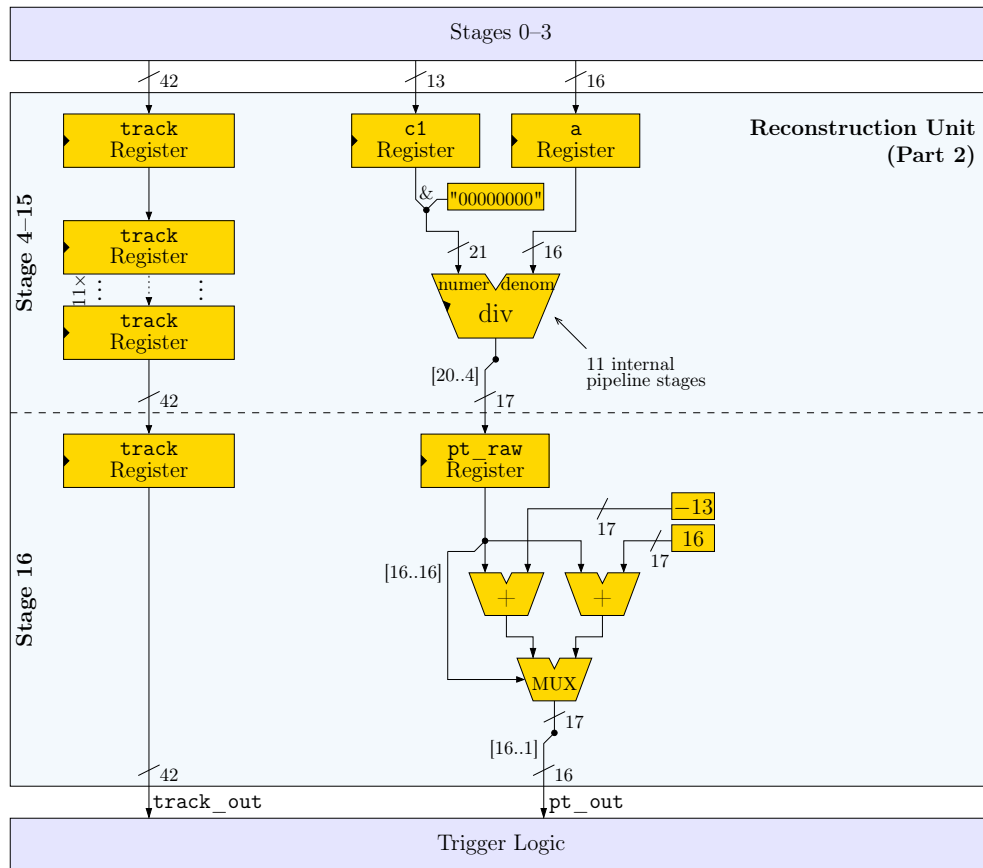


Abbildung 6.5: Der Aufbau der Pipeline­stufen 4–16 der Rekonstruktionseinheit. Aus den Werten c_1 und a der vorherigen Stufe wird durch Division der Transversalimpuls berechnet. Ist der genaue Zahlenwert nicht erforderlich, kann die zeitaufwändige Division eingespart werden und dieser Teil der Rekonstruktionseinheit wegfallen.

Sollen hingegen weitere Berechnungen wie die Rekonstruktion der invarianten Masse des Ursprungsteilchens aus einem Elektron-Positron-Spurpaar durchgeführt werden, muss die Division ausgeführt und der Transversalimpuls berechnet werden. Diese Variante ermöglicht darüber hinaus in der Simulation eine direkte Verifikation des Ergebnisses und wird daher hier beschrieben.

Der Aufbau der Pipeline Stufen 4–16 ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Für die Division wird der Zähler `c1` zunächst um acht Stellen erweitert. Bei der aktuell verwendeten Technik und einer Taktrate von 40 MHz wird ein Dividierer mit 11 internen Pipeline Stufen benötigt. Es werden nur die höchstwertigen 17 Bit des Ergebnisses verwendet.

In Stufe 16 wird schließlich der berechnete Transversalimpuls noch abhängig von seinem Vorzeichen um eine kleine additive Konstante korrigiert und auf 16 Binärstellen reduziert. Durch die Korrektur wird eine systematische Verschiebung verringert, die durch die Verwendung der groben Näherungsformel (6.18) im Mittel entsteht.² Das Ergebnis `pt_out` gibt den rekonstruierten Transversalimpuls als Festkommazahl mit sieben binären Nachkommastellen in der Einheit GeV/c an:

$$p_t = \frac{\text{pt_out}}{2^7} \text{ GeV}/c.$$

Die Beschreibung der TMU-Baueinheiten ist damit vollständig. Im folgenden Kapitel werden die Effizienz und das Zeitverhalten des Designs sowie der Platzbedarf nach der Abbildung auf ein FPGA untersucht.

²Die beiden Korrekturwerte unterscheiden sich im Betrag, um die vorzeichenabhängige Werteverchiebung im Mittel auszugleichen, die durch das Abschneiden von Nachkommastellen entsteht.

7 Ergebnisse

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse von verschiedenen Simulationen und Analysen zusammen. Im ersten Abschnitt wird an Hand von Ergebnissen der Root-Simulation dargestellt, wie gut das entwickelte System die Anforderungen hinsichtlich Effizienz und Genauigkeit erfüllt. Im zweiten Abschnitt werden Zeitverhalten und Größe der Hardwareimplementierung analysiert.

7.1 Ergebnisse der Simulation in Root

Im Folgenden werden einige statistische Ergebnisgrößen der Simulation dargestellt. Für die gesamte Triggerentscheidung steht so wenig Zeit zur Verfügung, dass aufwändige Berechnungen und insbesondere iterative Verfahren wie die Kalman-Filterung nicht anwendbar sind. Die Nachweiseffizienz wird daher nicht an der Effizienz der Offline-Analyse gemessen.

Von entscheidender Bedeutung ist zunächst die Wahrscheinlichkeit, dass ein gesuchtes Teilchen, das den Detektor durchquert, von diesem auch registriert wird (Effizienz). Wichtig ist auch die Wahrscheinlichkeit für ein Hintergrundereignis. Sie gibt an, wie häufig ein anderer Effekt vom Detektor fälschlicherweise für ein gesuchtes Teilchen gehalten wird. Bei einer zu großen Hintergrundrate würde der Trigger ständig auslösen und damit nutzlos sein. Schließlich ist für die gefundenen Teilchen die Qualität der Rekonstruktion wichtig. Sie gibt an, mit welcher Genauigkeit (Auflösung) die Eigenschaften des Teilchens bestimmt werden können.

Um verschiedene Verfahren auszuprobieren, wurde die Simulation in mehreren Varianten implementiert, deren Ergebnisse sich aber nur wenig unterscheiden. In diesem Abschnitt wird nur das Resultat der Variante vorgestellt, aus der die Hardware-Implementierung in den Kapiteln 5 und 6 abgeleitet ist. Bei der Umsetzung des simulierten Berechnungsverfahrens in eine möglichst schnelle Hardwarearchitektur wurde der Algorithmus leicht variiert und optimiert. Die durch die Veränderungen auftretenden zusätzlichen Verluste liegen aber nur im Bereich beispielsweise von Rundungsfehlern, so dass die wesentlichen Eigenschaften des Modells in der Root-Simulation sichtbar sind.

7.1.1 Nachweiseffizienz

Tabelle 7.1 gibt eine detaillierte Übersicht der Simulationsergebnisse für das Erkennen von Elektronspuren in der GTU. Die Tabelle ist nach der Anzahl Spursegmente unterteilt,

Spuren mit 4 Segmenten										
$dN_{\text{ch}}/d\eta =$		0	2000		4000		8000			
gesamt		171	150		256		325			
gef.	+0	-0	138	80,7 %	103	68,7 %	154	60,2 %	116	35,7 %
	+1	-0	8	5,3 %	3	2,0 %	6	3,1 %	8	3,4 %
		-1	1		0		2		3	
nicht gefunden		24	14,0 %	44	29,3 %	94	36,7 %	198	60,9 %	
Spuren mit 5 Segmenten										
$dN_{\text{ch}}/d\eta =$		0	2000		4000		8000			
gesamt		621	371		393		328			
gefunden	+0	-0	541	96,5 %	239	90,6 %	185	82,4 %	106	64,9 %
		-1	58		97		139		107	
		-0	2		1		0		2	
gefunden	+1	-1	0	0,5 %	2	0,8 %	7	2,3 %	3	3,7 %
		-2	1		0		1		7	
		-2	0		0		1		0	
nicht gefunden		19	3,1 %	32	8,6 %	60	15,3 %	103	31,4 %	
Spuren mit 6 Segmenten										
$dN_{\text{ch}}/d\eta =$		0	2000		4000		8000			
gesamt		1769	425		289		109			
gefunden	+0	-0	1477	98,0 %	262	95,8 %	123	90,7 %	19	70,6 %
		-1	196		121		100		33	
		-2	61		24		39		25	
		-1	1		4		1		1	
gefunden	+1	-2	0	0,1 %	1	1,6 %	3	2,0 %	1	2,8 %
		-3	0		2		1		1	
		-3	0		0		1		0	
nicht gefunden		34	1,9 %	11	2,6 %	21	7,3 %	29	26,6 %	
Spuren mit 7 Segmenten										
$dN_{\text{ch}}/d\eta =$		0	2000		4000		8000			
gesamt		65	15		11		3			
gef.	+0	-1	54	100,0 %	8	100,0 %	5	90,9 %	1	100,0 %
		-2	10		5		4		1	
		-3	1		2		1		1	
nicht gefunden		0	0,0 %	0	0,0 %	1	9,1 %	0	0,0 %	
Spuren mit 8 Segmenten										
$dN_{\text{ch}}/d\eta =$		0	2000		4000		8000			
gesamt		4	0		0		0			
gef.	+0	-2	2	75,0 %	0	–	0	–	0	–
		-3	0		0		0		0	
		-4	1		0		0		0	
nicht gefunden		1	25,0 %	0	–	0	–	0	–	

Tabelle 7.1: Simulationsergebnisse für das Erkennen von Teilchenspuren in der GTU (siehe Text).

die für eine Spur an die GTU übermittelt werden¹, und umfasst insgesamt zehn Spalten. Durch die ersten beiden Spalten (von links) wird pro Zeile eine Konstellation angegeben, in der eine Spur gefunden werden kann. Die erste Spalte gibt an, wie viele nicht zur Spur gehörende Segmente irrtümlich von der GTU zur Spur hinzugefügt werden (+0, +1, +2), in der zweiten Spalte steht, wie viele Spursegmente der Spur nicht gefunden werden (−0, −1, −2, ...). Im rechten Bereich der Tabelle ist für jede Konstellation angegeben, wie oft sie in der Simulation bei den verschiedenen Multiplizitäten auftritt. Die in der Tabelle nicht aufgeführten Kombinationen kommen in der Simulation nicht vor.

Bei der Auswertung werden alle Elektronen und Positronen berücksichtigt, die bei einem Υ -Zerfall mit einem Transversalimpuls $p_t > 3,0 \text{ GeV}/c$ erzeugt wurden, *weitgehend unbeeinflusst* den Detektor passieren und in mindestens vier Ebenen ein Spursegment erzeugen². Das Kriterium *weitgehend unbeeinflusst* trifft auf ein Teilchen zu, wenn es beim Eintritt in den Detektor noch mindestens 90 % seines ursprünglichen Transversalimpulses besitzt und darüber hinaus beim Durchqueren des Detektors höchstens 10 % seines Transversalimpulses verliert. Die Analyse beschränkt sich auf diese Teilchen, um den Einfluss der GTU auf das Ergebnis in den Vordergrund zu rücken. Die in der Tabelle angegebenen absoluten Teilchenzahlen erklären sich aus den in der Simulation verwendeten Ereignisdatensätzen (vgl. Tabelle 3.1) und der Effizienz bis zur Ebene der LTUs (siehe Abschnitt 7.1.4).

In der Simulation werden auch überlagerte Spursegmente berücksichtigt, da sie bei höheren Multiplizitäten im TRD häufig auftreten und sich die Effizienz der GTU auch dadurch auszeichnet, wie gut mit diesen überlagerten Spursegmenten bei der Rekonstruktion umgegangen wird. Das heißt einerseits, ob Segmente mit leichten Abweichungen noch richtig zugeordnet werden, und andererseits, wie verhindert wird, dass stark beeinflusste Spursegmente die Rekonstruktion der übrigen Segmente verschlechtern. Die Ergebnisse spiegeln somit nicht das Verhalten der isolierten GTU unter optimalen Bedingungen wider, sondern ihre Arbeitsweise in Bezug auf die Anwendung im TRD.

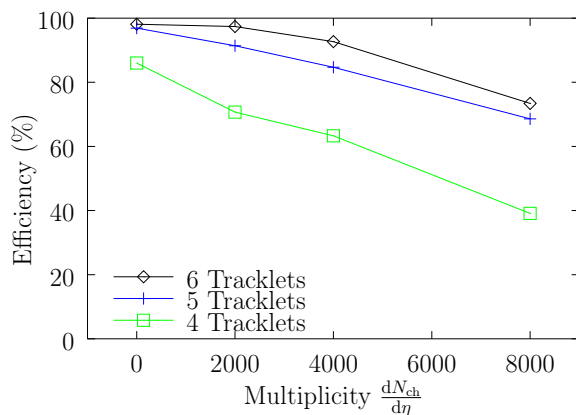


Abbildung 7.1: Nachweiseffizienz der GTU für Spuren mit vier, fünf und sechs Segmenten und verschiedene Multiplizitätsdichten.

¹Spuren mit 7 und 8 Segmenten können entstehen, wenn ein Teilchen in einem Detektormodul auf zwei benachbarten Padreihen Ionisationsspuren erzeugt. Die GTU verwendet in einem solchen Fall stets nur eines der beiden Spursegmente.

²Genauer: ‚... zu einem Spursegment mehrheitlich beitragen.‘ In der Simulation wird jedem Spursegment ein erzeugendes Teilchen zugeordnet. Bei sich überlagernden Spuren wird das Teilchen mit dem größten Beitrag ausgewählt.

In Abbildung 7.1 werden einige Werte der Tabelle für die Effizienz der GTU graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Nachweiseffizienz mit steigender Multiplizitätsdichte $\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ abnimmt. Spuren mit wenigen Segmenten sind von diesem Effekt stärker betroffen.

Die Abnahme der Nachweiswahrscheinlichkeit bei höherer Multiplizität hat zwei Hauptgründe. Zum einen steigt mit der Multiplizität die Wahrscheinlichkeit, dass in der GTU zu einer gesuchten Spur fälschlicherweise ein irrelevantes Spursegment hinzugefügt wird, weil es zufällig das Festerkriterium erfüllt. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, dass das zusätzliche Segment den rekonstruierten Transversalimpuls p_t^{rec} so verfälscht, dass er unter die Grenze von $p_{t,\text{min}}^{\text{GTU}} = 2,7 \text{ GeV}/c$ verschoben und das gesuchte Elektron nicht gefunden wird.

Bei größerer Multiplizität wächst zum anderen die Wahrscheinlichkeit, dass bereits auf LTU-Ebene ein einzelnes Spursegment aus der Überlagerung zweier Teilchenspuren besteht. Durch die Einwirkung des anderen Teilchens kann vor allem die Steigung des Spursegments so verfälscht werden, dass es von der GTU nicht zur Spur hinzugefügt wird. Spuren mit nur vier Segmenten werden bereits bei einem fehlenden Segment nicht mehr akzeptiert, so dass sich die Auswirkungen dieses Effekts auf die Effizienz hier besonders deutlich zeigen.

Bei einer Multiplizitätsdichte von $\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} = 2000$ – das liegt etwas unter der aktuell erwarteten – werden beispielsweise von den vollständigen Teilchenspuren (6 Segmente) 97,4% gefunden; bei Spuren mit nur 5 oder 4 Segmenten sind es noch 91,4% bzw. 70,7%.

7.1.2 Hintergrundrate

Hintergrundereignisse, also ‚falsche‘ Elektronfunde basieren im Wesentlichen auf zwei Effekten:

1. Ein Pion mit hohem Transversalimpuls wird für ein Elektron gehalten.
2. Ein Elektron mit geringem Transversalimpuls kommt nicht aus dem Primärvertex und wird deswegen mit zu hohem Transversalimpuls rekonstruiert.

Die Details der statistischen Teilchenbestimmung mit Hilfe der gemessenen Ladung stehen noch nicht fest und sollen nicht im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Die vorgestellte Simulation berücksichtigt daher die erste Fehlerquelle nicht; die Zuordnung wird als perfekt angenommen.

$\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} =$	0	2000	4000	8000
LTU	0,00	17,80	33,95	68,33
GTU	0,00	1,50	2,85	3,30

Tabelle 7.2: Hintergrundteilchen pro Ereignis auf LTU- und GTU-Ebene bei verschiedenen Multiplizitätsdichten.

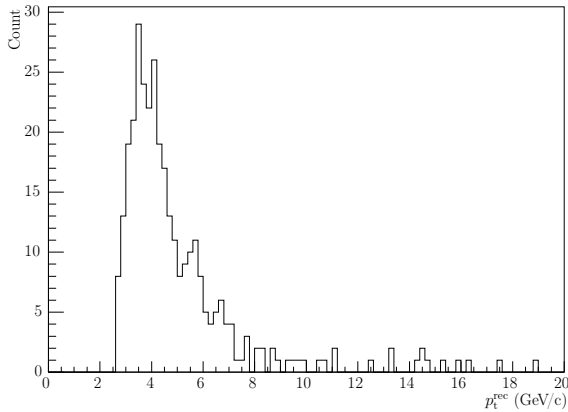


Abbildung 7.2: Rekonstruierter Transversalimpuls für Hintergrundteilchen. Für die Darstellung werden die Daten aller Multiplizitätsdichten verwendet.

Im Folgenden wird kurz der Einfluss der GTU auf die zweite Fehlerquelle beschrieben. Für präzise statistische Aussagen ist die Anzahl der verwendeten Ereignisdateien allerdings nicht ausreichend.

Ist die Primärvertexannahme verletzt, die bei der Rekonstruktion des Transversalimpulses verwendet wird, kann bei dem verwendeten Verfahren ein Teilchen beliebig hochenergetisch erscheinen. Die Anzahl gefundener Hintergrundteilchen pro Ereignis ist in Tabelle 7.2 für die LTU- und GTU-Ebene aufgeführt. In den LTUs werden die Spursegmente lediglich aufgrund ihrer Steigung aussortiert. Der entsprechende Schwellwert $p_{t,\min}^{\text{LTU}} = 2,3 \text{ GeV}/c$ liegt dabei niedriger als in der GTU. In der Tabelle sind auf LTU-Ebene nur jene Teilchen erfasst, die auf mindestens vier Ebenen falsch erkannt und an die GTU übermittelt werden. Die Teilchen haben im Durchschnitt einen realen Transversalimpuls von $\bar{p}_t \approx 0,3 \text{ GeV}/c$.

In der GTU wird die Hintergrundrate durch zwei Effekte verringert. Erstens ist durch die Kombination der Spursegmente die Genauigkeit der Rekonstruktion höher, so dass der Schwellwert $p_{t,\min}^{\text{GTU}} = 2,7 \text{ GeV}/c$ größer gewählt werden kann. Dadurch verringert sich statistisch die Wahrscheinlichkeit für ein Teilchen, den Detektor mit einer fälschlicherweise passenden Steigung zu durchqueren. Abbildung 7.2 zeigt die Verteilung des rekonstruierten Transversalimpulses p_t^{rec} für Hintergrundteilchen. Man kann daraus ablesen, wie sich die Hintergrundrate durch eine weitere Erhöhung von $p_{t,\min}^{\text{GTU}}$ verringern würde.

Zweitens führt die Vereinigung der Spursegmente dazu, dass Teilchen mit geringem Transversalimpuls unabhängig von ihrem Winkel verworfen werden, da ihre Bahn zu sehr gekrümmt ist, um das Fensterkriterium zu erfüllen. Die Hintergrundteilchen auf GTU-Ebene haben daher einen deutlich höheren mittleren realen Transversalimpuls: $\bar{p}_t \approx 1,2 \text{ GeV}/c$. Um die Hintergrundrate zu senken, könnte also auch (auf Kosten der Effizienz) die Fenstergröße noch weiter verringert werden.

7.1.3 Auflösung des rekonstruierten Transversalimpulses

Als Kriterium für die Qualität der Rekonstruktion wird der mittlere Fehler des rekonstruierten Transversalimpulses betrachtet. Es ist sinnvoll, den relativen Fehler zu betrachten, da

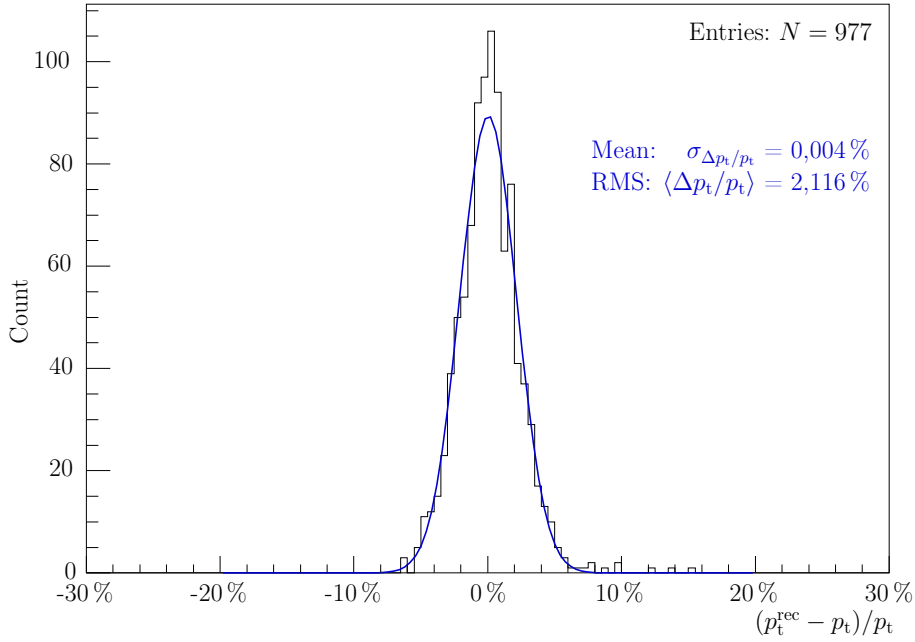


Abbildung 7.3: Auflösung der Transversalimpuls-Rekonstruktion. An die Fehlerverteilung ist eine Normalverteilung angepasst (blau eingezeichnet). Mittelwert und Breite der Fehlerverteilung sind ein Maß für die Genauigkeit des Rekonstruktionsverfahrens.

der Fehler für große Transversalimpulse zunimmt (folgt bei konstantem Fehler des Achsenabschnitts a aus (6.18)). Die Verteilung des relativen Fehlers bezogen auf den tatsächlichen Transversalimpuls ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

Viele Elektronen verlieren vor und im Detektor – beispielsweise durch Bremsstrahlung – so deutlich an Energie, dass der ursprüngliche Transversalimpuls nicht genau ermittelt werden kann, sondern sich systematisch ein geringerer Wert ergibt. Um die p_t -Auflösung möglichst unabhängig von diesem Effekt betrachten zu können, werden für das Diagramm nur Elektronen und Positronen mit einem Transversalimpuls $p_t > 3,0 \text{ GeV}/c$ berücksichtigt, die vor und im Detektor jeweils höchstens 1% ihres Transversalimpulses verlieren. Ohne diese Einschränkung wäre in Abbildung 7.3 eine deutliche Asymmetrie zu erkennen. Um die Rekonstruktion nicht durch Hintergrundteilchen zu stören, werden für diese Auswertung die Simulationsdatensätze mit Multiplizitätsdichte $\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} = 0$ (Signaldata) verwendet.

Zum Vergleich wird an die Daten eine Normalverteilung angepasst. Die Breite $\sigma_{\Delta p_t/p_t} = 2,12\%$ der Verteilung stellt eine Abschätzung für die relative Auflösung des rekonstruierten Transversalimpulses dar. Der absolute Rekonstruktionsfehler beträgt in der Simulation im Mittel $\sigma_{\Delta p_t} = 0,13 \text{ GeV}/c$. Die Ergebnisse sind vor allem durch die Ortsauflösung des Detektors in y -Richtung beschränkt und zeigen daher nicht isoliert die Genauigkeit der Berechnungen in der GTU.

Segmente	$dN_{\text{ch}}/d\eta$				Segmente	$dN_{\text{ch}}/d\eta$			
	0	2000	4000	8000		0	2000	4000	8000
0–3	31,0	34,7	37,4	49,6	0–3	3,6	8,4	12,3	28,4
4	6,6	11,7	18,3	22,4	4	6,3	14,3	23,7	30,4
5	18,5	26,2	25,9	20,5	5	22,8	35,4	36,3	30,7
6	42,0	26,2	17,6	7,3	6	64,8	40,5	26,7	10,2
7–8	1,9	1,2	0,9	0,1	7–8	2,5	1,4	1,0	0,3

Tabelle 7.3: Effizienz des gesamten Detektorsystems ausschließlich der GTU. Die Tabellen listen die Wahrscheinlichkeiten (in Prozent) auf, dass für ein gesuchtes Elektron eine bestimmte Anzahl Spursegmente an die GTU übermittelt werden. In der rechten Tabelle sind nur gesuchte Elektronen berücksichtigt, deren Transversalimpuls sich bis zum Detektor noch nicht deutlich verringert hat.

7.1.4 Analyse des gesamten Detektorsystems

Um zu überprüfen, dass die Ergebnisse der Root-Simulation für die GTU im Rahmen der Erwartungen liegen, soll die Nachweiseffizienz mit jener der abstrakteren ‚theoretischen‘ Simulation des Detektors verglichen werden, die von Dr. B. Vulpescu erstellt wurde und die – unter Beschränkung auf einfache Verfahren – als Software-Simulation versucht, die besten Ergebnisse zu produzieren.

Im Gegensatz zur vorliegenden Simulation, die das Verhalten der Hardware-Implementierung der GTU beschreibt, wird in der ‚theoretischen‘ Simulation mit uneingeschränkter Genauigkeit gerechnet; alle Größen sind Gleitkommazahlen. Die Datenübertragung wird nicht simuliert. Die Spursegmente werden statt auf eine Ebene auf eine Zylinderoberfläche projiziert. Das Zusammenfügen der Spursegmente ist als zweistufiger Prozess implementiert. Für die im ersten Schritt gefundenen Spuren werden die zugehörigen Spursegmente lediglich um den Einfluss der ‚tilted Pads‘ auf die y -Koordinate korrigiert. Im zweiten Schritt werden erneut alle Spursegmente betrachtet und es werden die endgültigen Spuren gefunden. Anders als in der vorliegenden Simulation werden Spuren über Stapelgrenzen hinweg verfolgt. Schließlich werden bei der Rekonstruktion des Transversalimpulses keine Näherungen verwendet.

Um mit den Ergebnissen dieser idealisierten Simulation, wie sie sich u. a. in [ALI01, S. 100] finden, vergleichen zu können, muss die Effizienz für das gesamte Detektorsystems unter Berücksichtigung aller gesuchten Elektronen betrachtet werden.

Effizienz bis zur Ebene der LTUs

In Tabelle 7.3 (links) sind die Wahrscheinlichkeiten (in Prozent) angegeben, dass für ein gesuchtes Elektron eine bestimmte Anzahl Spursegmente an die GTU übermittelt werden. Die Kombination dieser Werte mit den Nachweiswahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Spurtypen in der GTU ergibt die Gesamteffizienz des Detektors. Teilchen, die mit 0–3 Segmenten übermittelt werden, können von der GTU unter keinen Umständen nachgewiesen werden. Ihr Anteil beträgt bei $\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} = 0$ (Signalraten) bereits 31,0 %.

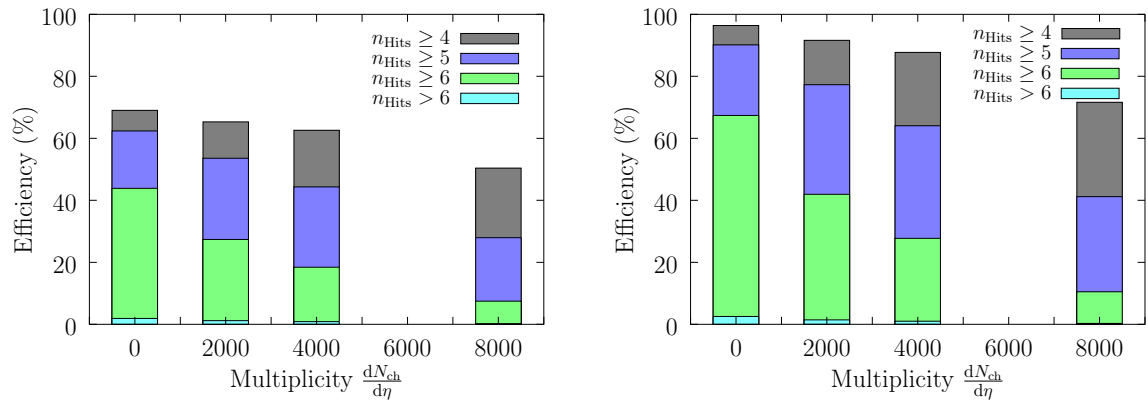


Abbildung 7.4: Graphische Darstellung der Daten aus Tabelle 7.3 für die Effizienz ohne Berücksichtigung der GTU. Im rechten Diagramm sind nur *weitgehend unbeeinflusste* Elektronen berücksichtigt.

Eine Hauptursache für die eingeschränkte Effizienz liegt auch hier im Energieverlust der Elektronen. In der rechten Tabelle sind zum Vergleich die Werte angegeben, die man erhält, wenn nur *weitgehend unbeeinflusste* Elektronen berücksichtigt werden, wie dies bei den in Abschnitt 7.1.1 angegebenen Ergebnissen für die GTU der Fall ist. In Abbildung 7.4 sind die Verteilungen graphisch dargestellt.

Gesamteffizienz

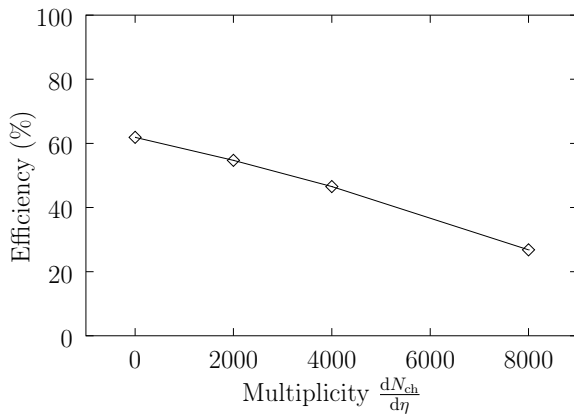


Abbildung 7.5: Nachweiseffizienz des gesamten Detektorsystems für primäre Elektronen mit $p_t \geq 3,0 \text{ GeV}/c$ bei verschiedenen Multiplizitätsdichten.

Kombiniert man die Ergebnisse mit der Effizienz der GTU in Form einer Gesamtsimulation, so ergibt sich der in Abbildung 7.5 dargestellte Effizienzverlauf in Abhängigkeit von der Multiplizitätsdichte. Bei der Auswertung werden alle Elektronen und Positronen berücksichtigt, die bei einem Υ -Zerfall mit einem Transversalimpuls $p_t > 3,0 \text{ GeV}/c$ in den Winkelbereich des Detektors erzeugt wurden. Die Abweichung zum etwa vergleichbaren ‚Cut A‘ in [ALI01, S.100] beträgt wenige Prozentpunkte, wobei der Unterschied für hohe Multiplizitäten größer ist als für niedrige.

Es entstehen in der hardwarenahen Simulation offensichtlich keine schwerwiegenden Nachteile durch die verwendeten vereinfachten Verfahren. Die Abweichungen lassen sich durch die oben genannten Unterschiede, insbesondere die Verwendung von Näherungsverfahren und die beschränkte Genauigkeit bei Übertragung und Verarbeitung der Spursegmentparameter erklären.

7.2 Analyse der Hardwareimplementierung

7.2.1 Bearbeitungsdauer

Die Bearbeitungsdauer der GTU ist zum einen von der Taktrate abhängig, mit der sie betrieben werden kann. Zum anderen ist aber auch die Anzahl Rechentakte, die bis zum Ergebnis benötigt werden, nicht konstant.

Die GTU ist so konzipiert, dass jede Einheit ihre Daten im Mittel mit möglichst geringer Latenz weiterreicht. Dabei können sich Verzögerungen bis zu einem gewissen Grad zwischen den Einheiten ausgleichen. Darüber hinaus ist beispielsweise anzunehmen, dass die maximal 40 Spursegmente pro Modul bei höchster Multiplizität einigermaßen verteilt über die Kammer auftreten. Da die GTU für eine geringe Gesamtverzögerung unter diesen Annahmen entwickelt wurde, ist es nicht sinnvoll, die theoretisch maximale Bearbeitungszeit zu untersuchen.

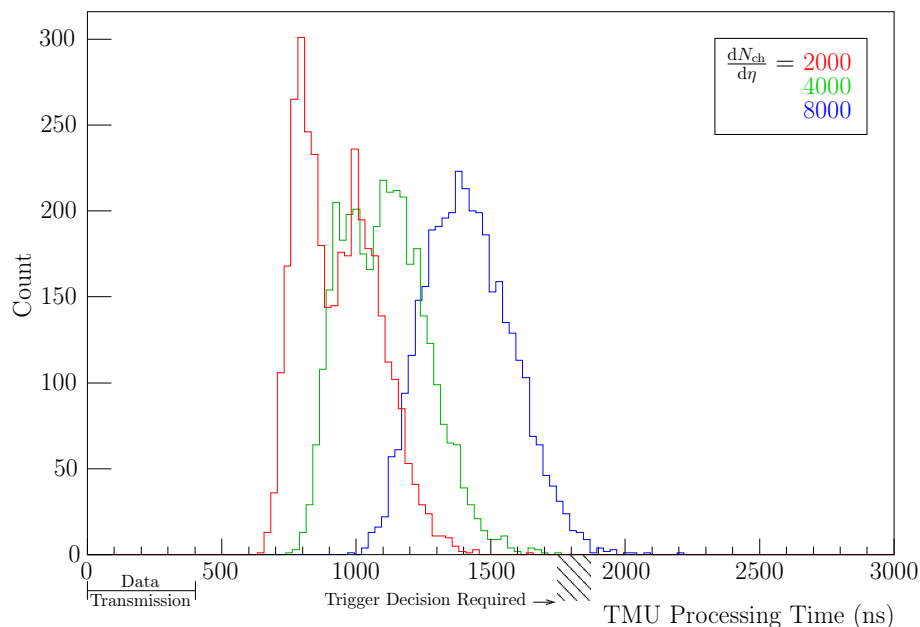


Abbildung 7.6: Die Bearbeitungsdauer der TMUs ist nicht konstant, sondern hängt stark von der Anzahl übertragener Spursegmente – und damit im Mittelwert von der Multiplizitätsdichte – ab. Die Null bezeichnet den Zeitpunkt des Eintreffens des ersten Spursegments, die Übertragungsdauer ist also in der angegebenen Zeit eingeschlossen.

Stattdessen wird die tatsächliche Bearbeitungszeit für simulierte Ereignisse betrachtet. Dazu werden die Simulationsdatensätze aus der Root-Simulation in Form von Spursegmentdatenworten in eine funktionale Simulation der VHDL-Beschreibung übernommen. Es wird dabei eine Taktfrequenz der GTU von 40 MHz angenommen.

Abbildung 7.6 zeigt die Verteilung der Bearbeitungszeit der einzelnen TMUs. In der dargestellten Rechenzeit ist die Übertragungsdauer mit eingeschlossen; der Nullpunkt der Zeitskala kennzeichnet also das Eintreffen des ersten Spursegments. In der Simulation wird angenommen, dass die Spursegmente ohne Unterbrechung übertragen werden. Das simulierte Modell ist die Variante ohne Division (vgl. Abschnitt 6.3), da die Taktzahl der Division – falls diese tatsächlich benötigt wird – sehr stark vom gewählten FPGA-Modell abhängt. Die Bearbeitungsdauer hängt erwartungsgemäß stark von der Multiplizität ab. Die zwei Spitzen, die bei den Werten für $\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} = 2000$ noch gut zu sehen sind, entstehen durch TMUs mit null bzw. einer gefundenen Spur.

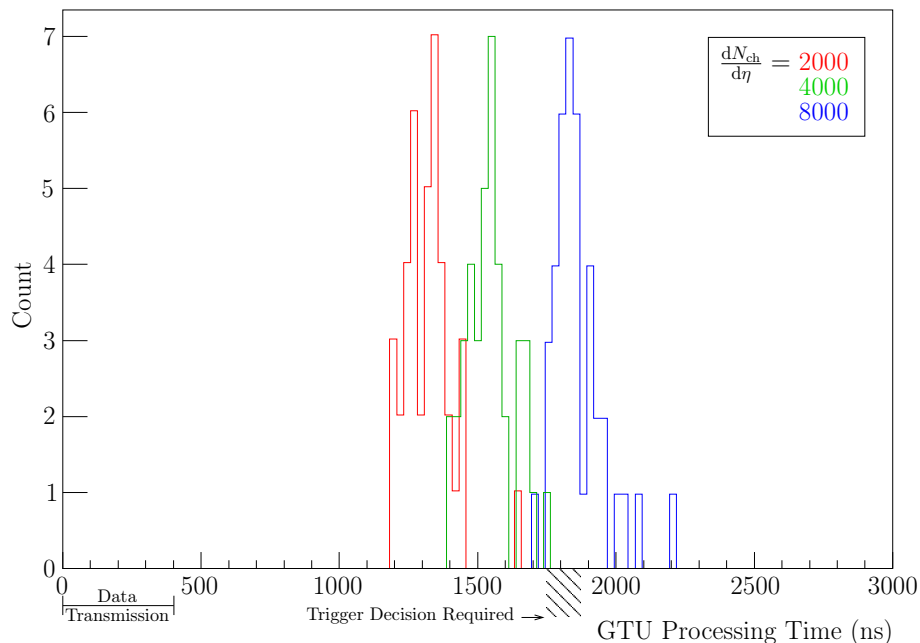


Abbildung 7.7: Die Bearbeitungsdauer der GTU ergibt sich für jedes Ereignis aus der maximalen Bearbeitungsdauer der einzelnen TMUs. Der Nullpunkt der Zeitskala kennzeichnet das Eintreffens des ersten Spursegments.

Entscheidend für den Einsatz im Experiment ist die gesamte Bearbeitungszeit der GTU. Um diese abzuschätzen, ist in Abbildung 7.7 für jedes der jeweils 40 Ereignisse die maximale Bearbeitungsdauer aller TMUs aufgetragen. Die Übertragungsdauer ist entsprechend der vorigen Darstellung in den Angaben eingeschlossen. Noch hinzugerechnet werden muss allerdings die Zeit, die für die Datenübertragung von den TMUs zur globalen Triggerlogik und für deren Berechnungen anfällt.

Bis zur Multiplizitätsdichte von $\frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} = 4000$ kann für sämtliche simulierte Ereignisse die Berechnung innerhalb von 1750 ns ab Beginn der Datenübertragung abgeschlossen werden

und liegt damit im vorgesehenen Zeitrahmen. Bei $\frac{dN_{ch}}{d\eta} = 8000$ ist die Berechnung immerhin in 36 von 40 Fällen in weniger als $2\ \mu\text{s}$ abgeschlossen.

7.3 Synthese für FPGAs

Bei der Abbildung der VHDL-Beschreibung auf ein FPGA (*Synthese*, vgl. Abschnitt 3.2) zeigt sich unter anderem die maximale Taktrate, mit der die Einheit betrieben werden kann. Außerdem erhält man über die Anzahl verwendeter Logikzellen ein Maß für die Größe des Designs.

Portierbarkeit. Für den Aufbau der GTU kommen die FPGA-Bausteine mehrerer Hersteller in Frage. Wegen des stetigen Preisverfalls der FPGAs soll die Entscheidung für einen bestimmten FPGA-Typ möglichst spät getroffen werden. Bei der Entwicklung des GTU-Designs ist es daher wichtig, die VHDL-Beschreibung portabel zu gestalten, so dass sie sich ohne große Änderungen für verschiedene FPGA-Modelle kompilieren lässt.

Dieser Grundsatz ist bei der Implementierung der Architektur berücksichtigt. So wird in den meisten Fällen darauf verzichtet, in der VHDL-Beschreibung vorgefertigte Module aus herstellerspezifischen Entwurfsbibliotheken zu verwenden. Bestimmte Funktionen der FPGAs lassen sich allerdings nur über die Bibliothek des jeweiligen Herstellers nutzen. An einigen Stellen wurde daher auf herstellerspezifische Komponenten zurückgegriffen. Hierbei wurde die technologieunabhängige LPM-Entwurfsbibliothek³ der Firma Altera verwendet. Es handelt sich bei den drei verwendeten Komponenten um die Dual-Clock-FIFO-Speicher in den Eingangsstufen (Komponente `lpm_fifo_dc`) und die arithmetischen Operationseinheiten mit internen Pipelineinstufen in der Rekonstruktionseinheit (`lpm_mult` und `lpm_divide`) (vgl. LPM-Referenz [Alt96]). Um das Design für die FPGAs anderer Hersteller zu kompilieren, müssen lediglich an diesen drei Stellen die entsprechenden Module des anderen Herstellers eingesetzt werden.

Hersteller	Altera
Baustein	Stratix EP1S30
Bauteilnummer	EP1S30F780C5
Logikzellen	28 749 (von 32 470)
Speicher (kBit)	210 (von 3 239)
DSP-Blockelemente	22 (von 96)
maximale Taktrate	45,2 MHz

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Synthese für ein beispielhaft ausgewähltes FPGA. Angegeben ist die Nutzung der Bauteil-Ressourcen. Die bei der Synthese geforderte Taktrate von 40 MHz wird erreicht.

³„Library of Parameterizable Modules“

Synthesergebnisse. In Tabelle 7.4 sind beispielhaft die Ergebnisse der Synthese für ein Stratix-FPGA der Firma Altera angegeben. Bei der Synthese wurde eine Taktrate von 40 MHz als Ziel vorgegeben. Die DSP-Blockelemente sind spezifisch für die Stratix-Serie. Sie werden automatisch für die Multiplikationen in den Eingangseinheiten und der Rekonstruktionseinheit eingesetzt.

Im ausgewählten FPGA erreicht das Design eine maximale Taktrate von 45,2 MHz; die geplante Taktrate von 40 MHz kann also erreicht werden. Die maximal erreichbare Frequenz hängt allerdings sehr stark vom ausgewählten Baustein ab.

Der kritische Pfad befindet sich in den Spurfindeeinheiten. Er geht in einer Schleife durch den Speicher, die Kombinationslogik, die Erhöhungslogik und das Adressregister. Die Register-zu-Register-Verzögerung beträgt hier maximal 22,125 ns. Die Leistung könnte an dieser Stelle noch gesteigert werden, indem die Speicher bereits einen Takt zuvor für die beiden folgenden Werte in Register ausgelesen werden, so dass der Speicherzugriff aus dem kritischen Pfad verschwindet.

Entwurfsteil	Anzahl	Logikzellen		Speicher (Bit)	
		pro Einheit	insgesamt	pro Einheit	insgesamt
Eingangseinheit	6	567	3 403	3 392	20 352
Z-Kanal-Einheit	18	466	8 383	448	8 064
Spurfindeeinheit	9	1 548	13 932	19 968	179 712
Zusammenführungseinh.	1	1 319	1 319	6 584	6 584
Rekonstruktionseinheit	1	1 712	1 712	588	588
Gesamtsumme			28 749		215 300

Tabelle 7.5: Die Größe der einzelnen Entwurfseinheiten der TMU nach der Synthese.

Die Größe der einzelnen Entwurfseinheiten ist in Tabelle 7.5 angegeben. Die Gesamtzahl verwendeter Logikzellen ist das wichtigste Größenmaß; der Bedarf an Speicherzellen ist in diesem Fall weniger kritisch. Wegen der verschiedenen Architekturen ist die Anzahl der Logikzellen allerdings nicht direkt mit den Angaben anderer Hersteller vergleichbar.⁴

Die Spurfindeeinheiten haben zusammen erwartungsgemäß den höchsten Platzbedarf. Die 18 Z-Kanal-Einheiten bilden den zweiten großen Anteil, wobei die Größe hier maßgeblich von den Sortierern bestimmt wird. Die nur einfach vorhandenen Einheiten haben kaum Einfluss auf die Gesamtgröße.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das vollständige Design einer TMU bei der geplanten Taktrate in einem (aktuell lieferbaren) FPGA implementieren lässt.

⁴Die Firma Altera bietet zu diesem Zeitpunkt (September 2003) Bausteine mit bis zu 79 040 Logikzellen an.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Übergangsstrahlungsdetektor des bevorstehenden Experiments ALICE dient dem orts-aufgelösten Nachweis von Teilchenspuren, der Impulsmessung und Teilchenidentifizierung und insbesondere als Trigger für langsamere, hochauflösendere Detektoren des Experiments. Das hierarchische Triggerkonzept des Übergangsstrahlungsdetektors sieht eine verteilte, massiv parallele Datenverarbeitung und -reduktion direkt auf den in mehreren zylindrischen Lagen angeordneten Detektorkammern in Verbindung mit einer zentralen Endverarbeitung und -auswertung in einer globalen Spurrekonstruktionseinheit (GTU) vor. Die in den Kammern beobachteten Spursegmente werden lokal als Geradenabschnitte parametrisiert. Aufgabe der GTU ist es, die zusammengehörigen Segmente aus den verschiedenen Detektorebenen wieder zu Spuren zusammzusetzen und aus dem Verlauf dieser Spuren den transversalen Impuls der erzeugenden Teilchen zu rekonstruieren, der ein wichtiges Kriterium für das Auslösen des Triggers darstellt.

In dieser Arbeit wurde die Funktionalität der GTU simuliert und spezifiziert sowie eine mögliche Architektur vorgestellt und als VHDL-Beschreibung implementiert. Das vorgestellte Design wurde durch Simulationen verifiziert und testweise für FPGA-Bausteine synthetisiert.

Bei der Entwicklung der Architektur war ein wesentliches Kriterium, dass der GTU für die Berechnungen auf den bis zu 20 000 Spursegmenten bis zur Triggerentscheidung weniger als $2\mu\text{s}$ zur Verfügung stehen. In Hinblick auf die Umsetzung in FPGAs wurde außerdem auf eine ressourcensparende Implementierung geachtet. Das Design ist so angelegt, dass es möglichst leicht angepasst werden kann, indem sich beispielsweise die Daten über die Detektorkonfiguration zentral in einer VHDL-Datei befinden und alle Wertetabellen automatisch aus wenigen Konfigurationsdaten erzeugt werden.

Die Arbeit der GTU wird auf mehrere Spurverfolgungseinheiten aufgeteilt, die sich parallel um verschiedene Raumwinkelbereiche kümmern. In Eingangseinheiten werden die Daten vom Auslesenetzwerk empfangen. Die Geradenabschnitte aus den sechs Detektorebenen werden auf eine gemeinsame Mittelebene projiziert und für jedes Segment werden der Winkel zur Vertexrichtung und eine für die Spurrekonstruktion angepasste y -Koordinate berechnet. Durch die Z-Kanaleinheiten werden die Spursegmente implizit auf Übereinstimmung in ihrer auf die Mittelebene projizierten z -Koordinate überprüft und anschließend nach ihrer projizierten y -Koordinate sortiert. Die neun parallelen Spurfindereinheiten sind der komplexeste Teil des Entwurfs und hinsichtlich der maximalen Taktrate die kritische Stelle der Architektur. Hier werden die projizierten Spursegmente der verschiedenen Ebenen durchlaufen, um ausgehend von einer Referenzebene zusammenhängende Spuren zu finden. Es wird angenommen, dass Spursegmente zur gleichen Spur gehören, wenn sich ihre y -Koordinaten und Winkel zur Vertexrichtung höchstens um einen festgelegten Wert

unterscheiden. In Folge der Parallelisierung bei der Verarbeitung können Spuren mehrfach gefunden werden. In der Zusammenführungseinheit werden die gefundenen Spuren aus mehreren parallelen Verarbeitungseinheiten verglichen und doppelte Spuren eliminiert. Die Rekonstruktionseinheit berechnet schließlich über eine dreidimensionale lineare Regression eine Ausgleichsgerade durch die Segmente einer Spur, aus deren Achsenabschnitt der Transversalimpuls des erzeugenden Teilchens bestimmt wird.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Design beschreibt hinsichtlich der Komplexität den wesentlichen Teil der GTU. Zu einer kompletten Hardwarebeschreibung der GTU, wie sie im Experiment eingesetzt werden soll, müssen noch die Teilchenidentifizierung, Steuerungseinheiten für die vorgesehene Rohdatenauslese, die Triggerlogik und die Kommunikation mit dem zentralen Triggerprozessor hinzugefügt werden.

Die Analyse der Simulation zeigt, dass das Verhalten des Entwurfs hinsichtlich Nachweiseffizienz und Rekonstruktionsgenauigkeit den Anforderungen entspricht. Während der Durchführung der Arbeit haben sich allerdings geringfügige Änderungen an der geplanten Geometrie des Detektors ergeben, die in dieser Arbeit nicht mehr berücksichtigt wurden. Mit der neuen Geometrie ist eine leichte Abnahme der Effizienz zu erwarten, da Spuren in der GTU nicht über Stapelgrenzen hinweg verfolgt werden und in der neuen (weniger projektiven) Geometrie die Winkelbereiche zunehmen, in denen vom Vertex aus gesehen nicht alle sechs Module eines Stapels durchquert werden.

Die Zeitvorgabe für die gesamte Berechnungsdauer der GTU wird vom vorgestellten Entwurf bis zu mittleren Multiplizitäten erfüllt. Bei maximaler Multiplizität ist die Bearbeitungszeit in einigen Fällen zu lang. In der vorgestellten Architektur bestehen allerdings Möglichkeiten, die benötigte Taktzahl noch weiter zu reduzieren. So ist beispielsweise die Zusammenführungseinheit so ausgelegt, dass sie mit einer hohen Zahl gefundener Spuren umgehen kann. Für die Anwendung als Elektron/Positron-Trigger mit nur wenigen Spuren kann durch eine einfache und weniger leistungsfähige Einheit die Berechnungszeit noch weiter verkürzt werden.

Die Ergebnisse der Synthese am Beispiel eines FPGAs der Firma Altera zeigen schließlich, dass sich der vorgestellte Entwurf effektiv bei der geplanten Taktrate von 40 MHz in verfügbaren FPGAs implementieren lässt.

Danksagung. Ich danke besonders herzlich meinem betreuenden Professor, Herrn Prof. Dr. Volker Lindenstruth, für die spannende Aufgabenstellung und die gestalterische Freiheit, die er mir bei der Umsetzung ließ. Seine gute und engagierte Betreuung hat mich sehr motiviert. Prof. Dr. Norbert Herrmann und Dr. Bogdan Vulpescu vom Physikalischen Institut der Universität Heidelberg danke ich für zahlreiche Ideen und Anregungen in den gemeinsamen Besprechungen. ‚Mein Doktorand‘ Rolf Schneider hat mich in vieler Hinsicht unterstützt. Ich danke ihm besonders dafür, dass er mir bei vielen Fragen mit Interesse und Erfahrung weiterhalf und ich von seinen Denkanstößen und Ideen profitieren konnte. Bei Herrn Dr. Venelin Angelov bedanke ich mich für seine Hilfsbereitschaft und diverse Ratschläge bei der Verwendung der Syntheseprogramme und bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für technische Informatik für die freundliche Atmosphäre und die gute Zusammenarbeit.

Anhang A

Die Klassen der GTU-Simulation

Die folgende Liste soll einen kurzen Überblick über die implementierten Klassen geben. Eine vollständige Übersicht mit allen enthaltenen Attributen und Methoden befindet sich auf dem beigefügten Datenträger (siehe Anhang B).

AliTRDgtuEvent	Container-Klasse für die GTU, die ein Ereignis aus einer Spursegmentdatei in die Datenstrukturen der GTU-Repräsentation laden kann. Enthält eine Instanz von AliTRDgtu.
AliTRDgtu	Hauptklasse der Spurrekonstruktionseinheit (GTU). Enthält ein Feld aus 90 Instanzen von AliTRDgtuTMU.
AliTRDgtuIter	Iterator-Klasse für die GTU. Durchläuft alle 90 TMUs innerhalb der GTU.
AliTRDgtuTracklet	Allgemeine Spursegmentklasse. Enthält alle Informationen über ein Spursegment einschließlich der Simulationsdaten und Referenzen auf die beitragenden Teilchenspuren (AliTRDgtuParticleTrack). Methoden liefern die für jedes Spursegment getrennt bestimmbareren Werte, z. B. die Ergebnisse der Berechnungen auf LTU-Ebene, das erzeugte Übertragungsdatenwort und den in der GTU berechneten Ablenkwinkel.
AliTRDgtuParticleTrack	Klasse für Teilchenspuren. Enthält u. a. eine Referenz auf das erzeugende Teilchen (Instanz der Klasse AliTRDgtuParticle).
AliTRDgtuParticle	Teilchenklasse der Simulation. Jede Instanz dieser Klasse entspricht einem in der Monte-Carlo-Simulation erzeugten Teilchen.
AliTRDgtuTMU	Abstrakte Basisklasse für eine TMU. Enthält ein Feld von Spuren (Instanzen von AliTRDgtuCandidate) sowie ein Feld aus $2 \cdot 6$ Instanzen von AliTRDgtuLink für die bei der TMU endenden Übertragungsleitungen. Der TMU werden durch eine Methode Spursegmente übergeben, die in die entsprechende Verbindungsleitung (AliTRDgtuLink) eingefügt werden.

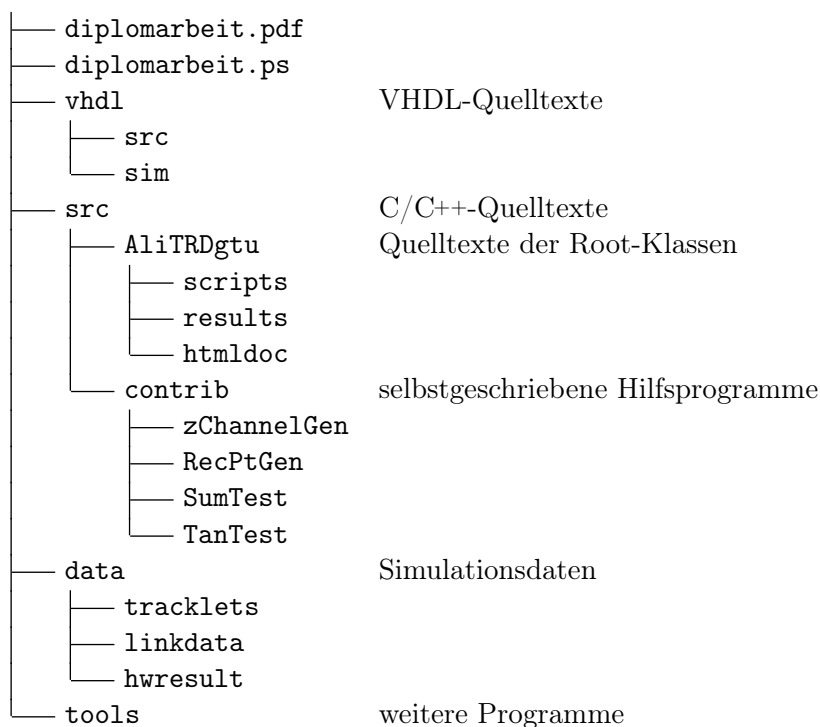
AliTRDgtuCandidate	Abstrakte Basisklasse für gefundene Spuren. Enthält ein Feld aus maximal sechs Verweisen auf Instanzen von <code>AliTRDltuTracklet</code> für die beitragenden Spursegmente der verschiedenen Detektorebenen.
AliTRDgtuLink	Container-Klasse für Spursegmente. Jede Instanz repräsentiert eine optische Verbindungsleitung zwischen Detektor und GTU und enthält ein Feld aus Objekten vom Typ <code>AliTRDltuTracklet</code> .
AliTRDgtuSimpleTMU	Repräsentation einer TMU. Wird von <code>AliTRDgtuTMU</code> abgeleitet und verwendet im Unterschied dazu <code>AliTRDgtuSimpleCandidate</code> als Klasse für die gefundenen Spuren.
AliTRDgtuSimpleCandidate	Implementierung der Klasse für rekonstruierte Spuren, die der Hardwareumsetzung entspricht. Wird von <code>AliTRDgtuCandidate</code> abgeleitet. Die enthaltenen Methoden prüfen Spursegmente auf Übereinstimmung und können für eine gefundene Spur den Transversalimpuls rekonstruieren.

Anhang B

Inhalt der DVD-ROM

Die beigefügte DVD-ROM enthält neben dieser Arbeit als PostScript- und als PDF-Datei alle erstellten Quelltexte. Zusätzlich sind eine Auswahl der verwendeten Ereignisdatensätze sowie die Ergebnisse der Simulationen enthalten.

Verzeichnisstruktur des Datenträgers



VHDL-Quelltexte

Das Verzeichnis /vhdl/src enthält in 21 *.vhd-Dateien die Hardwarebeschreibung der GTU. In /vhdl/sim befinden sich die VHDL-Prüfstanddateien (*Testbenches*) für Teile des Designs (*.tb.vhd) und für das Gesamtdesign (toplevel_tb.vhd) sowie Skripts zur Simulation mit *ModelSim*.

C/C++-Quelltexte

Die C++-Quelltexte der erstellten Root-Klassen (vgl. Anhang A) befinden sich im Verzeichnis `/src/AlitRDgtu`, die zugehörigen Analyseskripts im Unterverzeichnis `/src/AlitRDgtu/scripts`. Die Ergebnisse der Auswertungen liegen in `/src/AlitRDgtu/results`. Das Verzeichnis `/src/AlitRDgtu/htmldoc` enthält eine Kurzdokumentation der Klassen im HTML-Format. In den Unterverzeichnissen von `/src/contrib` liegen selbstgeschriebene Hilfsprogramme. Die Programme in `zChannelGen` und `RecPtGen` erzeugen Wertetabellen für die Auswahl der Z-Kanäle bzw. die Berechnung des Transversalimpulses. Sie generieren jeweils C-Quelldateien für die Simulation und VHDL-Dateien zum Einbinden in die Hardwarebeschreibung. In `SumTest` und `TanTest` befinden sich Testprogramme, die den Wertebereich der Regressionskoeffizienten bzw. den Fehler bei der Vereinfachung der p_t -Berechnung analysieren.

Simulationsdaten

Unterhalb des Verzeichnisses `/data` befinden sich die verwendeten Simulationsdatensätze. In `/data/tracklets` sind die Spursegmentdateien zu finden, wie sie von der Root-Simulation verwendet werden. Aus Platzgründen wurden die Daten für volle Multiplizität bis auf zehn Ereignisse weggelassen. Für die anderen Multiplizitäten sind die Ereignisdateien vollständig vorhanden. In `/data/linkdata` befinden sich die Datenwörter, die an die GTU übertragen werden. Sie sind mit Hilfe der Root-Simulation aus den ursprünglichen Simulationsdateien erzeugt worden und bilden die Eingabewerte für die funktionale Simulation der Hardwarebeschreibung. Die Ergebnisse dieser Simulation für die einzelnen Ereignisse finden sich in `/data/hwresult`.

Weitere Programme

Im Verzeichnis `/tools` befindet sich das verwendete Root-System in der Version 3.03.08 als Quelltextpaket sowie kompiliert für das Betriebssystem Linux.

Literaturverzeichnis

- [A L] A LARGE ION COLLIDER EXPERIMENT (ALICE) AT CERN LHC. *Homepage*. URL <http://alice.web.cern.ch/Alice/AliceNew/>
- [ALI01] ALICE COLLABORATION: ALICE Technical Design Report of the Transition Radiation Detector / CERN. Genf : CERN/LHCC, 2001 (CERN/LHCC 2001-021). – Forschungsbericht. – 246 S. – ISBN 92–9083–184–7
- [Alt96] ALTERA CORPORATION. *LPM Quick Reference Guide*. URL <http://www.altera.com/literature/catalogs/lpm.pdf>. Dezember 1996
- [BR03] BRUN, Rene ; RADEMAKERS, Fons. *ROOT Reference Guide*. URL <http://root.cern.ch/root/Reference.html>. 2003
- [Buc99] BUCHER, D.: *Produktion direkter Photonen in ultrarelativistischen Schwerionenstößen*, Universität Münster, Diss., 1999
- [BV98] BOCK, Rudolf K. ; VASILESCU, Angela ; BONAUDI, F. (Hrsg.) ; FABJAN, C. W. (Hrsg.): *The particle detector BriefBook*. Berlin ; Heidelberg ; [u.a.] : Springer, 1998. – 132 S. – ISBN 3–540–64120–3
- [CER] CERN. *Homepage*. URL <http://www.cern.ch>
- [FWSW03] FRÜHWIRTH, R. ; WALTENBERGER, W. ; STRANDLIE, A. ; WROLDSEN, J.: A review of fast circle and helix fitting. In: *Nucl. Instrum. Meth.* A502 (2003), S. 705–707
- [Gar02] GAREUS, Robin: *Slow Control – Serial Network and its implementation for the Transition Radiation Detector*. Heidelberg, Universität Heidelberg, Kirchhoff-Institut für Physik, Diplomarbeit, Oktober 2002. – 73 S
- [Gre00] GREEN, Dan: *The physics of particle detectors*. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 361 S. – ISBN 0–521–66226–5
- [Gru93] GRUPEN, Claus: *Teilchendetektoren*. Mannheim ; Leipzig ; Wien ; Zürich : BI-Wiss.-Verl., 1993. – 478 S. – ISBN 3–411–16571–5
- [Gut02] GUTFLEISCH, Marcus: *Digitales Frontend und Preprozessor im TRAP1-Chip des TRD-Triggers für das ALICE-Experiment am LHC (CERN)*. Heidelberg, Universität Heidelberg, Kirchhoff-Institut für Physik, Diplomarbeit, 2002. – 122 S

- [Hri00] HRIVNACOVA, Ivana. *AliRoot Coding Conventions*. URL <http://alisoft.cern.ch/offline/codingconv.html>. 2000
- [KKZ97] KLAPDOR-KLEINGROTHAUS, Hans V. ; ZUBER, Kai: *Teilchenastrophysik*. Stuttgart : Teubner, 1997. – 487 S. – ISBN 3-519-03094-2
- [Kle92] KLEINKNECHT, Konrad: *Detektoren für Teilchenstrahlung*. 3., durchges. und erw. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1992. – 295 S. – ISBN 3-519-23058-5
- [LAC⁺01] LESSER, F. ; ANGELOV, V. ; DE CUVELAND, J. ; LINDENSTRUTH, V. ; REICHLING, C. ; SCHNEIDER, R. ; SCHULZ, M. W.: A MIMD Multi Threaded Processor. In: *Proceedings of the 13th IEEE Hot Chips Conference*. Palo Alto (USA), August 2001
- [Les02] LESSER, Falk: *Entwurf und Realisierung eines vierfach MIMD Prozessor Mikrochips für eine Anwendung in der Hochenergiephysik*. Kirchhoff-Institut für Physik, Heidelberg, Universität Mannheim, Diss., 2002. – 130 S
- [LWS94] LEHMANN, Gunther ; WUNDER, Bernhard ; SELZ, Manfred: *Schaltungsdesign mit VHDL*. Poing : Franzis, 1994. – 317 S. – ISBN 3-7723-6163-3
- [Pei97] PEITZMANN, Thomas: *Kernmaterie unter extremen Bedingungen – Die experimentelle Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma*. Universität Münster, 1997. – 246 S. – Habilitationsschrift
- [Per00] PERKINS, Donald H.: *Introduction to high energy physics*. 4th ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 426 S. – ISBN 0-521-62196-8
- [PRSZ01] POVH, Bogdan ; RITH, Kalus ; SCHOLZ, Christoph ; ZENTSCHKE, Frank: *Teilchen und Kerne : eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. 5., korrigierte u. erw. Aufl. Berlin ; Heidelberg ; [u.a.] : Springer, 2001. – 409 S. – ISBN 3-540-65928-5
- [Sch03] SCHNEIDER, Rolf: *Entwicklung des Triggerkonzeptes und die entsprechende Implementierung eines 200 GB/s Auslesenetzwerks für den ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor*. Heidelberg, Universität Heidelberg, Kirchhoff-Institut für Physik, Diss., 2003
- [Stö00] STÖCKER, Horst (Hrsg.): *Taschenbuch der Physik*. 4., korrigierte Aufl. Thun ; Frankfurt am Main : Deutsch, 2000. – 1088 S. – ISBN 3-8171-1628-4
- [Vul01] VULPESCU, Bogdan: Physics with the ALICE TRD. In: *TRDs for the 3rd millenium*. Bari (Italien), September 2001
- [Vul03a] VULPESCU, Bogdan. *Online pion rejection (GTU)*. URL <http://www-aix.gsi.de/~vulpescu/AlIPw/Lhood.ps>. 2003
- [Vul03b] VULPESCU, Bogdan. *Online tracking: first step to LTU and GTU algorithms*. URL <http://www-aix.gsi.de/~vulpescu/AlIPw/Drawings.ps>. 2003
- [Won94] WONG, Cheuk-Yin: *Introduction to high-energy heavy-ion collisions*. Singapore ; London : World Scientific, 1994. – 516 S. – ISBN 981-02-0264-4

Erklärung zur selbständigen Verfassung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, im September 2003

Jan de Cuveland