

# Der STAR Level-3 Trigger

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Physik  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
in Frankfurt am Main

von  
Clemens Adler  
aus Leonberg

Frankfurt am Main, 2002  
(D F 1)

Vom Fachbereich Physik der  
Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan: Prof. Dr. Horst Schmidt-Böcking

Gutachter: Prof. Dr. Reinhard Stock  
Prof. Dr. Herbert Ströbele

Datum der Disputation: 14. Februar 2003

# Zusammenfassung

Schwerionen-*Collider*-Experimente, wie das STAR-Experiment am RHIC (BNL) oder das geplante ALICE-Experiment am LHC (CERN) untersuchen Schwerionenkollisionen bei Schwerpunktsenergien von  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV (RHIC), bzw.  $\sqrt{s_{NN}} = 5,5$  TeV (ALICE). In diesen Kollisionen werden mehrere tausend geladene Teilchen produziert, die in STAR und ALICE in großvolumigen TPCs gemessen werden. Das Datenvolumen erreicht dabei bis zu 10 MB (STAR) und 60 MB (ALICE) pro Ereignis.

Aufgrund der hohen Luminosität der *Collider* könnten die Experimente zentrale Schwerionenkollisionen mit einer Rate bis zu 100 Hz bzw. 200 Hz (ALICE) untersuchen. Die dabei entstehenden Datenraten im Bereich mehrerer GB/s sind mit heutiger Technologie jedoch nicht mehr einfach zu speichern. Deshalb kann nur ein Bruchteil der zur Verfügung stehenden Ereignisse aufgezeichnet werden. Aufgrund der exponentiellen Entwicklung der CPU-Leistung wird es jedoch möglich, die Rekonstruktion von Ereignissen während der Datennahme in Echtzeit durchzuführen. Basierend auf den rekonstruierten Spuren in den Detektoren kann die Entscheidung getroffen werden, ob ein Ereignis gespeichert werden soll. Dies bedeutet, dass die begrenzte Speicherbandbreite gezielt mit Ereignissen, die eine interessierende physikalische Observable beinhalten, angereichert werden kann. Ein solches System zur Ereigniselektion wird als Level-3-Trigger oder allgemeiner als *High Level Trigger* bezeichnet.

Am STAR-Experiment wurde erstmals in einem Schwerionenexperiment solch ein Level-3-Triggersystem aufgebaut. Es besteht aus 432 i960-CPU's, auf speziell gefertigten *Receiver Boards* für die parallele Clusterrekonstruktion in der STAR-TPC. 52 Standard-Computer mit ALPHA- bzw. Pentium-CPU's rekonstruieren die Spuren geladener Teilchen und treffen eine Triggerentscheidung.

Dieses System ermöglicht die Echtzeit-Rekonstruktion zentraler Au+Au-Kollisionen mit anschließender Analyse durch einen Trigger-Algorithmus mit einer Rate von 40-50 Hz.

Die Qualität, die mit dieser schnellen Analyse erreicht wird, kann mit der Qualität der STAR-*Offline*-Rekonstruktion verglichen werden. Der Level-3-*Clusterfinder* erreicht in Bezug auf Ortsauflösung und Rekonstruktionseffizienz dieselbe Qualität wie der *Offline-Clusterfinder*. Der Level-3-*Trackfinder* erreicht bei Rekonstruktionseffizienz und Impulsauflösung 10-20 % schlechtere Werte als der *Offline-Trackfinder*.

Die Anwendung eines Level-3-Triggers besteht in der Messung von seltenen Observablen („rare Probes“), die ohne eine Anreicherung nicht, oder nur schwer, meßbar wären.

In den Jahren 2000 und 2001 wurden erste Triggeranwendungen für das STAR-Level-3-System erprobt. In ultraperipheren Au+Au-Kollisionen wurden  $\rho_0$ -Kandidaten schon im Jahr 2000 selektiert. Während der Strahlzeit des Jahres 2001 wurde das Level-3-System erstmals zum Triggern in zentralen Au+Au-Kollisionen eingesetzt. Die Triggeralgorithmen beinhalteten einen  $\Upsilon$ -Trigger, einen  ${}^3\overline{He}$ -Trigger und einen Algorithmus zur Anreicherung von Spuren hohen Impulses in der Akzeptanz des RICH-Detektors.

Das STAR Level-3-System ist in der Lage zehnmal mehr Ereignisse zu analysieren, als gespeichert werden können. Aufgrund der begrenzten Luminosität des RHIC-Beschleunigers, konnten die Level-3 Trigger erst zum Ende der Strahlzeit eingesetzt werden. Den genannten Algorithmen standen zusätzlich zu den  $3 \cdot 10^6$  gespeicherten zentralen Ereignissen,  $6 \cdot 10^5$  zentrale Ereignisse zur Analyse zur Verfügung. Mit diesem begrenzten Anreicherungsfaktor von 20 % blieb das System hinter seinen Möglichkeiten zurück. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass das STAR Level-3-System in der erwarteten Qualität und Stabilität funktioniert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Quarks und Gluonen . . . . .	1
1.2. Untersuchung von relativistischen Schwerionenkollisionen . . . . .	3
1.3. Ereignisselektion in Schwerionenkollisionen . . . . .	5
<b>2. Der Beschleuniger</b>	<b>7</b>
2.1. Aufbau . . . . .	7
2.2. Inbetriebnahme des Beschleunigers . . . . .	10
2.2.1. Die Strahlzeit 1999 . . . . .	10
2.2.2. Die Strahlzeit 2000 . . . . .	11
2.2.3. Die Strahlzeit 2001 . . . . .	11
<b>3. Das STAR-Experiment</b>	<b>15</b>
3.1. Die Detektoren . . . . .	17
3.1.1. Die Spurendriftkammer (TPC) . . . . .	17
3.1.2. Die Vorwärts-Spurendriftkammern (FTPC) . . . . .	23
3.1.3. Der Silizium Vertex Tracking Detektor (SVT) . . . . .	26
3.1.4. Der RICH Detektor . . . . .	26
3.1.5. Das Elektromagnetische Kalorimeter . . . . .	27
3.1.6. Das Central Trigger Barrel . . . . .	29
3.1.7. Die Null-Grad-Kalorimeter . . . . .	29
3.2. Das Triggersystem . . . . .	30
3.3. Die Datenerfassung . . . . .	36
3.4. Run Control . . . . .	39
<b>4. Das Level-3-Trigger-System</b>	<b>45</b>
4.1. Motivation . . . . .	45
4.2. Architektur . . . . .	46
4.3. Receiver Boards (RB) . . . . .	49
4.3.1. Mezzaninekarte . . . . .	50
4.4. Sektor Level-3 (SL3) . . . . .	53
4.4.1. Aufgaben . . . . .	53
4.4.2. Implementation . . . . .	54

## Inhaltsverzeichnis

4.5. Global Level-3 (GL3) . . . . .	60
4.5.1. Aufgaben . . . . .	60
4.5.2. Implementation . . . . .	61
4.6. Level-3 Eventpool (L3EVP) . . . . .	65
4.7. Eventdisplay . . . . .	65
4.7.1. Implementation . . . . .	66
4.8. DAQ-Kommunikationsprotokoll . . . . .	66
4.9. Clusterfinder . . . . .	70
4.9.1. Organisation der TPC Rohdaten . . . . .	70
4.9.2. Algorithmus . . . . .	70
4.9.3. Implementation . . . . .	73
4.9.4. Qualität . . . . .	73
4.10. Spurrekonstruktion (Trackfinder) . . . . .	78
4.10.1. Das Helix-Spurmodell im STAR-Detektor . . . . .	80
4.10.2. Algorithmus . . . . .	83
4.10.3. Implementation . . . . .	86
4.10.4. Optimierung . . . . .	88
4.10.5. Qualität . . . . .	93
4.10.6. Korrekturen . . . . .	98
4.11. Analyse- und Trigger-Umgebung . . . . .	99
4.11.1. Daten . . . . .	100
4.11.2. Die Algorithmen . . . . .	103
4.11.3. Infrastruktur . . . . .	107
4.11.4. Zähler . . . . .	108
4.12. Prozessoren . . . . .	110
4.13. Netzwerk . . . . .	111
4.13.1. Anforderungen . . . . .	112
4.13.2. Myrinet . . . . .	113
4.13.3. Software . . . . .	116
4.14. Zeitbilanz des Gesamtsystems . . . . .	117
4.14.1. Clusterfinder . . . . .	117
4.14.2. Trackfinder . . . . .	118
4.14.3. Triggeralgorithmen . . . . .	119
4.14.4. Datentransfers . . . . .	120
4.14.5. Gesamtsystem . . . . .	121
4.15. Kontroll-Software . . . . .	122
4.15.1. Überwachung . . . . .	122
4.15.2. Steuerung . . . . .	124
4.16. Integration weiterer Detektoren . . . . .	124
4.16.1. FTTPC . . . . .	124
4.16.2. SVT . . . . .	125
4.16.3. EMC . . . . .	126

<b>5. Physikalische Anwendungen</b>	<b>127</b>
5.1. Messung von Quarkonium in Au+Au Kollisionen . . . . .	127
5.1.1. Motivation . . . . .	127
5.1.2. Ratenabschätzung . . . . .	129
5.1.3. $\Upsilon$ -Identifikation im STAR-Detektors . . . . .	130
5.1.4. Berechnung der invarianten Masse . . . . .	131
5.1.5. Akzeptanz des STAR Detektors für $\Upsilon$ . . . . .	133
5.1.6. Untergrund . . . . .	138
5.1.7. Elektronenidentifikation . . . . .	139
5.1.8. $\Upsilon$ -Trigger mit Level-3 . . . . .	141
5.1.9. Zusammenfassung . . . . .	142
5.2. Suche nach ${}^4\overline{He}$ . . . . .	143
5.3. RICH-Anreicherungs-Trigger . . . . .	143
5.4. Messung von $\rho_0$ in ultraperipheren Au+Au Kollisionen . . . . .	145
<b>6. Ausblick</b>	<b>147</b>
6.1. Erfahrungen . . . . .	147
6.2. Neue Entwicklungen im DAQ-System . . . . .	149
6.3. Perspektiven für ALICE . . . . .	150
<b>A. Beispiel eines GL3-Algorithmus</b>	<b>155</b>

## *Inhaltsverzeichnis*



# 1. Einleitung

## 1.1. Quarks und Gluonen

Bis Anfang des 20. Jahrhunderts galten Atome als die kleinsten Bausteine der Materie. Rutherford entdeckte 1911, dass Atome aus einem Atomkern und der Elektronenhülle bestehen. Später konnte er zeigen, dass selbst die Atomkerne noch weiter teilbar sind.

Die Kraft, die zwischen den Protonen und Neutronen im Kern herrscht, konnte nicht durch die bis dahin bekannten Wechselwirkungen, der Elektromagnetischen- oder Gravitationswechselwirkung, erklärt werden. Die neue Kraft war stärker als die bekannten Kräfte, weshalb sie Starke Wechselwirkung genannt wurde<sup>1</sup>.

1936 versuchte Yukawa die Kraft zwischen den Nukleonen durch eine Feldtheorie zu beschreiben. Dabei wird die Wechselwirkung über Austausch von Teilchen, den so genannten Feldquanten, vermittelt. Dieses Konzept war bei der Beschreibung der Elektrodynamik erfolgreich, die das Photon als Austauschteilchen besitzt.

Die Reichweite einer Wechselwirkung steht dabei in direktem Verhältnis zu der Masse des Feldquants: je kürzer die Reichweite, desto schwerer das Feldquant. Aufgrund der kurzen Reichweite von  $\approx 1 \text{ fm}$  ( $10^{-15} \text{ m}$ ), schätzte Yukawa die Masse des Austauschteilchens der Starken Wechselwirkung auf das 200-fache der Elektronenmasse, also ca.  $100 \text{ MeV}/c^2$ .

Tatsächlich wurde im Jahre 1948 das Pion, ein Teilchen der Masse  $140 \text{ MeV}/c^2$  entdeckt, was zunächst als Erfolg der feldtheoretischen Beschreibung gefeiert wurde.

Bis Anfang der 60er Jahre waren weitere Teilchen entdeckt, die der Starken Wechselwirkung unterlagen und Hadronen (von Hadros, griech.:stark) genannt wurden. Die Vielzahl dieser scheinbaren „Elementarteilchen“ stellte die Physiker vor Probleme, da keine Struktur erkennbar war, die auf ein fundamentales Prinzip schliessen ließ.

1963 erkannten Murray Gell-Mann und George Zweig, dass sich die neuen Teil-

---

<sup>1</sup>Diese drei fundamentalen Wechselwirkungen wurden dann noch durch die schwache Wechselwirkung ergänzt, die z. B. für den  $\beta$ -Zerfall verantwortlich ist.

## 1. Einleitung

chen anhand ihrer Quantenzahlen in Familien, den so genannten Teilchen-Multipletts einordnen liessen. Diese Multipletts entsprachen Strukturen, die von einer Symmetriegruppe, der SU(3)-Gruppe (Spezielle Unitäre Gruppe) erzeugt werden. Basierend auf der Analogie der SU(3)-Multipletts zu den Hadronen-Multipletts, konnten sie zeigen, dass sich die Existenz der bekannten Hadronen zwanglos erklären ließ, sofern sie aus noch kleineren Teilchen aufgebaut wären. Diese hypothetischen Teilchen wurden von Gell-Mann „Quarks“ genannt. 1967 konnte in e+p-Streuexperimenten am SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) tatsächlich nachgewiesen werden, dass Protonen aus punktförmigen Konstituenten, den Quarks, bestehen.

Quarks kommen in verschiedenen *Flavours* (Geschmack) vor: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und *top*. Des Weiteren besitzen sie eine Quantenzahl die als Farbe (oder Farbladung) bezeichnet wird und die Werte *rot*, *blau* oder *grün* annehmen kann.

Basierend auf dem Quarkinhalt konnten Hadronen in Baryonen (von *baryos*, griech. : schwer) aus 3 Quarks (z. B. Proton) und Mesonen (von *mesotron*, griech. : dazwischen) aus einem Quark und einem Anti-Quark (z. B. Pion) eingeteilt werden.

Zu Beginn der 70er Jahren war es gelungen, eine Theorie der Wechselwirkung dieser Quarks zu formulieren, die Quantenchromodynamik (QCD), die der Struktur nach eine nicht-abelsche lokal-eichinvariante Theorie<sup>2</sup> ist.

Die QCD beschreibt die Wechselwirkung zwischen Objekten mit Farbladung. Die Kraft zwischen Farbladungen, die Farbkraft, wird über Gluonen (von *Glue*, engl.: Leim) als Austauscheteilchen vermittelt. Die Gluonen sind masselos, tragen aber selber Farbladung (anders als die Photonen, als Austauscheteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung), wodurch die Gluonen selber miteinander wechselwirken können. Das führt dazu, dass die Kraft zwischen zwei Quarks bei größer werdendem Abstand zunimmt. Das Potential zwischen zwei Quarks läßt sich in einfachster Form als:

$$V(r) = \sigma \cdot r \tag{1.1}$$

schreiben, wobei  $\sigma$  als „Stringkonstante“ bezeichnet wird.

Daraus folgt, dass messbare Teilchen keine Farbladung tragen, also „farbneutral“ sind. Bei Baryonen wird dies erreicht, indem sich die drei Farben *rot*, *grün* und *blau* zu *weiss*<sup>3</sup> addieren, bei Mesonen heben sich die Farbe des Quarks und die Anti-Farbe des Anti-Quarks auf.

---

<sup>2</sup>Alle fundamentalen Wechselwirkungen lassen sich durch diese Art von Theorie beschreiben.

<sup>3</sup>Die Wahl der Farben ist natürlich nicht wörtlich zu nehmen, sondern dient nur der Veranschaulichung dieses Prinzips

## 1.2. Untersuchung von relativistischen Schwerionenkollisionen

Quarks und Gluonen kommen also immer nur in Baryonen oder Mesonen vor, was als *Confinement* (Eingeschlossenheit) bezeichnet wird.

In der Astrophysik stellte sich bei der (theoretischen) Untersuchung von Neutronensternen eine Frage bezüglich des *Confinement* von Quarks und Gluonen: Normale Kernmaterie (in Atomkernen) besitzt eine Dichte  $\rho_0 = 0,15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ . Aufgrund der immensen Gravitationskräfte, herrscht im Kern von Neutronensternen ein extrem hoher Druck, der eine Dichte von bis zu  $5\text{-}10 \cdot \rho_0$  erzeugt [Gle97][Web96]. Es ist nicht klar, ob die Neutronen dabei zusammengepresst werden, oder ob sie ihre Struktur vollständig verlieren, sodass die Quarks und Gluonen sich frei bewegen können. Dieser Zustand wird als Quark-Gluon-Plasma (QGP) bezeichnet.

Da sich Neutronensterne nicht gut für experimentelle Untersuchungen eignen, kam die Idee auf, dass in Kollisionen schwerer Atomkerne bei hohen Energien, eine entsprechend hohe Energiedichte oder Kompression der Kernmaterie erreichbar sei, sodass ein Quark-Gluon-Plasma erzeugt werde.

## 1.2. Untersuchung von relativistischen Schwerionenkollisionen

Relativistische Schwerionenkollisionen werden seit den 70er Jahren untersucht. Am AGS (Alternating Gradient Synchrotron) am Brookhaven National Laboratory (BNL) wurden Kollisionen von Goldkernen bei einer Schwerpunktsenergie von bis zu  $\sqrt{s_{NN}} \approx 5 \text{ GeV}$  untersucht. Mit dem Schwerionenstrahl des SPS (Super Proton Synchrotron) am CERN<sup>4</sup>, wurden seit Mitte der 80er Jahre Kollisionen von Schwefelkernen und seit Anfang der 90er Jahre, Bleikernen bei einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} \approx 17 \text{ GeV}$  untersucht. Am Schwerionensynchrotron (SIS), der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt, werden seit 1990 verschiedene Projektile auf eine Energie von bis zu  $2 \text{ GeV}/\text{Nukleon}$  beschleunigt.

Um höhere Schwerpunktsenergien zu erreichen, werden *Collider* gebaut, die gegenläufige Strahlen zur Kollision bringen (vgl. Kap. 2): Seit dem Jahr 2000 ist der *Relativistic Heavy Ion Collider* (RHIC) am BNL mit Gold-Kernen und einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} \leq 200 \text{ GeV}$  in Betrieb.

Schließlich wird im Jahr 2006 der LHC (Large Hadron Collider) im ehemaligen Tunnel des LEP (Large Electron Collider) am CERN, Kollisionen von Bleikernen bei einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} = 5,5 \text{ TeV}$  ermöglichen.

---

<sup>4</sup>European Laboratory for Particle Physics (vormals: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

## 1. Einleitung

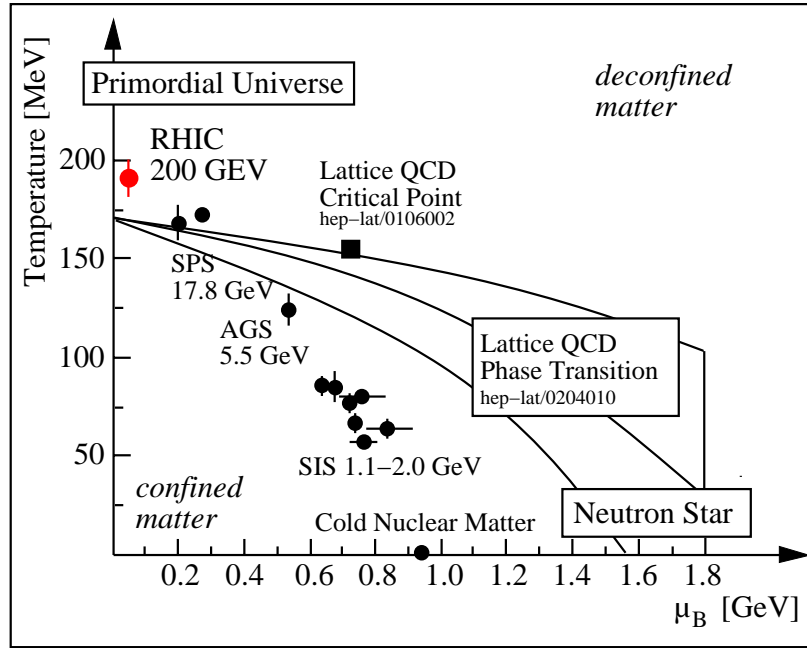


Abbildung 1.1.: Phasendiagramm der QCD (aus [Lan02c]).

Abbildung 1.1 zeigt das Phasendiagramm nuklearer Materie, das aufgrund theoretischer Berechnungen erwartet wird. Es wurde mit numerischen QCD-Berechnungen auf einem diskreten Raum-Zeit-Gitter (*Lattice QCD*) gewonnen [All02] [Fod02]. Eingezeichnet sind die experimentell gewonnenen Punkte bei verschiedenen Schwerpunktsenergien. Danach liegen die am SPS gemessenen Punkte schon im Bereich des Quark-Gluon-Plasma (*deconfined matter*).

Es gab bisher zwar noch keinen eindeutigen, einzelnen Beweis für die Bildung eines QGP am SPS, aber im Blei-Blei-Programm des SPS wurden viele Indizien gesammelt, die dies nahe legen [Hei00].

Basierend auf diesen Hinweisen wird erwartet, dass bei RHIC und LHC eine Phase freier Quarks und Gluonen erzeugt wird. Das Ziel dieser Beschleuniger ist somit die detaillierte Untersuchung der Eigenschaften eines Quark-Gluon-Plasma.

Mit steigender Schwerpunktsenergie der Kollisionen, steigt auch die Multiplizität geladener Teilchen. In zentralen Kollisionen beträgt die Anzahl geladener Teilchen pro Rapiditätseinheit bei  $\sqrt{s_{NN}} = 17$  GeV (SPS)  $dN_{ch}/dy = 400$ , bei  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV (RHIC) sind dies  $dN_{ch}/dy = 650$  und für den LHC wird mit einer Multiplizität von  $dN_{ch}/dy = 2000 - 8000$  gerechnet.

Mit höherer Multiplizität müssen aber auch die Detektoren komplexer werden, um die Spuren noch auflösen zu können und damit steigt die Datenmenge pro Ereignis. Bei NA49 und bei STAR beträgt die Größe eines zentralen Ereignisses 6-10 MB, während für das Schwerionensexperimentes ALICE (A Large Ion Colli-

der Experiment) am LHC bis zu 60 MB erwartet werden.

Mit der Ereignisgröße steigt auch die Kollisionsrate: bei RHIC kommen zentrale Kollisionen mit einer Rate von ca. 100 Hz vor, beim LHC wird dies 1 kHz sein, von denen die ALICE TPC 200 pro Sekunde aufzeichnen kann. Insgesamt werden damit bei STAR bis zu 800 MB/s und bei ALICE bis zu 12 GB/s an Daten produziert.

Die Speicherbandbreite die STAR zur Verfügung steht ist auf 30-50 MB/s beschränkt (vgl. Kap. 3.3), d.h. nur ein Bruchteil der verfügbaren Daten wird gespeichert. Bei ALICE steht die maximale Speicherbandbreite noch nicht fest, es wird aber eine maximale Speicherrate von ca. 10 Ereignissen pro Sekunde angestrebt. In beiden Experimenten übersteigt die mögliche Ereignisrate, die maximale Aufzeichnungsrate bei weitem.

## 1.3. Ereignisselektion in Schwerionenkollisionen

In Schwerionenexperimenten werden Kollisionen nach ihrer Zentralität geordnet. Es wird erwartet, dass nur in zentralen Kollisionen eine ausreichende Energiedichte erreicht wird, um die Struktur der Nukleonen aufzulösen. Üblicherweise wird deshalb schon während der Datennahme eine Selektion zentraler Ereignisse vorgenommen.

Da der Stoßparameter einer Kollision nicht direkt meßbar ist, unterliegt er immer gewissen Fluktuationen (z. B. [App98]), weshalb die Zentralität nicht mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden kann. Normalerweise werden die 5-7% zentralsten Kollisionen ausgewählt, da eine weitere Selektion nur zufällige Fluktuationen sortieren würde.

Bei der Analyse von Observablen, die in jedem Ereignis vorkommen (z. B. die Messung der Multiplizität von Pionen, oder die Messung von HBT), werden Ereignisse nur auf der Basis ihrer Zentralität ausgewählt. Bei Observablen, die nicht in jedem Ereignis auftreten (z. B. Messung von  $\overline{^3He}$ ) müssen üblicherweise die gesamten Datensätze durchsucht werden, um Ereignisse zu finden, die das gesuchte Signal enthalten. Dies ist aufgrund der benötigten hohen Anzahl von Ereignissen u. U. sehr zeitaufwändig.

Wäre es möglich, während der Datennahme eine Vorselektion von interessanten Ereignissen zu machen, ergäben sich folgende Vorteile:

- Einer Analyse steht eine höhere Statistik zur Verfügung (mehr als ein Faktor 20 bei STAR und ALICE). Das hat zur Folge, dass sehr seltene Observablen u. U. erst durch eine solche Selektion meßbar werden.

## 1. Einleitung

- Der Zeitaufwand der späteren Analyse reduziert sich, da weniger Ereignisse untersucht werden müssen.

Eine Vorselektion von Ereignissen während der Datennahme wird als Trigger bezeichnet. Dazu gehört zunächst die Selektion der Ereignisse nach Zentralität, was bisher meist das einzige „Triggerkriterium“ war. Die Zahlen für STAR und ALICE im vorigen Abschnitt machen aber deutlich, dass eine weitere Selektion von Ereignissen wünschenswert ist.

Wenn weitere Informationen über die Kollision zur Verfügung stehen, die als Triggerinformation benutzt werden, spricht man von einem Trigger höherer Ebene (*High Level Trigger*).

Stehen die rekonstruierten Spuren der Teilchen im Detektor während der Datennahme zur Verfügung, besitzt man in der Regel alle Informationen, die auch bei einer späteren *offline* Analyse zur Verfügung stehen. Damit kann man diese Analyse bereits während der Datennahme durchführen und das Ergebnis als Triggerentscheidung nutzen. Ein Trigger, der auf vollständig rekonstruierten Daten basiert, wird in der Regel als Level-3-Trigger bezeichnet.

Diese Arbeit beschreibt das Level-3-Trigger-System, das bei STAR installiert wurde. Dieses System sollte zunächst beweisen, dass eine Echtzeitrekonstruktion von ultrarelativistischen Schwerionenkollisionen möglich ist. Es war als Prototyp für einen Level-3 Trigger für ALICE geplant, ist aber auch zu einem integralen Bestandteil von STAR geworden und stellt eine Bereicherung der Möglichkeiten dieses Experimentes dar.

## 2. Der Beschleuniger

Der *Relativistic Heavy Ion Collider*<sup>1</sup> (RHIC) am *Brookhaven National Laboratory* (BNL) in Upton (Long Island), N.Y., USA, ist ein Beschleuniger, der schwere Ionen auf relativistische Energien beschleunigt. RHIC besteht aus zwei konzentrischen Speicherringen mit je 3,8 km Umfang, die den Strahl in getrennten Rohren beschleunigen und speichern.

Am RHIC können  $^{197}\text{Au}^{79+}$ -Ionen auf Energien bis 100 GeV/Nukleon beschleunigt werden. Das entspricht bis zu 40 TeV Schwerpunktsenergie, die in einer zentralen Kollision zur Verfügung stehen. Mit einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV/Nukleonpaar bietet RHIC eine zehnfach höhere Schwerpunktsenergie als der SPS am CERN.

RHIC bietet auch die Möglichkeit Kollisionen bei unterschiedlichen Energien und auch mit leichteren Ionen (z. B. Cu, Fe, und Si) zu untersuchen, was die systematische Untersuchung physikalischer Observablen in Abhängigkeit von Schwerpunktsenergie und Systemgröße ermöglichen soll.

Protonen können am RHIC bis zu einer Energie von 250 GeV/Nukleon beschleunigt werden. In erster Linie werden dabei Kollisionen unterschiedlich spinpolarisierter Protonenstrahlen untersucht, um den Beitrag der Gluonen zum Spins des Protons zu messen (z. B. [Vig98][Ada97]).

### 2.1. Aufbau

RHIC besteht aus sechs, abwechselnd gekrümmten und geraden Abschnitten. In den gekrümmten Rohrabschnitten wird der Strahl mit Hilfe supraleitender Magnete in den Strahlrohren gehalten. Auf den geraden Abschnitten befinden sich Hochfrequenzkavitäten, die das Hochfrequenzfeld erzeugen, in dem die Ionen

---

<sup>1</sup>Ein „Collider“ ist ein Speicherring mit gegenläufigen Strahlen. Im Vergleich zu „fixed Target“ Experimenten, bei denen ein Strahl auf ein feststehendes Ziel trifft, ermöglicht dies eine höhere Stoßenergie, da das Schwerpunktsystem des Stoßes im Laborsystem liegt und somit die Schwerpunktsenergie, der doppelten Strahlenergie entspricht.

## 2. Der Beschleuniger

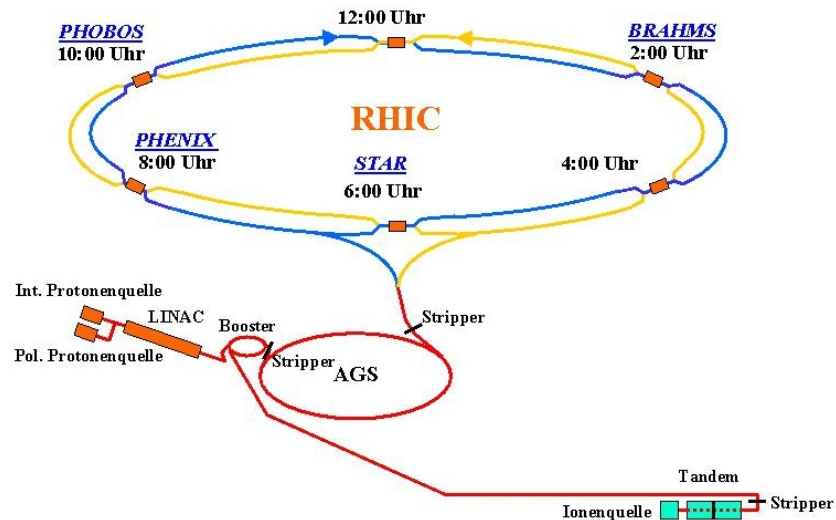


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung des RHIC Komplexes

beschleunigt werden. In der Mitte jedes geraden Abschnitts befindet sich eine Wechselwirkungszone<sup>2</sup>, in der die Strahlen kollidieren können. An beiden Seiten der Wechselwirkungszone konvergieren die Strahlrohre, sodass die Trajektorien des einlaufenden und auslaufenden Strahls sich nähern. Auf beiden Seiten des Wechselwirkungspunktes werden die Strahlen in 13,5 m Entfernung von einem Dipolmagneten so abgelenkt, dass sie in einem Bereich von ca. 19 m auf der gleichen Trajektorie laufen. Derselbe Dipol lenkt die auslaufenden Strahlen in deren Strahlrohre.

Um fünf dieser Wechselwirkungszone sind Experimente installiert: STAR<sup>3</sup>, PHENIX, PHOBOS und BRAHMS sind in erster Linie zur Untersuchung von Schwerionenkollisionen konzipiert, messen aber auch Protonkollisionen. Das fünfte Experiment PP2PP untersucht ausschließlich Protonkollisionen.

Die Strahlrohre sind evakuiert, damit die Wahrscheinlichkeit einer Kollision der Strahlteilchen mit Luft im Strahlrohr gering gehalten wird.

Zum Betrieb von RHIC sind mehrere Vorbeschleuniger notwendig, deren Anordnung in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt ist. Für den Betrieb mit Au-Strahlen wird zunächst  $\text{Au}^{-1}$  aus einer Ionenquelle mit einem Van de Graaff Beschleuniger auf ca. 1 MeV/Nukleon beschleunigt. Der Strahl wird durch eine Folie geleitet, in der weitere Hüllenelektronen abgestreift werden, und als  $\text{Au}^{32+}$  zum Booster<sup>4</sup>-Beschleuniger des Alternating Gradient Synchrotron (AGS) transpor-

<sup>2</sup>Im englischen *Interaction Region* als IR abgekürzt.

<sup>3</sup>Abk. für **S**olenoid **T**racker **A**t **R**HIC.

<sup>4</sup>Engl. für Verstärker. So genannt, da der Booster als spätere Ergänzung zum AGS hinzukam



tiert, wo die Ionen auf 100 MeV/Nukleon beschleunigt werden. Vor der Injektion der Au-Ionen in den AGS werden sie wiederum mit Hilfe einer Folie zu  $\text{Au}^{77+}$  ionisiert. Im AGS werden die Au-Ionen auf 9.5 GeV/Nukleon beschleunigt was der RHIC-Injektionsenergie entspricht. Auf dem Weg zu RHIC werden die letzten Elektronen der Ionen abgestreift, sodass  $\text{Au}^{79+}$  vorliegt [Ros02].

Bei dem Strahl handelt es sich zu keiner Zeit um einen kontinuierlichen Strahl sondern um kurze Strahlpulse, die im Allgemeinen als „Bunch“ bezeichnet werden. Der AGS sammelt mehrere Strahlpulse aus dem Booster, um die endgültige Intensität von  $1 \cdot 10^9$  Ionen pro Strahlpuls zu erreichen. Jeweils ein einzelner solcher Strahlpuls wird im AGS beschleunigt und in den RHIC injiziert.

Das Hochfrequenzsystem von RHIC unterteilt jeden Ring in 360 Zellen, „Bucket“ genannt. Jeder dritte Bucket wird mit einem Strahlpuls gefüllt, sodass jeder Ring maximal 60 Strahlpulse beschleunigen bzw. speichern kann. Tatsächlich werden die Ringe nur mit bis zu 56 Strahlpulsen gefüllt, um ein Zeitfenster freizuhalten, währenddessen ein Magnet eingeschaltet werden kann, um den Strahl kontrolliert aus den Ringen heraus zu lenken.

Wenn die RHIC-Ringe mit Strahlpaketen gefüllt sind, werden diese von einem Hochfrequenzfeld erfasst und beschleunigt. Dabei befinden sich die Ionen zunächst auf der ansteigenden Flanke der Hochfrequenzspannung, wodurch die vorderen Ionen im Bunch abgebremst, die hinteren Ionen beschleunigt werden. Dies ist richtig, solange die Ionen nicht allzu relativistisch sind. Nahe der Vakuumlichtgeschwindigkeit, kann die Geschwindigkeit der Ionen bei höherer Energie nicht mehr entsprechend zunehmen, was zu folgendem Effekt führt: Ionen mit höherer Energie werden durch die Strahlführungsmagnete weniger stark deflektiert, wodurch sie eine Trajektorie mit etwas größerem Radius bekommen. Da die höherenergetischen Ionen damit eine längere Strecke zurücklegen sind sie im Vergleich zu niederenergetischeren Ionen verspätet, d. h. die Impulsverteilung innerhalb eines Bunches invertiert sich im Vergleich zum nichtrelativistischen Fall. Nun muss sich ein Strahlpaket auf der abfallenden Flanke des Hochfrequenzfeldes befinden, sodass die späteren (höherenergetischen) Ionen abgebremst werden, während die früheren (niederenergetischeren) Ionen beschleunigt werden. Während diesem Übergang, „Transition“<sup>5</sup> genannt, wird der Strahl instabil und es kann zu Intensitätsverlusten kommen. Um dies zu verhindern werden am RHIC spezielle gepulste Stromversorgungen benutzt, die einen Sprung durch diesen Übergang ermöglichen sollen.

Das Beschleunigungs-Hochfrequenzsystem arbeitet bei ca. 28 MHz, wodurch sich bei der Füllung jedes dritten „Buckets“ eine Zeitdifferenz von 107 ns zwischen aufeinanderfolgenden Strahlpulsen ergibt.

---

und Beschleunigung auf höhere Energien ermöglichte.

<sup>5</sup>engl. Übergang.

## 2. Der Beschleuniger

Ist die gewünschte Strahlenergie erreicht, kommt ein weiteres Hochfrequenzsystem mit 200 MHz zur Speicherung des Strahls zum Einsatz. Diese höhere Frequenz ermöglicht es, den Strahl in sehr kurzen Paketen zu speichern. Das ist wichtig, da der Bereich in dem Kollisionen stattfinden können durch die Länge der Strahlpakete gegeben ist, sodass kürzere Strahlpakete eine bessere Kontrolle über den Ort der Kollision ermöglichen. Schließlich müssen die beiden gegenläufigen Strahlen noch synchronisiert werden, damit gegenläufige Strahlpakete in der Mitte der Wechselwirkungszonen, aufeinander treffen und Ionen kollidieren können. In den Kollisionszonen wurde in Strahlrichtung eine gaußförmige Häufigkeitsverteilung für eine Kollision mit einer Standardabweichung von 20-30 cm erwartet.

Im Falle des Protonstrahls werden Protonen aus einer Ionenquelle in einem LINAC<sup>6</sup> vorbeschleunigt. Es gibt eine Ionenquelle für polarisierte Protonen und eine Quelle für nicht polarisierte Protonen mit hoher Intensität. Der Prozess der Strahlinjektion in RHIC und der Beschleunigung ist derselbe wie bei Schwerionen. Die maximal erreichbare Energie ist aber für Protonen mit 250 GeV höher, da die magnetische Rigidität aufgrund der „mitgeschleppten“ Neutronen bei Schwerionen größer ist, d. h. für dieselbe Energie sind bei Schwerionen höhere Magnetfelder nötig, um sie auf ihrer Bahn zu halten.

Die Intensität der beschleunigten Strahlen nimmt aufgrund von Strahl-Strahl-Wechselwirkungen und Restgaskollisionen im Lauf der Zeit ab. Eine typische Lebensdauer einer Beschleunigerfüllung sollte ca. 10 Stunden betragen.

## 2.2. Inbetriebnahme des Beschleunigers

### 2.2.1. Die Strahlzeit 1999

Der geplante Betriebsbeginn von RHIC war im Sommer 1999. Es gelang jedoch nicht, den Strahl länger als wenige Sekunden in den Ringen zu halten, bevor er verloren ging. Es stellte sich später heraus, dass dies auf ein Verziehen des Strahlrohres beim Abkühlen zurückzuführen war.

Es wurden folglich keine Kollisionen erzeugt und somit konnten die Experimenten nichts messen.

---

<sup>6</sup>Ein LINAC ist ein Linearbeschleuniger der mit Hochfrequenz arbeitet, im Gegensatz zu einem Linearbeschleuniger wie z. B. einem Van de Graff Beschleuniger der mit einem statischen elektrischen Feld arbeitet.

### 2.2.2. Die Strahlzeit 2000

Für den Sommer 2000 war eine Strahlenergie von 65 GeV/Nukleon mit Au-Ionen geplant. Zunächst sollten die Ionen direkt auf 65 GeV/Nukleon beschleunigt werden, dies gelang zunächst nicht. Daraufhin wurden die Ionen auf 30 GeV/Nukleon beschleunigt und am 12. Juni erstmalig zur Kollision gebracht. Um ca. 21 Uhr wurde die erste Kollision am RHIC auf dem Level-3 Eventdisplay beobachtet (Abb. 2.2). Der Betrieb bei dieser Strahlenergie wurde noch einige Tage fortgesetzt, bis an allen Experimenten Kollisionen gemessen werden konnten.

Später wurden nur noch Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV/Nukleon erzeugt. Zu Beginn lag die Kollisionsrate unter  $1 \text{ s}^{-1}$ . Abbildung 2.3 zeigt den Anstieg der Kollisionsrate im Laufe der Strahlzeit. Gegen Ende wurde eine Rate bis zu 200 Kollisionen/s zu Beginn einer Beschleunigerfüllung gemessen. Gezeigt ist die Rate mit der in beiden ZDCs<sup>7</sup> mindestens ein Neutron gemessen wird, was direkt mit der Kollisionsrate bzw. der Luminosität zusammenhängt [Bal98]. Die Struktur kommt durch die exponentiell abfallende Intensität während einer Beschleunigerfüllung zustande.

Während der Strahlzeit 2000 war das 200 MHz Hochfrequenzsystem zum speichern der Strahlpakete noch nicht einsatzbereit, was zu einer breiten Vertexverteilung<sup>8</sup> in Strahlrichtung führte. Die Verteilung war nahezu gaußförmig mit einer Breite  $\sigma \approx 95$  cm [Cal01]. Da die Experimente für eine kleinere z-Vertexverteilung gebaut waren, musste ein großer Teil der Kollisionen verworfen werden<sup>9</sup>.

Im Jahr 2000 wurden am Ende der Strahlzeit erste Tests zur Beschleunigung von Protonen im RHIC erfolgreich durchgeführt. Es wurden jedoch keine Kollisionen erzeugt.

### 2.2.3. Die Strahlzeit 2001

Im Sommer 2001 war RHIC in der Lage, Au-Ionene auf 100 GeV/Nukleon zu beschleunigen. Die ersten Kollisionen bei einer Strahlenergie von 100 GeV/Nukleon fanden am 2. August statt (Abb. 2.4).

Zunächst war auch in diesem Jahr das 200 MHz Hochfrequenzsystem nicht betriebsbereit. Ab dem 18. September wurde es eingeschaltet was zu schmaleren

---

<sup>7</sup>Zero Degree Calorimeter, (engl.): Null Grad Kalorimeter. Eine genaue Beschreibung findet sich in [Adl98] und [Adl01].

<sup>8</sup>Der „Vertex“ ist der Ursprungspunkt der in der Kollision erzeugten Teilchen, also der Punkt der Kollision.

<sup>9</sup>STAR konnte zwar selbst Ereignisse, deren Vertex außerhalb der TPC lag rekonstruieren, für alle Physik-Analysen wurden jedoch nur Ereignisse mit einem  $|z\text{-Vertex}| < 50$  cm zugelassen, da sonst zu große Akzeptanzkorrekturen nötig gewesen wären.

## 2. Der Beschleuniger

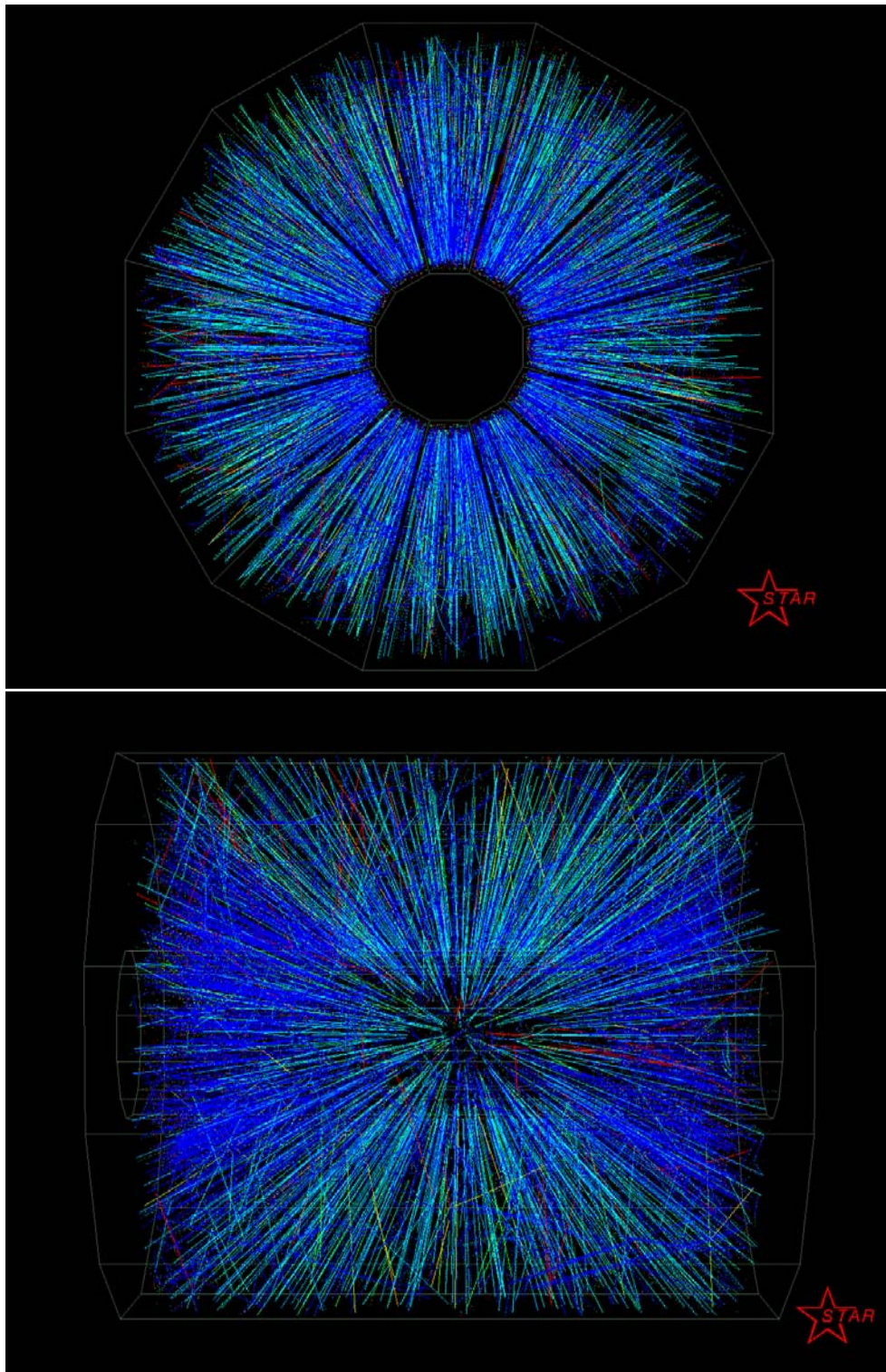


Abbildung 2.2.: Die erste an RHIC beobachtete Au+Au Kollision im Level-3 Eventdisplay in Frontansicht (oben, in Strahlrichtung) und Seitenansicht (unten). Die Spuren sind alle gerade, da diese Ereignisse ohne Magnetfeld aufgenommen wurden.

## 2.2. Inbetriebnahme des Beschleunigers

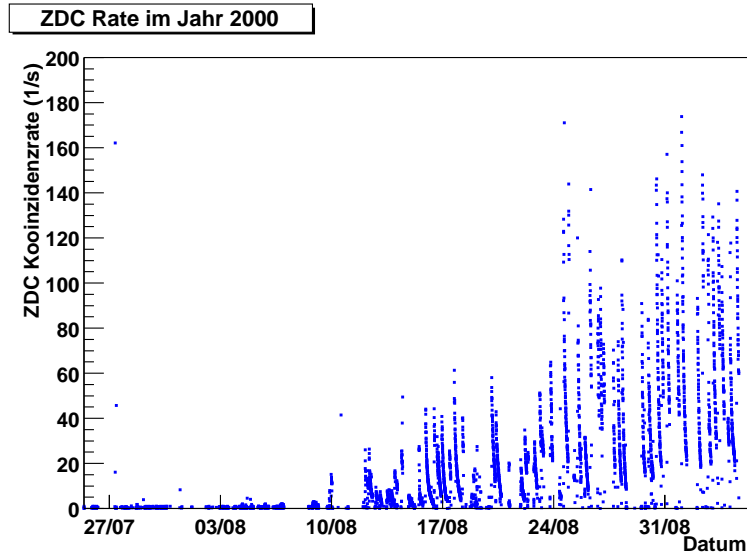


Abbildung 2.3.: Entwicklung der ZDC Koinzidenzrate im Jahr 2000.

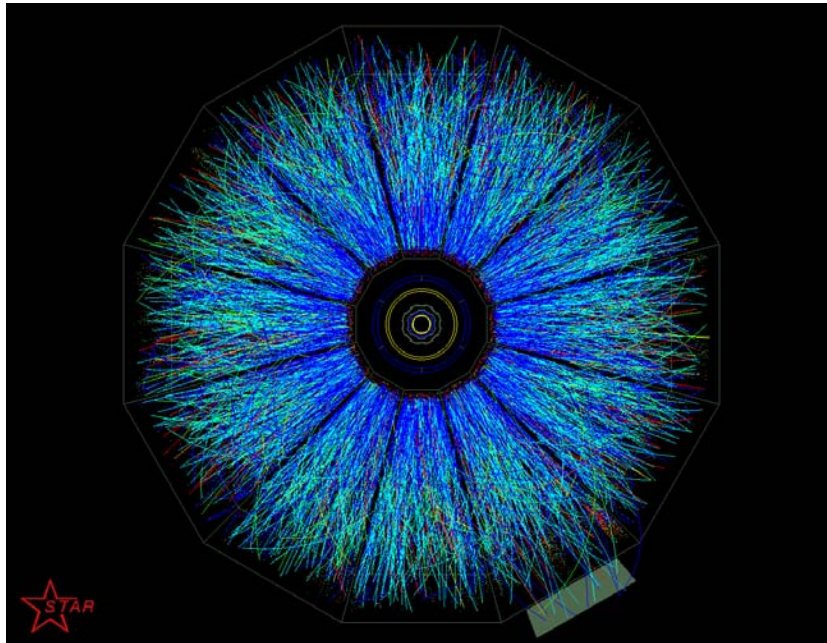


Abbildung 2.4.: Frontansicht einer der ersten Au+Au Kollisionen bei voller Strahlenergie ( $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV/Nukleon}$ ) am 2. August 2001.

## 2. Der Beschleuniger

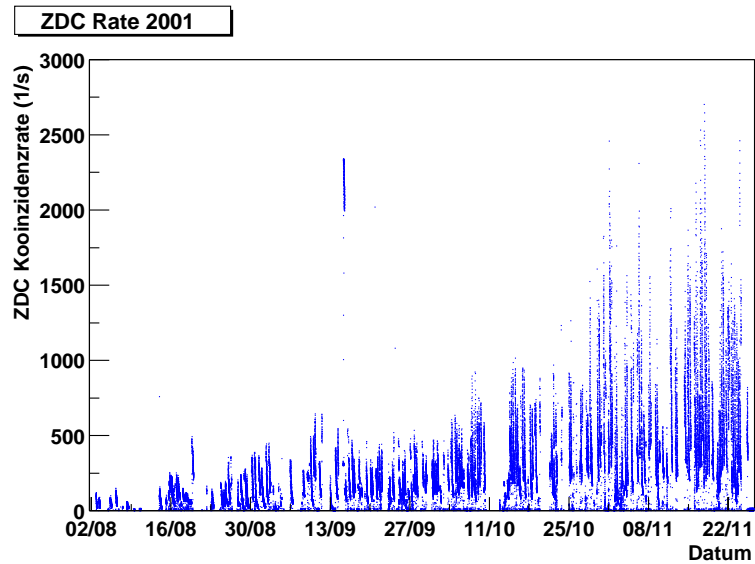


Abbildung 2.5.: Entwicklung der ZDC Koinzidenzrate im Jahr 2001.

Vertexverteilungen bei den Experimenten führte.

In Abbildung 2.5 sind die ZDC Koinzidenzraten während der Au-Strahlzeit im Jahr 2001 dargestellt. Die maximale Rate betrug  $2500 \text{ s}^{-1}$ .

Der Au-Betrieb endete am 25. November. Daraufhin wurden (teilweise polarisierte) Protonstrahlen im RHIC beschleunigt. Die maximale Strahlenergie betrug 100 GeV.

## 3. Das STAR-Experiment

Das STAR-Experiment besteht aus mehreren Detektoren, die unterschiedliche Bereiche des Phasenraums abdecken und sich durch unterschiedliche Impuls- und Ortsauflösung oder Teilchenidentifikationseigenschaften ergänzen. In Abbildung 3.1 ist der Aufbau des Detektors schematisch dargestellt.

Der zentrale Detektor ist die Spurendriftkammer (TPC) mit einer Länge von 4,2 m und einem Durchmesser von 4,0 m. In ihr werden Spuren geladener Teilchen nachgewiesen. Die TPC erfasst Teilchenspuren im Pseudorapiditätsbereich  $-1,8 \leq \eta \leq 1,8$ . Die Akzeptanz in azimuthaler Richtung beträgt  $360^\circ$ , wenn man von kleinen Bereichen an den Sektorgrenzen absieht. Die TPC befindet sich in einem Magneten mit solenoidalem Feld, dessen Feldlinien innerhalb der TPC parallel zur Strahlachse laufen. Das Magnetfeld innerhalb des TPC-Volumens ist homogen und seine Feldstärke beträgt bis zu 0,5 Tesla. Während der Strahlzeit im Jahr 2000 wurde der Magnet jedoch nur bei halber Feldstärke (0,25 T) betrieben.

Ein geladenes Teilchen wird in dem Magnetfeld abgelenkt, durch die Krümmung seiner Spur kann der Impuls bestimmt werden. Die STAR-TPC ist für einen Impulsbereich von  $\approx 100$  MeV/c bis zu einigen GeV/c konzipiert.

Durch die spezifische Ionisation eines geladenen Teilchens im Gas der TPC, können Rückschlüsse auf die Teilchenspezies gezogen werden.

Innerhalb der TPC, um den Kollisionsbereich, befindet sich ein Silizium Driftdetektor (SVT<sup>1</sup>), der eine gute Ortsauflösung von Spurpunkten nahe der Strahlachse ermöglicht. Der SVT wird eingesetzt, um sekundäre Vertices von Zerfällen kurzlebiger Teilchen (mit einer Lebensdauer  $c\tau$  von einigen mm bis cm) zu rekonstruieren und um die Orts- und Zweispurauflösung der TPC-Spuren zu verbessern. Beim SVT kann der Energieverlust eines Teilchens im Silizium gemessen werden, was wie bei der TPC die Bestimmung der Teilchenspezies ermöglicht.

Die beiden Vorwärts-Spurendriftkammern (FTPC<sup>2</sup>) befinden sich innerhalb des inneren Radius der TPC. Sie beginnen 1,5 m von der Mitte der TPC und reichen

---

<sup>1</sup>Von engl. Silicon Vertex Tracker.

<sup>2</sup>von engl. Forward Time Projection Chamber.

### 3. Das STAR-Experiment

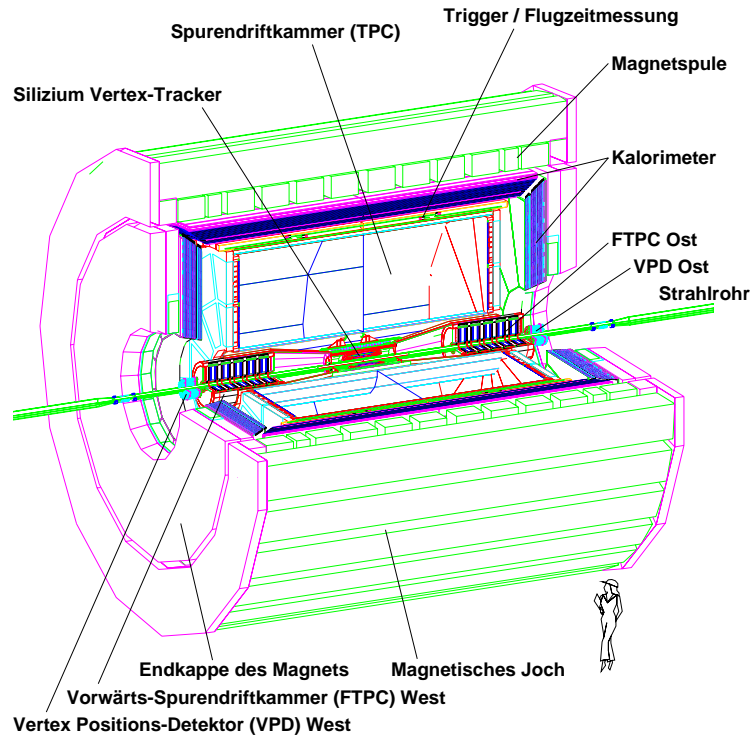


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung des STAR Detektors.

mit einer Länge von 1,2 m ca. 50 cm über die die Enden der TPC hinaus. Die FTFCs erweitern die Akzeptanz des STAR-Detektors um den Pseudorapiditätsbereich  $2,5 \leq \eta \leq 4,0$ .

Des Weiteren ist in STAR ein RICH-Detektor<sup>3</sup> eingebaut. Dieser ist ein Prototyp eines ALICE-Detektors und wurde STAR leihweise überlassen. Der RICH-Detektor deckt nur ca. 5% der TPC Akzeptanz ab. Er ermöglicht Teilchenidentifikation bei hohem Impuls. Insbesondere wurde mit ihm das  $\bar{p}/p$ -Verhältnis bei hohem transversalem Impuls gemessen [Dun01].

Ein elektromagnetisches Kalorimeter (EMC<sup>4</sup>) befindet sich zwischen Magnet und TPC. Es teilt sich in das so genannte Barrel EMC (BEMC), welches den Pseudorapiditätsbereich  $-1,0 \leq \eta \leq 1,0$  abdeckt, und das Endcap EMC (EEMC), das zwischen den Endkappen des Magneten und den Enden der TPC befindet und einen Pseudorapiditätsbereich von  $1,0 \leq \eta \leq 2,0$  abdeckt. Im Sommer 2001 wurde ein erster Teil des Kalorimeters installiert (ca. 25% des BEMC), der zum Ende der Strahlzeit einsatzbereit war.

<sup>3</sup>Abk. für Ring Imaging Cherenkov Detector. Details in Abschnitt 3.1.4

<sup>4</sup>ElectroMagnetic Calorimeter



Die so genannten Triggerdetektoren, die Zero Degree Calorimeter (ZDC), das Central Trigger Barrel (CTB) und das Multi Wire Chamber (MWC), zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr schnell ( $<100$  ns) und mit einer Rate von mindestens 10 MHz ausgelesen werden können.

Die ZDCs befinden sich in 18,25 m Entfernung von der Mitte des Experiments im RHIC-Tunnel. Dort messen sie neutrale Spektatoren<sup>5</sup> der Au+Au-Kollisionen und ermöglichen damit die Bestimmung der Anzahl von Partizipanten an der Reaktion. Das CTB ist ein großflächiger Detektor aus 240 Szintillatoren. Diese sind um die TPC angeordnet und decken den Pseudorapiditätsbereich  $-1, 0 \leq \eta \leq 1, 0$  ab. Das CTB misst die Multiplizität geladener Spuren.

Das MWC ist kein eigener Detektor, vielmehr werden die Anodendrähte der TPC als schneller Detektor genutzt.

Es gibt noch andere Detektoren<sup>6</sup>, die keinen Bezug zu dieser Arbeit haben, weshalb hier nicht darauf eingegangen wird.

Die Informationen der Triggerdetektoren werden vom Triggersystem verarbeitet. Wenn ein Ereignis die gewünschten Bedingungen erfüllt, werden auch die anderen Detektoren ausgelesen. Die Daten werden über Lichtleiter vom Detektor zum Datenerfassungssystem (DAQ<sup>7</sup>) geschickt. Dort werden die Beiträge aller Detektoren gesammelt und zusammengefügt. Die Daten werden über eine Gigabit-Ethernet-Verbindung zum RHIC-Rechenzentrum (RCF<sup>8</sup>) geschickt, wo sie gespeichert werden.

## 3.1. Die Detektoren

### 3.1.1. Die Spurendriftkammer (TPC)

Eine Spurendriftkammer (engl. Time Projection Chamber, TPC) ist ein gasgefüllter Detektor. Geladene Teilchen, die durch das Detektorgas fliegen, setzen Elektronen aus der Hülle der Gasatome frei.

Aufgrund eines elektrischen Feldes in z-Richtung driften die Elektronen zur Ausleseebene, wo die freigesetzte Ladung gemessen wird. Bei der Spurendriftkammer

---

<sup>5</sup>Als Spektatoren (engl.: Spectators) werden die Nukleonen bezeichnet, die nicht an der Reaktion teilnehmen, Partizipanten (engl: Participants) sind die Teilnehmer der Reaktion.

<sup>6</sup>Einen Flugzeitdetektor (pTOF, Time Of Flight Patch), einen Detektor für  $\pi^0$ , hoher Rapidität (FPD, Forward Pion Detector), einen Photonen Detektor (PMD, Photon Multiplicity Detector) und Strahlzähler, die geladene Teilchen nahe der Strahlrohre messen.

<sup>7</sup>Data Acquisition

<sup>8</sup>RHIC Computing Facility

### 3. Das STAR-Experiment

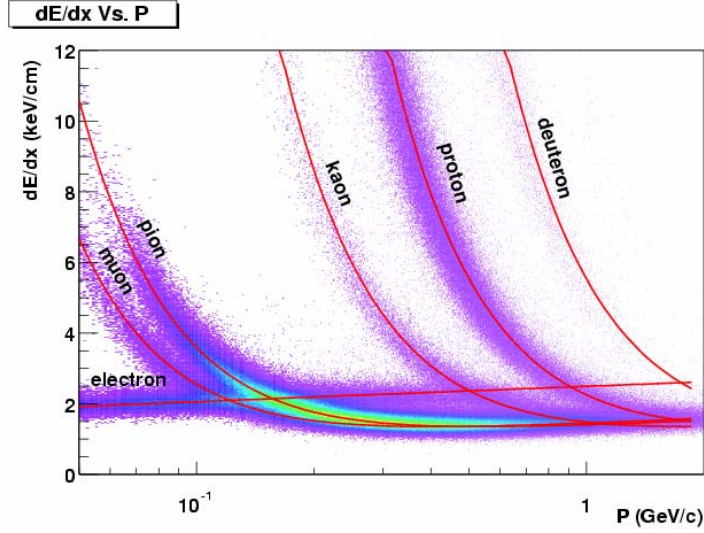


Abbildung 3.2.: In der STAR TPC gemessenes  $dE/dx$  (aus [And02a]).

ist die Ausleseebene segmentiert, sodass eine zweidimensionale Information über den Punkt der Ionisation erhalten wird. Über die Messung der Driftzeit der Elektronen wird die dritte Dimension festgelegt. Damit ist eine TPC vergleichbar mit einer dreidimensionalen Digitalkamera, mit der man Spuren geladener Teilchen aufnehmen kann.

Eine weitere Information über ein Teilchen wird über die Messung seiner spezifischen Ionisation erlangt. Der Energieverlust eines Teilchens beim Durchgang durch Materie (z.B. ein Gas) wird durch die Bethe-Bloch Formel

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi N_o r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A} \rho \frac{1}{\beta^2} z^2 \left( \ln \frac{2m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 - \beta^2 - \frac{\delta(\beta)}{2} \right) \quad (3.1)$$

beschrieben [Bet30]. Wobei  $m_e c^2$  die Ruheenergie des Elektrons ist,  $z$  die Ladung des Teilchens,  $N_o$  die Avogadro Zahl,  $r_e$  der klassische Elektronenradius,  $\rho$ ,  $A$  und  $Z$  sind die Dichte, Massenzahl und Kernladungszahl des durchquerten Mediums,  $I$  ist das Ionisationspotenzial des Mediums.  $\delta(\beta)$  ist eine Dichtekorrektur, die die Sättigung der Ionisation bei relativistischen Geschwindigkeiten des durchgehenden Teilchens beschreibt („relativistisches Plateau“). Es gibt noch andere Korrekturen zu dieser Formel, die für eine TPC vernachlässigbar sind [Blu93][Leo94].

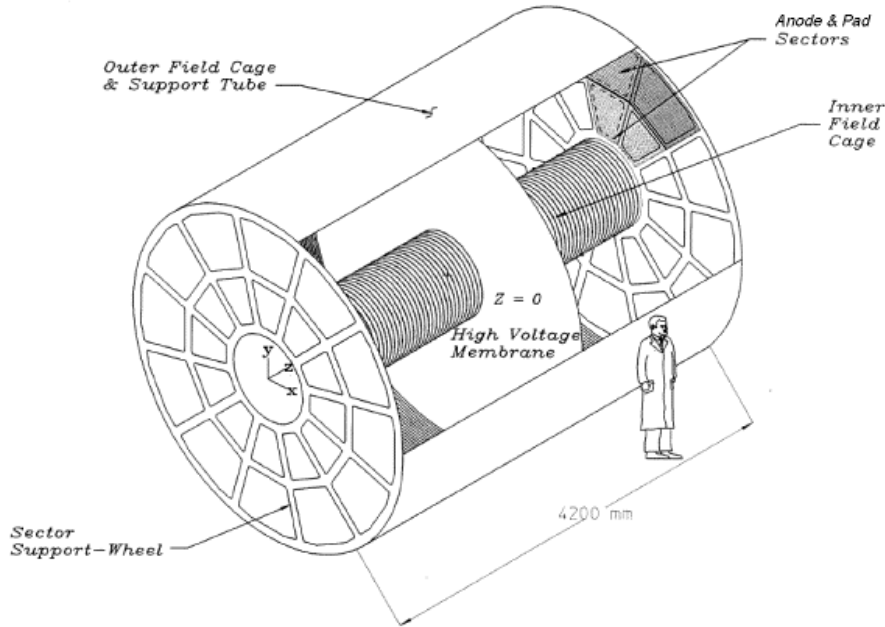


Abbildung 3.3.: Aufbau der STAR TPC.

In Abbildung 3.2 sind gemessene  $dE/dx$ -Werte für Teilchenspuren gegen ihren Impuls aufgetragen. Die durchgezogenen Linien entsprechen einer Parametrisierung der Bethe-Bloch-Formel.

Abbildung 3.3 zeigt schematisch die wichtigsten Elemente der STAR TPC. In der Mitte der TPC befindet sich die zentrale Membran (in der Abbildung als „High Voltage Membrane“ bezeichnet). Sie besteht aus Kohlenstoff-beschichteter Kapton<sup>9</sup>-Folie und stellt die Kathode der TPC dar. Zusammen mit dem äußeren und inneren Zylinder der TPC stellt diese einen elektrostatischen Feldkäfig dar, der ein elektrisches Feld von  $\approx 135$  V/cm zwischen der zentralen Membran und den Endkappen erzeugt. Innerer und äußerer Feldkäfig bestehen ebenfalls aus Kapton-Folie, auf der sich Metallstreifen befinden, die Äquipotentialringe darstellen und so für eine gute Homogenität des Feldes sorgen. Zusätzlich ist noch eine Wabenstruktur aus Kunststoff an die Feldkäfige laminiert, um der TPC die nötige Stabilität zu geben [And02a].

An den Endflächen der TPC befindet sich die Anode und Ausleseeinheit. Der Anodenbereich (Abb. 3.4) besteht aus Gating Gitter, Frisch Gitter und Anoden Gitter. Diese Drahtebenen sind vor den Auslese-Pads angeordnet. Zwischen der Kathode (zentrale Membran) und dem Frisch Gitter besteht ein homogenes elek-

<sup>9</sup>Kapton ist eine von DuPont<sup>TM</sup> hergestellte Polyimid Folie

### 3. Das STAR-Experiment

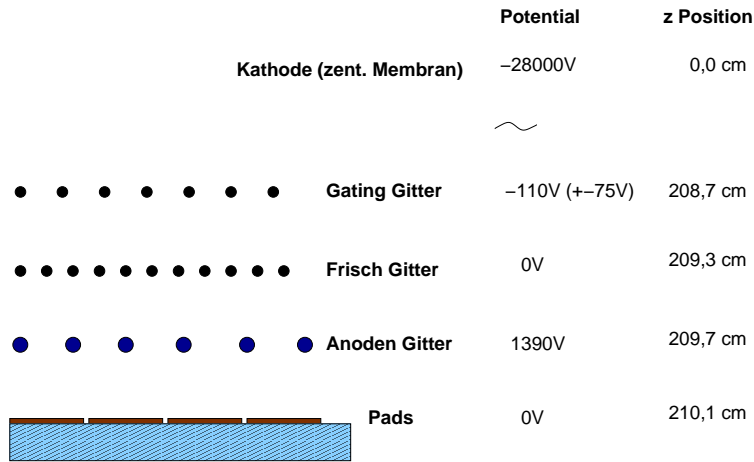


Abbildung 3.4.: Anodenbereich der STAR TPC mit Potentials und Position (nicht Maßstabsgerecht). Die angegebenen Werte gelten für die äußeren Sektoren.

trisches Feld, in dem die Elektronen driften. Nachdem die Elektronen das Frisch Gitter passieren, kommen sie in das inhomogene Feld zwischen Anodendrähten und Frisch Gitter und werden stark beschleunigt. Dadurch werden weitere Elektronen durch Ionisation freigesetzt und die ursprünglichen Ladung wird verstärkt. Die Elektronen werden von den Anodendrähten abgeführt, während die sehr viel langsameren zurückbleibenden Ionenrümpfe auf den Kathodensegmenten (*Pads*) eine Spiegelladung induzieren.

Die Drähte des Gating Gitters sind im geöffneten Zustand auf  $-110\text{ V}$  gelegt, wodurch es für die driftenden Elektronen durchlässig wird. In geschlossenem Zustand wird das Potential benachbarter Drähte abwechselnd um je  $75\text{ V}$  angehoben bzw. abgesenkt, wodurch positive Ionen „abgesaugt“ werden und nicht in den Driftbereich der Kammer zurückdriften können.

Die Endstücke der TPC sind in je 12 keilförmige Sektoren unterteilt (vgl. Abb. 3.3), die ihrerseits wieder in inneren und äußeren Sektor unterteilt sind. Äußerer und innerer Sektor unterscheiden sich in der Anordnung der Pads, die in Abbildung 3.5 gezeigt ist. Im inneren Sektor sind die Pads mit  $2,85\text{ mm}$  weniger als halb so breit wie die Pads im äußeren Sektor mit  $6,2\text{ mm}$  Breite. Im inneren Sektor (wo die höchste Spurdichte herrscht) sollte die Zweispurauflösung maximiert werden. Die äußeren Sektoren sind für die Messung des  $dE/dx$  optimiert, weshalb dort die gesamte Fläche mit Pads bedeckt ist. Innerer und äußerer Sektor unterscheiden sich in den Dimensionen in der Auleseebene, wodurch sich eine unterschiedliche effektive Driftlänge ergibt. Die Anodenverstärkung im inneren Sektor ist ca. 3 mal größer, um bei der kleineren Padgröße im inneren Sektor dasselbe Signal-Rausch-Verhältnis (20:1) wie im äußeren Sektor zu erreichen. Einige Parameter, in denen sich innere und äußere Sektor unterscheiden sind in

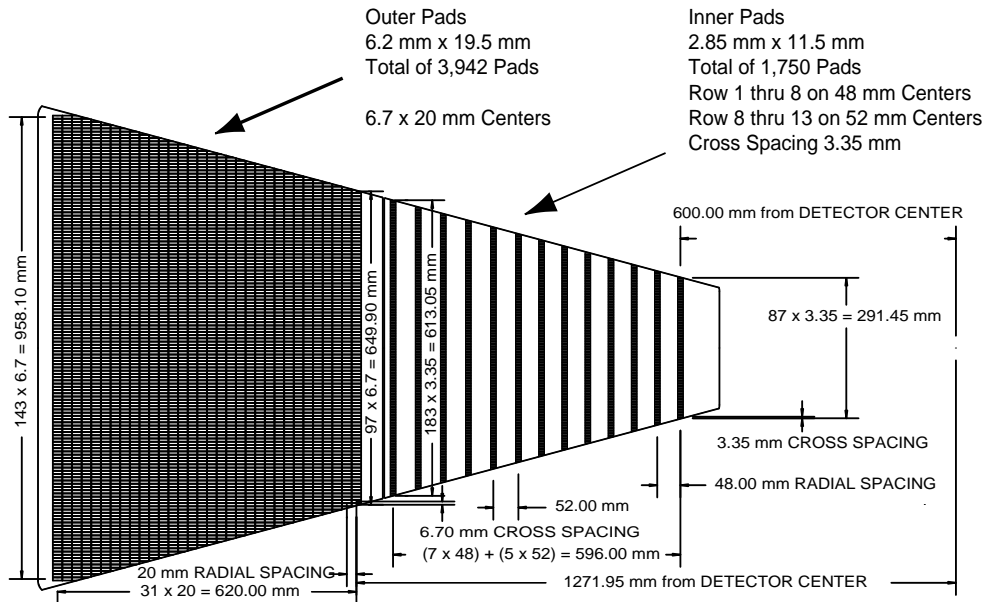


Abbildung 3.5.: Anordnung der Pads in einem Sektor.

Tabelle 3.1 aufgeführt.

Die STAR TPC ist mit einer Mischung aus 90% Argon und 10% Methan ( $\text{CH}_4$ ) (P10) gefüllt. Die Wahl des Gases bestimmt die Driftgeschwindigkeit, den Verstärkungsfaktor, Absorption und Diffusion der Elektronenwolken.

Die transversale Diffusion einer Elektronenwolke in P10 beträgt  $230 \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$  bei einem Magnetfeld von 0,5 T [And02a], was bei einer Driftlänge von 210 cm 3,3 mm ergibt. In longitudinaler Richtung beträgt die Diffusion eines Elektronenclusters, welches über die gesamte Länge der TPC driftet, 5,2 mm.

Abbildung 3.6 zeigt die Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit vom E/P-Verhältnis. Das E/P-Verhältnis ist das Verhältnis von elektrischer Feldstärke des Drift-

Parameter	Innerer Sektor	Äußerer Sektor
Pad Größe	2.85 mm x 11.5 mm	6.20 mm x 19.5 mm
Pad Reihen	13 (#1-#13)	32 (#14-#45)
Anzahl der Pads	1750	3942
Dist. Anod. Drähte zu Pad Ebene	2 mm	4 mm
Anoden Spannung	1170 V	1390 V
Anoden Verstärkung	3770	1230

Tabelle 3.1.: Vergleich der Geometrie und Eigenschaften von innerem und äußerem Sektor.

### 3. Das STAR-Experiment

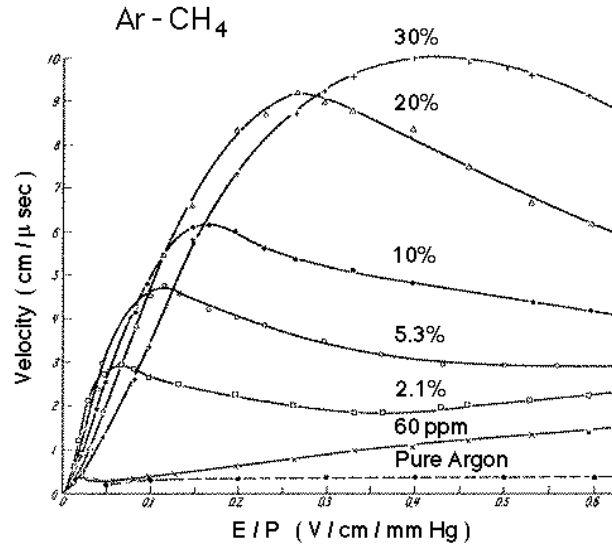


Abbildung 3.6.: Driftgeschwindigkeit in Ar-CH<sub>4</sub> Mischungen verschiedener Verhältnisse aufgetragen gegen E/P (aus [Sau77]). Die % Angaben beziehen sich auf den CH<sub>4</sub>-Gehalt.

feldes zum barometrischen Druck. Der Arbeitspunkt einer TPC läßt sich über die Wahl der Kathodenspannung einstellen, wird sich aber bei Änderung des barometrischen Druckes ändern. Zunächst war der Arbeitspunkt der STAR TPC so gewählt, dass er rechts neben dem Maximum der Driftgeschwindigkeit lag (in Abb. 3.6). Damit führte eine Druckänderung zu einer dazu linearen Änderung der Driftgeschwindigkeit. Dies sollte eine einfache Korrektur auf Änderungen der Driftgeschwindigkeit bei bekanntem barometrischen Druck ermöglichen. Aufgrund der Erfahrungen der Strahlzeit im Jahr 2000 wurde die Kathodenspannung von nominell 31 kV auf 28 kV abgesenkt, wodurch der Arbeitspunkt der TPC auf das Maximum der Driftgeschwindigkeit gelegt wurde. Dort führen kleine Luftdruckschwankungen zu einer minimalen Änderung der Driftgeschwindigkeit. In der Strahlzeit des Jahres 2001 zeigte sich, dass die Änderung der Driftgeschwindigkeit mit dieser Wahl unter  $\pm 0.2\%$  blieb [Har02].

In Abbildung 3.7 ist der Aufbau der Ausleseelektronik schematisch gezeigt. 32 Pads werden von einer Front-End Karte (FEE, *Front End Electronics*) ausgelesen. Die FEE-Karten beinhalten zwei speziell für STAR hergestellte Chips, den STAR preamplifier/shaper (SAS) chip (Vorverstärker und Signalformer), und einen Analog-Digital-Wandler Chip mit einem „switched Capacitor Array“<sup>10</sup> (ADC/SCA). Ein SAS-Chip besitzt 16 Kanäle und bereitet das Signal der Pads

<sup>10</sup>Übersetzt hieße das: geschaltete Kondensator Kette.

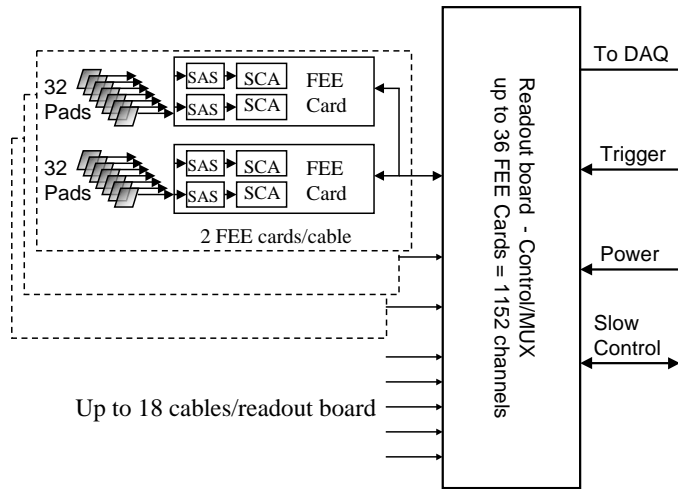


Abbildung 3.7.: Layout der Front-End Elektronik der STAR TPC.

auf. Dabei wird die Ladung auf den Pads integriert und in einen Puls entsprechender Spannung umgewandelt. Beim SCA handelt es sich um einen analogen Speicher, der 512 Spannungswerte (= *Timebins*) aus dem SAS Chip zwischenspeichern kann, die in der Folge von den ADCs digitalisiert werden. Der SCA wird während der Driftzeit<sup>11</sup> von ca.  $40 \mu\text{s}$  mit typischerweise 380 *timebin*-Werten gefüllt, der Vorgang des Digitalisierens nimmt ca. 10 ms in Anspruch [And02b]. Die Spannungen aus dem SCA werden von dem ADC in 10-Bit Ladungswerte gewandelt und über die Auslese-Karten (Readout Boards), die bis zu 36 FEE-Karten bündeln, zur Datenerfassung (DAQ) geschickt. Die Readout-Karten empfangen Triggerbefehle und kommunizieren mit den Slow Controls<sup>12</sup>. 136608 Kanälen (*Pads*) werden damit in 4269 FEE-Karten ausgelesen.

Tabelle 3.2 faßt die wichtigsten Parameter der STAR TPC zusammen.

### 3.1.2. Die Vorwärts-Spuredriftkammern (FTPC)

Die Akzeptanz des STAR Detektors wird durch die beiden FTPCs um den Bereich  $2,5 \leq |\eta| \leq 4,0$  erweitert. Diese funktionieren nach demselben Prinzip wie

<sup>11</sup>Als (maximale) Driftzeit ist hier die Zeit gemeint, die eine Elektronenwolke benötigt um von der zentralen Membran zur Anode zu driften.

<sup>12</sup>Als Slow Controls wird das System bezeichnet, welches für die Kontrolle aller sich langsam ändernder Parameter, wie z.B. Spannungsversorgungen, Gasmischung, Temperatur von Detektoren und Elektronik, zuständig ist.

### 3. Das STAR-Experiment

Parameter	Dimension	Kommentar
Länge der TPC	420 cm	Zwei Hälften, 210 cm lang
Äußerer Ø des Driftvol.	400 cm	200 cm Radius
Innerer Ø des Driftvol.	100 cm	50 cm Radius
Distanz: Kath. zu Erde	209,3 cm	Jede Seite
Kathode	400 cm Ø	In der Mitte der TPC
Kathoden Potential	28 kV	Typisch
Driftgas	P10	10 % Methan, 90% Argon
Druck	Atmosphärisch + 2 mbar	Reguliert bei 2 mbar
Driftgeschwindigkeit	5,45 cm / $\mu$ s	Typisch
Transvers. Diffusion ( $\sigma$ )	$230\mu\text{m}/\sqrt{cm}$	140 V/cm & 0,5 T
Longitud. Diffusion ( $\sigma$ )	$360\mu\text{m}/\sqrt{cm}$	140 V/cm
Anzahl von Sektoren	24	12 pro TPC-Hälfte
Anzahl der Pads	136608	
Signal-Rausch-Verhältnis	20 : 1	
Pulsformungszeit	180 ns	FWHM
Dyn. Signalbereich	10 bits	
Sampling Rate	9,4 MHz	
Sampling Tiefe	512 Zeitbuckets	typisch 380 Zeitbuckets
Magnet Feld	0, $\pm$ 0,25 T, $\pm$ 0,5 T	Solenoidales Feld

Tabelle 3.2.: Grundparameter der STAR TPC (Werte aus [And02a]).

die TPC, sie sind ebenfalls zylinderförmig mit einem inneren (äußeren) Durchmesser des sensitiven Volumens von 8 cm (30,5 cm). Da die Spurdichte im Bereich der FTTPCs sehr groß ist (bis zu 1000 Spuren pro FTTPC<sup>13</sup>), wären bei longitudinaler Drift und Auslese an den Endstücken (wie bei der TPC) Spuren nahe des Strahlrohrs nicht mehr zu trennen. Die Elektronenwolken driften daher in einem radialen Feld, die Auslese befindet sich am äußeren Umfang der FTTPC (vgl. Abb. 3.8). Dies bringt zwei Probleme mit sich:

- Aufgrund des radialen Feldes nimmt die Driftgeschwindigkeit mit der Feldstärke nach außen hin ab. Damit kann man nicht wie bei der TPC den Ort der Ionisation mit einer linearen Beziehung zwischen Driftzeit und Driftstrecke bestimmen.
- Die Feldlinien des Magnetfeldes und des elektrischen Driftfeldes laufen senkrecht zueinander<sup>14</sup>. Dadurch werden die Elektronen durch die Lorentzkraft

<sup>13</sup>Die Akzeptanz einer FTTPC ist mit 1,5 Pseudorapiditätseinheiten vergleichbar mit der Hälfte der TPC, somit ist bei den beobachteten Pseudorapiditätsverteilungen [Bac01] eine vergleichbare Anzahl von geladenen Teilchen in einem Volumen, das um einen Faktor 75 kleiner ist.

<sup>14</sup>Da sich die FTTPCs im Randbereich des solenoidalen Magnetfeldes befinden, ist zu der außenliegenden Seite hin ein Bereich, in dem das Magnetfeld nicht mehr vollständig homogen ist, was weitere Korrekturen erfordert.



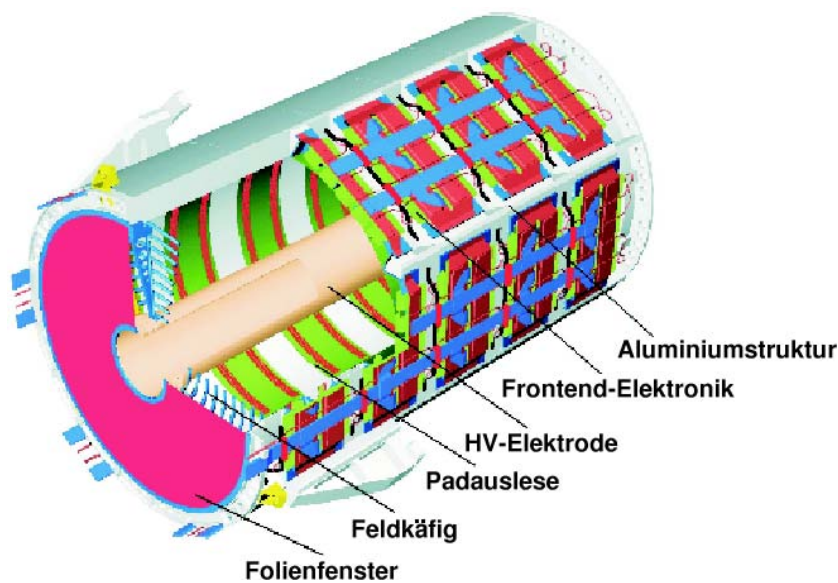


Abbildung 3.8.: Aufbau einer Vorwärts-Spuredriftkammer.

in azimuthaler Richtung abgelenkt.

Die Transformation von gemessenen Koordinaten zu tatsächlichen Koordinaten eines Clusters ist also nicht-trivial ist und muss deshalb über LUTs<sup>15</sup>, die mit Hilfe eines Simulationsprogrammes (MAGBOLTZ [Old01][Bia89]) errechnet werden, geschehen.

Abbildung 3.8 zeigt den Aufbau einer FTPC. Als Kathode dient ein Rohr in der Mitte der FTPC, das auf eine Spannung von 10-15 kV gelegt wird. Das Driftfeld von der Kathode bis zum Frisch-Gitter wird durch den Feldkäfig aus konzentrisch angeordneten Aluminiumrohren definiert. Als Gas wurde ein Mischung aus 50 % Ar und 50 % CO<sub>2</sub> gewählt. Damit beträgt die Driftgeschwindigkeit 0,3-2,0 cm/ $\mu$ s. Die Auslese ist in fünf Ringe gegliedert, die je zwei Padreihen tragen. Jede der ringförmigen Padreihen besitzt 160 Pads. Eine Spur hinterlässt in maximal zehn Padreihen ein Signal. Dies reicht nicht aus, um die Teilchenspezies über die spezifische Ionisation im Gas zu bestimmen. Die Gesamtzahl der Pads und somit der Auslesekanäle beträgt 19200. Die verwendeten FEE Karten ähneln denen der TPC, unterteilen die Driftlänge jedoch in nur 256 *Timebins*.

<sup>15</sup>LUT, Look-up table (engl.), Tabelle zum Nachschauen.

### 3.1.3. Der Silizium Vertex Tracking Detektor (SVT)

Ein Silizium-Driftdetektor funktioniert ähnlich wie eine Spurendriftkammer aus Silizium. Als Driftvolumen dient ein Wafer, der auf beiden Seiten  $p^+$ -dotierte Streifen besitzt. Diese Streifen werden auf einem bestimmten Potential mit Gradienten in Driftrichtung gehalten und stellen einen Feldkäfig dar. Elektronen, die beim Durchgang eines geladenen Teilchens durch das Silizium freierwerden, driften in diesem Feld zu den Anoden. Diese sind segmentiert und ermöglichen somit eine Bestimmung des Ortes in Anodenrichtung. Durch die Messung der Driftzeit wird die Koordinate in Driftrichtung bestimmt.

Der STAR SVT besteht aus 216 einzelnen Silizium-Driftdetektoren (SDD) mit einer Größe von  $63 \times 63$  mm. Jeder dieser Driftdetektoren ist in zwei Hälften geteilt. Die zentrale Kathode in der Mitte, liegt auf dem maximalen Potential von -1500 V. Elektronen driften von der Kathode zu den Seiten, wo sich je eine Anode befindet. Insgesamt befinden sich 480 Anodensegmente auf jedem Wafer, die Driftrichtung wird in 128 Zeitbuckets unterteilt, somit besitzt jeder Wafer effektiv  $256 \times 240$  Pixel.

Die SDDs sind in der Mitte der TPC in drei konzentrischen Ringen um das Strahlrohr angeordnet. Der innerste Ring besteht aus acht Leitern, die jeweils vier Wafer tragen, der radiale Abstand beträgt 5,97 cm. Der mittlere Ring besteht aus 12 Leitern zu je sechs Wafern und befindet sich in einem radialen Abstand von 10,16 cm. Der dritte Ring befindet sich in einem radialen Abstand von 14,91 cm und besteht aus 16 Leitern zu je sieben Wafern [Bel96].

Die Ortsauflösung der SDDs beträgt  $20 \mu\text{m}$  in Anodenrichtung und  $25 \mu\text{m}$  in Driftrichtung [Bel02]. Die Ortsauflösung in radialer Richtung ist durch die Dicke der Wafer von  $280 \mu\text{m}$  gegeben.

Wie in der TPC wird auch beim SVT die Ladung eines Clusters bestimmt, um die spezifische Ionisation ( $dE/dx$ ) eines Teilchens zu bestimmen. Aufgrund von Teststrahl-Ergebnissen wurde die  $dE/dx$ -Auflösung zu ca. 7% abgeschätzt [Bel02].

Der SVT war im Jahr 2000 mit nur einer Leiter eingebaut, um mögliche Strahlungsschäden abschätzen zu können. Für die Strahlzeit im Jahr 2001 war der gesamte Detektor installiert. Bis zur nächsten Strahlzeit im Herbst 2002 wird ein Silizium-Strip-Detektor (SSD) als vierte Lage um den SVT installiert. Der SSD wird sich in einer Entfernung von 23 cm von der Strahlachse befinden [Bou99].

### 3.1.4. Der RICH Detektor

Der RICH-Detektor überdeckt eine Fläche von ca.  $1 \text{ m}^2$ . Er besteht aus zwei Modulen der Größe  $1330 \times 413 \text{ mm}^2$  und erfasst den zentralen Pseudorapiditäts-

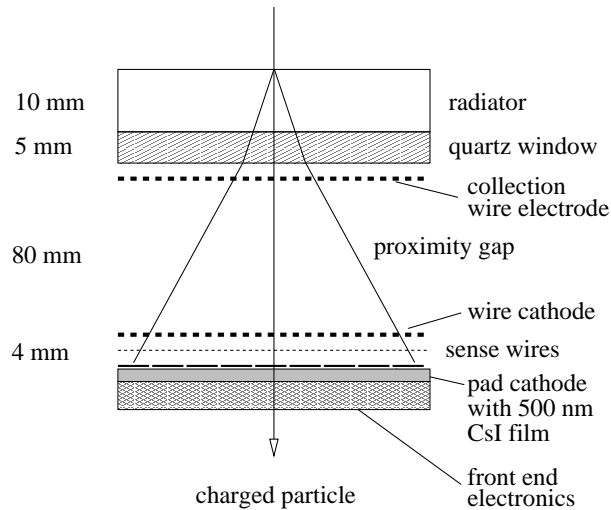


Abbildung 3.9.: Querschnitt durch den RICH-Detektor.

bereich mit  $|\eta| < 0,3$ . Azimutal wird ein Winkel von  $\Delta\phi = 20^\circ$  abgedeckt<sup>16</sup>. Abbildung 3.9 zeigt den schematischen Aufbau des RICH Detektors. Ein geladenes Teilchen passiert den Radiator, in dem Cherenkov-Strahlung emittiert wird. Der Cherenkov-Ring wird durch ein Quarzfenster in Richtung der Ausleseebenen abgestrahlt. Dort treffen die Photonen auf eine CsI-beschichtete, segmentierte Kathode. Im CsI werden Photoelektronen herausgeschlagen, die zur Anode (in der Abbildung als „sense wire“ bezeichnet) hin beschleunigt und somit verstärkt werden. Die Ladung der zurückbleibenden Ionenrümpfe wird auf den Pads („pad cathode“) gemessen. Die Ortsbestimmung erfolgt über die segmentierten Pads ( $8 \times 8,4$  mm). Im Raum zwischen Quarzfenster und Anode wird ein Feld erzeugt, welches Elektronen ausserhalb des Verstärkungsbereichs „absaugt“.

Der RICH ermöglicht die Teilchenidentifikation von Kaonen mit einem Impuls bis 3 GeV/c und Protonen bis 5 GeV/c. Mit der TPC und dem SVT können Kaonen (Protonen) hingegen nur bis zu einem Impuls von 0.6 (1.0) GeV/c identifiziert werden.

### 3.1.5. Das Elektromagnetische Kalorimeter

Das EMC unterteilt sich in das „Barrel Electromagnetic Calorimeter“ (BEMC), welches die Außenseite des TPC-Zylinders umgibt und das „Endcap Electromagnetic Calorimeter“ (EEMC), das sich zwischen einer Endfläche der TPC und

<sup>16</sup>In Abbildung 2.4 ist der RICH als Fläche rechts unten im L3-Eventdisplay eingezeichnet.

### 3. Das STAR-Experiment

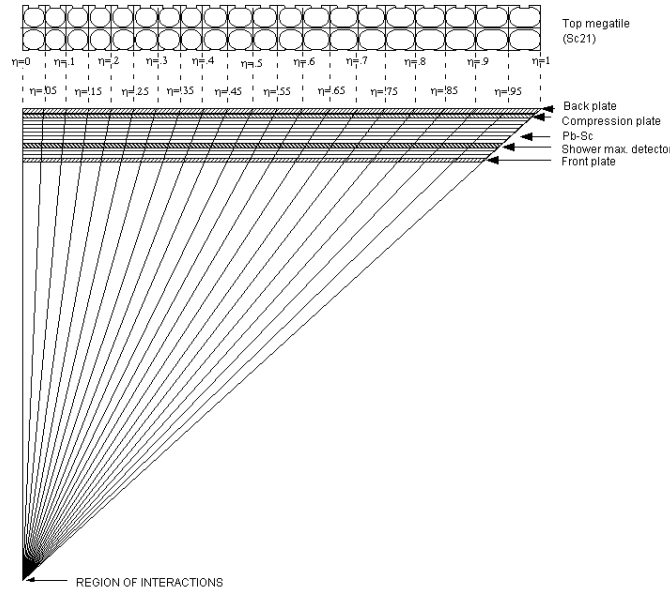


Abbildung 3.10.: Seitenansicht eines BEMC Moduls.

der Endkappe des Magneten befindet. Das BEMC deckt den Pseudorapiditätsbereich  $-1,0 < \eta < 1,0$  ab, das EEMC deckt  $1,086 \leq \eta \leq 2,00$  ab [Alg02]. Beide Kalorimeter sind Blei-Szintillator-Sampling Kalorimeter.

Das BEMC ist azimuthal in 60 Module und in der Pseudorapidität in 2 Module unterteilt. Jedes Modul ist azimuthal zweifach und in der Pseudorapidität 20-fach in 40 Türme unterteilt. Jeder Turm überdeckt einen azimuthalen Winkel  $\Delta\phi = 3^\circ$  und einen Pseudorapiditätsbereich von 0,05 Einheiten. Die Türme sind auf den Mittelpunkt des Detektors ausgerichtet (vgl. Abb. 3.10). Jeder Turm besteht aus 19 Szintillator und 20 Bleischichten, von jeweils 5 mm Dicke, die in einer Sandwich-Bauweise angeordnet sind. Insgesamt beträgt die Dicke eines Turmes 20 Strahlungslängen  $X_0$ . Hinter den ersten fünf Strahlungslängen befindet sich ein Schauermaximum-Detektor (SMD<sup>17</sup>), der aus einer zweilagigen Proportionaldrahtkammer mit Streifenauslese besteht. Die Auslestreifen sind senkrecht zueinander angeordnet, um eine zweidimensionale Orts- und Intensitätsinformation des Schauers zu erhalten [Bed02]. Das Licht der Szintillatoren wird über Lichtleiter außerhalb des Magneten geführt und dort von Photovervielfachern in Ladungsinformation umgewandelt.

Das EEMC besteht aus insgesamt 720 Türmen, die in 12 Ringen zu je 60 Türmen angeordnet sind. Jeder Turm überdeckt einen azimuthalen Winkel von  $\Delta\phi = 6^\circ$ . In radialer Richtung variiert die Größe, sodass die Pseudorapiditäts-Abdeckung eines Turmes zwischen  $\Delta\eta = 0,057$  und  $0,099$  liegt. Auch beim EEMC sind die Türme so gestaltet, dass ihre Grenzflächen zum Mittelpunkt des Detektors aus-

<sup>17</sup>SMD, Shower Maximum Detektor, (engl.: Schauermaximum-Detektor)

gerichtet sind. Die Türme des EEMC bestehen aus 24 Lagen Szintillator zwischen 23 Lagen Absorber (4,57 mm Blei auf 0,5 mm Stahl laminiert). Die Dicke beträgt somit 21,4 Strahlungslängen  $X_0$ . Hinter der fünften Absorber-Lage befindet sich ein SMD, der eine Ortsinformation über die Intensitätsverteilung im Schauer gibt. Das Licht der Szintillatoren wird mit Lichtleitern zur Rückseite der Magnetendkappe geleitet und dort von Photovervielfachern ausgelesen. Die Photovervielfachersignale von BEMC und EEMC werden von 12-Bit Flash-ADCs digitalisiert und bei jeder Bunchkreuzung ausgelesen.

### 3.1.6. Das Central Trigger Barrel

Das Central Trigger Barrel (CTB) ist ein Detektor aus 240 Szintillatoren, die um die TPC angeordnet sind und einen Pseudorapiditätsbereich von  $-1,0 \leq \eta \leq 1,0$  abdecken. In Strahlrichtung ist das CTB in vier Ringe, zu je 60 Szintillatoren, unterteilt. Die azimuthale Abdeckung beträgt  $360^\circ$ . Jeder Szintillator wird in einen Photovervielfacher ausgelesen, dessen Signal in ein CTB Digitizer Board (CDB)<sup>18</sup> ausgelesen wird. Das CTB gehört zu den schnellen Detektoren und wird deshalb genutzt, um eine Triggerentscheidung zu treffen.

Das CTB ist so kalibriert, dass ein geladenes Teilchen durchschnittlich ein Signal von 5 ADC Kanälen erzeugt. Die Breite dieser Verteilung beträgt ca. 30-40% [War01]. Das Gesamtsignal wird benutzt, um die Multiplizität einer Kollision zu bestimmen.

### 3.1.7. Die Null-Grad-Kalorimeter

Die Null-Grad-Kalorimeter (ZDC)<sup>19</sup> sind hadronische Kalorimeter, die neutrale Spektatoren messen. Sie befinden sich in einem Abstand von 18,25 m vom Zentrum der Wechselwirkungszone, zwischen den Strahlrohren für einlaufenden und auslaufenden Strahl. Die ZDCs befinden sich hinter dem Dipolmagneten, der die Strahlen in der Kollisionszone auf parallele Bahnen lenkt. Dieser lenkt alle geladenen Teilchen und Kernfragmente ab, sodass nur Neutronen (und Photonen) von den ZDCs gemessen werden. Über die Messung der neutralen Spektatoren ist eine Bestimmung der Zentralität einer Kollision möglich [App98].

Des Weiteren messen die ZDCs einzelne Neutronen, die aus der Abregung von Dipol-Riesenresonanzen stammen. Die Riesenresonanzen werden über Austausch von Photonen beim Vorüberfliegen zweier Au-Kerne angeregt. Der Wirkungsquerschnitt für die korrelierte Emission einzelner Neutronen über diesen Prozess

<sup>18</sup>Digitizer Board, (engl.): Digitalisierungseinheit

<sup>19</sup>ZDC, Zero Degree Calorimeter, (engl.): Null-Grad-Kalorimeter.

### 3. Das STAR-Experiment

ist ungefähr so groß wie der Wirkungsquerschnitt für Au+Au Kollisionen [Bal98]. Die ZDCs bestehen aus einem Sandwich aus Wolframplatten und Lagen aus Plastiklichtleitern. Sie haben eine Breite von 10 cm, eine Höhe von 15 cm und eine Länge von 60 cm, dies entspricht  $6 \lambda_i$  (hadronische Wechselwirkungslänge) in Wolfram. Longitudinal sind sie in 3 Module unterteilt, die aus je 27 Wolframplatten und 26 Lichtleiterschichten bestehen [Adl98]. Die Lagen sind unter einem Winkel von  $45^\circ$  relativ zur Strahlachse angeordnet. Die Lichtleiterlagen bestehen aus 200 jeweils 0,5 mm dicken Lichtleitern. Alle Lichtleiter eines Moduls werden gebündelt und in einen Photovervielfacher ausgelesen. Das Signal wird durch Elektronen des Schauers, die in den Lichtleitern Cherenkov-Strahlung erzeugen verursacht. Die Energieauflösung der Kalorimeter für ein Neutron von 100 GeV beträgt etwa 20%, was ausreicht, um einzelne Neutronen nachzuweisen. Die ZDCs haben aufgrund der Schnelligkeit der Signalerzeugung eine sehr gute Zeitauflösung von  $< 200$  ps [Adl01]. Seit der Strahlzeit im Jahr 2001 wird die Zeitinformation genutzt, um die z-Position der Kollision zu bestimmen. Die gemessene Ortsauflösung hat eine Standardabweichung von ca. 3,2 cm nach Slewingskorrektur<sup>20</sup> und 7 cm ohne Korrektur [Gon01].

Die ZDCs werden ebenfalls in ein CDB ausgelesen, wobei die Signale der einzelnen Module sowie eine analoge Summe der drei Module eines ZDC digitalisiert werden. Da die Dynamik der 8-Bit ADCs nicht ausreicht, um das gesamte Spektrum der ZDCs zu erfassen, werden dieselben Signale nach einer Abschwächung um 14 dB digitalisiert.

Das unabgeschwächte Signal wird genutzt, um den unteren Bereich des Spektrums bei dem 1-Neutron Peak gut auflösen zu können. Damit kann eine Triggerschwelle unterhalb des 1-Neutron Peaks gesetzt werden.

## 3.2. Das Triggersystem

Die Aufgabe des Triggersystems besteht in der Reduktion der Kollisionsrate von einigen kHz bei voller Luminosität (2-3 kHz bei Au+Au Kollisionen, 10 kHz bei p+p Kollisionen) auf die Ausleserate der TPC von maximal 100 Hz. Dies passiert auf verschiedenen Triggerebenen, die sich in der Zeit, die jeweils für die Triggerentscheidung zur Verfügung steht, unterscheiden. Diese Triggerebenen werden als Level-0, Level-1, Level-2 und Level-3 Trigger bezeichnet.

Level-0 bis Level-2 Triggerentscheidungen basieren auf den Daten schneller Detektoren, deren Auslesezeit unter 100 ns liegt. Dazu gehören CTB, ZDC, MWC und

---

<sup>20</sup>Slewing ist ein Effekt der bei der Messung der Ankunftszeit eines Photovervielfacherpulses mit einem Diskriminator entsteht, größere Pulse haben eine schneller ansteigende Flanke als kleine Pulse, wodurch ein hoher Puls die Bedingung des Diskriminators schneller erfüllt als ein niedriger Puls.

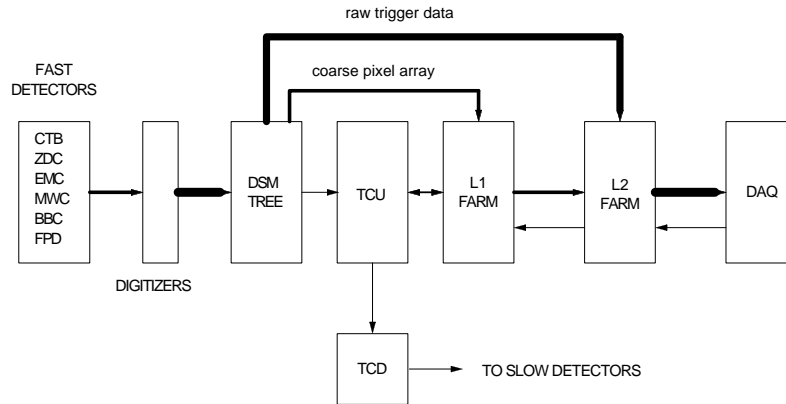


Abbildung 3.11.: Datenfluß des Trigger-Systems (aus [Bie02]).

EMC. Mit der Information dieser Detektoren ist es möglich globale Eigenschaften einer Kollision, wie Multiplizität oder Kollisionsvertexposition zu bestimmen. Darauf basierend wird entschieden, ob die langsameren Detektoren (TPC, FTPC, SVT) ausgelesen werden.

Der Level-3 Trigger unterscheidet sich konzeptionell von den niedrigeren Triggerebenen und wird in Kapitel 4 beschrieben.

### Level-0:

Die schnellen Detektoren werden bei jeder Bunchkreuzung (alle 107 ns) ausgelesen. Die digitalisierten Signale (aus den CDBs oder anderen Digitalisierungseinheiten) werden mit dem nächsten Bunchkreuzungssignal (RHIC Clock<sup>21</sup>) in „Data Storage and Manipulation“ Einheiten (DSM) gespeist. Dort wird das Signal benutzt, um LUTs zu adressieren, die genutzt werden können um ein Pedestal abzuziehen oder Verstärkungskorrekturen durchzuführen. Mit dem folgenden Bunchkreuzungssignal werden die Ergebnisse des Look-Ups in Ringspeicher geladen, die Platz für die Daten von 64k Bunchkreuzungen haben. Gleichzeitig werden die Daten von einem FPGA<sup>22</sup> verarbeitet, der z.B. die einzelnen CTB Signale addiert. Die Daten werden in einer baumförmigen Struktur (vgl. Abb. 3.12)

<sup>21</sup>RHIC stellt ein Signal zur Verfügung, welches auf die Umlauffrequenz der Strahlen synchronisiert ist. Die Frequenz beträgt ca. 28 MHz, somit wird für jede mögliche Bunchkreuzung (ca. alle 35 ns) ein Signal produziert. Jedes dritte dieser Signale gibt die Kreuzung gefüllter Bunches an (vgl. Kapitel 2.1). Dieses Signal dient als „Herzschlag“ für den Trigger, definiert aber auch die Auslesefrequenz der TPC.

<sup>22</sup>Field Programmable Gate Array

### 3. Das STAR-Experiment

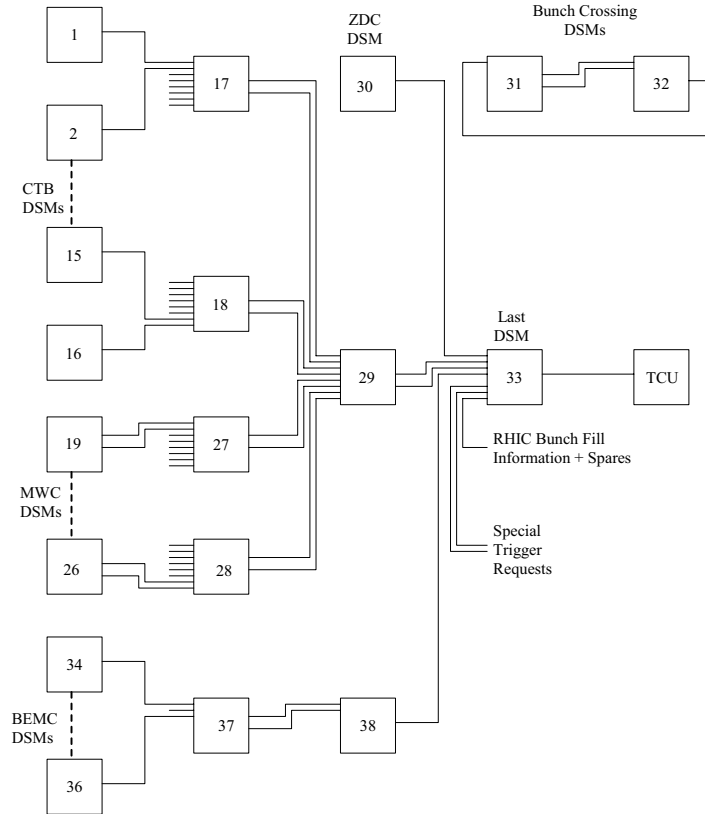


Abbildung 3.12.: Baumstruktur der DSMs für das Jahr 2001 (aus [Bie02]).

verarbeitet. Jede DSM Einheit erhält mit einem Bunchkreuzungssignal neue Daten der vorhergehenden (bzw. Daten der Detektoren, im Fall der ersten Generation) und reduziert diese, bis im letzten DSM ein 12 Bit Wort erzeugt wird, welches das Ereignis klassifiziert. Das Ergebniswort des letzten DSM wird zusammen mit 6 Live-/Busy-Signalen<sup>23</sup> der Detektoren, als 18-Bit Wort, in die Trigger Kontroll Einheit (TCU)<sup>24</sup> gespeist. In der TCU wird dieses 18-Bit Wort als Adresse in einen 16-Bit LUT benutzt, der die Triggerwörter enthält. Die Triggerwörter dienen zur Klassifikation unterschiedlicher Ereignisklassen. Einer Ereignisklasse, z. B. „beide ZDC haben ein Signal über einem bestimmten Schwellenwert“, wird ein Triggerwort zugeordnet. Innerhalb dieser Ereignisklasse kann es Ereignisse mit

<sup>23</sup>Ein Detektor ist Busy, d.h. Beschäftigt, während er ausgelesen wird. Während dieser Zeit darf keine neue Auslese begonnen werden, da sich sonst Daten unterschiedlicher Ereignisse vermischen. Wenn ein Detektor bereit ist ausgelesen zu werden wird er als „Live“, d.h. Lebendig, bezeichnet. Dies trifft zwar im Prinzip für jeden Detektor zu, spielt aber in der Regel nur bei langsamen Detektoren, z. B. der TPC oder dem SVT, eine Rolle.

<sup>24</sup>Trigger Control Unit



Trigger Kommando	Bedeutung
0	kein Trigger
1	clear
2	Master Reset
3	reserviert
4	Physik Trigger
5-7	spezielle Physik Trigger
8-11	Kalibrations Trigger (z. B. Pulsar, Laser, etc.)
12	Konfigurationsauslese der Readout-Karten

Tabelle 3.3.: Bedeutung der verschiedenen Trigger-Kommandos. Genauere Beschreibung ist in [Lin96] zu finden.

unterschiedlichen CTB Signalen geben, d.h. das Ergebniswort des letzten DSM wird an verschiedene Speicherplätze im Triggerwort-LUT zeigen, hier muss dann das vorher definierte Triggerwort stehen. Jede mögliche Adresse des Triggerwort-LUT muss also mit einem Triggerwort gefüllt sein.

Das Triggerwort wird wiederum als Adresse eines LUT benutzt, aus dem das „Action Word“ gewonnen wird. Das *Action Word* besteht aus einer 8-Bit-Detektor-Bitmaske, einem 4-Bit-DAQ-Kommando und einem 4-Bit-Trigger-Kommando. Die Detektor-Bitmaske gibt an, welche Detektoren angesprochen werden sollen. Das DAQ-Kommando ermöglicht das Verhalten auf der Datenerfassungsebene schon auf der untersten Triggerebene zu steuern. So kann festgelegt werden, dass ein Detektor getriggert wird, seine Daten aber im DAQ-System als Kalibrationsdaten interpretiert werden sollen.

Das Trigger-Kommando definiert die Art des Triggers und die erwartete Reaktion der Detektoren. Definitionen der Trigger-Kommandos sind in Tabelle 3.3 gegeben. Das TCU besitzt eine Prescale-Einheit, die aus Zählern besteht, welche die Häufigkeit des Auftretens verschiedener Triggerwörter zählen. Damit kann die Häufigkeit von Triggerwörtern herunterskaliert werden.

Das TCU generiert für jeden gültigen Trigger ein Token<sup>25</sup>, welches ein Ereignis auf dem Weg durch das Trigger- und Datenerfassungssystem bis zur Analyse begleitet. Da sich zu einem Zeitpunkt mehrere Ereignisse im Trigger- und DAQ-System befinden können, werden die Token benutzt, um diese eindeutig zu kennzeichnen. Das Token ist eine 12 Bit Zahl, womit es 4096 verschiedene Token gibt.

Ist ein Token vergeben, kann es erst wiederverwendet werden, wenn alle beteiligten Systeme, alle Datenstrukturen die mit diesem Token assoziiert werden gelöscht haben und explizit das Token freigegeben haben (vgl. auch DAQ-Protokoll).

Sollen Detektoren für ein Event ausgelesen werden, schickt das TCU das *Action Word*, das Triggerwort und das Token zu den „Trigger Clock Distribution“-Modulen (TCD). Jeder Detektor hat ein eigenes TCD, welches für jede Bunch-

<sup>25</sup>Token, (engl.): Merkmal, Zeichen, Los, Münze.

### 3. Das STAR-Experiment

kreuzung das *Action Word* decodiert. Wenn die Detektor Bitmaske für einen Detektor zeigt, dass er an diesem Ereignis beteiligt werden soll, übernimmt ein speziell auf den jeweiligen Detektor abgestimmtes Modul die Aufgabe, dem Trigger Kommando entsprechend zu reagieren (z.B. Auslese starten, Pulser feuern, usw.). Jedes TCD besitzt noch einen Eingang für ein DAQ-Busy Signal, welches mit dem intern generierten Detektor-Busy Signal über ein ODER verknüpft ist. Das resultierende Busy-Signal wird an die TCU weitergegeben und bildet das oben erwähnten Detektor-Live-/Busy-Signal. Dies sorgt dafür, dass die Auslese eines Detektors nicht gestartet werden kann, wenn das DAQ-System nicht in der Lage ist die Daten zu verarbeiten.

Die Zeit, die zwischen einer Kollision und dem Beginn der Auslese der Detektoren vergeht, beträgt ca.  $1.5 \mu\text{s}$ . Im Fall der TPC (Driftzeit ca.  $40 \mu\text{s}$ ) beträgt der Verlust an Daten durch diese Zeitverzögerung  $\approx 4\%$ .

#### Level-1 und Level-2

Nachdem die Auslese der Detektoren gestartet ist, dauert es bis zu  $100 \mu\text{s}$  bis die Auslese beendet ist (z. B.  $40 \mu\text{s}$  bei der TPC). Nach der Auslese beginnt die Digitalisierung der Daten, was einige ms in Anspruch nimmt ( $10 \text{ ms}$  für die TPC). Die Zeiten, die für eine Level-1 bzw. Level-2 Entscheidung zur Verfügung stehen orientieren sich grob an diesen Zeitdomänen. Level-1 sollte schnell genug sein, während des Auslesevorgangs zu einer Entscheidung zu kommen, während Level-2 eine Entscheidung treffen soll bevor die Daten ans DAQ-System geschickt werden.

Level-1 steht das so genannte Coarse Pixel Array (CPA) zur Verfügung, welches die Summen größerer Bereiche der Detektoren enthält (z. B. CTB Information in Bereichen mit  $\Delta\eta = 0.5$  und  $\Delta\phi = \pi/2$ , also jeweils ein Viertel eines der 4 Ringe des CTB). Damit können grobe räumliche Asymmetrien in der Multiplizitätsverteilung festgestellt werden, wie sie z. B. bei Strahl-Restgas Kollisionen auftreten können. Die Funktionalität des Level-1-Triggers ist auf Motorola 2306 VME CPUs implementiert.

Wenn ein Ereignis nicht von Level-1 verworfen wurde, wird es von Level-2 analysiert, wobei alle Rohdaten der Triggerdetektoren zur Verfügung stehen. Bisher (d. h. für die 2000 und 2001 Datennahmen) war Level-2 auch auf einer MVME 2306 CPU implementiert, hatte aber nur die Aufgabe die Triggerdaten zu formatieren. Momentan gibt es Überlegungen, Level-2 auf einer CPU-Farm (z. B. Pentium oder ALPHA) unter Linux zu implementieren [Mil02].

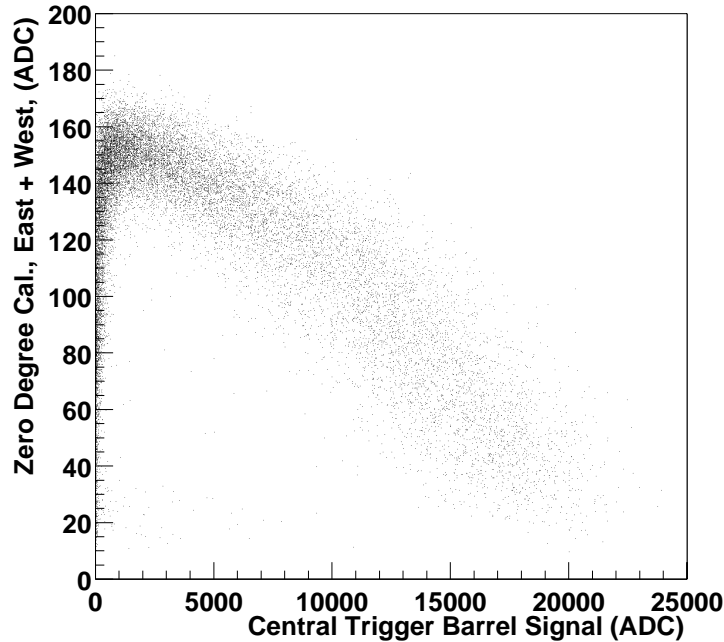


Abbildung 3.13.: ZDC-Signal gegen CTB-Signal (aus [Adl02a]).

### Zentralitätsdefinition

Während der Strahlzeiten im Jahr 2000 und 2001 wurden nur die Möglichkeiten des Level-0 Trigger genutzt.

Die ZDCs wurden fast immer als Basistrigger verwendet, da sie praktisch 100% aller Au+Au Kollisionen identifizieren konnten. Darüber hinaus wurde mit diesem Trigger die korrelierte Dipol-Riesenresonanz-Abregung gemessen, die ca. 35% aller getriggerten Ereignisse ausmachte. Dieser Trigger wurde als *Minimum Bias*-Trigger bezeichnet, da er alle (hadronischen) Au-Au-Kollisionen beinhaltet.

Das CTB wurde eingesetzt, um diesen Trigger auf höhere Multiplizitäten einzuschränken.

Es gab 2 Sorten von zentralen Triggerdefinitionen:

- Multiplizitätstrigger:  
Hier wurde mit dem CTB die gewünschte Multiplizität ausgewählt.
- ZDC-Trigger:  
Hier wurde mit dem CTB eine Mindestmultiplizität ausgewählt, sodass man in den Bereich gelangt, in dem das Signal der ZDCs mit höherer Multipli-

### 3. Das STAR-Experiment

zität kleiner wird (vgl. Abb. 3.13), die Zentralität wurde dann aber über das Signal der ZDCs bestimmt.

Im Jahr 2000 wurde während der Datennahme nur die erste Möglichkeit gewählt, um einen semizentralen Trigger zu implementieren. Für die Datenanalyse wurde meist eine Zentralitätsdefinition über das ZDC-Signal benutzt. Im Jahr 2001 wurden auch Datensätze mit einem ZDC-Trigger genommen.

## 3.3. Die Datenerfassung

Die verschiedenen Detektoren in STAR produzieren über 100 MB an Daten pro Ereignis, die TPC liefert mit ca. 80 MB den größten Beitrag. Bei der maximalen Ausleserate von 100 Hz muss das Datenerfassungssystem also eine Datenrate von  $\approx 10$  GB/s verarbeiten. Dies ist nur durch eine starke Parallelisierung möglich. Das STAR Datenerfassungssystem besteht aus insgesamt über 500 CPUs, die in funktionelle Einheiten gegliedert sind. Die meisten CPUs sind auf der hochparallelierten Empfangsseite des DAQ-Systems zu finden. Auf der Ausgangsseite befindet sich eine Einheit, die alle Datenkontributionen eines Ereignisses sammelt und per Gigabit-Ethernet-Verbindung zum RHIC-Rechenzentrum (RCF) schickt, wo sie auf Band geschrieben werden.

Alle Einheiten des DAQ-Systems sind über ein schnelles Netzwerk (Myrinet, siehe Kap. 4.13.2) miteinander verbunden.

### Receiver Boards (RB):

Die Rohdaten werden über Lichtleiter von den *Readout*-Karten der Detektoren zu mehreren *Receiver Boards*<sup>26</sup> (144 für die TPC, 20 für die FTPCs und 24 für den SVT) transferiert. Die *Receiver Boards* sind 9U VME Einschübe, die in so genannten *Sector Crates* gebündelt sind. Im Fall der TPC werden 2 physikalische Sektoren in ein *Sector Crate* ausgelesen. Bei den FTPCs wird jeweils eine FTPC, und bei dem SVT die Hälfte des Detektors in je ein *Crate* ausgelesen. Es gibt somit 12 *Crates* für die TPC und je 2 für FTPC und SVT.

Die *Receiver Boards* besitzen je 3 PMC<sup>27</sup> Steckkarten, die als Mezzaninekarten bezeichnet werden. Diese besitzen für STAR entworfene ASIC-Bausteine<sup>28</sup>, deren Aufgabe die 10-zu-8-Bit-Kompression und die Nullunterdrückung der Rohdaten ist. Durch die Nullunterdrückung wird nur noch der Teil der Daten weitergeleitet,

<sup>26</sup>Receiver Board, (engl.): Empfangskarte.

<sup>27</sup>Abk. für PCI Mezzanine Card, gebräuchliches Steckkartenformat für VME Einschübe.

<sup>28</sup>Abk.: Application Specific Integrated Circuit

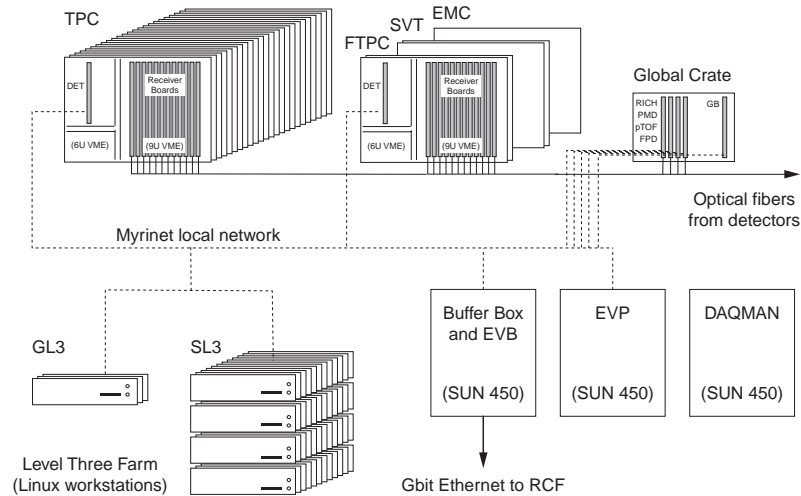


Abbildung 3.14.: Schematischer Aufbau des Datenerfassungssystems (aus [Lan02a]).

in dem ein (über dem Rauschen liegendes) Signal gemessen wird. Auf den Mezzaninekarten befindet sich eine i960 CPU, die zur Datenformatierung und zum Auffinden von Clustern benutzt wird. Eine genauere Beschreibung der Mezzaninekarten befindet sich in Kapitel 4.

Die Datenreduktion durch Nullunterdrückung ist abhängig von der „Belegung“ eines Detektors, womit das Verhältnis von Pixeln mit Signal, zur Gesamtzahl der Pixel bezeichnet wird. Typischerweise ist die Belegung der TPC für zentrale Au+Au Kollisionen  $< 10\%$ , womit der Datenbeitrag der TPC nach Nullunterdrückung noch ca. 6 MB beträgt.

### Detector Broker (DET):

Jedes *Sector Crate* wird durch einen *Detector Broker* kontrolliert, der die Kommunikation und Datentransfers zwischen den *Receiver Boards* und den anderen DAQ Einheiten über Myrinet koordiniert. Im Fall von Detektoren mit geringem Datenvolumen, z. B. RICH, werden die Daten über eine private Punkt-zu-Punkt Fast-Ethernet-Verbindung direkt an die DET geschickt. Die *Detector Broker* der verschiedenen Detektoren unterscheiden sich somit in der Implementation, stellen aber nach außen hin eine Standard-Schnittstelle für die anderen DAQ-Einheiten dar.

### 3. Das STAR-Experiment

#### **Trigger-DAQ-Interface (TDI)**

Das *Trigger-DAQ-Interface* vermittelt die Kommunikation zwischen den Prozessoren des Trigger-Systems und dem DAQ-System. Zum einen wird über das TDI angekündigt, dass ein Ereignis getriggert wurde, zum anderen werden die Daten der Triggerdetektoren CTB, MWC, ZDC und die in den DSM verarbeiteten EMC-Daten über das TDI ans DAQ-System geschickt. Diese Daten beinhalten alle Informationen, die auf den Triggerebenen Level-0 bis Level-2 benutzt wurden, um Entscheidungen zu treffen.

#### **Global Broker (GB)**

Der Global Broker ist die zentrale Steuerungseinheit des DAQ-Systems. Er erhält zum einen von der Seite des Trigger-Systems die Information, welche Detektoren Daten liefern werden, zum anderen kommuniziert der GB mit den DET und stellt sicher, dass auch alle Daten zu einem Ereignis angekommen sind. Des Weiteren führt er Buch über den Zustand jedes Ereignisses, welches das DAQ-System durchläuft. Der GB, DET und TDI sind auf MVME Prozessoren implementiert.

#### **Event Builder (EVB)**

Sind alle Daten der Detektoren auf die DET transferiert, übergibt der GB die Kontrolle an den *Event Builder*, der für die Kollektion der Daten von den DET, in einem speicherbaren Format verantwortlich ist.

Der EVB ist auf einem SUN Enterprise 450 Server implementiert, der so genannten Buffer Box, da auf dieser Maschine 140 GB Plattenplatz zur Verfügung steht, auf dem Daten bis zum Transfer zu RCF zwischengespeichert werden können.

#### **HPSS**

HPSS (High Performance Storage System) ist das System mit dem im RHIC-Rechenzentrum die Daten der Experimente gespeichert werden. Es gehört nicht zum STAR DAQ-System, limitiert aber dessen Bandbreite. Für STAR ist eine Bandbreite von dauerhaft 30 MB/s zum Speichern von Daten auf Band vorgesehen. Im Jahr 2001 betrug die Bandbreite bis zu 50 MB/s.

**Level-3 (GL3,SL3)**

In dem schematischen DAQ-Diagramm in Abbildung 3.14 befinden sich, als GL3 und SL3 bezeichnete Einheiten. Diese gehören zu dem Level-3-Trigger-System, welches in das DAQ-System integriert ist. Eine genaue Beschreibung des Level-3-Trigger-Systems befindet sich in Kapitel 4.

**Eventpool (EVP)**

Ein Bruchteil der Daten, die das DAQ-System passieren, werden am Experiment lokal gespeichert. Dies hat den Zweck eine schnelle Qualitätskontrolle der Daten durchführen zu können. So kann schnell festgestellt werden, ob ein Teil des Detektors keine oder fehlerhafte Daten liefert.

**Daqman**

In Abbildung 3.14 ist eine Einheit „Daqman“ (von DAQ Manager) eingezeichnet. Dies ist keine funktionelle Einheit des DAQ-Systems, sondern dient als Server für alle DAQ-Software und Betriebssysteme der VME Prozessoren.

**3.4. Run Control**

Um Daten nehmen zu können ist es notwendig, dass sich die beteiligten Systeme (d. h. Detektoren, DAQ-Einheiten, Trigger-Prozessoren, etc.) in bestimmten Zuständen befinden. Zu Beginn eines Runs<sup>29</sup> muss den Detektoren mitgeteilt werden, dass Trigger zu erwarten sind. Dem DAQ-System muss mitgeteilt werden, dass Daten der Detektoren zu erwarten sind, etc. Zusätzlich müssen Vorgänge synchronisiert werden: das Trigger-System darf keine Trigger an die Detektoren senden, bevor deren Elektronik in einem Zustand ist, die Detektoren auslesen zu können.

Das dafür verantwortliche System wird *Run Control* (RC) genannt. Die RC kommuniziert mit allen Systemen, führt Buch über den jeweiligen Zustand eines Systems und teilt den Systemen mit, wenn eine Änderung ihres Zustandes nötig ist. Damit ist es möglich, die Datennahme mit dem STAR Detektor zentral zu steuern.

Jedes System muss zu jedem Zeitpunkt, zu dem es mit der RC verbunden ist,

---

<sup>29</sup>Bezeichnung für die Periode während der Daten genommen werden.

### 3. Das STAR-Experiment

einen definierten Zustand haben, der der RC mitgeteilt wird. Die Zustände „READY“, „RUNNING“ und „PAUSED“ müssen implementiert sein. „READY“ gibt an, dass ein System bereit ist konfiguriert zu werden, bzw. für den Beginn eines Runs bereit ist (sofern keine Konfiguration nötig ist). Ein System ist in dem Zustand „RUNNING“, wenn es Daten verarbeiten kann. „PAUSED“ gibt den Zustand an, wenn ein Run unterbrochen wird, um später weitergeführt zu werden. Für ein Trigger-System bedeutet „PAUSED“, dass keine Trigger versendet werden dürfen, für alle anderen Systeme besteht in der Regel kein Unterschied zwischen dem Zustand „PAUSED“ und „RUNNING“.

Weiterhin gibt es den Zustand „PRESENT“, den ein System vor seiner erstmaligen Konfiguration einnimmt, und Zwischenzustände, die den Übergang zwischen zwei Zuständen bezeichnen. Letztere werden durch ein angehängtes `_W` (von waiting (engl.): warten) an den vorherigen Zustand gekennzeichnet, z. B. „READY\_W“.

Die RC-Kommandos, die ein System verarbeiten können muss, sind im folgenden erklärt:

#### REBOOT:

Als Reaktion auf ein REBOOT Kommando sollen alle Systeme neu gestartet werden, oder zumindest einen „sauberen“ Zustand annehmen. Für die VME Prozessoren bedeutet dies einen Neustart („*Boo-ten*“) des Systems, für andere Einheiten bedeutet es in der Regel einen Neustart der beteiligten Prozesse.

#### SEND\_CONFIG:

Dieses Kommando startet die Konfiguration der Systeme, die Nachricht enthält den Namen einer Konfigurationsdatei, die von dem System eingelesen wird. Alle Konfigurationsdateien werden zentral verwaltet. Das SEND\_CONFIG Kommando wird vor jedem Start eines Runs versendet.

#### RUN\_START:

Nachdem alle Systeme konfiguriert sind folgt das RUN\_START Kommando und teilt den Systemen mit, dass sie Daten zu erwarten haben.

#### RUN\_STOP:

Dieses Kommando teilt den Systemen mit, dass ein Run beendet ist. Dies ist nützlich, wenn ein System z. B. Zähler führt, die am Ende eines Run gespeichert werden sollen.



#### RUN\_PAUSE:

Dies ermöglicht einen Run vorübergehend anzuhalten. Wie oben erwähnt, hat dieses Kommando nur für Trigger-Systeme eine Bedeutung, die nach Erhalt diese Kommandos keine Trigger mehr versenden dürfen.

#### RUN\_RESUME:

Damit wird ein angehaltener Run fortgesetzt.

#### QUERY\_TOKENS:

Hiermit wird angefragt wieviele und welche Token ein System zu einem Zeitpunkt bearbeitet. Dieses Kommando hat praktisch nur bei der Fehlersuche Bedeutung.

#### FLUSH\_TOKENS:

Dieses Kommando teilt einem System mit, dass es sich in einen möglichst „sauberen“ Grundzustand bringen soll. Momentan im System bearbeitete Token werden gelöscht. Dieses Kommando wird benutzt wenn Fehler im System aufgetreten sind. Es stellt eine abgeschwächte Version des REBOOT Kommandos dar. Während dort der beteiligte Prozess neu gestartet wird, versucht hier der Prozess selber die Fehler zu beseitigen.

Alle oben aufgeführten Kommandos werden von der RC an die beteiligten Prozesse gesendet. Mit Ausnahme des REBOOT Kommandos müssen alle Kommandos beantwortet werden, um eine erfolgreiche Ausführung und Beendigung der geforderten Aktion zu bestätigen.

Die folgenden Kommandos können von Prozessen unaufgefordert an die RC gesandt:

#### FORCE\_STOPRUN:

Beendet den Run, weil ein Prozess ein Problem hat. Ein Argument in diesem Kommando unterscheidet zwei Versionen:

- Der Run soll sofort gestoppt werden, da ein Problem aufgetreten ist, das dem System nicht mehr ermöglicht fehlerfrei Daten zu verarbeiten.
- Eine Empfehlung zum Anhalten des Runs, wobei die Entscheidung über den Stop, der RC überlassen bleibt.

### 3. Das STAR-Experiment

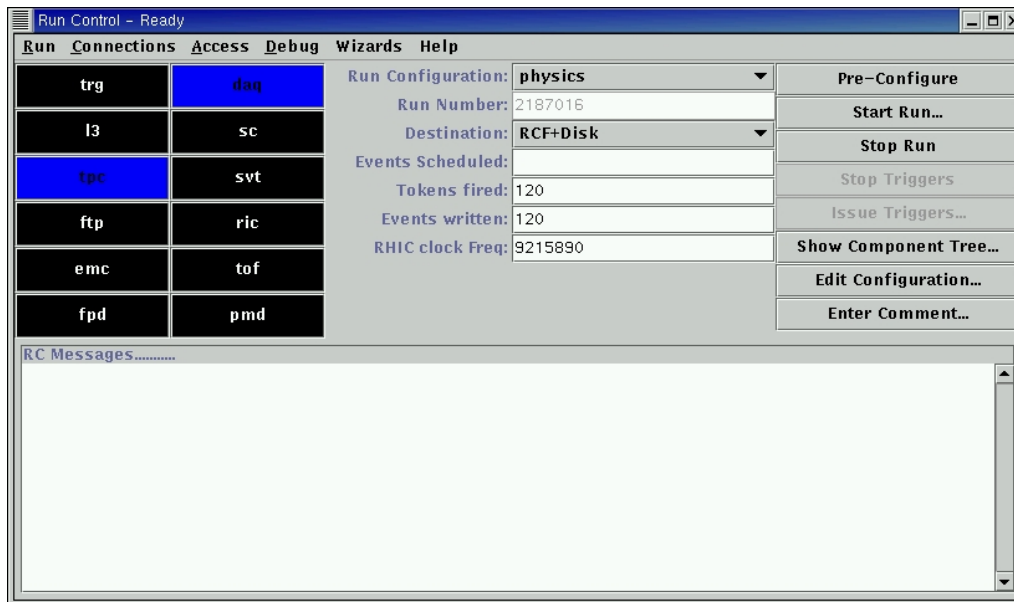


Abbildung 3.15.: Die Benutzerschnittstelle der *Run Control*.

#### FORCE\_PAUSERUN:

Diese Kommando erzwingt einen *Paused* Zustand. Ein Beispiel für den Einsatz diese Kommandos ist der Fall, dass das Triggersystem die Synchronisation mit dem Bunchkreuzungssignal verloren hat (vgl. Kapitel 3.2).

#### TRIGGERS\_SENT:

Dies wird nur von der Trigger CPU benutzt, um der RC (und damit dem Benutzer) mitzuteilen, dass die gewünschte Anzahl von Triggern genommen wurden.

### Architektur

Die *Run Control* gliedert sich in die Benutzerschnittstelle und das zugrundeliegende Steuerungsprogramm (*Handler*). Die Benutzerschnittstelle (*GUI*)<sup>30</sup> (vgl. Abb. 3.15) bietet eine graphische Bedienoberfläche, die dem Benutzer ermöglicht:

- die Konfiguration aller Systeme festzulegen,

<sup>30</sup>GUI, Graphical User Interface, (engl.): Graphische Benutzerschnittstelle.

- einen Run zu Starten, zu Stoppen oder zu Unterbrechen,
- die Parameter eines Runs zu kontrollieren, z. B. Runnummer, Art des Run (Kalibrationsrun, Physikrun, Pedestalrun).

Der *Handler* kommuniziert mit allen Systemen, wozu er Ports zur Verfügung stellt, zu denen die Systeme eine Verbindung über Ethernet aufbauen, wenn sie gestartet werden. Dadurch weiß der *Handler* welche Systeme vorhanden sind. Das *GUI* teilt dem *Handler* alle Informationen, die eingegeben wurden mit, und der *Handler* ergreift die nötigen Schritte. Bei Änderung der Konfigurationen im *GUI*, werden diese dem *Handler* mitgeteilt, der daraufhin Konfigurationsdateien für alle Systeme erstellt. Wird auf dem *GUI* ein Run gestartet, wird dies an den *Handler* weitergeleitet, der diesen Befehl in Nachrichten an alle beteiligten Systeme umsetzt und versendet. Im Gegenzug werden Änderungen im System dem *GUI* mitgeteilt, der Benutzer ist somit über eventuell auftretende Probleme informiert.

### 3. *Das STAR-Experiment*

# 4. Das Level-3-Trigger-System

## 4.1. Motivation

In Kapitel 3.3 wurde beschrieben wie die Bandbreite, mit der bei STAR, Daten auf Datenträger gespeichert werden können, durch das HPSS-System auf ca. 30 MB/s limitiert ist. Damit besteht eine Diskrepanz zwischen der Datenmenge, die der Detektor liefern kann, und der Datenmenge, die gespeichert werden kann. Bei einer typischen Ereignisgröße von 6-10 MB für eine zentrale Au+Au Kollision ist die Rate, mit der Ereignisse gespeichert werden können, auf  $3\text{-}5\text{ s}^{-1}$  beschränkt. Bei einer maximalen Ausleserate der langsamen Detektoren von  $100\text{ s}^{-1}$ , bedeutet dies, dass nur einige Prozent der zur Verfügung stehenden Daten gespeichert und analysiert werden können.

Der Schwerpunkt des STAR-Experimentes liegt zwar in der Messung von Observablen, die in jedem Ereignis zu messen sind, z.B.  $\pi$ -, K-, p-Spektren, elliptischer Fluss dieser Teilchen usw. Es besteht jedoch auch großes Interesse an der Messung von seltenen Teilchen, so genannten „Rare Probes“ (engl.: seltene Proben), wie z. B. dem  $J/\psi$ ,  $\Upsilon$  und dem  ${}^4\text{He}$ , welche selten produziert werden, bzw. nur selten in messbare Kanäle zerfallen. Diese Messungen werden aber erst mit einer Statistik im Bereich von 10-100 Millionen Ereignissen möglich, was bei einer aufgezeichneten Ereignisrate von einigen  $\text{s}^{-1}$  nicht erreichbar ist.

Um trotz der Bandbreitenbeschränkung von HPSS möglichst alle verfügbaren Ereignisse für eine physikalische Analyse nutzen zu können, kann man zwei Strategien verfolgen:

- Datenkompression:  
Hierbei ist die Idee, die verfügbaren Daten auf eine geringere Größe zu reduzieren, sodass bei gleicher Bandbreite mehr Ereignisse auf Datenträger geschrieben werden können. Zum einen gab es Ansätze Rohdaten zu komprimieren [Ber98a][Ber02], was in STAR aber nicht weiterverfolgt wurde. Zum anderen kann man Ereignisse in Echtzeit rekonstruieren, d. h. Cluster oder auch Spuren rekonstruieren und nur diese abspeichern. Dies erlaubt eine Datenreduktion der TPC-Daten um einen Faktor 5 beim Speichern

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

von Clustern oder einem Faktor 20, wenn ausschließlich Spurinformatoren gespeichert werden (vergl. Kapitel 6.2).

- Ereignisselektion (Triggern):  
Hier werden die zusätzlich zur Verfügung stehenden Informationen der langsamen Detektoren genutzt um eine Triggerentscheidung zu fällen. Dies geschieht, indem die Ereignisse in Echtzeit rekonstruiert werden und basierend auf den rekonstruierten Teilchenspuren nach Signaturen interessanter Physik gesucht wird.  
Im Detail bedeutet dies, dass Cluster rekonstruiert werden, welche dann zu Spuren verbunden werden. Die Spuren beinhalten Informationen über den Impuls, die Flugrichtung, spezifische Ionisation und Ladung eines Teilchens. Mit diesen Informationen kann dann das Vorhandensein seltener Teilchen oder Zerfälle festgestellt werden (im Prinzip ist natürlich jede Art von Analyse denkbar, die auf den genannten Informationen basiert). Damit wird die Entscheidung getroffen, ob ein Ereignis auf Datenträger gespeichert oder verworfen wird. Dieser Ansatz macht nur Sinn, wenn der Entscheidungsalgorithmus nur bei einem kleinen Teil der analysierten Ereignisse eine positive Entscheidung trifft, sodass die Datenspeicherbandbreite nicht gesättigt wird.  
Da die Triggerentscheidung von einem Software-Algorithmus getroffen wird, wird dies auch als Software-Trigger bezeichnet, oder in Anlehnung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Trigger-Level als Level-3 Trigger (oder allgemeiner als High-Level-Trigger).

Zu dem Zeitpunkt, als der Vorschlag für das STAR Level-3 Trigger System [Ber98b] vorgestellt wurde, rechnete man mit einer höheren Multiplizität der Au+Au Kollisionen an RHIC, was in Simulationen zu einer Rohdatengröße von 20 MB pro Ereignis führte. Zusammen mit dem ursprünglich geplanten Wert für die Speicherbandbreite von 20 MB/s für jedes Experiment, ergab sich für den Fall eines mit  $100 \text{ s}^{-1}$  laufenden Level-3 Triggers, ein Gewinn eines Faktors 100 in der Anzahl analysierbarer Ereignisse. Dieser hohe Faktor, im Vergleich zu dem vergleichsweise geringen Gewinn durch Datenkompression, war die Motivation ein Level-3-Trigger-System in STAR aufzubauen.

## 4.2. Architektur

Um von den Rohdaten zu einer Level-3 Triggerentscheidung zu gelangen, müssen die in Tabelle 4.1 dargestellten Schritte durchlaufen werden. Zunächst müssen

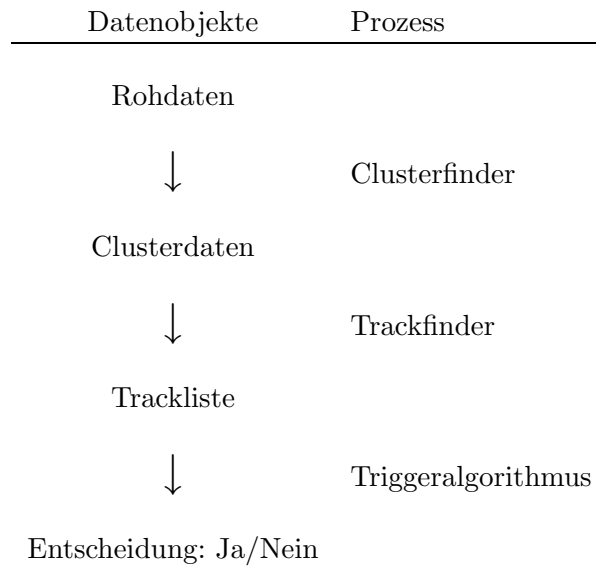


Tabelle 4.1.: Die Arbeitsschritte die vom Level-3 System geleistet werden müssen. Prozesse und die von ihnen verarbeiteten Datenobjekte sind getrennt dargestellt.

aus den Rohdaten die Cluster, d. h. die in der TPC<sup>1</sup> hinterlassenen Spurpunkte rekonstruiert werden. Diese Spurpunkte werden vom *Trackfinder* zu Spuren verbunden. Die einer Spur zugeordneten Parameter werden in einer Liste gespeichert.

Der Instanz, welche die Triggerentscheidung trifft, steht diese Trackliste und zusätzliche Informationen, wie die Ergebnisse der niederen Triggerebenen, Daten der Triggerdetektoren etc., zur Verfügung. Zusätzlich zu den Triggeralgorithmen ist eine genaue Buchführung über Triggerentscheidungen und Zahl der verarbeiteten Ereignisse notwendig, um später Triggereffizienzen und Wirkungsquerschnitte der gemessenen Prozesse rekonstruieren zu können. Deshalb sollte diese Entscheidungsinstanz ein Programm sein, welches diese Buchführung automatisch erledigt und dabei eine klar definierte Schnittstelle für Triggeralgorithmen bereitstellt, sodass der Benutzer, d. h. Autor eines Triggeralgorithmus, sich nur um den eigentlichen Algorithmus kümmern muss.

In Abbildung 4.1 ist der Fluss der Daten und die Aufteilung der verschiedenen Arbeitsschritte auf Prozessoren gezeigt. Der Detektor, in diesem Fall die TPC, liefert Daten aus 24 Sektoren (vgl. Kapitel 3.1.1), die in 12 *Sector Crates* ausgelesen werden (vgl. Kapitel 3.3). Je zwei zusammengefasste Sektoren werden

<sup>1</sup>Dasselbe gilt auch für andere Detektoren, insbesondere den SVT und die FTPC, zur Verdeutlichung der Prinzipien soll aber zunächst nur die TPC besprochen werden.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

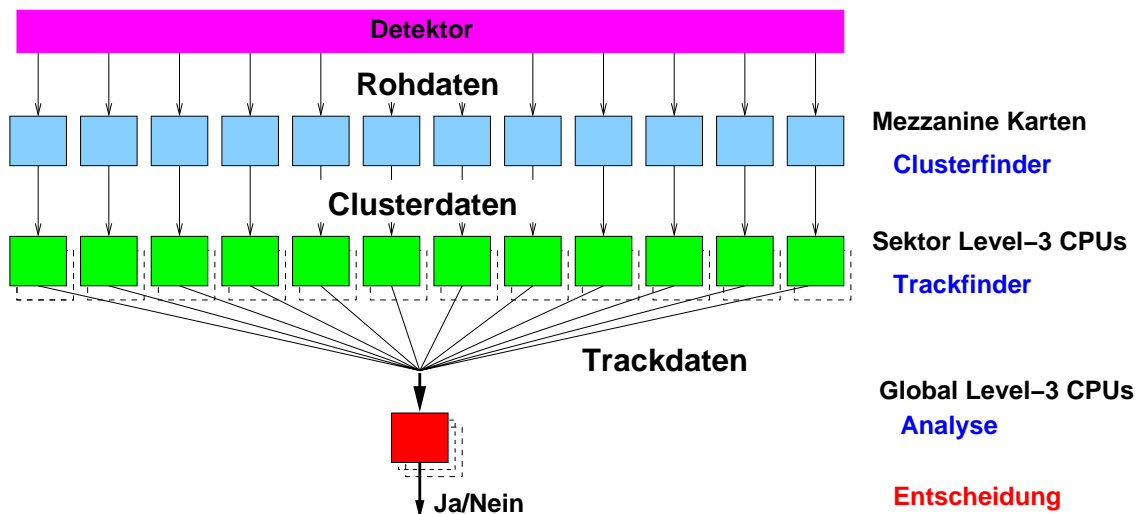


Abbildung 4.1.: Schematische Darstellung des Datenflusses aus den 12 TPC Supersektoren in die 12 *Sector Crates*, jeweils 12 zugeordneten SL3 CPUs (gestrichelt sind weitere „Generationen“ von SL3 CPUs angedeutet) und die Konzentration in eine GL3 CPU (gestrichelt sind weitere Instanzen angedeutet).

auch als Supersektor bezeichnet. In den *Sector Crates* befinden sich die *Receiver Boards* mit den Mezzaninekarten, auf deren i960-Prozessoren der Clusterfinder läuft.

Jedem *Sector Crate* ist ein Prozessor zugeordnet, der die Clusterdaten eines Supersektors empfängt und auf dem der *Trackfinder* läuft. Da dieser Teil eine feste Sektor-Zuordnung hat, werden diese Prozessoren als Sektor-Level-3-Prozessoren (SL3) bezeichnet. Jedem Sektor stehen mehrere SL3 zur Verfügung, die Clusterdaten mehrerer Ereignisse können so parallel verarbeitet werden. Die erzeugten Trackdaten stehen also zunächst nur sektorweise zur Verfügung.

Haben alle SL3 die Bearbeitung eines Ereignisses abgeschlossen, senden sie die Trackdaten an einen einzelnen Prozessor. Dieser setzt die Beiträge der verschiedenen Sektoren zusammensetzt und erstellt eine zusammenhängende Liste aller TPC Spuren, welche dem Triggeralgorithmus, der auf derselben CPU läuft, bereitsteht. Da dieser Prozessor alle Beiträge eines Ereignisses sammelt, wird er Global-Level-3 (GL3) genannt.

Die Triggerentscheidung wird vom GL3 an den *Global Broker* (vgl. Kapitel 3.3) geschickt, der bei einer positiven Entscheidung, die Kontrolle an den *Event Builder* übergibt. Soll ein Ereignis verworfen werden, schickt der GB allen beteiligten Systemen den Befehl zum Löschen aller Daten dieses Ereignisses.

Ein Bruchteil der Daten, die auf dem GL3 zur Verfügung stehen, werden auf



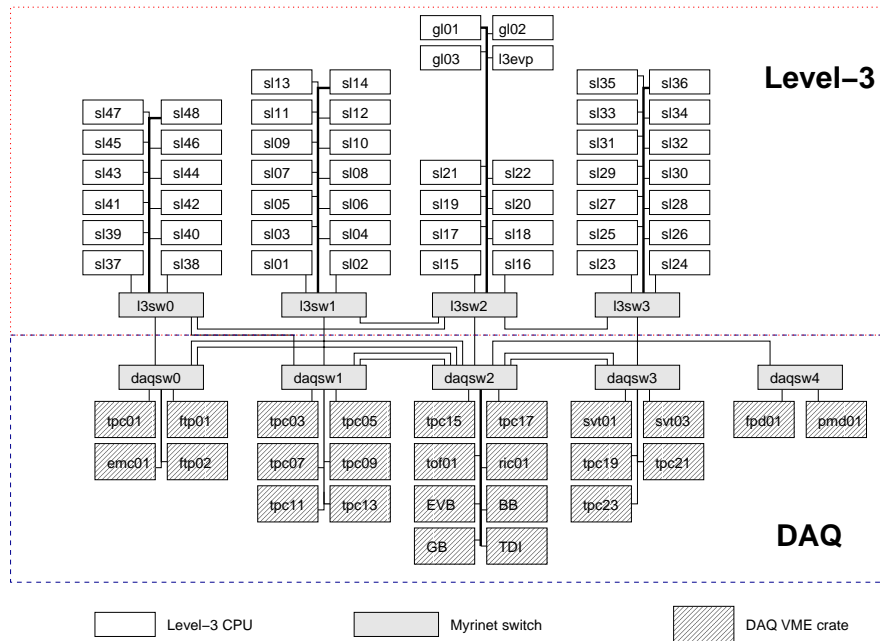


Abbildung 4.2.: Level-3 und DAQ-Systeme inklusive Netzwerkstruktur.

einem „Eventpool“ (L3EVP) gespeichert. Dieser empfängt die Daten vom GL3 und stellt sie dem Level-3-*Eventdisplay* oder anderen Prozessen zur Verfügung.

In Abbildung 4.2 ist das DAQ und Level-3 System im Ausbau des Jahres 2001 gezeigt. Auf der Level-3 Seite entspricht jeder Kasten einem Prozessor, auf der DAQ Seite einem *Sector Crate*. Alle Einheiten sind mit einem schnellen Netzwerk (Myrinet, vgl. Kapitel 4.13) verbunden, welches switchbasiert ist (l3sw0-3, daqsw0-4). Auf der DAQ-Seite sind *Sector Crates* für alle im Jahr 2001 installierten Detektoren gezeigt, während nur TPC, SVT und FTFC Daten für Level-3 lieferten (vgl. Kapitel 4.16).

### 4.3. Receiver Boards (RB)

Die *Receiver Board* empfangen die Rohdaten der TPC. Je 12 sind in einem *Sector Crate* zusammengefasst und werden von einem DET-Prozessor verwaltet (s. Kap. 3.3).

Die Komponenten eines RB sind in Abbildung 4.3 gezeigt. Ein RB trägt drei Mezzaninekarten, einen Demultiplexer, der die ankommenden Daten auf die insgesamt 18 ASICs (s. u.) der drei Mezzaninekarten verteilt und eine VME-PCI-

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

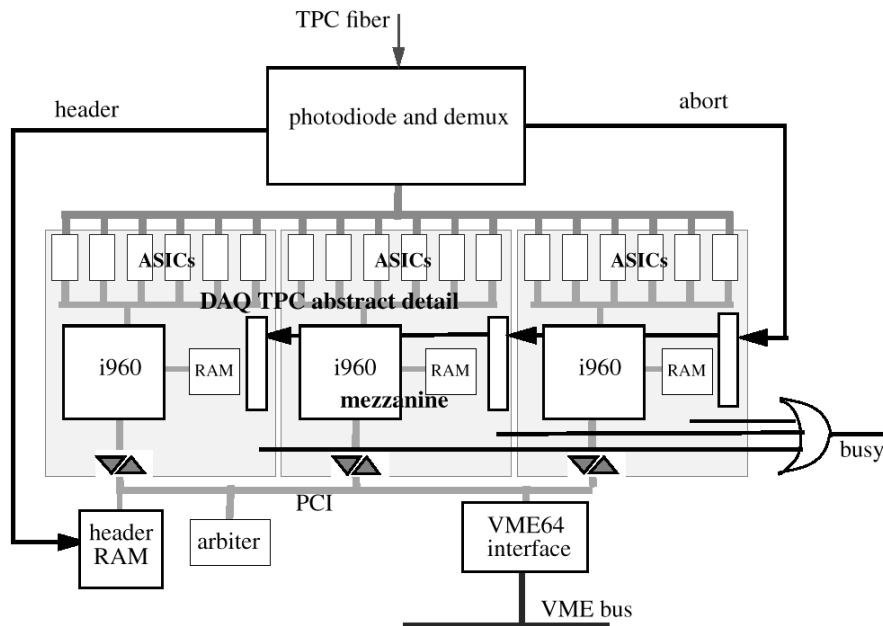


Abbildung 4.3.: Schematischer Aufbau eines DAQ *Receiver Board* (aus [Lan02a]).

Schnittstelle, welche die Mezzaninekarten an den VME-Bus (und somit den DET) anbindet.

##### 4.3.1. Mezzaninekarte

Jede Mezzaninekarte besteht im Wesentlichen aus sechs ASICs, einer i960-CPU und 4 MB dual-ported VRAM. Die ASICs sind für das Vorprozessieren der Rohdaten verantwortlich, der i960 Prozessor für zweidimensionale Clusterrekonstruktion und Datenformatierung, wobei das VRAM als Zwischenspeicher der vorprozessierten Daten dient, auf den die ASICs und i960-CPU zugreifen können.

##### ASIC:

Die TPC Rohdaten liegen – als sequenzielle ADC-Werte – an den Eingängen der ASICs an. Ein ASIC bearbeitet mehrere *Pads*<sup>2</sup>. Die Aufgabenschritte, die von den ASICs bearbeitet werden sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Zunächst kommen die

<sup>2</sup>Im Durchschnitt werden ca. 50 Pads von einem ASIC bearbeitet

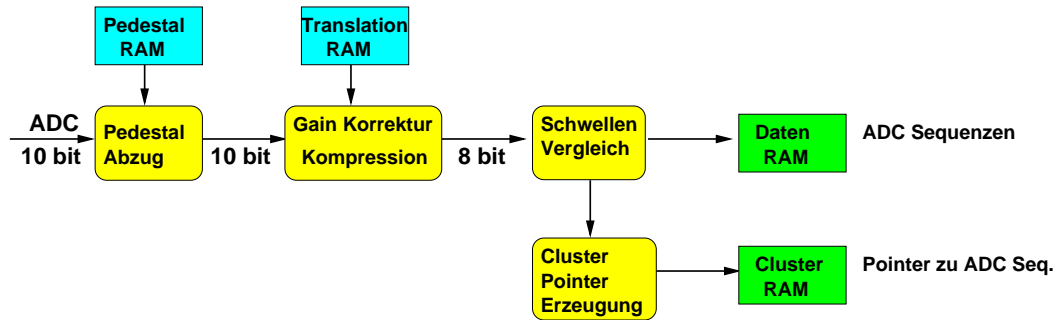


Abbildung 4.4.: Das ASIC Prozess Modell (nach [Bot98]).

TPC Daten als 10-Bit-ADC-Werte an, von denen das Pedestal<sup>3</sup> abgezogen wird. Die Pedestals für jedes Pad sind im Pedestal-RAM abgelegt. Als nächster Schritt wird eine Kompression der Daten von 10-Bit auf 8-Bit vorgenommen, da 8-Bit Werte leichter zu verarbeiten sind. Damit geht kein Informationsverlust einher, da die 10-Bit ADCs aus Dynamik- und nicht aus Auflösungsgründen eingesetzt werden. Die 10-zu-8-Bit Konversion geschieht mit Hilfe eines Look-Up-Table, der über ADC-Wert und Padnummer adressiert wird. Letzteres erlaubt auch eine padweise Verstärkungskorrektur [Bot98].

Die 8-Bit-ADC-Werte gelangen in einen „Cluster-Prozessor“, der Cluster in *Time-bin*-Richtung rekonstruiert. Dazu werden verbundene ADC-Sequenzen durch einen Vergleich mit vier Parametern, als gültiges Cluster identifiziert:

- $P_1$ : Untere Schwelle
- $P_2$ : Minimale Anzahl zusammenhängender ADC-Werte über der unteren Schwelle
- $P_3$ : Obere Schwelle
- $P_4$ : Minimale Anzahl von ADC-Werten, über der oberen Schwelle.

Zunächst muss die Bedingung erfüllt sein, dass eine zusammenhängende ADC-Sequenz mindestens die Länge  $P_2$  (*Timebins*) besitzt. Die ADC-Werte all dieser *Timebins* müssen größer als  $P_1$  sein. Zusätzlich besteht die Bedingung, dass eine Sequenz mindestens  $P_4$  *Timebins* besitzen muss, deren ADC-Werte größer als  $P_3$  sind.

Die erste Bedingung sorgt für eine Mindestlänge der Cluster, und verwirft Spitzen in einzelnen Timebins, wie sie durch elektronisches Rauschen entstehen können. Die zweite Bedingung verwirft Cluster, wenn diese zwar lange Sequenzen sind

<sup>3</sup>Als Pedestal wird der ADC-Wert eines Kanals bezeichnet, der dem Rauschen entspricht.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

(und damit Bedingung 1 erfüllen), aber nicht genug Ladung beinhalten. Letzteres kann durch Pedestalfluktuationen eines Pads zustandekommen kann.

Die gültigen ADC-Sequenzen werden im Daten-RAM gespeichert, während der erste und letzte Timebin im Cluster-RAM gespeichert wird. Der Cluster-RAM dient somit als Index in den Daten-RAM. Diese Daten werden von allen 6 ASICs im VRAM gespeichert, worin Platz für 12 Ereignisse ist.

Die eindimensionale Clusterrekonstruktion, die auch als Nullunterdrückung bezeichnet wird, verkleinert das Datenvolumen in zentralen Au+Au Kollisionen um einen Faktor zehn auf ca. 6-10 MB pro Ereignis.

#### **i960 CPU:**

Auf jeder Mezzaninekarte befindet sich ein Intel i960-Prozessor, ein 32-Bit Prozessor, der mit 66 MHz Core-Geschwindigkeit getaktet ist. Auf diesen Prozessoren läuft der zweidimensionale Clusterfinder, der die von den ASICs bereitgestellten *Timebin*-Sequenzen, in Pad-Richtung zusammenfügt (s. Kapitel 4.9). Des Weiteren haben die i960 CPUs die Aufgabe die Daten zu formatieren: Aus den im VRAM abgelegten ADC-Sequenzen und Cluster-Pointern werden Datenstrukturen generiert, die gespeichert werden können.

#### **VRAM Ereignispuffer**

Die 4 MB VRAM (Speicherplatz für 12 Ereignisse) stellt einen Ereignispuffer dar. Bei einer Auslesegeschwindigkeit der TPC von 100 Hz, kann dieser Daten eines Ereignisses bis maximal 120 ms speichern, bevor sie entweder an den Eventbuilder weitergereicht oder verworfen werden. Sobald 12 Ereignisse im Speicher sind, wird ein Busy-Signal generiert, welches erneutes Triggern der TPC verhindert. Dieser Puffer bestimmt maßgeblich das Design des Level-3 Systems, da er zum einen ein Zeitlimit darstellt (120 ms bei 100 Hz), innerhalb dessen eine Triggerscheidung getroffen sein muss. Zum anderen wird durch die Pufferung eine parallele Bearbeitung mehrere Ereignisse (nach der Clusterfinder-Stufe) möglich.

## 4.4. Sektor Level-3 (SL3)

### 4.4.1. Aufgaben

Der Sektor Level-3 ist der Teil des Level-3 Systems, der die Clusterdaten der Sektoren empfängt. Hier findet die Spurrekonstruktion (*Tracking*) statt, und die Spurdaten werden an den GL3 weitergereicht. Die Aufgaben bestehen im Detail aus:

#### 1. Kommunikation und Datentransfer:

- a) Kommunikation mit DET:  
Wenn ein DET Daten anbietet, muss ein freier Speicherbereich zur Verfügung gestellt werden. Für den Fall, dass kein freier Speicher vorhanden ist, muss sich der SL3 die Grösse der Datenkontribution „merken“ und bei Freiwerden eines entsprechenden Speicherbereichs die Daten vom DET anfordern.
- b) Kommunikation mit GL3:  
Ist das *Tracking* fertig, muss der entsprechende GL3 über das Vorhandensein von Daten unterrichtet werden.
- c) Kommunikation mit *Run Control*:  
Die in Abschnitt 3.4 beschriebenen *Run Control*-Kommandos müssen verarbeitet werden.

#### 2. *Tracking*:

- a) Der *Tracker* muss gestartet werden und ihm muss ein Zeiger auf die Daten übergeben werden.
- b) Wenn der Prozess der Spurrekonstruktion beendet ist, müssen die Spurdaten in entsprechendem Format in einen Speicherbereich gefüllt werden, von dem sie weitergeschickt werden können.
- c) Es gibt die Möglichkeit, Cluster in einem Format zu speichern, in welchem jedes Cluster eine Referenz zu der Spur bekommt, der es zugeordnet wurde. Ist dieses Format gewünscht, muss der *Tracker* diese Daten explizit generieren. Dieses Format wird als SL3-Cluster bezeichnet, das originale Format als i960-Cluster.
- d) Speicherschutzverletzungen oder *Floating Point Exceptions*<sup>4</sup>, die im *Tracker* durch fehlerhafte Daten entstehen können, müssen abgefangen

---

<sup>4</sup>engl.: Fließkomma-Ausnahme. Ein Signal, dass vom Prozessor (oder entsprechenden Mathematik-Bibliotheken) erzeugt wird, wenn einer Funktion ein ungültiges Argument zur Berechnung gegeben wird, z. B. Division durch 0.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

werden, da sie sonst zu der Beendigung eines Prozesses durch das Betriebssystem führen.

##### 3. Buchhaltung:

###### a) *Time-Out Timer*:

Bekommt ein SL3 Daten eines Sektors, während in einem anderen Sektor Probleme auftreten, kann es sein, dass dieses Ereignis verworfen wird. Der zuständige GL3 wird diese Daten somit nicht anfordern. Da Speicherplatz nicht unbegrenzt zur Verfügung steht, und es nur eine begrenzte Anzahl von Token (4096) gibt, müssen alle Datenstrukturen die mit einem Token assoziiert werden, nach einer bestimmten Zeit gelöscht werden. Für jedes Token, wird deshalb ein *Timer* geführt, der nach Ablauf einer einstellbaren Zeit ( $\approx 10$  s) alle Daten eines Ereignisses löscht und das Token freigibt.

###### b) Ereigniszähler:

Es müssen Zähler existieren, welche die Anzahl der Ereignisse eines Runs zählen. Auch die Anzahl der Ereignisse, bei denen ein Problem auftrat, sollte gezählt werden. Diese Informationen werden nicht gespeichert, dienen aber zur *Online*-Kontrolle.

##### 4. Stabilität:

Die Datennahme beruht auf der Funktion und Kommunikation mehrerer hundert Prozesse auf verschiedenen CPUs. Ein plötzlicher Absturz, d. h. Einfrieren oder Verschwinden eines Prozesses, bringt i. d. R. große Teile oder das gesamte DAQ-System zum Hängen. Da bei der Komplexität des Systems aber gelegentliche Fehler nicht auszuschliessen sind, sollten alle beteiligten Prozesse auf mögliche Fehler reagieren können, ohne einen Stillstand des Systems zu erzwingen. Dies heißt, dass Fehler in Log-Dateien notiert werden und eventuell begonnene Kommunikationsschritte beendet werden, aber die Datennahme nicht unterbrochen wird. Ausnahme sind Probleme, die einem Prozess nicht erlauben, weiterhin fehlerfreie Daten zu nehmen. In diesem Fall sollte ein Prozess die Möglichkeit haben explizit die Datennahme anzuhalten.

#### 4.4.2. Implementation

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Aufgaben des SL3 in Kommunikation und Datentransfer, *Tracking* und Buchhaltung unterteilt. Diese Unterteilung bietet sich auch bei der Implementation in Software an, deren Struktur in Abbildung 4.5 gezeigt ist. Der Prozess wurde als ein *Multithreaded* Prozess mit Hilfe der

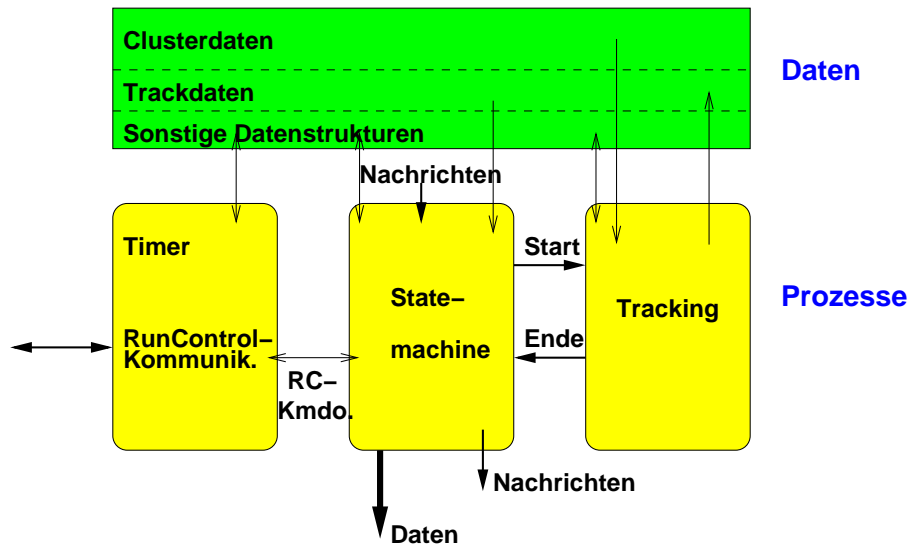


Abbildung 4.5.: Struktur der SL3-Software. Pfeile stehen für Datentransfers.

POSIX<sup>5</sup> konformen *Pthreads*-Bibliothek [Nic96] implementiert. Ein Multithreaded Prozess zeichnet sich durch mehrere asynchron laufende Prozesse aus, die auf dieselben Datenstrukturen zugreifen können<sup>6</sup>.

In unserem Fall ist ein *Thread* (d. h. Teilprozess) für die Kommunikation zuständig, ein Thread ist für das *Tracking* verantwortlich und ein Thread für die Buchhaltung.

Eine Implementation in einem einzigen Prozess, der alle Arbeitsschritte sequentiell bearbeitet ist nicht möglich, da in diesem Fall keine präzisen *Timer* zu implementieren wären<sup>7</sup>. Zum anderen sollte eine Nachricht möglichst schnell bearbeitet werden um Latenzzeiten im System möglichst niedrig zu halten. Der Spurfindungsprozess braucht aber mit ca. 100 ms sehr viel länger als die durchschnittliche Reaktionszeit auf Nachrichten ( $\approx 100 \mu\text{s}$ ). In einem sequentiellen Programm würde eine Nachricht, die während des *Tracking*-Vorgangs eintrifft, unbearbeitet bleiben bis das *Tracking* beendet ist.

<sup>5</sup>Portable Operating System Interface. IEEE Standard, der versucht wichtige Programmierschnittstellen (API, Application Programming Interface) in Betriebssystemen zu vereinheitlichen und somit die Portabilität von betriebssystemnahen Programmen zu ermöglichen.

<sup>6</sup>Genauere Unterscheidungen gegenüber separaten Prozessen die auf Shared memory zugreifen, d. h. die Unterscheidung zwischen Lightweight- und Heavyweight-Prozessen, sollen hier nicht diskutiert werden.

<sup>7</sup>Es gibt zwar Möglichkeiten präzise *Timer* auch in sequentiellen Programmen zu implementieren, aber nur wenn man dafür in Kauf nimmt, dass Aufgaben die gerade bearbeitet werden, unterbrochen werden. Dies bedingt ein Hin- und Herspringen zwischen verschiedensten Programmteilen und den internen Datenstrukturen des Prozesses, was Unübersichtlich ist.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

Die Implementation der im vorigen Kapitel aufgezählten Aufgaben soll im Folgenden erläutert werden, wobei die Nummerierung des vorigen Kapitels beibehalten wird:

##### 1. Kommunikation und Datentransfer:

Der Thread, der für die Kommunikation verantwortlich ist, besteht aus einer *Statemachine*<sup>8</sup>, welche ankommende Nachrichten interpretiert und entsprechende Aktionen einleitet.

##### a) Kommunikation mit DET:

Sind Clusterdaten vorhanden, sendet ein DET eine Nachricht an einen SL3, welche die Größe der Datenkontribution enthält. Der SL3 allokiert einen entsprechende Speicherbereich für die ankommenden Clusterdaten. Für die im SL3 erzeugten Daten (Spurdaten und SL3-Cluster, s. Punkt 2c) wird ein Speicherbereich allokiert, dessen Größe aufgrund der Größe der Clusterdaten abgeschätzt wird.

Ist nicht genug Speicherplatz vorhanden, werden die Informationen (Größe des Beitrags, Tokennummer) in einem FIFO<sup>9</sup> gespeichert. Die Clusterdaten werden dann erst angefordert, wenn genug Speicherplatz zur Verfügung steht.

Nach dem Datentransfer, schickt der DET eine Nachricht an den SL3, die das Ende des Transfers anzeigt.

##### b) Kommunikation mit GL3:

Ein neues Ereignis wird den SL3 vom GL3 angekündigt (der diese Information seinerseits vom GB bekommt). Dies hat den Vorteil, dass der GL3 für jedes Ereignis bestimmen kann, in welchem Format die Daten auf dem SL3 produziert und an den GL3 weitergeschickt werden sollen.

Auch wird der Transfer der Spurdaten von den SL3 an den GL3 verhandelt. Ist der SL3 mit *Tracking* fertig, wird eine Nachricht mit Angabe des Datenvolumens an einen GL3 geschickt. Dieser antwortet, sobald er Daten empfangen kann. Der SL3 schickt die Daten an den GL3 und sendet ihm eine Nachricht über den vollendeten Transfer. Daraufhin werden alle Daten eines Ereignisses gelöscht.

##### c) Kommunikation mit *Run Control*:

Die *Run Control*-Kommandos sind im selben Format [LeV00] wie alle anderen Nachrichten im DAQ-System. Deshalb bietet es sich an, diese

---

<sup>8</sup>*Statemachine* kann als Zustandsmaschine übersetzt werden, ist aber in der englischen Form eine gebräuchliche Bezeichnung in der Softwaretechnik.

<sup>9</sup>FIFO: First-In First-Out Speicher. Ein Typ von Speicher, bei dem Daten in der chronologischen Reihenfolge des Eintreffens ausgelesen werden.



ebenfalls von derselben *Statemachine* bearbeiten zu lassen. Die eigentliche Kommunikation mit der *Run Control* findet über einen externen Prozess statt, mit dem der SL3 Prozess (d. h. die Gesamtheit der 3 Threads) über *SysV IPC Message Queues* Nachrichten austauscht. Dies geschieht zwar aus technischen Gründen im Buchhaltungsthread, aber die Nachrichten werden an die *Statemachine* weitergeleitet und dort verarbeitet und beantwortet.

## 2. *Tracking*:

Der *Tracking-Thread* beinhaltet alle Funktionen die zur Spurfindung nötig sind. Das Spurfindungsprogramm besteht aus einer Klasse, die *Member-Funktionen* als Schnittstelle bereitstellt. Beim Start des Prozesses wird ein Objekt der *Tracker*-Klasse erzeugt und mit den nötigen Parametern (z. B. die maximale Anzahl von Cluster und Spuren) initialisiert.

### a) *Tracker* starten:

Der Kommunikations-Thread teilt dem *Tracking-Thread* das Vorhandensein neuer Daten über eine *Pipe*<sup>10</sup> mit. Eine *Pipe* hat den Vorteil, dass ein Lesen aus der *Pipe* blockiert, wenn keine Daten anliegen. Das heißt der *Tracking*-Prozess wartet bis Daten anliegen und fängt dann an sie zu bearbeiten. Zum anderen stellt eine *Pipe* einen Puffer für ankommende Ereignisse dar, falls der *Tracker* noch beschäftigt ist.

Zum Start des Spurfindens wird zunächst eine Memberfunktion des *Trackers* aufgerufen, die als Argument einen Zeiger auf die Clusterdaten akzeptiert und die Daten einliest. Dann wird der eigentliche Spurfindungsprozess gestartet.

### b) Spurdaten füllen:

Nach Beendigung des Spurfindungsprozesses wird eine Funktion aufgerufen, die die Spurdaten in das bereitgestellte Speichersegment füllt. Diese Funktion akzeptiert einen Zeiger auf den Zielspeicherbereich, die Größe dieses Bereiches (um ein Überschreiben anderer Daten zu vermeiden, wird diese mit der benötigten Speichergröße verglichen) und das Token, das im *Header* jeden Datenbeitrags vorhanden sein muss.

### c) Clusterdaten füllen:

Falls vom GL3, SL3-Cluster angefordert wurden, werden diese in den vorgesehenen Speicherbereich gefüllt. Die dafür verantwortliche Memberfunktion gleicht derjenigen für das Füllen von Spurdaten.

### d) Speicherschutzverletzungen und *Floating Point Exceptions*:

Wie oben erwähnt ist die Hauptquelle für Probleme während des Spurfindungsprozesses fehlerhaft produzierte Daten. Eine weitere Quelle

---

<sup>10</sup>Eine *Pipe* ist ein POSIX konforme FIFO-Art, welche Kommunikation zwischen Prozessen einer Prozessgruppe (d. h. Threads eines Prozesses) ermöglicht.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

eventueller Probleme sind Fehler im *Trackingcode*, welche nach längerem fehlerfreiem Einsatz aber nahezu ausgeschlossen werden können. Die Integrität der gesamten Daten zu überprüfen würde zu lange dauern, weshalb lediglich die Integrität der Datenheader überprüft wird. Ein Problem, das auftreten kann, sind fehlerhafte Offsets in den Daten, welche dem einlesenden Programm als Zeiger dienen und somit Zugriffe auf verbotene Speicherbereiche provozieren können.

Ein anderes Problem sind *Floating Point Exceptions*. Diese können durch Rundungsfehler zustandekommen, die analytisch unmögliche Werte erzeugen, die beim Einlesen in Funktionen mit begrenztem Argumentbereich, diese Ausnahmen erzeugen können. Sie können durch fehlerhafte Daten provoziert werden, da eventuelle Annahmen im Spurfindungscode damit ausser Kraft gesetzt werden. Um letzteres Problem zu minimieren, wurde an vielen Stellen im *Trackercode* Kontrollen implementiert, um Werte, die zu *Floating Point Exceptions* führen könnten, zu entdecken und zu korrigieren.

Da beide Arten von Ausnahmen nicht mit absoluter Sicherheit zu verhindern sind, werden die entsprechenden Signale, die dem Prozess vom Betriebssystem geschickt werden, von einer Funktion abgefangen. In beiden Fällen wird der Spurfindungsprozess abgebrochen und das Ereignis wird als „fehlerhaft“ markiert.

Die Beendigung des Spurfindungsprozesses und somit das Bereitstehen von Spurdaten, wird dem GL3 durch eine Nachricht bekanntgegeben. Dies ist die einzige Nachricht, die nicht vom Nachrichten-Thread versandt wird. Dies bricht zwar etwas die Aufgabenteilung der verschiedenen Threads, war aber die einfachste und effizienteste Möglichkeit der Implementation.

#### 3. Buchhaltung:

##### a) *Time-Out Timer*:

Es gibt 3 Bereiche in denen *Timer* eingesetzt werden.

- *Token*:  
Jedes Token, das in das System kommt, startet einen *Timer*. Nach Ablauf von ca. 10 s wird dieses Ereignis als nicht bearbeitet betrachtet und gelöscht.
- *Run Control*-Kommandos:  
Wird ein *Run Control* Kommando 50 s lang nicht bearbeitet, wird versucht die Fehlerquelle zu ermitteln und eine Fehlermeldung an den *Run Control Handler* geschickt.
- *Tracker*:  
Schliesslich wird noch ein *Timer* gestartet, wenn der *Tracker* ein

Ereignis zur Bearbeitung bekommt. Wenn der Spurfindungsprozess nach einer bestimmten Zeit nicht abgeschlossen ist, kann der gesamte *Tracking-Thread* neu gestartet werden. Dieser *Time-Out* wurde auf 7 s gesetzt. Die Idee war, den *Tracking*-Prozess neu starten zu können, falls dieser in einen Zustand kommt, in dem er hängt.

Die *Timer* sind alle als einfache Variablen implementiert, denen ein Startwert zugewiesen wird, der in der Folge dekrementiert wird. Erreicht der Wert einer Variablen 1, gilt der *Timer* als abgelaufen und die entsprechenden Maßnahmen werden eingeleitet. Ein Wert von 0 schaltet einen *Timer* aus. Das Herunterzählen geschieht in einer Schleife, die alle 100 ms durchlaufen wird. Damit sind die *Timer* nicht sehr genau, aber genügen den gestellten Anforderungen.

b) Ereigniszähler:

Im SL3 gibt es Zähler für

- Ereignisse seit letztem Neustart des Prozesses,
- Ereignisse seit Beginn des Runs,
- Ereignisse, die einem *Time-Out* unterlagen,
- Ereignisse, die Probleme während dem *Tracking* hatten und als „fehlerhaft“ markiert wurden.

Diese Zähler sind durch Variablen verwirklicht, die zu entsprechenden Zeiten auf 0 gesetzt werden (z. B. Beginn des Runs) und bei Eintreten des entsprechenden Ereignisses inkrementiert werden. Damit werden diese Zähler an den verschiedensten Stellen des Programms inkrementiert und können nicht direkt dem Buchhaltungs-Thread zugeordnet werden.

#### 4. Stabilität:

Die Erfahrung zeigte, dass in einem komplexen System wie der STAR-DAQ, viele unerwartete Probleme auftreten können. Deshalb wird bei jedem Prozessschritt darauf geachtet, dass alle möglichen Fehler berücksichtigt werden können. Soweit möglich wird mit Hilfe redundanter Information, Integrität von Daten und Nachrichten kontrolliert. Z. B. befindet sich in jeder Datenstruktur die Token-Nummer, die dann mit der Token-Nummer der entsprechenden Nachricht verglichen wird.

Um eventuell dennoch auftretende Probleme einfacher zu ihrem Ursprung verfolgen zu können, wird für jedes Token eine Zustandsgeschichte geführt, die bei einem auftretenden Fehler mit der Fehlermeldung notiert wird. Damit lässt sich rekonstruieren, in welchem Zustand und Prozessschritt das Problem auftrat.

## 4.5. Global Level-3 (GL3)

### 4.5.1. Aufgaben

Die Hauptaufgabe des GL3 ist das Sammeln der Kontributionen der verschiedenen Sektoren bzw. Detektoren, und die Analyse dieser Daten, die zu einer Trigger-Entscheidung führt. Die Analyse- und Trigger-Umgebung wird in Kapitel 4.11 beschrieben, hier soll analog zum vorigen Abschnitt der infrastrukturelle Teil des GL3 beschrieben werden.

Betrachtet man SL3 und GL3 ohne Tracking und der GL3-Analyseumgebung sind die Aufgaben und Anforderungen sehr ähnlich. Die Aufgaben des GL3 bestehen aus:

1. Kommunikation und Datentransfer:

- a) Kommunikation mit SL3:

Der GL3 kündigt ein Ereignis an, nachdem es ihm vom *Global Broker* angekündigt wurde. In dieser Nachricht findet der SL3 die Information für welchen DET er zuständig ist, während durch den Absender der zuständige GL3 festgelegt ist. Diese Zuordnung gilt nur für ein Ereignis, damit eine dynamische Lastverteilung möglich wird.

Der GL3 empfängt die Spurdaten der SL3, und muss diese dann zusammensetzen, sodass sie der Analyseumgebung angeboten werden können. Wie beim SL3 muss ein Ereignis für das nicht genug Speicherplatz zur Verfügung steht, später angefordert werden.

- b) Kommunikation mit *Global Broker*:

Zunächst wird ein GL3 vom *Global Broker* benachrichtigt, dass ein Ereignis eintreffen wird. Diese Nachricht enthält auch eine Liste der beteiligten DET (d. h. der beteiligten Detektoren/Sektoren) und eine Liste von SL3 mit der Zuordnung, welcher SL3 Daten von einem bestimmten DET empfangen soll. Weiterhin enthält diese Nachricht einen Ereignisdeskriptor, der die Ergebnisse der niedrigeren Trigger-ebenen zusammenfasst.

Als nächstes kann der GL3 die Triggerdaten anfordern. Diese bestehen aus zwei Teilen, den Triggerdetektor-Rohdaten und der Zusammenfassungen der Triggerentscheidungen sowie den Trigger-Summary-Daten, die die Resultate der DSM-Berechnungen enthalten.

Liegt eine Triggerentscheidung vor, muss der *Global Broker* benachrichtigt werden. Soll ein Ereignis verworfen werden, können dessen Daten gelöscht werden, soll es gespeichert werden, werden die Daten

aufgehoben, da diese in der Folge vom *Event Builder* angefordert werden können.

- c) Kommunikation mit *Event Builder*:  
Wird ein Ereignis gespeichert, fordert der *Event Builder* von allen beteiligten Systemen Daten an. Kann der *Event Builder* ein Ereignis nicht komplett zusammenstellen, teilt er dies den beteiligten System mit, sodass diese ihre Daten löschen.
- d) Kommunikation mit *Level-3 Event Builder (L3EVP)*:  
Ein Bruchteil der prozessierten Daten sollen lokal auf Platten gespeichert werden. Der GL3 muss dem L3EVP Daten anbieten, der sie bei Bedarf anfordert und auf Platte schreibt.
- e) Kommunikation mit *Run Control*:  
Identisch mit SL3.

### 2. Analyse:

- a) Die Analyse muss gestartet werden, und ihr muss ein Zeiger auf die Spurdaten übergeben werden.
- b) Wenn die Analyse beendet ist, muss die Triggerentscheidung, samt Datenkontributionen der Algorithmen, im richtigen Format zusammengestellt werden.
- c) Die Triggerentscheidung wird an den *Global Broker* gesandt.
- d) Speicherschutzverletzungen und *Floating Point Exceptions*:  
Siehe SL3.

### 3. Buchhaltung:

- a) Time-Out Timer:  
Siehe SL3.
- b) Ereigniszähler:  
Siehe SL3. Zusätzlich müssen auf dem GL3 noch Zähler über die verschiedenen Algorithmen geführt werden. Diese sind in der Analyseumgebung implementiert und werden in Kapitel 4.11 besprochen.

### 4. Stabilität:

Hier gilt dasselbe wie für den SL3.

## 4.5.2. Implementation

Aufgrund der großen Ähnlichkeit der Aufgaben von GL3 und SL3, wurde der GL3 im selben Gerüst wie der SL3 implementiert. Die Unterschiede bestehen im Inhalt

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

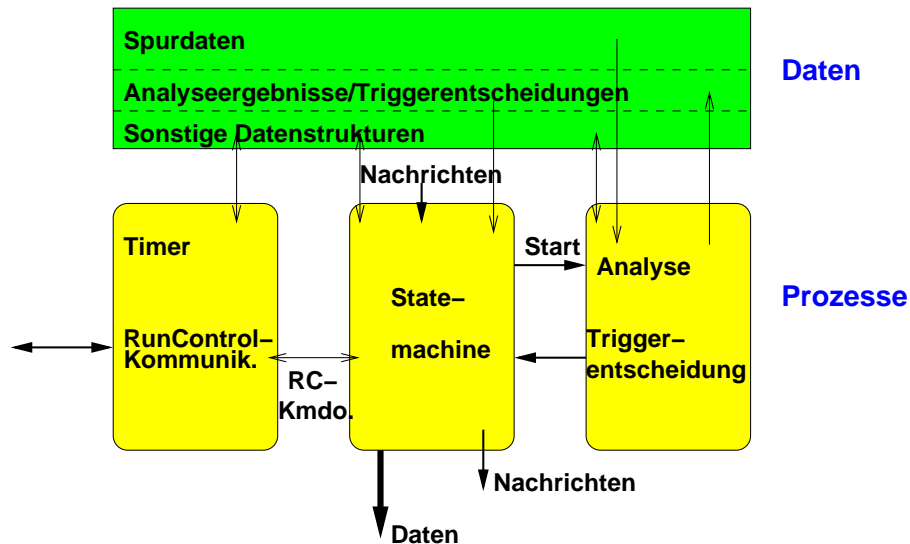


Abbildung 4.6.: Struktur der GL3-Software. Pfeile zeigen Datentransfers.

der Kommunikation mit anderen Prozessen und dem unterschiedlichen Hauptprozess (Tracker bei SL3, Analyseumgebung bei GL3). Mit der unterschiedlichen Kommunikation und der Andersartigkeit der verarbeiteten Daten ergeben sich dennoch einige Unterschiede im Detail. Analog zum vorigen Kapitel wird hier die Implementation der Aufgaben erläutert, wobei das Nummerierungsschema gleich bleibt:

##### 1. Kommunikation und Datentransfer:

###### a) SL3 Kommunikation:

Der erste Teil der Kommunikation mit den SL3 besteht aus der Ankündigung eines Ereignisses. Der GL3 geht durch die Liste der zugeordneten SL3, baut sich intern eine Adressliste und konstruiert aufgrund der Adressen der zugeordneten DETs die Art des Detektors, dessen Daten über einen bestimmten SL3 an den GL3 weitergereicht werden. Der GL3 markiert in dieser Nachricht, welche Art von Daten er von den SL3 bekommen möchte (Spurdaten, i960Cluster-Daten, SL3Cluster-Daten, in beliebigen Kombinationen) und schickt sie an die beteiligten SL3.

Der zweite Teil der Kommunikation beginnt mit der Ankündigung von SL3-Daten. Diese Nachrichten werden gesammelt, bis alle SL3, welche Beiträge dieses Ereignis bearbeiten, ihre Resultate angekündigt haben. Daraufhin allokiert der GL3 die nötige Menge an Speicher, kalkuliert die Speicheradressen für die SL3 Beiträge und teilt den SL3

diese mit. Ist nicht genug freier Speicherplatz vorhanden, werden die Informationen wieder in einem FIFO gespeichert, und Daten werden erst angefordert, wenn genug freier Speicherplatz zur Verfügung steht.

b) Kommunikation mit GB:

Die Ankündigung eines Ereignisses wird vermerkt und die im vorigen Abschnitt beschriebenen Maßnahmen eingeleitet. Der Eventdeskriptor wird gespeichert.

Beide Arten von Triggerdaten werden für jedes Ereignis angefordert, da die Analyseumgebung diese Informationen den Algorithmen zu Verfügung stellt und diese somit in die Entscheidung eines Algorithmus eingehen können.

Die Mitteilung der Triggerentscheidung besteht aus einer Nachricht an den GB, in der die Triggerentscheidung und ein Level-3-Triggerwort enthalten sind. Letzteres kann genutzt werden, damit GB oder EVB eine differenzierte Kenntnis über den Grund einer Ablehnung oder Akzeptanz eines Ereignisses gewinnen können.

c) Kommunikation mit EVB:

Wird ein Ereignis gespeichert, sendet der EVB eine Nachricht mit der Aufforderung die Daten zu formatieren. Dabei kann er verschiedene Datenformate anfordern. Wenn Cluster auf dem GL3 vorhanden sind, können diese angefordert werden, wenn nur Spurdaten vorhanden sind, können höchstens Spuren gespeichert werden. In der Regel sind aus Effizienzgründen keine Cluster-Daten auf dem GL3 vorhanden, und Spurdaten werden normalerweise nur Stichprobenweise gespeichert.

Das Formatieren der Daten beinhaltet die Konstruktion eines entsprechenden Daten-Headers und dem Zusammensetzen der gewünschten Daten zu einem zusammenhängenden Stück. Um letzteres zu vereinfachen, werden die Daten von Anfang an so gespeichert, dass meist kein Umkopieren der Daten notwendig ist. In dem Speicherbereich, der für ein Ereignis allokiert ist, stehen zunächst der *Header* und die Ergebnisdaten der Triggeralgorithmen, da diese für jedes gespeichert Ereignis übermittelt werden. Danach kommt die Spurliste, die vom GL3 aus den Sektorkontributionen zusammengesetzt wurde. Als letztes stehen die Sektorkontributionen, da diese in der Regel nicht gespeichert werden.

Als Antwort sendet der GL3 eine Nachricht mit der Größe seiner Kontribution an den EVB. Wenn dieser von allen Systemen über deren Datenbeiträge unterrichtet wurde, sendet er Nachrichten mit der Aufforderung Daten zu senden. Sind die Daten an den EVB gesandt, löschen die System ihre Daten lokal.

d) Kommunikation mit L3EVP:

Die Kommunikation mit dem L3EVP besteht zunächst aus einer An-

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

kündigung von Daten. Diese Nachricht enthält die Triggerentscheidung, eine Ereignisnummer und die Größe des Beitrages. Der L3EVP kann daraufhin entscheiden, ob er dieses Ereignis anfordert und antwortet mit einer entsprechenden Nachricht. Werden Daten angefordert, schickt der GL3 diese und teilt dem L3EVP die Beendigung des Sendevorgangs mit.

Der GL3 darf die Daten eines Ereignisses nur bis zur Beendigung der Verhandlungen mit EVB bzw. GB behalten, da danach das zugehörige Token wiederverwendet werden kann. Deshalb muss diese Aushandlung mit dem L3EVP stattfinden, bevor der GL3 seine Triggerentscheidung an den GB sendet. Aus Effizienzgründen wird deshalb die Entscheidung, ob die Daten eines Ereignisses lokal gespeichert werden auf den GL3 verlagert, sodass nur ein Bruchteil der Ereignisse dem L3EVP angeboten werden.

- e) Kommunikation mit RC:  
Siehe SL3.

#### 2. Analyse:

Wie auch der Tracker beim SL3, besteht die GL3-Analyseumgebung aus einer Klasse, die *Member*-Funktionen als Schnittstelle bereitstellt.

- a) Beim GL3 wird dem Analyse-*Thread* das Vorhandensein neuer Daten ebenfalls über eine *Pipe* (s. SL3) mitgeteilt und damit der Prozess der Analyse gestartet.  
Die Analyseumgebung greift auf die Spurdaten, die zunächst aber noch Sektorweise vorliegen, die beiden Arten von Triggerdaten und den Ereignisdeskriptor zu. Es gibt keine gesonderte Funktion zum Start der Analyse, diese wird implizit nach dem Einlesen der Daten gestartet.
- b) Die oben beschriebene Funktion liefert die Triggerentscheidung als Rückgabewert. Eine weitere Funktion füllt das Level-3-Triggerwort und die Ergebnisdaten der Algorithmen in dafür vorgesehene Speicherbereiche.
- c) Die Triggerentscheidung wird zusammen mit dem Level-3-Triggerwort an den GB gesandt.  
Es gibt noch die Möglichkeit, einen Bruchteil der Ereignisse unabhängig von einer Level-3-Triggerentscheidung zu Speichern, was durch interne Zähler des GL3 gesteuert wird. Deshalb wird zusätzlich zur Triggerentscheidung eine Entscheidung zum Speichern mitgeschickt, die also die tatsächliche Triggerentscheidung darstellt. In der Regel wird sie jedoch mit der Level-3 Triggerentscheidung übereinstimmen.
- d) Hier gilt dasselbe wie für den SL3. Zusätzlich kommt beim GL3 erschwerend hinzu, dass oft neue Algorithmen eingesetzt werden, sodass



immer neue Quellen von Programmierfehlern bestehen. Deshalb wird vor dem Einschalten eines neuen Algorithmus ein extensiver Test mit bestehenden Daten vorgeschrieben. Dies ist aber nicht unbedingt ausreichend, da es in der Regel nicht praktikabel ist, mehrere Millionen Ereignisse testweise zu prozessieren.

### 3. Buchhaltung:

- a) Time-Out Timer:  
Siehe SL3.
- b) Ereigniszähler:  
Siehe SL3, bzw. Analyse-Umgebung.

### 4. Stabilität: Siehe SL3.

## 4.6. Level-3 Eventpool (L3EVP)

Der L3EVP hat die Aufgabe einen Bruchteil der prozessierten Daten auf eine lokale Platte zu schreiben, wo sie Programmen wie dem Eventdisplay zugänglich sind. Die Aufgaben des L3EVP bestehen in erster Linie aus dem Empfangen von Daten der GL3.

Das Programm ist wie SL3 und GL3 aus 3 Threads aufgebaut, wobei der Thread, der bei SL3 die Spurfindung erledigt und bei GL3 die Analyseumgebung beinhaltet, beim L3EVP nur zum Schreiben der Daten auf Platte dient. Da das Schreiben eines Ereignisses auf Platte bis zu einige hundert Millisekunden dauern kann, hat eine Trennung des Schreibens von der Kommunikation den Vorteil, die Verzögerung der Antwort auf Nachrichten der GL3 minimal zu halten.

Um einen Stau von Daten auf dem L3EVP zu verhindern, werden nur neue Ereignisse akzeptiert, wenn der Schreibvorgang des letzten Ereignisses abgeschlossen ist.

## 4.7. Eventdisplay

Im Rahmen des Level-3 Projektes wurde von Jens Berger ein Eventdisplay [Ber03] entwickelt, welches die Visualisierung der Teilchenspuren und Cluster ermöglicht. Ziel bei der Entwicklung war, eine visuelle Kontrolle des Spurfindungsprozesses zu ermöglichen und eventuelle Probleme leichter zu erkennen.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

Während der Datennahme stellte sich das Eventdisplay als hilfreich zur Qualitätskontrolle der genommenen Daten heraus. Wenige Sekunden nach der Datennahme können rekonstruierte Daten dargestellt werden. Somit können fast in Echtzeit, viele Probleme erkannt werden, die sonst erst nach längerer Zeit entdeckt würden. Für den Betrieb während der Datennahme, erhält das Eventdisplay Daten vom L3EVP über NFS<sup>11</sup>.

##### 4.7.1. Implementation

Das Eventdisplay nutzt die OpenGL-Bibliothek, um Objekte in einer dreidimensionalen Umgebung zu definieren, welche dann in ihrer zweidimensionalen Projektion auf dem Bildschirm dargestellt werden. Das heißt es genügt ein Objekt (z. B. eine Spur) an einem Ort zu definieren, welches mit dem Bezugssystem gedreht oder verschoben werden kann, wobei die OpenGL-Funktionen implizit die Berechnung der neuen Position und Projektion erledigen. Ein weiterer Vorteil der Nutzung der OpenGL-Bibliothek ist die Verfügbarkeit von Grafikkarten, die OpenGL-Funktionen in Hardware implementieren. Letzteres ermöglicht eine Darstellung einer Schwerionenkollision mit bis zu 150000 Clustern und 5000 Spuren, die in Echtzeit gedreht oder verschoben werden kann.

In Abbildung 2.4 ist eine zentrale Au+Au Kollision bei einer Strahlenergie von  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV/Nukleon zu sehen. Das Eventdisplay stellt den Umriss der Detektoren dar. In der Mitte der TPC befindet sich der SVT, an beiden Seiten der TPC (in Strahlrichtung), befinden sich die FTTPCs. Seitlich von der TPC, bei 5 Uhr, ist der RICH eingezeichnet.

In diesem Bezugssystem können nun Cluster, Cluster und Spuren, oder nur Spuren dargestellt werden. Der gesamte Detektor samt Cluster und Spuren kann mit der Maus bewegt werden, wobei Verschiebung, Drehung und auch das Vergrößern oder Verkleinern von Ausschnitten möglich ist.

Für die Datennahme ist eine Update-Funktion implementiert, bei deren Aktivierung das Eventdisplay alle 10 Sekunden ein neues Ereignis einliest und darstellt.

## 4.8. DAQ-Kommunikationsprotokoll

In den vorhergehenden Kapiteln wurde schon die Kommunikation der verschiedenen Prozesse miteinander beschrieben. Das gesamte Protokoll, das abläuft, um ein Ereignis zu verarbeiten soll hier nochmal zusammengefasst dargestellt werden.

Abbildung 4.7 zeigt die wichtigsten DAQ-Systeme und die Pfade auf denen die

---

<sup>11</sup>NFS: Network File System.

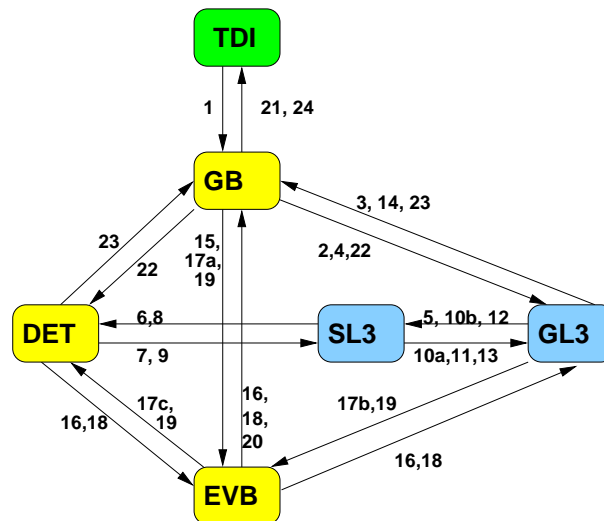


Abbildung 4.7.: Die wichtigsten DAQ-Systeme und ihre Kommunikationswege. Die Ziffern korrespondieren zu der folgenden chronologischen Auflistung der DAQ-Kommandos. Daten kommen über die DETs ins System und verlassen es über den EVB.

Kommunikation abläuft. Die angegebenen Nummern beziehen sich auf die Kommunikationsschritte, die in der folgenden Tabelle aufgeführt sind. Dort sind sie chronologisch geordnet, wobei Teile der Kommunikation parallel auf verschiedenen System stattfinden und dadurch nicht mehr notwendigerweise synchronisiert sind.

1.	TDI → GB	ANNOUNCE_TOKEN
2.	GB → GL3	ANNOUNCE_TOKEN
3.	GL3 → GB	SEND_SUMMARY
4.	GB → GL3	CONFIRM_SEND
5.	GL3 → SL3	GL3_ANNOUNCE_TOKEN
6.	SL3 → DET	ANNOUNCE_NODEID
7.	DET → SL3	DET_ANNOUNCE_RESULTS
8.	SL3 → DET	SL3_SEND_RESULTS
9.	DET → SL3	DET_START_SL3
10a.	SL3 → GL3	SEND_SUMMARY
10b.	GL3 → SL3	CONFIRM_SEND
11.	SL3 → GL3	SL3_ANNOUNCE_RESULTS
12.	GL3 → SL3	GL3_SEND_RESULTS
13.	SL3 → GL3	SL3_CONFIRM_SEND
14.	GL3 → GB	GL3_BUILD_DECISION

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

Wird das Ereignis gespeichert:

15.	GB → EVB	GB_BUILD_EVENT
16.	EVB → DET/GB/GL3	EVB_FORMAT_DATA
17a.	GB → EVB	GB_ANNOUNCE_DATA
17b.	GL3 → EVB	GL3_ANNOUNCE_DATA
17c.	DET → EVB	DET_ANNOUNCE_DATA
18.	EVB → DET/GB/GL3	EVB_SEND_DATA
19.	DET/GB/GL3 → EVB	CONFIRM_SEND
20.	EVB → GB	EVENT_DONE
21.	GB → TDI	EVENT_DONE

Wird das Ereignis verworfen:

22.	GB → DET/GL3	RELEASE_TOKEN
23.	GL3/DET → GB	CONFIRM_RELEASE_TOKEN
24.	GB → TDI	EVENT_DONE

Im folgenden sind die oben vorkommenden Kommandos aufgeführt und kommentiert. Eine genaue Beschreibung aller DAQ-Kommandos befindet sich in [LeV00].

ANNOUNCE_TOKEN	Der GB erhält diese Nachricht vom TDI (Trigger-DAQ-Interface), sobald ein Ereignis getriggert wurde. Der GB fügt die DET-SL3-GL3-Zuordnung für dieses Ereignis hinzu und schickt sie an den zuständigen GL3 weiter.
SEND_SUMMARY	Der GL3 fordert mit dieser Nachricht die Triggerdaten vom GB an. Die SL3 können mit derselben Nachricht die Triggerdaten vom GL3 anfordern.
CONFIRM_SEND	Generische Nachricht, die nach fast allen Datentransfers vom Sender an den Empfänger geschickt wird.
GL3_ANNC_TOKEN	Abgeänderte ANNOUNCE_TOKEN Nachricht, die vom GL3 an die SL3 geschickt wird. Diese Nachricht enthält zusätzlich eine Format-Variable, die bestimmt ob die SL3 Spuren, Spuren und Cluster, Cluster, oder gar keine Daten schicken sollen.
ANNOUNCE_NODE_ID	Die DET bekommen damit die SL3 Node-ID mitgeteilt, die sie für dieses Ereignis benutzen sollen. Diese Nachricht wird von den SL3 an die ihnen zugeordneten DET geschickt.

#### 4.8. DAQ-Kommunikationsprotokoll

DET_ANNC_RES	Ein DET informiert einen SL3, dass Clusterdaten bereitstehen. Diese Nachricht enthält die Größe der Daten, die Art des Detektors und die Sektornummer.
SL3_SEND_RES	Aufforderung des SL3 an den DET, Daten zu schicken.
DET_START_SL3	Eine CONFIRM_SEND Nachricht, nach dem Transfer der Clusterdaten zum SL3, die zusätzlich die Detektor/Sektor Information beinhaltet.
SL3_ANNC_RESULTS	Nachricht des SL3 an GL3, wenn Spurdaten zur Verfügung stehen.
GL3_SEND_RESULTS	Aufforderung des GL3 an den SL3, Daten zu senden.
SL3_CONFIRM_SEND	Identisch zu DET_START_SL3, d.h. eine CONFIRM_SEND Nachricht mit Detektor und Sektor Information.
GL3_BUILD_DECISION	GL3 benachrichtigt den GB über die Level-3 Triggerscheidung. Diese Nachricht enthält auch das Level-3-Summary, eine kurze Zusammenfassung der Entscheidung.
GB_BUILD_EVENT	Nachricht des GB an den EVB, dass dieses Ereignis gespeichert werden soll.
EVB_FORMAT_DATA	EVB teilt allen beteiligten Systemen mit, dass sie ihre Daten zum Senden vorbereiten sollen.
GB_ANNOUNCE_DATA GL3_ANNOUNCE_DATA DET_ANNOUNCE_DATA	Antwort auf EVB_FORMAT_DATA mit der Mitteilung über das Datenvolumen der Beiträge.
EVB_SEND_DATA	Aufforderung des EVB an die beteiligten System ihre Daten zu senden.
EVENT_DONE	Nachricht des EVB an den GB und in der Folge vom GB an den TDI, dass ein Ereignis fertig bearbeitet ist, d.h. gespeichert ist. Im Fall einer negativen Level-3 Entscheidung, ist der EVB nicht eingeschaltet, und diese Nachricht wird nur von GB an TDI gesandt.

## 4. Das Level-3-Trigger-System

RELEASE_TOKEN	Bei negativer Level-3 Entscheidung wird dies vom GB an GL3 und die DET geschickt, damit diese ihre Daten löschen können. Dies geschieht ansonsten implizit nach der Beendigung der EVB-Kommunikation.
CONFIRM_REL_TOKEN	Bestätigung von GL3 und DET, dass sie alle Daten dieses Ereignisses gelöscht haben, und das entsprechende Token wiederverwendet werden kann.

### 4.9. Clusterfinder

Der erste Schritt der Rekonstruktion eines Ereignisses besteht in der Rekonstruktion der Raumpunkte, welche die Spur eines Teilchen definieren. Dies sind im Fall der STAR TPC Punkte auf Ebenen, die jeweils durch die Padreihen und die Driftrichtung aufgespannt werden.

#### 4.9.1. Organisation der TPC Rohdaten

Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, werden die TPC Rohdaten, durch die ASICs auf mögliche Clusterkandidaten reduziert. Die Daten werden durch die ASICs in zwei Beiträge unterteilt:

- Die von den ASICs als gültig erkannten ADC-Sequenzen, werden in der Reihenfolge der Datenbearbeitung gespeichert. Beginnend mit dem ersten Pad, welches von einem ASIC bearbeitet wird, werden die ADC-Sequenzen mit aufsteigenden *Timebin*-Werten hintereinander geschrieben. Diese Daten geben noch keinen Aufschluss darüber, wo eine Sequenz anfängt und wo sie aufhört.
- Zeiger auf die ADC-Sequenzen werden separat gespeichert. Diese beinhalten einen Index, welche Daten von welcher Padreihe und welchem Pad stammen, das Start-*Timebin* und die Länge jeder Sequenz.

#### 4.9.2. Algorithmus

Die Aufgabe des *Clusterfinders* besteht zunächst darin, die ADC-Sequenzen, die in *Timebin*-Richtung von den ASICs zusammengefügt wurden, auch in Pad-Richtung zu verbinden, sodass der Ladungsschwerpunkt der Cluster in der zwei-dimensionalen Padreihe-Zeit-Ebene rekonstruiert wird.

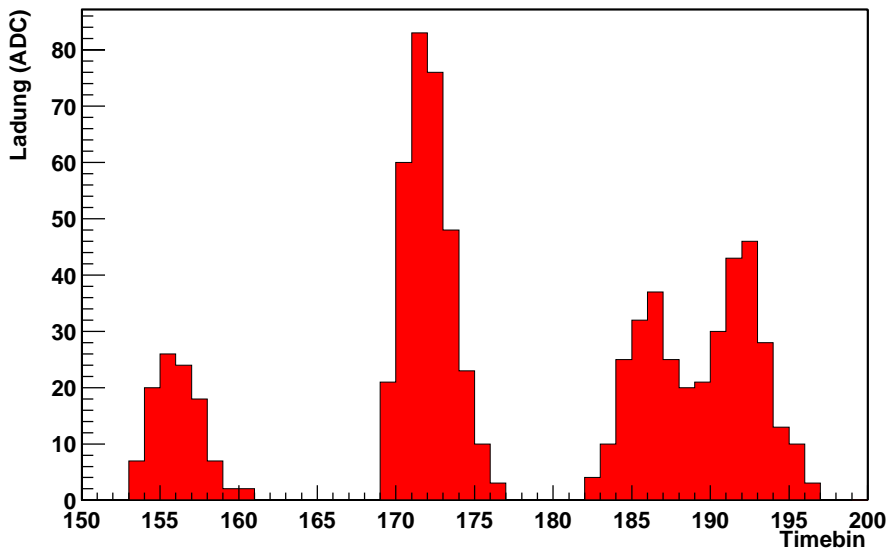


Abbildung 4.8.: Typische Ladungsverteilung auf einem Pad. Rechts sind zwei verschmolzene Cluster zu sehen, die von den ASICS nicht als getrennte Cluster erkannt werden können.

Da es möglich ist, dass mehrere Cluster sehr nah beieinander liegen und ihre Ladungsverteilungen überlappen, muss dieser Fall erkannt werden und nach Möglichkeit die Ladungsbeiträge, der verschiedenen Cluster getrennt werden. Das Separieren verschmolzener Cluster wird auch *Deconvolution* genannt. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten verschmolzener Cluster ist natürlich abhängig von der Spurdichte und damit der Belegung der TPC. Bei Au+Au Kollisionen sind zumindest in den inneren Sektoren eine große Anzahl von Clustern verschmolzen, während bei p+p Kollisionen die Wahrscheinlichkeit dafür sehr gering ist.

Abbildung 4.8 zeigt eine typische Ladungsverteilung auf einem Pad. Es sind vier Cluster zu sehen, von denen die beiden rechten verschmolzen sind. Der Algorithmus des *Clusterfinders* [Lju99] ist in dem Flussdiagramm in Abbildung 4.9 dargestellt. Für ein Pad geht der *Clusterfinder* durch alle ADC-Werte. Handelt es sich um den ersten Wert einer Sequenz, wird dieser (8-Bit-Wert) wieder zu 10-Bit konvertiert. Letzteres ist notwendig um den Ladungsschwerpunkt zu berechnen, da die 10-zu-8-Bit Konversion nichtlinear ist. Schließlich wird der *Timebin* dieses ADC-Wertes mit dem ADC-Wert gewichtet und als Ladungsschwerpunkt gespeichert. Beim nächsten ADC-Wert wird verglichen, ob die Ladung größer ist als beim vorhergehenden. Ist dies nicht der Fall wird die Sequenz als „fallend“ markiert. Ist ein Wert größer als ein vorhergehender Wert und wurde die Sequenz

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

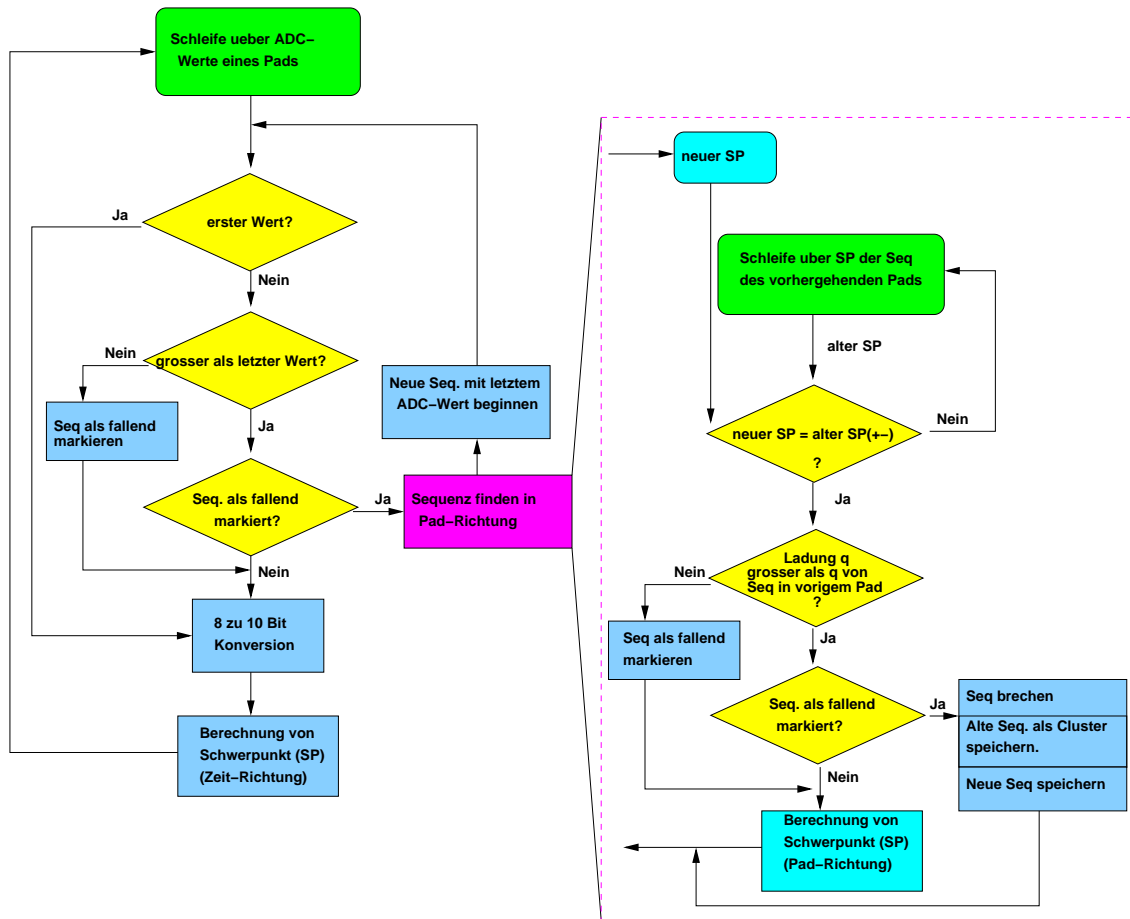


Abbildung 4.9.: Flussdiagramm des Clusterfinderalgorithmus.

davor als „fallend“ markiert, wird dies als Zeichen dafür angesehen, dass es sich um ein verschmolzenes Cluster handelt, und mit dem letzten ADC-Wert wird eine neue Sequenz angefangen.

Ist eine Sequenz aufsteigend oder monoton abfallend, wird für jeden neuen ADC-Wert dessen *Timebin* mit der Ladung gewichtet und der Ladungsschwerpunkt der *Timebin*-Sequenz berechnet.

Sobald eine *Timebin*-Sequenz beendet ist, wird im vorhergehenden Pad geschaut, ob es dort eine Sequenz gibt, deren Ladungsschwerpunkt in der Nähe liegt. Dieses Verhalten ist über einen Parameter einstellbar. Wurde eine entsprechende Sequenz gefunden, wird wieder (entsprechend dem Ladungsvergleich in *Timebin*-Richtung) geschaut ob es sich um ein verschmolzenes Cluster handelt. Dazu wird die Gesamtladung der *Timebin*-Sequenz des vorigen Pads mit der Gesamtladung der Sequenz des aktuellen Pads verglichen. Ist die Gesamtladung der aktuellen Sequenz größer als die des letzten Pads und war die Gesamtladung der vorigen



Sequenzen in Padrichtung abfallend, wird das Cluster als verschmolzen erkannt. Der Ladungsschwerpunkt der beitragenden Sequenzen der vorigen Pads wird als Cluster gespeichert und der aktuelle Wert wird als Beginn eines potentiellen neuen Clusters gespeichert.

Da das geschilderte Trennen von verschmolzenen Clustern die Ladung der Cluster nicht sehr gut rekonstruiert, werden solche Cluster markiert, um später bei Berechnungen, die auf einer genauen Ladungsinformation beruhen (z. B.  $dE/dx$ ), verworfen werden zu können. Um eine genaue Rekonstruktion der Ladungsverteilung beider Cluster zu erhalten, wäre der Winkel unter dem die Teilchenspur die Padreihe-Ebene schneidet, und ein Anpassen der daraus zu erwartenden Clusterform an die gemessene Ladungsverteilung notwendig. Ersteres ist nicht möglich, da dieser Winkel erst nach der Spurrekonstruktion bekannt ist und die Anpassung wäre zu langsam, um *Online* ausgeführt zu werden.

### 4.9.3. Implementation

Der *Clusterfinder*-Algorithmus wurde von Ante Ljubicic Jr. als C++ Programm implementiert, bei dem ein besonderes Augenmerk der Effizienz galt, z. B. wird unnötiges Umkopieren von Daten vermieden. Insbesondere wurde der Algorithmus dadurch beschleunigt, dass einige Funktionen in Assemblersprache programmiert wurden und dabei die Architektur der i960-Prozessoren optimal ausgenutzt wurde [Lju99]. Da die i960-Prozessoren über internen Speicher verfügen, der schnell ansprechbar ist und über eine hohe Speicherbandbreite verfügt, wird dieser Speicher bevorzugt benutzt, und nur bei Bedarf auf den externen, langsameren Speicher zugegriffen.

Um Algorithmen testen und Effizienzen bestimmen zu können muss alle *Online* laufende Software auch in der *Offline*-Rekonstruktionskette laufen. Der *Clusterfinder* wurde dazu in eine Form gebracht, die es erlaubt, die i960-Architekturspezifischen Funktionen allgemeiner zu formulieren. Damit kann der Quelltext auf anderen Unixplattformen übersetzt werden [Lan02b].

### 4.9.4. Qualität

Um die Qualität des *Clusterfinders* zu untersuchen gab es drei Möglichkeiten:

- Optischer Vergleich der Rohdaten mit den gefundenen Clusterpositionen. Diese Methode ermöglicht natürlich keine quantitative Aussage über die

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

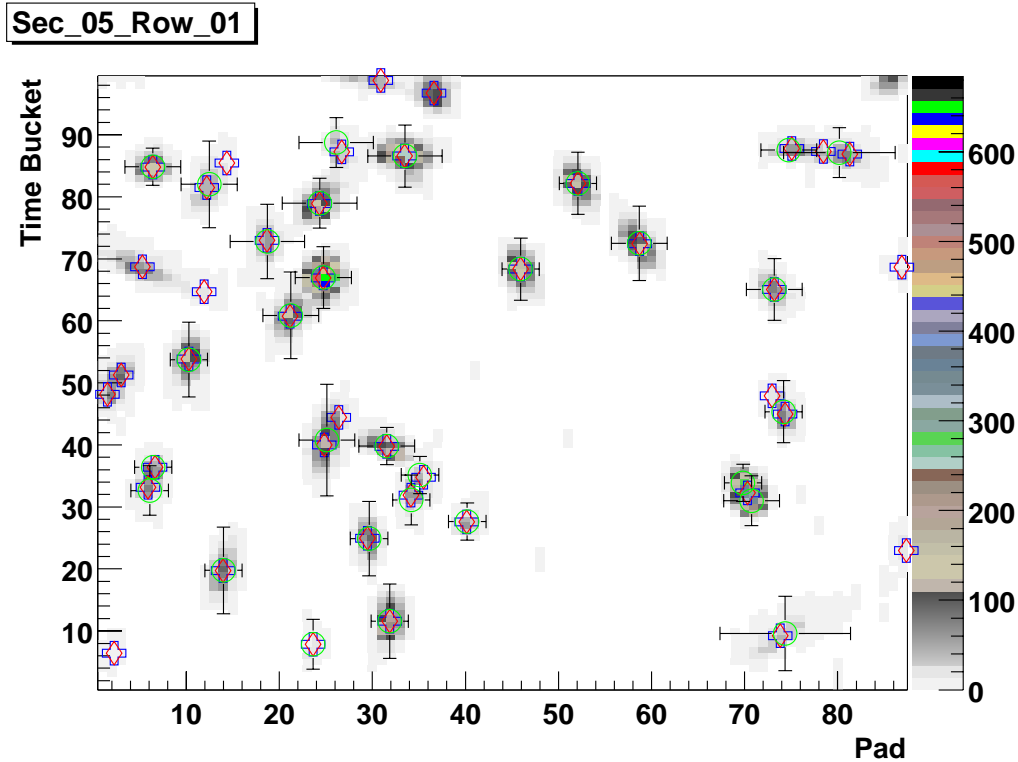


Abbildung 4.10.: Cluster in einem Ausschnitt einer Padreihe (Padrow 1). Die Symbole zeigen die Position von gefundenen Clustern. Rote Rauten: Level-3 *Clusterfinder* auf i960 (während Datennahme rekonstruiert), blaue Kreuze: Level-3 *Clusterfinder* in *Offline*-Rekonstruktionskette, grüne Kreise (mit Fehlerbalken) STAR-*Offline-Clusterfinder*.

Qualität, erlaubt aber, einen Eindruck von eventuell vorhandenen Problemen zu bekommen. Zu diesem Zweck wurde von Dominik Flierl ein Clusterdisplay geschrieben, welches die Ladung der TPC-Pixel einer Padreihe und die Position der gefundenen Cluster darstellt. Ein Beispiel ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Dort ist ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener *Clusterfinder* zu sehen. Rote Rauten und blaue Kreuze sollten immer übereinanderliegen, da sie vom selben Algorithmus gefunden wurden. Dieser Vergleich diente lediglich der Kontrolle, dass der Algorithmus nicht architekturabhängig ist. Die grünen Kreise stellen die vom STAR-*Offline-Clusterfinder* gefundenen Cluster dar. Dieser *Clusterfinder* [Lis96] macht eine 2-dimensionale Anpassung und berechnet die Ortsfehler aus der Breite der Cluster (Fehlerbalken).

Aus diesem optischen Vergleich ist zu sehen, dass der Level-3-*Clusterfinder* unabhängig von der Architektur dasselbe Resultat liefert. Weiterhin fällt auf, dass Cluster, die an das Ende der Padreihe grenzen, vom *Offline*-

*Clusterfinder* nicht gefunden werden (s. u.). Ansonsten sind die Ergebnisse von Level-3 und *Offline-Clusterfinder* bei isolierten Clustern kompatibel, nur bei verschmolzenen Clustern gibt es Abweichungen, die auf die unterschiedlichen Algorithmen zur Deconvolution zurückzuführen ist.

- Vergleich mit dem *Offline-Clusterfinder*, was eine „relative“ Qualitätsangabe darstellt. Diese Methode hat insofern ihre Berechtigung, da die Qualität der schnellen Rekonstruktion an einem de facto Standard gemessen werden kann. Diese Methode wurde nur angewandt, als das Ergebnis des Embedding (s. u.) von Level-3-*Clusterfinder* und *Offline-Clusterfinder* verglichen wurde.
- *Embedding*, das Einbetten von bekannten Monte-Carlo-Spuren in echte Ereignisdaten, liefert ein absolutes Maß für Rekonstruktionseffizienz und Ortsauflösung.

Dazu werden zunächst mit GEANT<sup>12</sup> Teilchen generiert, deren Spuren durch den simulierten Detektor verfolgt werden. GEANT liefert die Information, wo ein Teilchen mit dem Detektor eine Wechselwirkung eingegangen ist, wo z. B. das Gas der TPC ionisiert wurde. Diese Ortsinformation wird an den TPC Simulator TRS<sup>13</sup> weitergereicht, der die Drift der Ladungswolke durch das Gas und die Signalerzeugung an der Auslese modelliert. Die simulierten Signale werden dann im selben Format wie die TPC Rohdaten abgespeichert und können somit leicht mit echten Ereignissen verschmolzen werden. Als Resultat erhält man ein Ereignis, das Spuren mit bekannten Parametern in einer realistischen Umgebung (d. h. Rauschen, Untergrundsignal etc.) beinhaltet. Zusätzlich werden die Punkte gespeichert, an denen in GEANT ein Cluster erzeugt wurde. So kann die Position des rekonstruierten Clusters kann mit dem Ort der Erzeugung des Clusters verglichen werden. Dasselbe ist für rekonstruierte Spuren möglich, bei denen die rekonstruierten Parameter mit den ursprünglichen Parametern verglichen werden (s. nächstes Kapitel).

Die Qualität der *Clusterfinder* wurde von Dominik Flierl mit Hilfe von Embedding untersucht. Dabei wurden für Level-3 und *Offline-Clusterfinder* dieselben Rohdaten und Randbedingungen benutzt, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Es wurden Teilchen mit Impulsen von 0.5 GeV/c, 1 GeV/c, 2 GeV/c und 5 GeV/c generiert und ihre Spuren in echte Ereignisse eingebettet.

Abbildung 4.11 zeigt das Ergebnis für Spuren von Teilchen mit einem Impuls von 1 GeV/c; bei den anderen Impulsen ändern sich die Werte geringfügig, aufgrund

<sup>12</sup>GEANT ist ein Detektor Simulationsprogramm aus der CERN Bibliothek.

<sup>13</sup>TRS: TPC Response Simulator.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

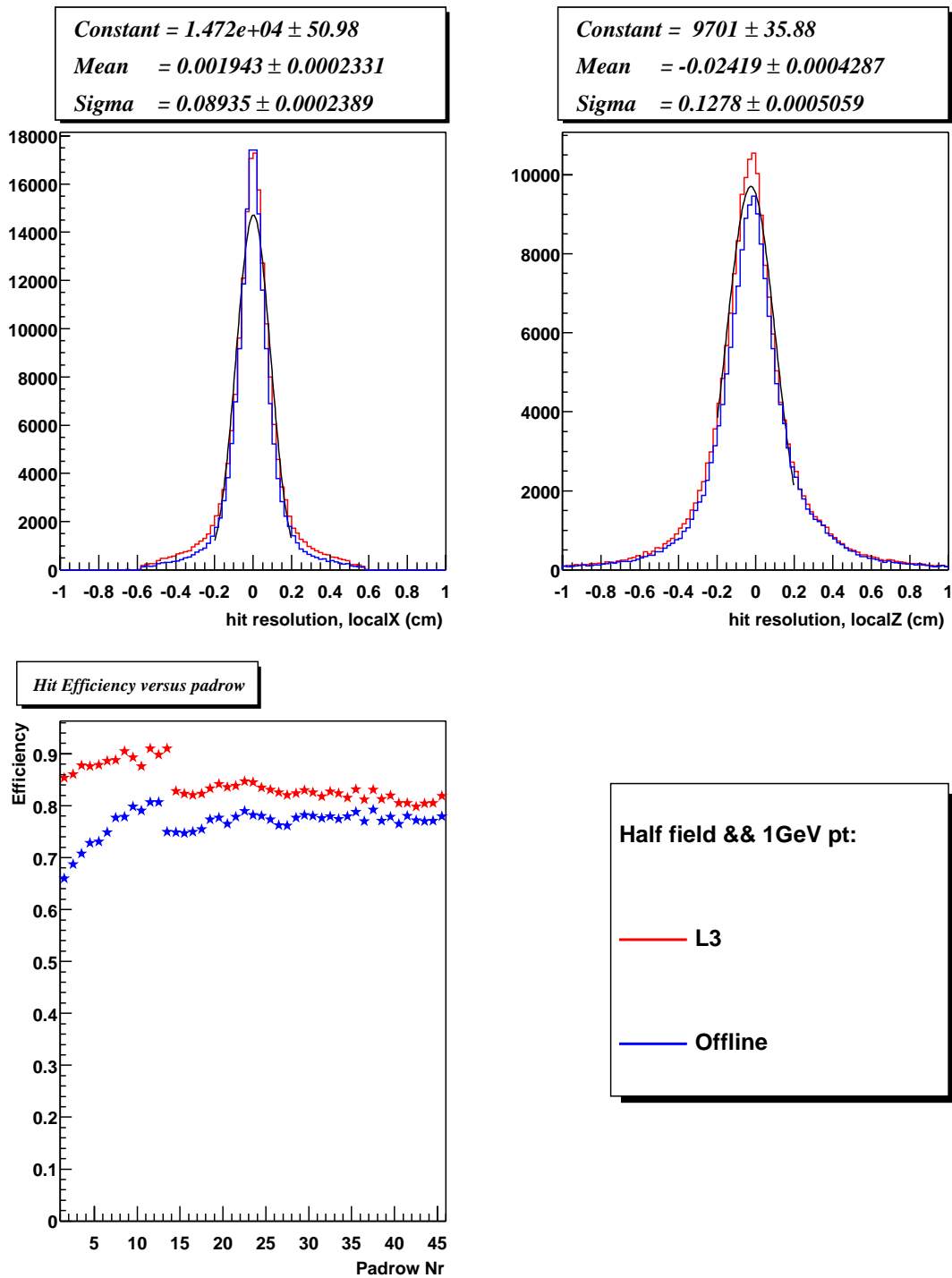


Abbildung 4.11.: Einige Resultate des Vergleichs von Level-3-Clusterfinder mit Offline-Clusterfinder, gewonnen mit Hilfe der Embedding Technik (aus [Fli01]). Links oben ist die Differenz zwischen ursprünglicher Position entlang einer Padreihe (local X), rechts oben dasselbe in Driftrichtung dargestellt. Unten ist die Rekonstruktionseffizienz in Abhängigkeit von Padreihe dargestellt.

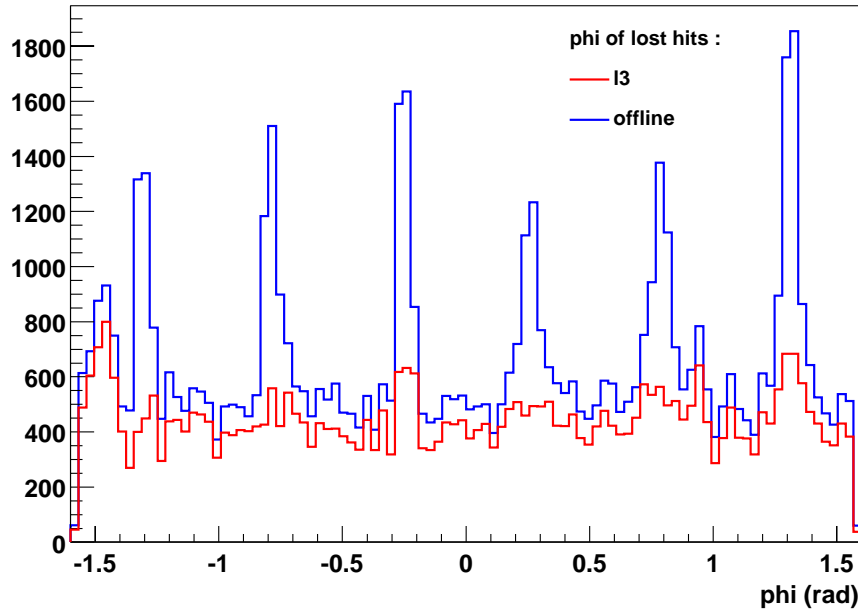


Abbildung 4.12.: Azimutale Winkelverteilung der nicht-rekonstruierten Hits für Offline- und Level-3-Clusterfinder.

anderer Kreuzungswinkel zwischen Spur und Padreihe, aber die wichtigen Charakteristiken sind dieselben.

In der oberen Reihe sind die Differenzen zwischen der Position von generierten Hits und rekonstruierten Clustern zu sehen. Die Breite dieser Verteilungen gibt also die absolute Ortsauflösung von *Clusterfinder* inklusive dem Beitrag der TPC-Auflösung an. Links ist die Differenz in Richtung der Padreihen aufgetragen, die auch als lokale x-Koordinate (engl.: local X) bezeichnet wird, rechts in Driftrichtung, entlang der STAR z-Koordinate.

Die Ortsauflösung der Cluster ist mit dem *Offline-Clusterfinder* in beiden Fällen geringfügig besser, für alle praktischen Zwecke können aber beide *Clusterfinder* als vergleichbar bezüglich der Auflösung bezeichnet werden.

Unten links ist die Effizienz, mit der generierte Hits wiedergefunden werden in Abhängigkeit der Padreihe aufgetragen. Zunächst springt die im Vergleich zum *Offline-Clusterfinder* deutlich bessere Effizienz des Level-3-Clusterfinders ins Auge, dies ist aber durch den oben erwähnten Unterschied im Algorithmus zu erklären: Beim *Offline-Clusterfinder* werden alle Cluster die an Sektorgrenzen stoßen verworfen. Abbildung 4.12 zeigt, dass an den Positionen der Sektorgrenzen überdurchschnittlich viele Hits des Offline-Clusterfinders verloren gehen. Dieses Verhalten des Offline-Clusterfinder ist beabsichtigt, da man bei einem nicht-vollständigen Cluster den Schwerpunkt der Ladung – die Position – nicht mehr genau bestimmen kann.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

Ein Einfluss auf die Ortsauflösung ist praktisch nicht feststellbar, allerdings wäre es möglich, dass die unterschiedliche Behandlung der Randcluster eine Auswirkung auf die Qualität der rekonstruierten Spuren hat. Das Argument für die Verwendung der Randcluster in der Level-3 Analyse ist in den unterschiedlichen Algorithmen der Trackfinder gegeben. Der *Offline-Trackfinder* kann bei der Rekonstruktion einer Spur bis zu fünf Padreihen überspringen, sodass einige fehlende Cluster nicht sehr ins Gewicht fallen. Die Effizienz des Level-3-Trackfinder fällt jedoch stark ab, wenn Cluster verloren gehen. Somit ist ein Fehler der Position einem Fehlen des Clusters vorzuziehen.

Neuere Untersuchungen bezüglich der Qualität des Level-3-Clusterfinders in Verbindung mit dem *Offline-Trackfinder* (s. Kap. 6.2), deuten daraufhin, dass die Verwendung von Randclustern keine Verschlechterung der Spurqualität nach sich zieht.

### 4.10. Spurrekonstruktion (Trackfinder)

Die Aufgabe des *Trackfinders* ist das Verbinden der Cluster, sodass die Trajektorie eines Teilchens durch den Detektor rekonstruiert wird. Wenn wenige Spuren die TPC bevölkern, scheint dies eine einfache Aufgabe zu sein, man erkennt mit dem Auge die einzelnen Teilchenspuren. Tatsächlich wurden Blasenkammeraufnahmen auf die Art ausgewertet: das Auge war für die Spurerkennung und -rekonstruktion zuständig, die Spurparameter (der Impuls) wurde durch die Vermessung der Spur bestimmt. Moderne Detektoren liefern keine Bilder, sondern elektronische Daten, die von Computern ausgewertet werden. Selbst bei wenigen Spuren ist es nicht notwendigerweise trivial, diese zu rekonstruieren. In Schwerionenkollisionen werden hunderte bis tausende Spuren erzeugt, die aufgrund der beschränkten Größe von Detektoren, in der Regel auch sehr nah beieinander liegen. Mit bloßem Auge ist es nicht mehr möglich alle Spuren zu erkennen (vgl. z. B. Abbildung 2.4).

Es gibt verschiedene Verfahren zur Rekonstruktion von Spuren aus Clusterinformation, von denen hier einige Beispiele aufgezählt werden. Eine Übersicht über die gebräuchlichen Verfahren ist z. B. in [Old01] zu finden.

#### Kombinatorische Methode

Die vollständig kombinatorische Methode kombiniert einfach alle Cluster miteinander. Dies ist zwar technisch einfach zu implementieren, aber es ist schwer die physikalisch sinnvollen Spuren auszuwählen.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Anzahl der möglichen Kombina-

tionen und damit die Rechenzeit mit steigender Anzahl von Clustern  $N$ , wie  $N!$  anwächst.

### **Spurverfolgung (Follow-Your-Nose)**

Diese Methode besteht aus zwei Schritten, zunächst wird ein möglicher Spuranfang (*Seed*<sup>14</sup>) gesucht. Dies geschieht in der Regel in einem Teil des Detektors der möglichst weit vom Kollisionspunkt entfernt ist, da dort die Spurdichte am geringsten ist. Als *Seed* werden einige (zwei bis fünf) nahe beieinanderliegende Cluster verbunden.

Der zweite Schritt besteht aus einer Extrapolation dieses Spuranfangs. Punkte, die nah genug an dieser Extrapolation liegen, werden zur Spur hinzugenommen. Ist eine Spur gefunden, werden die zugeordneten Cluster als verwendet markiert und die nächste Spur wird begonnen. Dieser Prozess setzt sich fort, bis die übrig gebliebenen Cluster sind nicht mehr zu vernünftigen Spuren verbinden lassen.

### **Interpolations-Methode**

Ist mindestens ein Punkt jeder Spur bekannt, z. B. der Kollisionsvertex, kann man annehmen, dass zu jedem Cluster der weit vom Kollisionsvertex entfernt liegt, eine Spur gehört, die durch diese beiden Punkte geht. Sind die Spuren gerade, kann man also Vertex und außenliegendes Cluster verbinden und einfach alle auf der Verbindungsgerade liegenden Cluster aufsammeln und der Spur zuordnen. Im Fall gerader Spuren, ist diese Methode sehr effizient. In der Regel sollen jedoch Spuren geladener Teilchen in einem Magnetfeld bestimmt werden, die entsprechend ihrem Impuls gekrümmt sind. In diesem Fall müssen alle möglichen Pfade zwischen den beiden bekannten Punkten berechnet werden und der Pfad, entlang dessen die meisten Cluster liegen, gesucht werden. In diesem Fall ist gewöhnlich die *Follow-Your-Nose* Methode schneller.

### **Histogramm-Methode**

Bei der Histogramm-Methode werden alle Raumpunkte durch eine entsprechend gewählte Transformation so auf einen  $n$ -dimensionalen Raum abgebildet, dass alle gültigen Spuren auf einen Punkt dieses Raumes abgebildet werden. Die Cluster einer Spur werden also im Idealfall auf einen Punkt dieses Raumes abgebildet

---

<sup>14</sup>Seed, (engl.): Samen

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

(tatsächlich ist dies aufgrund der beschränkten Auflösung von Detektoren etwas verschmiert). Ist eine solche Transformation bekannt, wird sie auf die Ortskoordinaten der Cluster angewandt und das Ergebnis wird in ein  $n$ -dimensionales Histogramm gefüllt. Die Aufgabe der Spurrekonstruktion beschränkt sich nun darauf, Maxima in diesem Histogramm zu finden.

Dies ist eine elegante Methode, die aber offensichtlich nur angewandt werden kann, wenn es möglich ist eine entsprechende Transformation zu finden. Ein weiteres Problem ist, dass kreuzende Spuren auf den selben Punkt im transformierten Raum abgebildet werden. Dies kann jedoch erkannt werden und die Spuren können später durch andere Verfahren getrennt werden.

Für Schwerionenkollisionen muss bei einem solchen Verfahren zunächst untersucht werden, ob die Auflösung ausreicht, um Cluster-Anhäufungen verschiedener Spuren zu trennen.

#### **Bemerkung zu den vorgestellten Spurfindungs-Verfahren**

Grundsätzlich ist es notwendig zu wissen, wie eine Spur aussehen sollte, da sonst nicht differenziert werden kann, ob eine gefundene Spur der Trajektorie eines realen Teilchens entspricht oder eine zufällige Kombination von Clustern ist. Im einfachen Fall der kombinatorische Methode ist klar, dass die meisten möglichen Kombinationen von Clustern keine Spuren von Teilchen darstellen, da sie keine physikalisch mögliche Propagation eines Teilchens beschreiben. Bei der Histogramm-Methode ist es sogar notwendig exakt zu wissen, was für Spuren zu erwarten sind, da die Transformation entsprechend gewählt werden muss.

Bevor der Algorithmus des verwendeten *Trackfinders* beschrieben wird, soll deshalb das Spurmodell im STAR-Detektor beschrieben werden.

#### **4.10.1. Das Helix-Spurmodell im STAR-Detektor**

Teilchen die in einer Kollision erzeugt werden, bewegen sich ohne Magnetfeld auf Geraden, radial vom Kollisionsvertex weg. Dies ist in Abbildung 2.2 oben, zu sehen, die ein ohne Magnetfeld aufgenommenes Ereignis zeigt.

Der überwiegende Teil der Subdetektoren in STAR befindet sich innerhalb des Magneten, d.h. in einem solenoidalen Magnetfeld mit Feldlinien in Richtung der Strahlachse. Bei eingeschaltetem Magnetfeld erfährt ein geladenes Teilchen eine Lorentz-Kraft, die senkrecht zu seiner Trajektorie und den Magnetfeldlinien wirkt und proportional zur Geschwindigkeit des Teilchens ist. Dies bedeutet, dass ein geladenes Teilchen im STAR-Detektor in der Projektion auf die  $x$ - $y$ -Ebene einen Kreis beschreibt, wobei der Kreisradius proportional zum transversalen Impuls



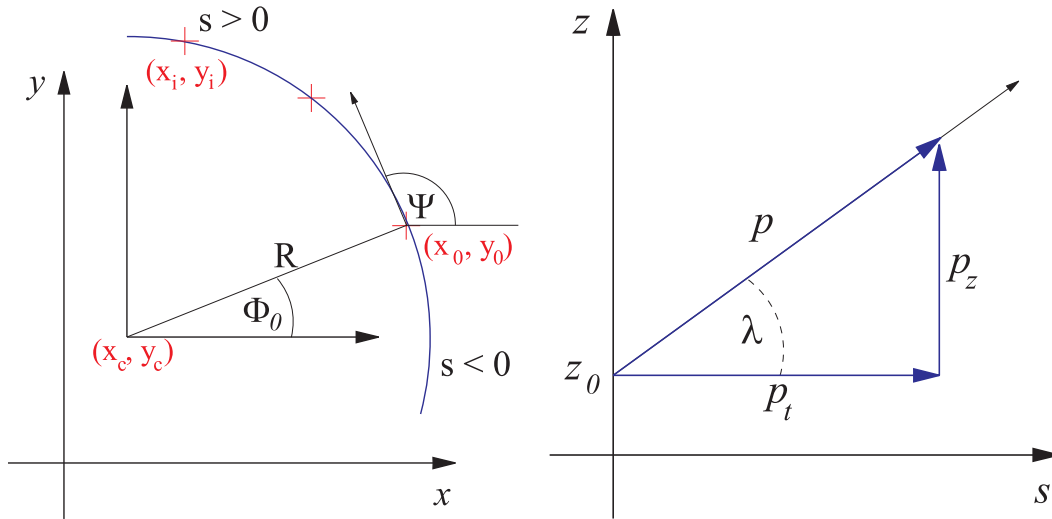


Abbildung 4.13.: Eine Helix in Projektion auf die x-y-Ebene (links) und auf die s-z-Ebene (rechts). Es sind die zur Beschreibung notwendigen Parameter eingezeichnet. (Aus [Las99])

des Teilchens ist. Auf die z-Komponente der Trajektorie eines Teilchens wirkt keine Kraft, da diese parallel zu den Magnetfeldlinien läuft. Damit besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Spurlänge  $s$  und z-Koordinate (vgl. Abb. 4.13 rechts). Ein geladenes Teilchen wird sich also auf einer kreisförmigen Trajektorie bewegen, während sich die z-Koordinate entsprechend der z-Komponente des Impulses linear ändert. Das Teilchen bewegt sich also auf einer schraubenförmigen Bahn, einer Helix.

### Helix-Parametrisierung

Eine Teilchenspur im STAR-Detektor beschreibt eine Helix, deren Achse immer in z-Richtung liegt. Solch eine Helix kann durch folgende Gleichungen in Abhängigkeit der Spurlänge  $s$  beschrieben werden (nach [Las99]),

$$x(s) = x_0 + \frac{1}{\kappa} [\cos(\Phi_0 + h s \kappa \cos \lambda) - \cos \Phi_0] \quad (4.1)$$

$$y(s) = y_0 + \frac{1}{\kappa} [\sin(\Phi_0 + h s \kappa \cos \lambda) - \sin \Phi_0] \quad (4.2)$$

$$z(s) = z_0 + s \sin \lambda \quad (4.3)$$

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

wobei  $s$  die Pfadlänge entlang der Helix,  $(x_0, y_0, z_0)$  der Startpunkt der Helix bei  $s = s_0 = 0$ ,  $\lambda$  der Neigungswinkel in der  $s$ - $z$ -Ebene,  $\kappa$  die Krümmung ( $\kappa = 1/R$ ) und  $h$  die Helizität ( $h = -\text{sign}(qB) = \pm 1$  mit der Ladung  $q$  des Teilchens und dem Betrag des Magnetfeldes  $B$  ist.  $\Phi_0$  und  $R$  beschreiben die Position des ersten Punktes der Helix in Zylinderkoordinaten von der Helixachse aus gesehen und  $\Psi$  gibt den azimuthalen Winkel der Spurrichtung am ersten Punkt an. Die Bedeutung der beschriebenen Parameter wird nochmals in Abbildung 4.13 verdeutlicht.

Aus diesen Parametern kann direkt der transversale und longitudinale Impuls über die Beziehungen

$$p_{\perp} = c q B / \kappa \quad (4.4)$$

$$p_z = p_{\perp} \tan \lambda \quad (4.5)$$

berechnet werden. Um  $p_x$  und  $p_y$  bei der Teilchenerzeugung zu bestimmen, muss die Helix auf den Entstehungspunkt des Teilchens extrapoliert werden (z. B. den Kollisionsvertex) und  $\Psi$  an dieser Stelle bestimmt werden.

#### **Einschränkungen durch die Vertexposition**

Eine weitere Einschränkung der möglichen Spuren entsteht durch die Tatsache, dass die meisten Teilchen vom Kollisionsvertex stammen. Teilchen aus sekundären Zerfällen, weitab vom Vertex werden üblicherweise gesondert betrachtet. Durch die Annahme, dass ein Teilchen vom Vertex stammt, kann der Vertex als zusätzlicher Punkt der Spur berücksichtigt werden. Dabei ist die Vertexposition in  $z$ -Richtung von der Vertexposition in der  $x$ - $y$ -Ebene zu unterscheiden.

Die Vertexposition in  $z$ -Richtung ist durch die Länge der Strahlpakete gegeben und sollte am RHIC im Bereich von  $\pm 30$  cm (Standardabweichung) liegen. Diese Auflösung allein reicht nicht aus, um die Spurrekonstruktion zu verbessern.

In der  $x$ - $y$ -Ebene ist die Breite der Vertexverteilung durch die transversale Breite der Strahlen bestimmt und bewegt sich im Bereich  $< 1$  mm. Diese Genauigkeit liegt im Bereich der Auflösung der TPC. Wenn die Position der Strahlen bekannt wäre, könnte man also durch diese Position einen zusätzlichen Punkt auf der Spur eines Teilchens hinzugewinnen und die Spurrekonstruktion verbessern.

### 4.10.2. Algorithmus

Der verwendete Spurrekonstruktionsalgorithmus basiert auf einem Follow-Your-Nose Algorithmus. Es wird zunächst ein Spuranfang gesucht, der dann durch Extrapolation erweitert wird. Dabei werden weitere Cluster zu der Spur hinzugefügt. Der rechenaufwendigste Teil bei diesem Verfahren ist, die jeweils erneute Anpassung des Spurkandidaten an die Cluster (die bei jedem neuen Cluster erneut geschieht) und die Extrapolation der Spur.

Wie oben beschrieben, lässt sich die Helix, welche eine Teilchenspur im STAR-Detektor beschreibt, durch einen Kreis(-abschnitt) in der x-y-Ebene und einer Geraden in der s-z-Ebene beschreiben. Dies ist schon eine Vereinfachung gegenüber dem Problem der Anpassung und Extrapolation einer Helix, es wäre aber wünschenswert, die immer noch rechenaufwendige Anpassung und Extrapolation von Kreisen zu vermeiden.

Dies ist mit Hilfe einer Transformation, die Kreise auf Geraden abbildet möglich. Mit Hilfe dieser, als „konformen Abbildung“<sup>15</sup> bezeichneten Transformation, werden die x-y-Koordinaten der Cluster auf eine Ebene abgebildet (konformer Raum genannt), in der die Cluster einer Spur auf einer Gerade liegen.

Für die Transformation ist die Kenntnis eines Punktes  $(x_t, y_t)$  auf der Spur notwendig. Die Transformationsgleichungen für die Transformation eines Punktes  $(x, y)$  auf einen Punkt  $(x', y')$  im konformen Raum lauten dann

$$x' = \frac{x - x_t}{r^2}, \quad y' = \frac{y - y_t}{r^2} \quad \text{mit} \quad r^2 = (x - x_t)^2 + (y - y_t)^2 \quad (4.6)$$

Das Resultat dieser Transformation<sup>16</sup> ist in Abbildung 4.14 verdeutlicht. Dort sind Spuren von 10 Pionen mit einem Impuls zwischen 0,1 und 2 GeV/c in der STAR TPC simuliert, und die Position der Cluster in der Projektion auf die x-y-Ebene dargestellt. Rechts ist die Position der Cluster nach der Transformation gezeigt. Dabei wurde als Referenzpunkt für die Transformation der Punkt  $(x_t, y_t) = (0, 0)$  angenommen.

Abbildung 4.14 zeigt einige Eigenschaften dieser Abbildung auf:

1. Aus den Gleichungen wird klar, dass der Referenzpunkt  $(x_t, y_t)$  auf das Unendliche abgebildet wird. Dies wird in der Abbildung dadurch deutlich,

<sup>15</sup>In der Mathematik wird jede lokal Winkel erhaltende Abbildung als konforme Abbildung bezeichnet. In der Anwendung für Spurfundungsprogramme spielt aber nur die hier erwähnte spezielle Form eine Rolle, weshalb sie in der Regel nur als „konforme Abbildung“ bezeichnet wird.

<sup>16</sup>Der Beweis, dass Kreise durch diese Transformation auf Geraden im konformen Raum abgebildet werden, ist z. B. in [Old01] zu finden.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

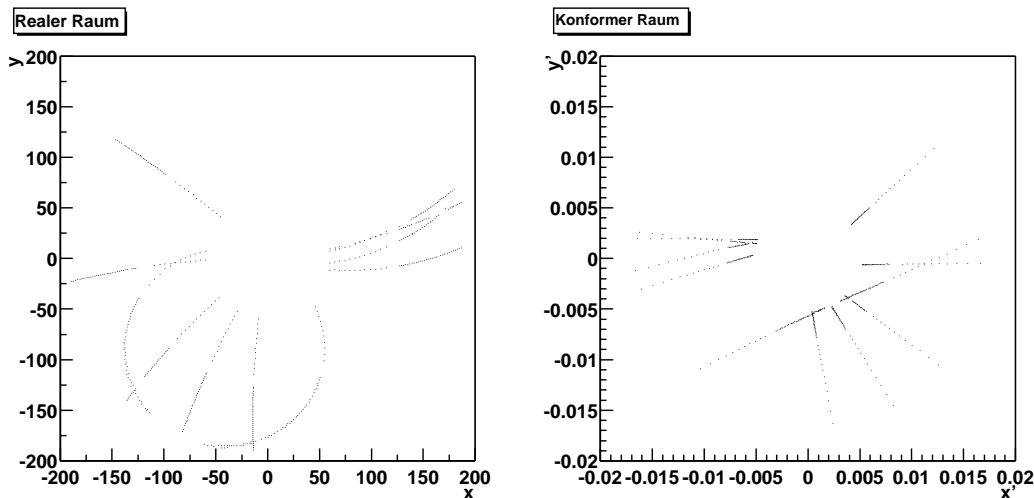


Abbildung 4.14.: Konforme Abbildung: Spuren in der x-y-Ebene im realen Raum (links) und nach Abbildung auf den konformen Raum (rechts).

dass die Mitte des linken Bildes (wo sich der Referenzpunkt befindet) nach aussen abgebildet wird.

2. Wie sich an den Abständen zwischen den Clustern erkennen lässt sind Längen unter der konformen Abbildung nicht erhalten.
3. Die Größenskala ändert sich stark.

Punkt 1. hat zur Folge, dass der Referenzpunkt nicht mehr direkt für eine Anpassung der Spur an die Cluster verwendet werden kann. Die Genauigkeit der Kenntnis dieses Punktes (z. B. der Kollisionsvertex) geht vielmehr in die „Richtigkeit der Transformation“ ein. Wenn der Referenzpunkt neben der Spur liegt, ist die Hypothese, auf der die Transformation beruht falsch, und man wird keine Gerade im konformen Raum erhalten.

Punkt 2. und 3. haben Implikationen für die Berücksichtigung von Ortsfehlern von Clustern. Da der verwendete Clusterfinder keine Anpassung einer Clusterhypothese an die Daten vornimmt, kann auch der Ortsfehler nicht für jedes Cluster bestimmt werden. Deshalb wird ein empirisch bestimmter durchschnittlicher Ortsfehler für die Cluster angenommen. Aufgrund der Nichterhaltung von Längen bei der konformen Abbildung muss der Fehler jedes Clusters in ein Gewicht im konformen Raum umgerechnet werden, welches zur Anpassung einer Geraden verwendet wird.

Der Algorithmus des Level-3 *Trackfinders* [Yep96] transformiert die Cluster in einen konformen Raum, um die Spuren zu finden. Zunächst entspricht das nur

einem Sortieren der Cluster nach ihrer Spurzugehörigkeit.

Sind die Spuren im konformen Raum bekannt, ist es zwar möglich aus deren Parametern direkt den Impuls und die anderen Parameter der Spur zu bestimmen, was aber aufgrund der oben genannten Probleme nur unter Einschränkungen möglich ist. Um eine möglichst genaue Information über die Parameter der Teilchenspur zu gewinnen, wird deshalb im realen Raum noch ein Kreis an die Cluster angepasst.

Die Transformation kann zu Beginn des Prozesses auf alle Cluster angewandt werden. Hierzu benötigt man eine Hypothese über einen gemeinsamen Punkt aller Spuren, was im Fall primärer Spuren durch den Kollisionsvertex gegeben ist.

Für den Fall sekundärer Spuren ist es auch möglich, die Transformation erst während des Spurfindens, mit dem ersten Kandidatenpunkt der Spur als Referenzpunkt, durchzuführen. Als Anhaltspunkt, ob es sich um eine sekundäre Spur handelt, kann die Qualität der Geradenanpassung im konformen Raum genommen werden.

### Beschleunigung der Spurfindung

Ein wichtiger Punkt zur Erhöhung der Geschwindigkeit des Spurfindungsprozesses ist das Sortieren der Cluster bevor der Spurfindungsprozess begonnen wird. Bei der großen Anzahl an Clustern wäre ein sequenzielles „Durchprobieren“ aller Cluster zu jeder Spur sehr zeitaufwändig.

Hierbei wird die (grobe) Kenntnis der Vertexposition genutzt, um das Volumen der TPC azimuthal und in der Pseudorapidität  $\eta$  in Untervolumina aufzuteilen. Dabei sollte idealerweise eine Spur in genau einem dieser Untervolumina liegen. Wenn der Spurfindungsprozess beginnt, müsste im Idealfall nur in der nächsten Padreihe, im selben Volumen nach dem nächsten Cluster gesucht werden. Da es aber sein kann, dass eine Spur auf der Grenze zweier Volumina liegt oder diese kreuzt, wird der Suchbereich auch auf die jeweils nächsten umliegenden Volumina ausgedehnt. Damit werden in jedem Schritt neun Volumina untersucht. Bei geeigneter Wahl der Unterteilung reduziert sich die Anzahl der zu untersuchenden Cluster um Größenordnungen, während die Effizienz praktisch unverändert bleibt<sup>17</sup>.

Die Unterteilung in azimuthaler Richtung ist durch die Strahlposition recht genau gegeben, die Unterteilung in  $\eta$  ist jedoch abhängig von der z-Position des Kollisionsvertex, der sehr viel stärkeren Schwankungen unterliegt. Der Vorteil ei-

---

<sup>17</sup>Spuren, die unter einem zu großen Winkel relativ zu der Unterteilung laufen und dann nicht mehr rekonstruiert werden können, da ihr nächster Cluster erst im übernächsten Volumen sitzt, stammen praktisch immer aus Wechselwirkungen mit Detektormaterial.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

ner ereignisweisen Anpassung der  $\eta$ -Volumina-Unterteilung an den tatsächlichen Kollisionsvertex wurde untersucht, es wurde aber keine nennenswerte Erhöhung der Effizienz bei der zu erwartenden Breite der  $z$ -Vertex-Verteilung festgestellt [Str01].

### 4.10.3. Implementation

Der Level-3 *Trackfinder* wurde von Pablo Yepes als C++ Programm implementiert [Yep96]. Es wurde in Hinblick auf die schnelle Spurrekonstruktion im STAR-Detektor entwickelt, wobei die Implementation in Bezug auf Detektorgeometrie möglichst allgemein gehalten wurde. Damit kann das Programm leicht auf andere Detektorgeometrien angewendet werden.

Der Ablauf der Spurfindung ist schematisch in Abbildung 4.15 dargestellt wobei sich der Ablauf grob in die folgenden Schritte unterteilen lässt:

- Einlesen der Cluster:  
Zunächst werden die Clusterdaten eingelesen, welche die Clusterpositionen in TPC-Koordinaten, also Sektor, Padreihe, Pad und *Timebin* enthalten. Diese werden in kartesische Koordinaten umgerechnet und gespeichert. Dann werden die Cluster nach  $\eta$ - $\phi$ -Volumen und Padreihe sortiert. Dies geschieht, indem verbundene Listen erzeugt werden, die Pointer auf alle Cluster eines Volumens oder einer Padreihe besitzen. Damit kann schnell auf alle Cluster eines Volumens zugegriffen werden kann, ohne diese kopieren zu müssen.
- Spuranfang erzeugen:  
Ein Spuranfang wird dadurch erzeugt, dass zwei naheliegende Cluster gesucht werden, also nur ein Abstandskriterium erfüllt ist. Ab dem dritten Cluster muss zusätzlich ein Winkelkriterium erfüllt sein, was einer einfachen Form der Extrapolation gleichkommt. Die Anzahl von Clustern die für einen gültigen Spuranfang nötig sind, ist über einen Parameter steuerbar, beträgt aber mindestens drei Cluster.  
Diese Spuranfänge werden zunächst in den äußeren Padreihen gesucht, da dort die Spurdichte aufgrund des großen Abstands zum Kollisionsvertex am geringsten ist. Wenn alle Cluster der äußersten Padreihe einer Spur zugeordnet sind, werden Spuranfänge mit Clustern auf weiter innen liegenden Padreihen gesucht. Die innerste Padreihe, in der noch Spuren begonnen werden sollen ist über einen Parameter definierbar.
- Spur erweitern:  
Nachdem ein Spuranfang gefunden wurde, wird die Spur durch Überprüfung

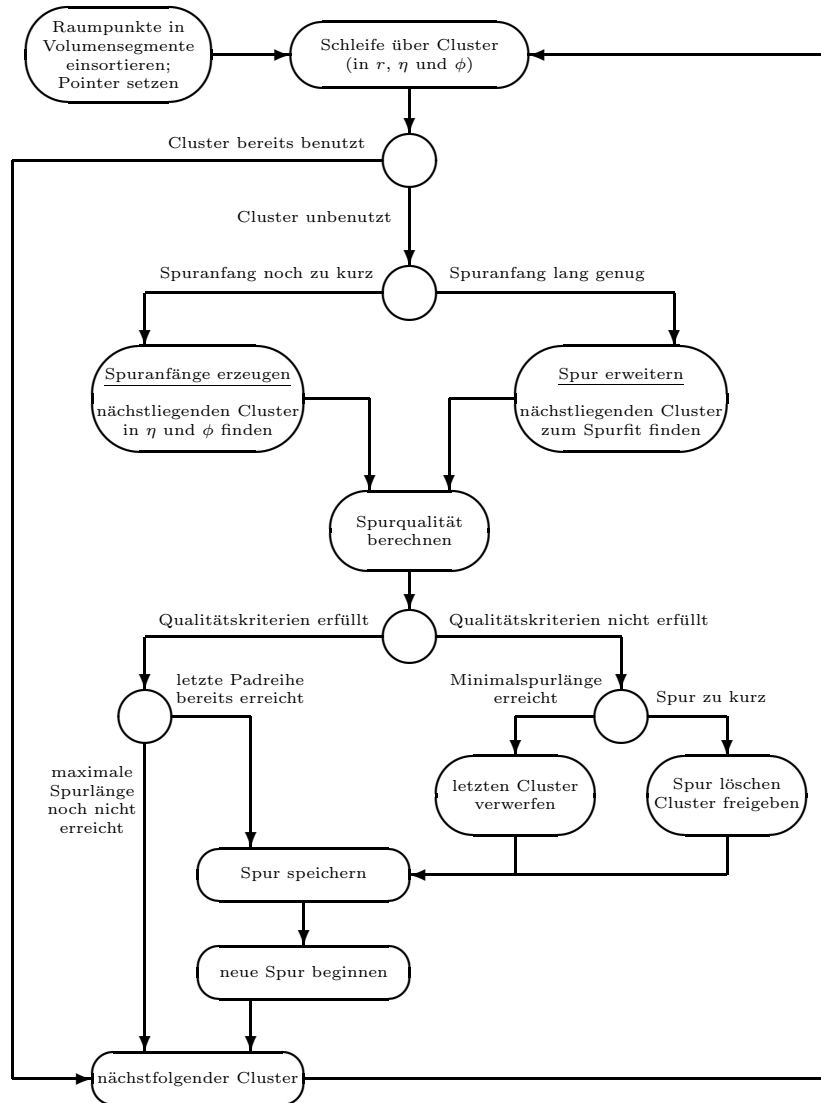


Abbildung 4.15.: Flussdiagramm der schnellen Spurrekonstruktion (aus [Old01]).

der Cluster der nachfolgenden Padreihe erweitert. Ein Cluster wird zur Spur hinzugefügt, wenn eine Geradenanpassung im konformen Raum gewisse Qualitätskriterien erfüllt. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis die letzte Padreihe erreicht ist, oder bis keine Cluster mehr gefunden werden, die den Qualitätskriterien genügen.

Es kann vorkommen, dass eine Teilchenspur auf einer Padreihe, die gekreuzt wird, keine Ladung hinterlässt oder ein Cluster vom Clusterfinder nicht gefunden wurde. Um eine Spur trotzdem zu finden, können bis zu zwei Padreihen übersprungen werden. Fehlen mehr Cluster einer Spur, ist die Extrapolation meist nicht mehr genau genug, um entscheiden zu können,

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

ob ein Cluster zu einer Spur gehört oder nicht.

Zunächst wird eine Spur vom außen liegenden Spuranfang in Richtung Kollisionsvertex erweitert, später kann aber versucht werden dieselbe Spur noch weiter nach außen zu erweitern. Dies kann sinnvoll sein, da ein fehlendes Cluster einen Spuranfang verhindern kann, beim Extrapolieren aber übersprungen werden kann.

- Neuanpassung im realen Raum (optional):  
Nachdem eine Spur gefunden wurde, kann eine Anpassung eines Kreises in der x-y-Ebene und einer Geraden in der s-z-Ebene im realen Raum durchgeführt werden.
- dE/dx-Berechnung:  
Für jede Spur kann die dE/dx-Information berechnet werden. Dabei wird die „Truncated Mean“-Methode verwendet, bei der die 30% höchsten Ladungswerte verworfen werden, um die mittlere Ionisation des Teilchens auszurechnen. Die dE/dx-Information wird nur für Spuren mit mindestens 15 Clustern bestimmt, wobei zur Berechnung keine verschmolzenen Cluster verwendet werden.
- Speichern der Spuren:  
Als letzter Schritt werden die Parameter einer Spur (d. h. Impuls, Orientierung und dE/dx-Information) berechnet und in Datenstrukturen gespeichert.

Das Verhalten des Spurfindungsprogrammes wird durch ca. 80 Parameter bestimmt, die es ermöglichen das Programm an verschiedene Einsatzbereiche anzupassen. Einige Parameter dienen der Flexibilität des Programms, z. B. ist die Anzahl der Padreihen ein Parameter, der für ein bestimmtes Experiment konstant bleiben wird. Einige Parameter bestimmen grob das Verhalten des *Trackfinders*, z. B. ob alle Spuren als primäre Spuren oder als sekundäre Spuren betrachtet werden sollen. Fünf Parameter bestimmen entscheidend die Qualität der Spurfindung und mussten auf die Gegebenheiten (z. B. Spurdichte) angepasst werden. Im Prinzip ist es möglich verschiedene Parameter für verschiedene Ereignisse zu verwenden (z. B. in Abhängigkeit der Ereignis-Multiplizität), was aber bisher nicht genutzt wurde.

#### 4.10.4. Optimierung

Die Optimierung des Spurfindungsprogrammes konnte erst durchgeführt werden nachdem die ersten echten Daten (des Jahres 2000) vorhanden waren. Zur



Optimierung eines Rekonstruktionsalgorithmus bettet man üblicherweise Monte-Carlo-Spuren in echte Ereignisse ein und optimiert die Rekonstruktionseffizienz durch den Vergleich von originalen zu rekonstruierten Spuren für verschiedene Parameter.

Das Problem bei diesem Verfahren ist, dass das Einbetten der Spuren in Rohdaten ein relativ aufwendiger Prozess ist, der für eine Anzahl von Ereignissen, die einen Rückschluss auf die Rekonstruktionseffizienz erlauben würde, ca. einen Tag braucht.

Um zunächst in einem iterativen Prozess schnell zu guten Parametern zu gelangen, wurde eine Methode genutzt, die Monte-Carlo-Spuren in echte Daten einbettet, jedoch nicht in die Rohdaten, sondern in Clusterdaten. Dazu wurden Monte-Carlo-Spuren generiert und deren Rohdaten mit dem Level-3-Clusterfinder (offline) rekonstruiert. Diese Clusterdaten wurden dann gemeinsam mit den Clusterdaten von echten Ereignissen in den *Trackfinder* eingelesen, wodurch die generierten Cluster mit den echten Clustern vermischt wurden. Beim Einlesen wurden die generierten Cluster markiert, um später feststellen zu können, zu welchen Spuren die Monte-Carlo-Cluster zugeordnet wurden.

Der Unterschied zum „echten“ Einbetten von simulierten Spuren in Rohdaten besteht darin, dass beim hier genutzten Verfahren, generierte Cluster nicht mit echten Clustern verschmelzen können.

Bei der Spurdichte in RHIC-Kollisionen schien dieser Effekt für den Spurfundungsprozess keine bedeutende Rolle zu spielen.

Nach dem Spurfundungsprozess wurden Spuren, mit mehr als 23 generierten Clustern (von 45 möglichen) herausgesucht und gezählt. Der Quotient aus gefundenen zu eingebetteten Spuren wurde als Effizienz gewertet. Von den generierten Spuren wurden nur „rekonstruierbare“ Spuren verwandt. Damit sind Spuren gemeint, die vor dem Einbetten in ein echtes Ereignis vom *Trackfinder* mit ausreichender Länge (23 Cluster) gefunden werden. Es zeigte sich, dass die Rekonstruktion der generierten Spuren vor dem Einbetten, nahezu ausschließlich durch Akzeptanzlücken (Sektorgrenzen) verhindert wird.

Zur Kontrolle der Rekonstruktionsqualität wurden Histogramme gefüllt, die folgendes zeigten: ob falsche Cluster zu einer Spur zugeordnet wurden (Selektivität), die Abweichung des rekonstruierten Impulses zum generierten Impuls (Stabilität der Impulsrekonstruktion in der x-y-Ebene) und die Differenz des generierten zum rekonstruierten Neigungswinkels  $\lambda$  (Stabilität der Rekonstruktion in der s-z-Ebene).

Es wurde ein Ereignis mit 50  $\pi^+$  mit einem transversalen Impuls von je 1 GeV/c im Pseudorapiditätsbereich  $-1 < \eta < 1$  generiert. Die Spuren waren in  $\eta$  und  $\phi$  flach verteilt, wobei der Ursprung der Spuren in der Mitte der TPC also bei  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  lag. Die Spuren wurden durch die vollständigen TPC Simu-

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

lation propagiert (TRS), sodass Detektoreffekte wie Diffusion korrekt modelliert wurden. Die mit dem Level-3-Clusterfinder rekonstruierten Cluster dieser Spuren wurden mit dem oben beschriebenen Verfahren in Daten von 100 zentralen Au-Au Kollisionen mit einem z-Vertex  $|z| < 20$  cm eingebettet.

Mit den ursprünglichen Parametern erreichte der *Trackfinder* eine Effizienz von 90 %, nach Optimierung der Parameter eine Effizienz von 99,87 %. Da bei dieser hohen Effizienz eventuelle Unterschiede nicht mehr sichtbar sind, wurde dasselbe mit einer restriktiveren Bedingung für die Rekonstruktion einer Spur wiederholt. Dabei musste eine Spur mit mindestens 30 Clustern (statt 23 Clustern) wiedergefunden werden. Mit dieser Bedingung betrug die Effizienz 79,7 % für die alten Parameter und 97,4 % für die optimierten Parameter. Es ist zu sehen, dass mit den optimierten Parametern auch längere Stücke von Spuren zuverlässig gefunden werden.

In Abbildung 4.16 sind die rekonstruierten transversalen Impulse der eingebetteten Spuren mit alten und neuen Parametern dargestellt. Es zeigt sich, dass die optimierten Parameter eine stark verbesserte Impulsauflösung bewirken. In Abbildung 4.17 ist dargestellt, wie gut die eingebetteten Cluster der richtigen Spur zugeordnet werden und wieviele falsche Cluster einer eingebetteten Spur zugeordnet werden. Das Spurfindungsprogramm kann mit den optimierten Parametern die eingebetteten Spuren besser aus ihrer Umgebung trennen, es werden weniger falsche Cluster zugeordnet und von den eingebetteten Spuren werden längere Stücke gefunden.

Die Parameter mit dem größten Einfluss auf diese Verbesserungen waren die Fehler der Clusterposition, die bei den ursprünglichen Parametern zu groß angenommen wurden. Dadurch konnte der *Trackfinder* bei der Erweiterung der Spur nicht zwischen den richtigen und zufällig in deren Nähe liegenden Clustern unterscheiden. Wenn einer Spur einige falsche Cluster zugeordnet werden, nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass ihr bei der Erweiterung weitere falsche Cluster zugeordnet werden. Bei zu großen Fehlern, wären die Spuren daher zufällige Kombinationen von Clustern, die nichts miteinander zu tun haben.

Werden die angenommenen Fehler der Cluster kleiner gewählt als bei den optimierten Parametern, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein richtiges Cluster verworfen wird, wodurch die Spur zerbrochen oder gar nicht gefunden wird.

Um sicherzugehen, dass das oben geschilderte Verfahren der Optimierung ein korrektes Ergebnis liefert, wurden mit der offiziellen STAR-Einbettungskette verschiedene Datensätze mit variierten Cluster-Fehlern prozessiert. Dieses Verfahren kam zu denselben Ergebnissen für die optimalen Parameter.

Da die Parameter mit Daten des Jahres 2000, Kollision bei  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV, optimiert wurden, wurde nach dem *Run* im Jahr 2001 dieselbe Prozedur für Da-

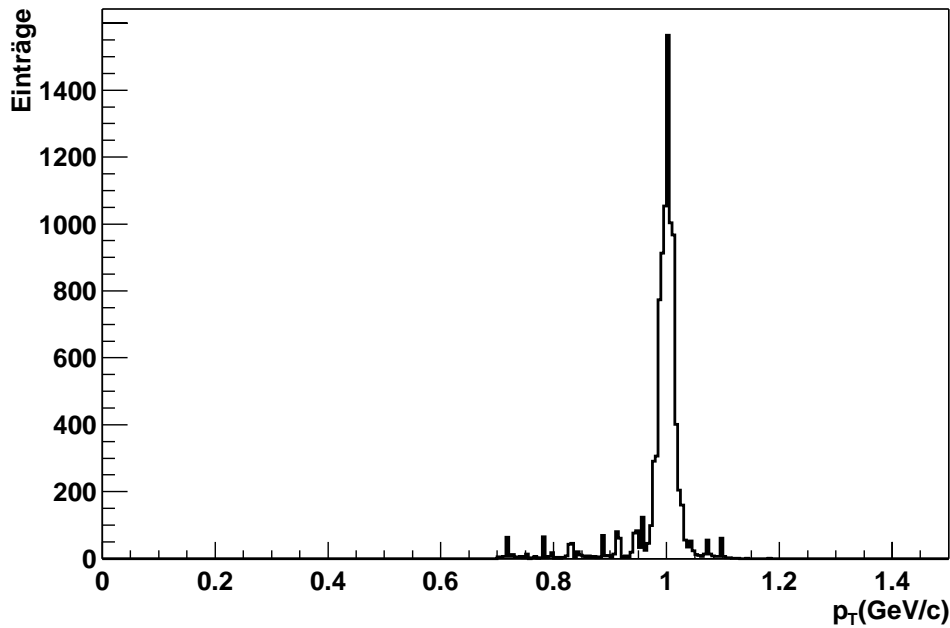
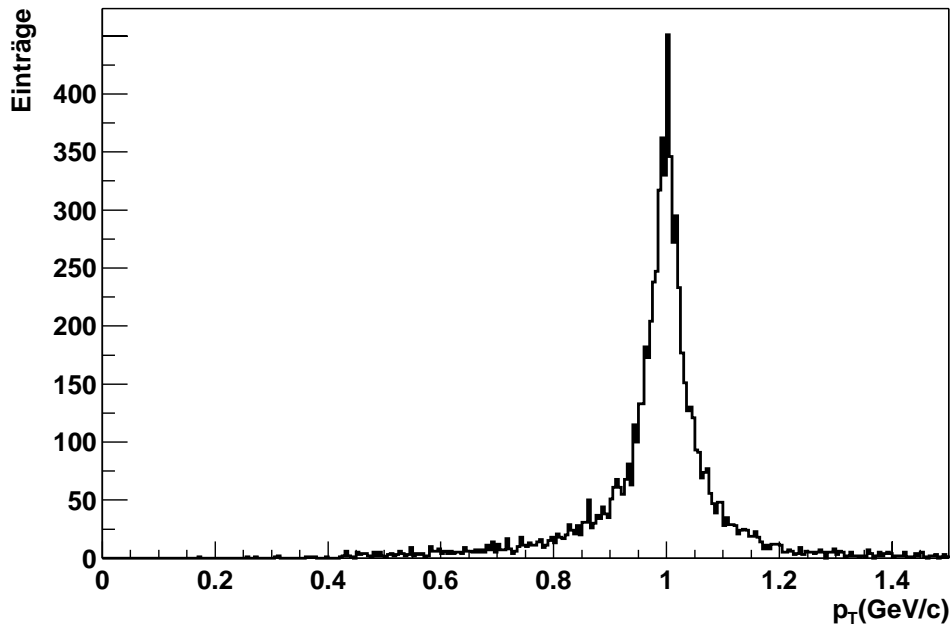


Abbildung 4.16.: Rekonstruierte transversale Impulse, der als „wiedergefunden“ eingestuft Spuren. Da hier nur Spuren mit einem transversalen Impuls von 1 GeV/c eingebettet wurden, gibt die Breite der Verteilungen einen Eindruck von der Impulsauflösung. Das obere Bild zeigt das Ergebnis bei Verwendung der ursprünglichen *Trackfinder*-Parameter, das untere Bild bei Verwendung der optimierten Parameter.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

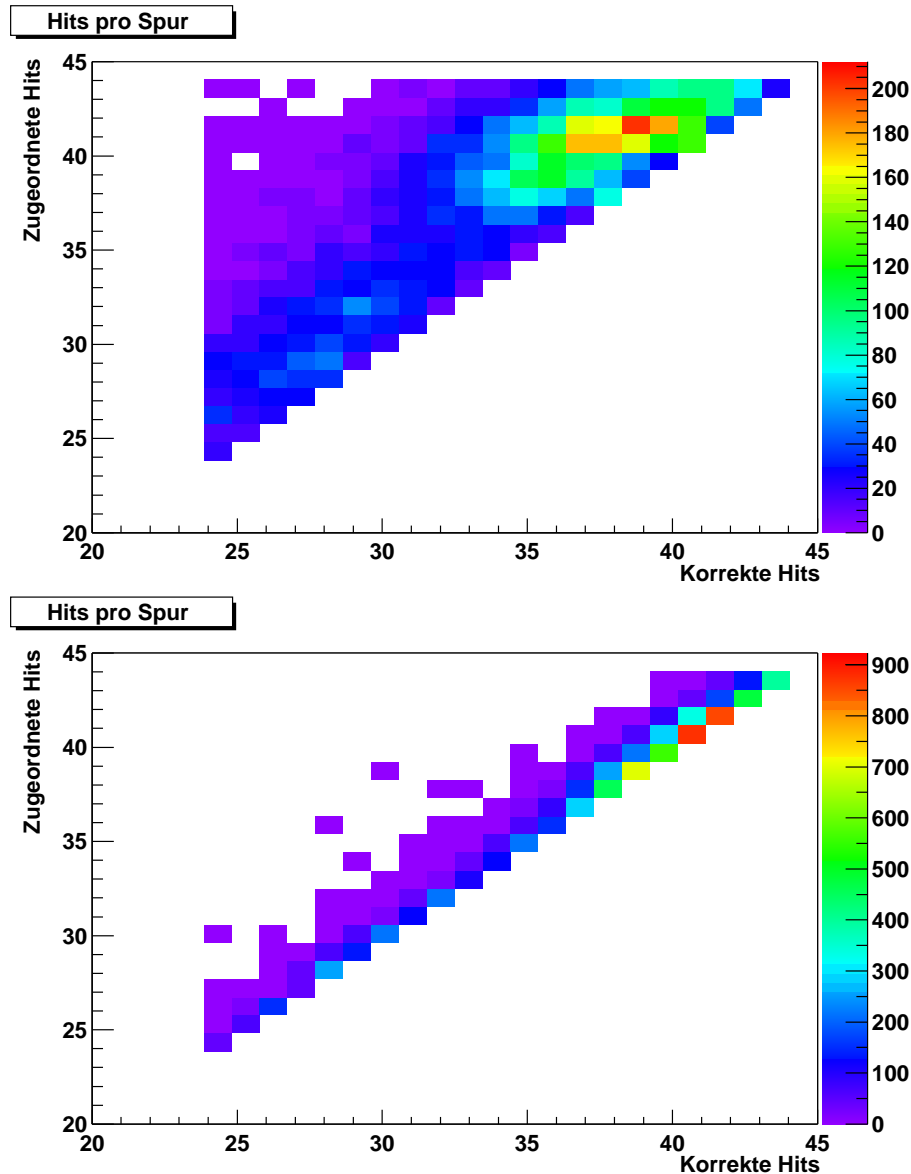


Abbildung 4.17.: Anzahl der Cluster von „wiedergefundenen“ Spuren (zugeordnete Hits) gegen die Anzahl der richtig zugeordneten Cluster der jeweiligen Spur (korrekte Hits). Die Farbskala gibt die Häufigkeit wieder. Würden nur richtige Cluster zugeordnet, befänden sich alle Einträge auf einer Diagonalen. Im oberen Bild (ursprüngliche Parameter) sind den Spuren mehr falsche Cluster zugeordnet als im unteren Bild (optimierte Parameter). Es ist auch zu sehen, dass mit den optimierten Parametern längere Stücke der Spuren gefunden werden.

ten, die bei vollem Magnetfeld und einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV aufgenommen wurden, durchgeführt. Das Optimum an Effizienz und Sauberkeit der Spuren wird bei 20% geringer angenommenen Clusterpositionsfehlern gefunden, was der Verringerung der Diffusion durch das stärkere Magnetfeld entspricht.

#### 4.10.5. Qualität

Die Qualität eines Spurfindungsalgorithmus wird in der Regel daran gemessen, mit welcher Wahrscheinlichkeit er eine vorhandene Spur rekonstruieren kann, mit anderen Worten, wie effizient die Spurrekonstruktion ist. Bei Ereignissen mit wenig Spuren stellt dies meist kein Problem dar. In ultrarelativistischen Schwerionenkollisionen werden aber so viele Teilchen produziert, dass deren Spuren nicht mehr notwendigerweise klar getrennt sind und verschiedene Effekte können dazu beitragen, dass eine Spur nicht erkannt wird. Cluster können einer falschen Spur zugeordnet werden, wodurch sie der richtigen Spur nicht mehr zur Verfügung stehen. Es gibt immer ein gewisses Maß an Rauschen in einem Detektor, das fälschlicherweise als Cluster einer Spur interpretiert werden kann und die Rekonstruktion in die falsche Richtung lenkt, etc.

Es reicht aber nicht aus, dass eine Spur gefunden wird, man sollte natürlich auch in der Lage sein, die interessierenden Eigenschaften des Teilchens möglichst genau rekonstruieren zu können. Die zunächst wichtigste Eigenschaft eines Teilchens für eine physikalische Analyse ist sein Impuls und seine Ladung. Diese beiden Eigenschaften gehen in fast jede nachfolgende physikalische Analyse ein.

Das Vorzeichen der Ladung ist durch die Orientierung der Krümmung einer Teilchenbahn im Magnetfeld bestimmt. Zur Bestimmung des Impulses, ist zum einen der Wert der Krümmung einer Spur in der x-y-Ebene (transversaler Impuls), sowie der Neigungswinkel der Spur relativ zur Strahlachse in der s-z-Ebene notwendig (longitudinaler Impuls). Dieser Neigungswinkel ist bei einem Detektor wie der STAR-TPC mit solenoidalem Magnetfeld immer sehr viel besser bestimmt als der transversale Impuls [Blu93], weshalb die Auflösung des transversalen Impulses ( $p_{\perp}$ -Auflösung) die bestimmende Größe ist.

Die  $p_{\perp}$ -Auflösung ist zunächst durch die Bauart des Detektors bestimmt. Vor allem die Diffusion der Elektronenwolke beim Driften und der Granularität der Auslese sind bestimmende Größen. Das Spurfindungsprogramm hat aber insofern Einfluss auf die Auflösung, da falsch zugeordnete Cluster den Impuls mehr oder weniger stark verfälschen können. Des Weiteren hat die Art der Anpassung Einfluss auf die  $p_{\perp}$ -Auflösung<sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup>Bei der Offline-Spurrekonstruktion wird z. B. ein Kalmanfilter eingesetzt, der bei der Anpassung einer Spur den Energieverlust eines Teilchens im Gas der TPC berücksichtigt.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

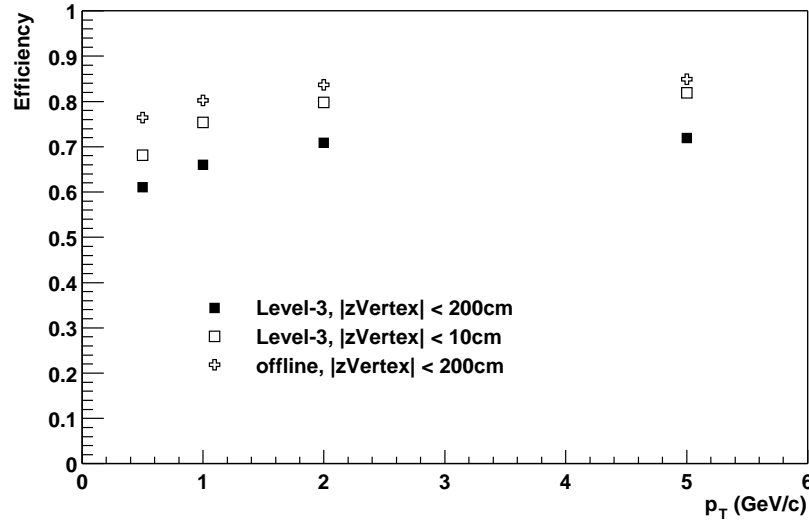


Abbildung 4.18.: Effizienz in Abhängigkeit des transversalen Impulses.

#### Technische Durchführung

Die Bestimmung der Effizienz- und  $p_{\perp}$ -Auflösung wurde mit der vollständigen Simulations- und Einbettungskette durchgeführt. Zunächst wurden Spuren mit bestimmtem transversalem Impuls generiert, in die Rohdaten zentraler Kollisionen eingebettet und durch den TRS prozessiert. Als Ursprung der generierten Spuren wurde jeweils der Kollisionsvertex des Ereignisses gewählt in das diese Spuren eingebettet werden sollten. Daraufhin wurden die Daten von Level-3 Clusterfinder und Level-3 *Trackfinder* rekonstruiert. Während diesen Schritten wird über die Zugehörigkeit eines Clusters zu einer Monte-Carlo-Spur, und deren Parameter Buch geführt. Damit kann später entschieden werden, ob eine Spur wiedergefunden wurde und wenn ja, wie sehr ihre Parameter sich von der ursprünglichen Spur unterscheiden.

#### Effizienz

Für die Bestimmung der Effizienz wurde die Anzahl wiedergefundener Spuren durch die Anzahl eingebetteter Spuren geteilt. Eine Spur wurde als wiedergefunden angesehen, wenn sie mindestens 23 Punkte (von maximal 45) mit der eingebetteten Spur teilt. Dieses Kriterium sorgt dafür, dass zerbrochene Spuren nicht doppelt gezählt werden können.

Um die Werte in Relation setzen zu können, wurde mit denselben Daten und denselben Bedingungen die Effizienzwerte für die STAR-Offline-Rekonstruktionssoftware bestimmt.

In Abbildung 4.18 sind die so bestimmten Werte für die Effizienz in Abhängigkeit des transversalen Impulses der eingebetteten Spuren dargestellt. Dort werden die Effizienzwerte für zwei unterschiedliche Datensätze angegeben. Die Werte, die mit  $|z\text{-Vertex}| < 200$  cm bezeichnet sind, beinhalten alle Ereignisse, d.h. die  $z$ -Vertex Verteilung ist sehr breit<sup>19</sup>. Wenn eine Spur die zentrale Membran durchquert, hinterlässt sie Cluster in verschiedenen Sektoren. Da die Spurfindung im Level-3-System sektorweise geschieht, müsste der GL3 zerbrochene Spuren verschiedener Sektoren wieder zusammenzufügen, was bisher noch nicht implementiert ist. Dies führt dazu, dass bei Ereignissen mit einem  $|z\text{-Vertex}| > 0$  immer ein Teil der Spuren an der zentralen Membran zerbrochen werden.

Das Offline-Trackingprogramm ist in der Lage, Spuren über die zentrale Membran hinaus zu verfolgen, ein Grund weshalb seine Effizienz höher liegt als beim Level-3-*Trackfinder*.

Da diese breite  $z$ -Vertex-Verteilung aber nur für das Jahr 2000 gelten sollte, wurde die Effizienz für Ereignisse mit einem  $|z\text{-Vertex}| < 10$  cm bestimmt, um einen Eindruck der Effizienz unter realistischen Bedingungen zu bekommen.

Im Vergleich zu der Effizienz von nahezu 100 %, die bei der Optimierung der *Trackfinder*-Parameter bestimmt wurde, steigt die Effizienz hier nicht über 80-85 %. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass bei der Optimierung der Parameter immer ein  $z$ -Vertex bei 0,0 cm angenommen wurde. Zum anderen wurden dort Akzeptanzeffekte ausgeschlossen: Spuren, die Sektorgrenzen kreuzen, werden zerbrochen und potentielle Spurpunkte gehen verloren. Die Akzeptanz der TPC beträgt azimuthal aufgrund der Sektorgrenzen tatsächlich nur 91 %. Die Auswirkungen auf die Rekonstruktionseffizienz sind impulsabhängig: „gerade“ Spuren (sehr hoher transversaler Impuls) liegen entweder auf der Sektorgrenze oder nicht, Teilchen mit niedrigem Impuls (starke Krümmung) kreuzen die Sektorgrenzen. Im letzteren Fall hängt die Rekonstruktionseffizienz von der azimuthalen Lage der Spur ab.

### $p_{\perp}$ -Auflösung

Die  $p_{\perp}$ -Auflösung wurde im Zuge desselben Verfahrens bestimmt. Auch hier wurde verlangt, dass eine Spur mit mindestens 23 Punkten wiedergefunden wird. Für die Bestimmung des transversalen Impulses einer Spur wird ein Kreis an

---

<sup>19</sup>Zu der Zeit dieser Untersuchung standen nur Daten des Jahres 2000 zur Verfügung, die sich durch eine sehr breite  $z$ -Vertex Verteilung auszeichnen (vgl. Kap.2.2).

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

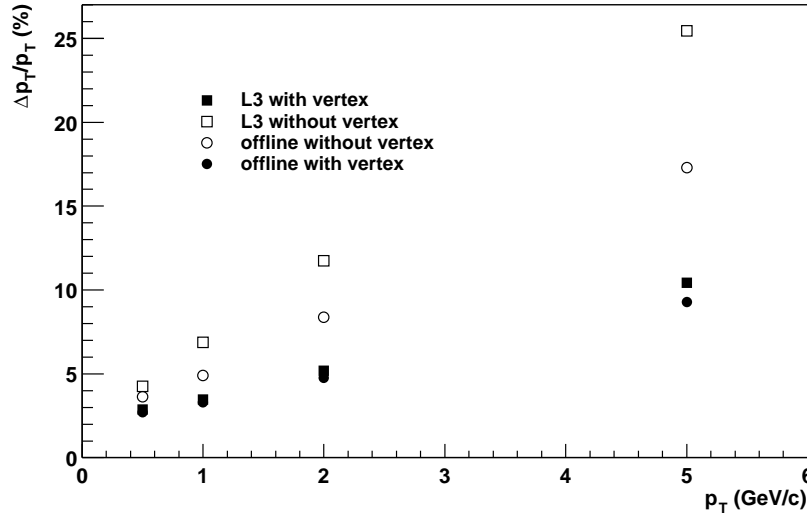


Abbildung 4.19.:  $p_{\perp}$ -Auflösung (RMS) in Abhängigkeit des transversalen Impulses. Offene Symbole zeigen die Auflösung bei Anpassung ohne Vertex, gefüllte Symbole bei Kenntnis des Kollisionsvertex.

die Punkte der Spur angepasst. Bei bekanntem Ursprung (z. B. Kollisionsvertex) der Spur verbessert die Hinzunahme desselben die Genauigkeit der Anpassung, da damit die Länge der Spur im Detektor um fast 50%<sup>20</sup> erhöht wird. Bei der STAR-Offline-Datenrekonstruktion, wird in einem ersten Durchgang der Kollisionsvertex bestimmt, der später zur Anpassung von primären Spuren hinzugekommen wird. Die Bestimmung des Kollisionsvertex beruht auf einem iterativen Verfahren, welches relativ viel Zeit benötigt, um eine entsprechende Genauigkeit zu erreichen, weshalb dieses Verfahren für das Level-3-System nicht durchführbar erschien. Zusätzlich zu der Zeitbeschränkung kommt beim Level-3-System die Parallelisierung des Spurfindungsprozesses erschwerend dazu: alle Spuren eines Ereignisses sind erst auf dem GL3 bekannt. Da die Spurfindung auf den SL3 verteilt ist, müsste die Vertexrekonstruktion entweder auf Sektorebene stattfinden, wobei keine ausreichende Genauigkeit erreicht wird. Eine andere Möglichkeit wäre ein iterativer Prozess mit Datentransfers zwischen den SL3 und dem GL3, was aus zeitlichen Gründen nicht möglich ist.

Da also eine ereignisweise Rekonstruktion des Kollisionsvertex nicht möglich erschien, wurde untersucht, ob eine Kenntnis der Strahlposition in der x-y-Ebene ausreicht, um die  $p_{\perp}$ -Auflösung signifikant zu erhöhen.

<sup>20</sup>Die Mitte der innersten Padreihe der TPC befindet sich in 60 cm Entfernung vom Zentrum der TPC, die Mitte der äußersten Padreihe ist 189.2 cm vom Zentrum entfernt, womit entlang der Mitte eines Sektors, der sensitive Bereich 129.2 cm lang ist.



Als Erstes wurde die Verteilung des x-y-Vertex während einem Run untersucht, was zeigte, dass die maximale Abweichung vom Mittelwert kleiner als 1,5 mm war. Dies liegt in der Größenordnung der Ortsauflösung der TPC, d. h. die Kenntnis der Strahlposition würde einen vollwertigen zusätzlichen Punkt auf der Spur liefern. Es blieb jedoch das Problem, dass sich die Strahlposition von Run zu Run ändern kann.

Es wurde vorgeschlagen die aktuelle Strahlposition mit einem iterativen Algorithmus mit geringer Priorität im Hintergrund laufen zu lassen, der die Strahlposition auf dem aktuellsten Stand hält, was aber bisher nicht weiter verfolgt wurde.

Als realistischer Wert für die Genauigkeit der Kenntnis der x-y-Vertexposition wurde ein Wert von 3-5 mm abgeschätzt. Untersuchungen mit Hilfe der Einbettungsmethode und realistischen Vertexverteilungen zeigten, dass die Nutzung eines konstanten Vertex mit einem Ortsfehler (bei der Spurfindung) von 5 mm die maximale Impulsauflösung ergibt<sup>21</sup>. Bei dieser Wahl, ist die Impulsauflösung gegenüber Schwankungen der tatsächlichen Vertexposition von  $\pm 2$  mm unempfindlich.

In Abbildung 4.19 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur  $p_{\perp}$ -Auflösung zusammengefasst. Der große Einfluss einer bekannten Vertexposition (gefüllte Symbole) ist deutlich zu sehen. Bei bekannter Vertexposition ist die Impulsauflösung des Level-3-Trackfinder 10-15% schlechter, als die der STAR-Offline-Rekonstruktionskette. Bei unbekanntem Vertex, ist der Unterschied zwischen Level-3 und Offline-Rekonstruktion größer, was eventuell auf die im Durchschnitt längeren rekonstruierten Spuren im Fall der Offline-Rekonstruktion zurückzuführen ist.

Für die Datennahme im Jahr 2001 wurde die Strahlposition nicht als Vertexinformation genutzt, da sie lange nicht sehr genau bekannt war, und damit Bedenken bestanden den Impuls aller Spuren zu verfälschen.

Ein weiterer Aspekt der Impulsaufhebungsbestimmung ist die Tatsache, dass hierzu nur Daten bei halbem Magnetfeld zur Verfügung standen. Da die Krümmung einer Spur bei vollem Feld doppelt so groß ist und damit einer Spur des halben Impulses bei halbem Feld entspricht, könnte man annehmen, dass sich die Impulsaufhebung dementsprechend verbessert. Dazu kommt noch eine geringere Diffusion der Elektronenwolken bei der Drift, sodass die Ortsfehler der Cluster geringer werden. Für die Offline-Rekonstruktion wurde die Impulsaufhebung bei vollem Magnetfeld bestimmt, mit dem Ergebnis, dass sie im Vergleich zur Impulsaufhebung bei halbem Feld etwas weniger als die Hälfte beträgt, also eine Verbesserung um mehr als einen Faktor zwei [Kla02].

---

<sup>21</sup>Bei der Annahme von kleineren Fehlern, wird die Impulsaufhebung schlechter, da der Vertex im Vergleich zu den anderen Punkten zu stark gewichtet wird.

### Bemerkungen zur $p_{\perp}$ -Auflösung und Effizienz

Es ist faktisch unmöglich absolute Werte für Effizienz und  $p_{\perp}$ -Auflösung anzugeben. Beide Größen hängen stark von den Bedingungen ab, unter denen sie bestimmt werden. Die Effizienz steigt, wenn man weniger als 23 Punkte zwischen engebetteter und rekonstruierter Spur verlangt und sinkt wenn mehr Punkte verlangt werden. Genauso sinkt die  $p_{\perp}$ -Auflösung, wenn nur sehr wenige gemeinsame Punkte verlangt werden, da dann mehr falsch gefundene Spuren zu ihrer Bestimmung herangezogen werden. Spuren, die 45 Punkte mit den generierten Spuren gemein haben, besitzen eine sehr gute  $p_{\perp}$ -Auflösung, kommen aber selten vor. Es ist also die Frage welche Werte man sinnvollerweise angibt. Die Bedingung von mindestens 23 gemeinsamen Punkten schien insofern vernünftig, da die Erfahrung zeigte, dass Spuren ab einer Länge von 15-20 Punkten eine gute Representation der ursprünglichen Spur darstellen.

Schlußendlich ist die Effizienz, mit der ein Algorithmus eine physikalische Signatur erkennen kann ausschlaggebend. In diese Effizienz wird in der Regel auch die Impulsauflösung in unterschiedlich starkem Maß eingehen, weshalb mit allgemeinen Werten bezüglich der Effizienz keine Aussage über einen bestimmten Algorithmus gemacht werden kann.

Da die Kenntnis der Effizienz bei jeder quantitativen Messung bekannt sein muss, muss diese für jeden Algorithmus getrennt bestimmt werden.

Die Werte die oben angegeben sind, sollen lediglich die Qualität der Level-3 Rekonstruktion in Verhältnis setzen, um einschätzen zu können, was grundsätzlich möglich ist und was nicht.

### 4.10.6. Korrekturen

Es gibt Effekte in der TPC, welche die Ortsbestimmung der Cluster verfälschen. Diese „Verzerrungen“ wirken sich negativ auf die Effizienz der Spurrekonstruktion aus, wenn Spuren aufgrund verschobener Cluster zerbrochen werden. Auch die Impulsrekonstruktion wird durch systematisch verschobene Cluster beeinträchtigt. Die bekannten Verzerrungen sind im einzelnen:

- $E \times B$ -Verzerrungen:  
Diese treten auf, wenn die Feldlinien des Driftfeldes (E-Feld) nicht parallel zu denen des Magnetfeldes (B-Feld) verlaufen. Dieser Effekt entsteht aufgrund lokaler Inhomogenitäten der Felder.
- Padreihe 13:  
Eine Spalte im Feldkäfig zwischen innerem und äußerem Sektor (zwischen

Padreihe 13 und 14) verzerrt das Driftfeld auf eine Weise, dass driftende Elektronen in diesem Bereich in diese Spalte gezogen werden.

- Verschiebung:  
Die TPC ist als Ganzes relativ zur Achse des Magnetfeldes etwas verschoben, sodass eine globale  $E \times B$ -Verzerrung resultiert.
- Verdrehung:  
Die beiden Endkappen der TPC sind leicht gegeneinander verdreht, wodurch die TPC-Hälften nicht mehr spiegelsymmetrisch zur zentralen Membran sind.
- Mißplatzierung der zentralen Membran:  
Die zentrale Membran ist relativ zu den Endkappen leicht gekippt, sodass in ihrer Nähe das Driftfeld nicht mehr homogen ist.

Die erste Herangehensweise an die Korrekturen in STAR war diese einzeln zu berechnen, was pro Cluster ca. 1 ms auf einem Rechner der STAR Analyse-Farm brauchte [Tho01]. Bei einer Anzahl von über 100000 Cluster bei einem zentralen Ereignis dauert dies also 100 s, selbst bei einer Parallelisierung wie beim Level-3 *Trackfinder*-Computercluster würde dies zu lange dauern.

Die Transformationsroutine im *Trackfinder*-Programm, welche die Übersetzung der natürlichen TPC-Koordinaten (Sektor, Padreihe, *Pad*, *Timebin*) in kartesische Koordinaten vornimmt, wurde deshalb als Look-Up-Table implementiert, der die korrigierten Koordinaten implizit enthält.

Die Granularität dieses Look-Up-Tables beträgt 16 Pads und 16 *Timebins*, d. h. auf einem Gitter im Pad-*Timebin*-Raum, der Seitenlänge 16, sind exakte Koordinaten gespeichert. Für Werte zwischen diesen Punkten wird linear extrapoliert. Mit dieser Granularität beträgt die Größe des Look-Up-Tables im Arbeitsspeicher 4 MB [Die02].

Auf diese Art und Weise beträgt der Zeitaufwand pro Cluster  $< 1\mu\text{s}$ , bei zentralen Ereignissen beträgt damit der Zeitaufwand für das Einlesen der Daten pro Sektor weniger als 10 ms.

## 4.11. Analyse- und Trigger-Umgebung

Die Analyse- und Trigger-Umgebung ist der Prozess, der auf dem GL3 die Triggerentscheidung fällt. Dazu sind zunächst Daten erforderlich, auf denen die Entscheidung beruhen soll: die Spurdaten der verschiedenen TPC-Sektoren, Daten der Triggerdetektoren, und im Prinzip aller Detektoren, die ihre Daten schnell

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

genug mit einer gewissen Aussagekraft zur Verfügung stellen können<sup>22</sup>

Diese Daten stehen einem „Algorithmus“ zur Verfügung, der nach bestimmten Informationen in den Daten sucht. Diese Analyse kann trivial sein, wie z. B. die Entscheidung, ob ein Teilchen mit einem Impuls von mehr als 5 GeV/c, in dem Ereignis gemessen wurde, was ein einfaches Durchsuchen der Spurliste bedeutet. Ein Beispiel einer komplizierterer Analyse, stellt die Rekonstruktion von Zerfällen dar. Dies kann die Berechnung der invarianten Masse eines Teilchens, als Auswahlkriterium, beinhalten (s. Kap. 5).

Ein Algorithmus kann zusätzlich zu seiner Triggerentscheidung auch Daten produzieren, die später die Analyse der getriggerten Daten vereinfacht.

Die Algorithmen sind in einer Infrastruktur eingebettet, die ihnen die Daten zur Verfügung stellen, die Entscheidungen weiterleitet und aus eventuell mehreren gleichzeitig laufenden Algorithmen und deren Entscheidungen eine globale Entscheidung (samt Begründung) erstellt.

Ein wichtiger Aspekt der Messung seltener Prozesse ist die Bestimmung des entsprechenden Wirkungsquerschnittes, was bedeutet, dass eine genaue Buchführung über getriggerte und verworfene Ereignisse stattfinden muss. Dies geschieht über Zähler (s. Kap. 4.11.4).

##### 4.11.1. Daten

Die Daten sind die Grundlage, auf der ein Algorithmus seine Entscheidung trifft. Da die verschiedenen Subdetektoren des STAR-Detektors komplementäre Informationen liefern, wäre es wünschenswert, möglichst alle Daten aller Detektoren in die Level-3-Analyse miteinzubeziehen. Das wäre zwar möglich, aber bei einigen Detektoren ist es aus technischen Gründen (Architektur der Datenverarbeitung) nicht möglich, bei anderen ist der Kosten-Nutzen-Faktor nicht angemessen.

Im Jahr 2000 standen dem Level-3 System die Spurdaten der TPC und die Daten der Triggerdetektoren zur Verfügung, im Jahr 2001 kamen noch Clusterdaten der FTPC und des SVT<sup>23</sup> hinzu. Diese Clusterdaten waren jedoch in erster Linie als Mittel zur Qualitätskontrolle dieser (neuen) Detektoren gedacht. Hier sollen nur die Spurdaten der TPC und die Triggerdaten besprochen werden, auf die Integration weiterer Detektoren in das Level-3-System wird in Abschnitt 4.16 eingegangen. Die

---

<sup>22</sup>Das EMC gibt über den ADC Wert in einem seiner Türme eine relativ direkte Energiemessung, während z. B. für den RICH erst eine Analyse der Daten erforderlich würde, um für Level-3 nützlich zu sein.

<sup>23</sup>Der SVT hatte im Jahr 2001 Probleme mit starkem Rauschen, weshalb die Daten nutzlos erschienen und nicht ans Level-3-System geleitet wurden, obwohl die technische Möglichkeit gegeben war.

**TPC-Daten:**

Die Daten der TPC werden von den Supersektoren, d. h. zwölf Datenproduzenten an einen GL3 geliefert. Da Daten immer als eigenständige Pakete verschickt werden, stehen die Spurdaten zunächst als zwölf getrennte Beiträge im Speicher des GL3 bereit.

Um den Zugriff zu vereinfachen werden die Spurdaten der Sektoren in eine zusammenhängende Liste kopiert und dabei durchnummeriert. Die Daten einer Spur können dann über ihre Nummer, als Index in diese Liste, direkt angesprochen werden.

Die Daten einer Spur beinhalten folgende Informationen:

- $q$ :  
Ladung des Teilchens. Diese nimmt die Werte -1 oder 1 an. Teilchen mit höherer Ladung werden nicht als solche identifiziert.
- $p_{\perp}$ :  
transversaler Impuls.
- $\chi^2$ :  
Reduziertes  $\chi^2$ , der Anpassung des Impulses in der x-y-Ebene und der s-z-Ebene.
- `innerMostRow`:  
Nummer der Padreihe, auf der sich das innerste Cluster dieser Spur befindet.
- `outerMostRow`:  
Padreihe des äußersten Clusters der Spur.
- `nHits`:  
Anzahl der Cluster.
- `ndedx`:  
Anzahl der Punkte die zur Berechnung des  $dE/dx$ -Wertes benutzt wurden.
- `dedx`:  
 $dE/dx$ -Wert der Spur.
- $\phi_0, r_0$ :  
Erster Punkt<sup>24</sup> der Spur in Zylinderkoordinaten.

---

<sup>24</sup>Dieser Punkt legt die Position der Helix im Raum fest. In der Regel wird der Punkt gegeben, der am nächsten an dem Kollisionsvertex, bzw. der Strahlachse liegt (*Point of Distance of Closest Approach*).

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

- $z_0$ :  
z-Koordinate des ersten Punktes.
- $\psi$ :  
Azimutaler Winkel des Impulses am ersten Punkt der Spur.
- $\tan \lambda$ :  
Tangens des Neigungswinkels am ersten Punkt.
- length:  
Länge der Spur.
- $dp_{\perp}$ ,  $d\psi$ ,  $dz_0$ ,  $d\tan \lambda$ :  
Fehler der jeweiligen Größen.

Diese Daten sind in Klassenstrukturen gespeichert, die Funktionen bereitstellen, um Spuren zu extrapolieren, ihren Schnittpunkt mit Ebenen und den Punkt ihrer nächsten Annäherung an eine Gerade (z. B. Strahlachse) zu berechnen.

#### Triggerdetektor-Daten

Die Daten der Triggerdetektoren beinhalten die Daten des CTB, der ZDCs und der MWC, wobei letzteres wegen zu hohem Rauschen nicht verwendet wurde. Die Daten des CTB beinhalten:

- Die ADC-Werte der einzelnen Szintillatoren.
- Eventuell auf Level-0 bzw. Level-1 erstellte Summen der DSM-Module. Dies stellt zum Beispiel die Summe von ADC-Werten in einem Quadranten des CTB dar.

Die Daten der ZDC beinhalten:

- ADC-Werte der einzelnen Module.
- Summe der ADC-Werte jeweils einer Seite.

## Bereitstellung der Daten

Alle Daten werden in ein Objekt eingelesen und darin verwaltet. Dieses Objekt ist eine Klasse, die in der Analyse- und Trigger-Umgebung einfach als *Event* bezeichnet wird. Algorithmen können über Funktionen dieser Klasse auf die Daten zugreifen.

### 4.11.2. Die Algorithmen

#### Funktionen

Ein Algorithmus stellt die Schnittstelle zwischen einem Benutzer und dem Level-3-System dar. Ein Algorithmus wird als C++-Klasse implementiert, die über eine definierte Schnittstelle in die Analyse- und Trigger-Umgebung eingebunden wird. Es können mehrere Algorithmen gleichzeitig eingesetzt werden, wobei darauf geachtet werden muss, dass nicht zuviel rechenintensive Algorithmen gleichzeitig aufgerufen werden, damit das System nicht zu langsam wird. Eine maximale Anzahl von 20 parallel laufenden Algorithmen ist momentan technisch möglich.

Parameter:

Zunächst besteht ein Algorithmus aus der Funktion, die aus den Daten eine Triggerentscheidung erstellt. Das Verhalten dieser Funktion kann über Parameter gesteuert werden, die zu Beginn eines *Runs* eingegeben werden können. Jedem Algorithmus stehen fünf Integer(Ganzzahl)-Parameter und fünf Fließkomma-Parameter zur Verfügung.

Pre- und Postscale:

Die Frequenz einer positiven Entscheidung kann herunterskaliert werden. Der Skalierungsfaktor wird als ganzzahliger Wert angegeben, wobei z. B. 5 bedeutet, dass jedes fünfte Ereignis getriggert wird.

Bei dieser Skalierung, gibt es die Möglichkeit den Aufruf eines Algorithmus zu skalieren, d. h. ein Algorithmus wird nur jedes x-te Ereignis aufgerufen, und somit wird die Anzahl der positiven Triggerentscheidungen statistisch um den Faktor x reduziert. Dieser Modus wird als „Prescale“ (Vorskalierung) bezeichnet.

Die andere Möglichkeit ist, den Algorithmus bei jedem Ereignis aufzurufen, und die Anzahl seiner Entscheidungen zu skalieren, was als „Postscale“ (Nachskalierung) bezeichnet wird.

Statistisch sollte sich bei beiden Methoden der Skalierung dieselbe Anzahl von positiven Triggerentscheidungen ergeben. Der Vorteil der Prescale ist, dass ein Algorithmus der relativ viel Rechenzeit benötigt, nur selten aufgerufen wird und somit das System schneller laufen kann. Der Vorteil der Postscale ist statistisch

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

begründet, da eine Prescale die Anzahl der begutachteten Ereignisse reduziert, während die Postscale die Anzahl der positiven Entscheidungen skaliert. Damit ist die statistische Signifikanz der Messung einer Rate höher, wenn man die Rate positiver Entscheidungen eines Algorithmus per Postscale reduziert.

Die bisherigen Erfahrungen zeigten jedoch, dass das Konzept der Postscale nie benutzt wird und verwirrend ist.

Speichern unbeeinflusster Ereignisse:

Es ist in aller Regel wünschenswert, einen Teil der prozessierten Ereignisse auf Band zu speichern, unabhängig von einer Level-3 Triggerentscheidung. Dies ist erforderlich um später die getriggerten Ereignisse mit einem entsprechenden Satz ungetriggelter Ereignisse vergleichen zu können. Da Level-3 Triggerentscheidungen relativ selten fallen sollten, wird sowieso in einem Modus Daten genommen, in dem nur ein Teil der Speicherbandbreite für Level-3 getriggerte Ereignisse reserviert ist. Der Rest wird mit Level-0,1,2 getriggerten Ereignissen aufgefüllt<sup>25</sup>. Dies wird durch einen speziellen Algorithmus (gl3True genannt), der bei jedem Ereignis eine positive Triggerentscheidung liefert, mit einer entsprechenden Prescale, erreicht. Wird der gl3True Algorithmus mit einer Prescale von 10 eingesetzt, wird also jedes zehnte Ereignis auf Band geschrieben, unabhängig davon ob ein anderer Level-3 Algorithmus es getriggert hätte oder nicht.

Identifizierung eines Algorithmus:

Jedem Algorithmus ist eine 32-bit Zahl zugeordnet. Diese Zuordnung ist fest. Das limitiert die mögliche Anzahl von Algorithmen auf  $2^{32}$ , verhindert aber mögliche Verwirrung<sup>26</sup>.

### Produzierte Daten

Jeder Algorithmus produziert eine geringe Menge an Daten, die bei jedem gespeicherten Ereignis mit auf Band geschrieben werden. Diese Daten beinhalten:

- Id:  
Die Identifikationsnummer des Algorithmus.

---

<sup>25</sup>Dies in der Realität zu erreichen ist nicht trivial. Es gab verschiedene Ansätze dies zu automatisieren, bisher wurde aber die entsprechende Prescale per Hand auf einen Wert gesetzt, der der Kollisionsrate des Beschleunigers angemessen war.

<sup>26</sup>Dies klingt wie ein Witz, aber die Geschichte (vor allem der Computertechnik) bietet viele Beispiele, bei denen eine vernünftig klingende Einschätzung einer Größe nach kurzer Zeit absurd erschien. Wir haben dieses Problem ernsthaft diskutiert, kamen aber zu dem Schluss, dass die Gefahr einer Ausschöpfung all dieser Möglichkeiten während der Lebenszeit unseres Systems sehr unwahrscheinlich sei.



- On:  
Lief der Algorithmus bei diesem Ereignis?
- Accept:  
Hat dieses Ereignis die vom Algorithmus gestellten Bedingungen erfüllt? (Unabhängig von einer eventuellen Postscale).
- Build:  
Wurde dieses Ereignis gebaut, weil dieser Algorithmus eine positive Entscheidung getroffen hat?  
Dieser Wert weicht von dem Accept-Wert ab, wenn eine Postscale aktiv war, die bei diesem Ereignis dafür sorgte, dass es nicht aufgrund der positiven Entscheidung dieses Algorithmus gebaut wurde, sondern aufgrund eines anderen Algorithmus (z.B. gl3True).
- nProcessed:  
Laufende Zahl der von diesem Algorithmus untersuchten Ereignisse.
- nAccept:  
Laufende Zahl der untersuchten Ereignisse, welche die vom Algorithmus gestellte Beding erfüllten.
- nBuild:  
Laufende Zahl der Ereignisse, die aufgrund dieses Algorithmus gebaut wurden.
- Ergebnis:  
Jeder Algorithmus kann zehn 32-Bit Fließkommazahlen mit Informationen füllen. Es wäre z. B. denkbar, dass ein Algorithmus der nach  ${}^4\text{He}$  sucht (vgl. Kap. 5), den Impuls und dE/dx-Wert einer Kandidatenspur speichert, damit diese Werte später mit dem Ergebnis einer Offline-Analyse verglichen werden können.

## Implementation

Die Grundstruktur der Algorithmen wurden von Thomas Dietel implementiert. Das Grundgerüst eines Algorithmus ist über eine Base-Klasse definiert. Sie gibt zum einen alle nötigen Funktionen vor, die von einem Algorithmus bereitgestellt werden müssen. Zum anderen verbirgt diese Base-Klasse einige Dinge wie Zähler (die jeder Algorithmus korrekt führen muss) vor dem Benutzer.

Ein Benutzer-Algorithmus muss als Klasse implementiert sein, welche von der Algorithmus-Base-Klasse erbt. Eine Algorithmus-Klasse muss folgende Funktionen definieren:

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

- `decide()`:  
Diese Funktion beinhaltet den eigentlichen Algorithmus, der die Triggerentscheidung produziert. Diese Funktion gibt als Rückgabewert die Triggerentscheidung, 0 bzw. 1.
- `getAlgorithmID()`:  
Diese Funktion gibt die Algorithmus-Identifikationsnummer zurück.
- `getAlgorithmName()`:  
Dies gibt den Namen eines Algorithmus wieder, dieser ist zur Identifikation für Menschen gedacht und sollte dementsprechend tatsächlich ein Name sein.

Diese Funktionen die durch die Base-Klasse vorgegeben sind optional:

- `init()`:  
Diese Funktion wird aufgerufen, wenn ein Algorithmus neu eingesetzt wird, was immer zu Beginn eines *Runs* geschieht. Diese Funktion kann genutzt werden, um Variablen auf Anfangswerte zu setzen.
- `setParameters()`:  
Damit sind eventuell vorhandene Parameter, die vom Benutzer über die *Run Control* eingegeben werden, dem Algorithmus zugänglich. Damit werden also interne Variablen gefüllt.
- `registerHistos()`:  
Damit werden Histogramme, die ein Algorithmus benutzen kann, nach der Definition derselben registriert. Diese Funktion muss aufgerufen werden, wenn ein Algorithmus Histogramme verwenden will.

Weitere Funktionen sind in der Base-Klasse implementiert, sind aber nicht direkt dem Benutzer zugänglich, sondern dienen als Schnittstelle der Algorithmen nach außen:

- `process()`:  
Ruft implizit die benutzerdefinierte `decide()`-Funktion auf, sofern keine *Pre-scale* dies verbietet. Hier werden auch die Zähler des Algorithmus inkrementiert.  
Der Rückgabewert ist 0 wenn die `decide()`-Funktion den Rückgabewert 0 hatte, oder eine von 0 verschiedene Zahl, die die Priorität einer Entscheidung angibt. Letzteres ist gedacht, um einer weiteren Instanz die Möglichkeit zu geben, Level-3 Trigger-Entscheidungen zu revidieren. Insbesondere

für eine automatische Einstellung der Prescale zur optimalen Sättigung der Speicherbandbreite spielt dies eine Rolle.

- `setScaling()`:  
Wird zu Beginn eines *Runs* aufgerufen, um dem Algorithmus die Werte für Pre- und Postscale mitzuteilen.
- `fillSummary()`:  
Wird am Ende eines zu speichernden Ereignisses aufgerufen, sodass die Daten der Algorithmen in Strukturen gefüllt werden, die gespeichert werden können.
- `showConfiguration()`:  
Wird bei der Konfiguration der Algorithmen aufgerufen und schreibt die Parameter in das GL3-Logfile. Ein Benutzer kann somit direkt kontrollieren, ob die richtigen Parameter übermittelt wurden.
- `resetCounters()`:  
Wird von `init()` aufgerufen, und initialisiert die Zähler zu Beginn eines *Runs*.

In Anhang A ist als Beispiel des einfachsten möglichen Algorithmus der Quellcode des `gl3True` Algorithmus aufgelistet.

### 4.11.3. Infrastruktur

Mit Infrastruktur ist hier der Teil des Programms gemeint, der alles erledigt was nicht direkt innerhalb eines Algorithmus abgearbeitet wird. Dazu gehören die folgenden Aufgaben:

- Konfiguration der Algorithmen:  
Zu Beginn eines *Runs* wird über eine Konfigurationsdatei eingelesen, welche Algorithmen, mit welchen Parametern und Pre-Postscals eingesetzt werden sollen. Es wird eine List aller aktuellen Algorithmen erstellt, damit diese über Zeiger angesprochen werden können. Danach werden den Algorithmen ihre jeweiligen Parameter mitgeteilt.
- Formatieren der Daten:  
Dazu gehört das oben beschriebene Umkopieren der Spurdaten und Ordnen der Triggerdetektor-Daten bevor ein Ereignis bearbeitet wird.  
Dies geschieht unmittelbar bevor die Algorithmen aufgerufen werden.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

- Aufruf der Algorithmen:  
Die Algorithmen werden der Reihe nach aufgerufen, indem bei jedem Algorithmus die `process()`-Funktion aufgerufen wird. Der Rückgabewert der Algorithmen, der die Entscheidung darstellt, wird gespeichert.
- Erstellen einer globalen Triggerentscheidung:  
Nachdem alle Algorithmen ihre Analyse beendet haben, wird eine globale Triggerentscheidung erstellt, indem die Entscheidungen der verschiedenen Algorithmen mit einem ODER verknüpft werden. Die Entscheidungen der einzelnen Algorithmen werden als Bitmaske gespeichert. Zusammen mit einer Bitmaske, die angibt welche Algorithmen bei diesem Ereignis aktiv waren, wird diese an den GL3 weitergegeben, der diese an den GB weiterleitet.
- Füllen der Algorithmus-Daten:  
Nachdem eine Entscheidung getroffen wurde, werden die Daten der Algorithmen in eine Struktur gefüllt, die an den GL3 weitergereicht wird. Der schickt diese beim Bau eines Ereignisses an den *Event Builder*.
- Führen globaler Zähler:  
Es werden globale Zähler geführt, die zählen, wieviele Ereignisse insgesamt in einem *Run* prozessiert wurden, wieviele Ereignisse positive/negative Triggerentscheidungen hervorriefen und wie viele Ereignisse nicht bearbeitet werden konnten, weil ein Fehler auftrat<sup>27</sup>.

Dieser Teil des Programms wurde von Pablo Yepes und Thomas Dietel implementiert.

##### 4.11.4. Zähler

Ein genaues Führen von Zählern ist notwendig, um bei der späteren Datenanalyse, Raten gemessener Größen ins Verhältnis zur Luminosität setzen zu können. Daraus lässt sich dann bei bekannter absoluter Luminosität der Wirkungsquerschnitt bestimmen. Natürlich muss auf jeder Ebene der Datenverarbeitung, auf der Ereignisse verworfen werden können, also auf allen Triggerebenen, eine genaue Buchführung stattfinden.

Im Level-3-System kann man zwischen globalen Zählern und den Zählern der einzelnen Algorithmen unterscheiden.

---

<sup>27</sup>Die passiert in der Regel nur wenn Daten fehlerhaft produziert wurden, sodass sie falsche Zeiger enthalten.

## Globale Zähler

Es gibt zwei globale Zähler die auf den GL3 geführt werden:

- **nProcessed:**  
Zunächst wird die Anzahl der Ereignisse, die das System passieren gezählt. Das entspricht der Anzahl der Ereignisse, die den Level-0,1,2-Trigger passieren und das DAQ-System erreichen. Dies dient als Referenz für die folgenden Zähler.
- **nReconstructed:**  
Dies entspricht der Anzahl der Ereignisse, die vollständig rekonstruiert und analysiert wurden. Die Differenz zu den „prozessierten“ Ereignissen ergibt sich aus Ereignissen, bei deren Rekonstruktion oder Analyse Fehler auftraten, oder die aufgrund eines anderen Fehlers im DAQ-System nicht vollständig das Level-3-System erreichten. Die Anzahl der „verunglückten“ Ereignisse ist in der Regel so gering, dass ein Fehler im Wirkungsquerschnitt aufgrund derer Nichtbeachtung vernachlässigbar wäre. Dies kann aber mit diesem Zähler kontrolliert und quantifiziert werden.

## Algorithmen-Zähler

Jeder Algorithmus führt drei Zähler, die seine Aktionen dokumentieren:

- **nProcessed:**  
Dieser Zähler zählt alle Ereignisse, die ein Algorithmus bearbeitet hat. Die Differenz zwischen dieser Zahl und dem globalen *nReconstructed* ergibt die Prescale eines Algorithmus.
- **nAccept:**  
Dies ist die Zahl der Ereignisse, die die Bedingungen eines Algorithmus erfüllt haben. Wenn der Algorithmus eine Postscale von 1 hat, ist diese Zahl gleich der Zahl, der von diesem Algorithmus getriggerten Ereignisse.
- **nBuild:**  
Diese Zahl gibt die Anzahl der Ereignisse an, die aufgrund einer positiven Entscheidung dieses Algorithmus, gespeichert wurden. Die Differenz zu *nAccept* desselben Algorithmus gibt die Postscale an.

### Auswertung der Zähler

Die Auswertung der Zähler birgt das Problem, dass es mehrere Instanzen des GL3 geben kann. Damit werden dieselben Zähler an verschiedenen Orten geführt und müssen später addiert werden, damit man das gesamte Ensemble von Ereignissen erfasst. Ein Synchronisieren der verschiedenen Zähler während des *Runs* wurde diskutiert, da dies aber eine große Menge zusätzlicher Nachrichten zwischen den GL3 bedeutet hätte, wurde ein anderer Weg gewählt.

Bei der Produktion der Rohdaten werden die Zähler aller GL3-Instanzen addiert und zentral gespeichert, so hat man bei der späteren Auswertung der Daten einfachen Zugriff auf die Zähler, welche auf der Gesamtheit der Ereignisse basieren.

## 4.12. Prozessoren

Die Wahl der Prozessoren wurde zunächst durch die Anforderungen bestimmt, die im Level-3-Proposal [Ber98b] gestellt wurden. Um eine Rate von 100 Ereignissen/s bearbeiten zu können, wurde eine maximale Bearbeitungszeit pro Ereignis von unter 100 ms vorgegeben. Dies setzt eine Anzahl von 12 Prozessoren zur Spurrekonstruktion pro Sektor voraus. Diese könnten parallel auf den maximal 12 Ereignissen im Ereignispuffer der Mezzaninekarten arbeiten.

Im Frühjahr 1999, als die Entscheidung für einen Prozessortyp fallen mußte, standen als Alternativen Intel Pentium-Prozessoren und Compaq Alpha-Prozessoren zur Verfügung. Der schnellste Pentium-Prozessor zu dieser Zeit war der Pentium III mit 450 MHz Taktfrequenz, während der Alpha Prozessor (Typ 21264) mit 500 MHz Taktfrequenz verfügbar war. In Abbildung 4.20 ist die Spurfindungszeit pro Sektor eines simulierten Ereignisses, mit 400 Spuren pro Sektor, für verschiedene Prozessoren gezeigt. Ein Alpha Prozessor mit 500 MHz benötigte ca. 88 ms um einen Sektor mit 400 Spuren zu bearbeiten, während ein 450 MHz Pentium ca. 135 ms benötigte.

Da somit nur der Alpha-Prozessor die gestellten Anforderungen erfüllte, fiel die Entscheidung, Alpha-Prozessoren zu verwenden.

Die größere Schnelligkeit des Alpha Prozessors im Vergleich zum Pentium Prozessor bei gleicher Taktrate ist durch die unterschiedliche Architektur zu erklären. Der Alpha Prozessor ist ein 64-Bit Prozessor, bei einem Taktzyklus verarbeitet er ein 64-Bit breites Datenwort, während der Pentium ein 32-Bit Prozessor ist. Bei den Vorläufern des Alpha 21264 Prozessors wurde die Schnelligkeit in erster Linie durch eine hohe Taktfrequenz erreicht. Zusätzlich wurden beim Alpha 21264 Prozessor noch einige „intelligente“ Details implementiert, z. B. eine präzise Sprungvorhersage, Out-of-order-execution, erstmalige Implementation von mathemati-

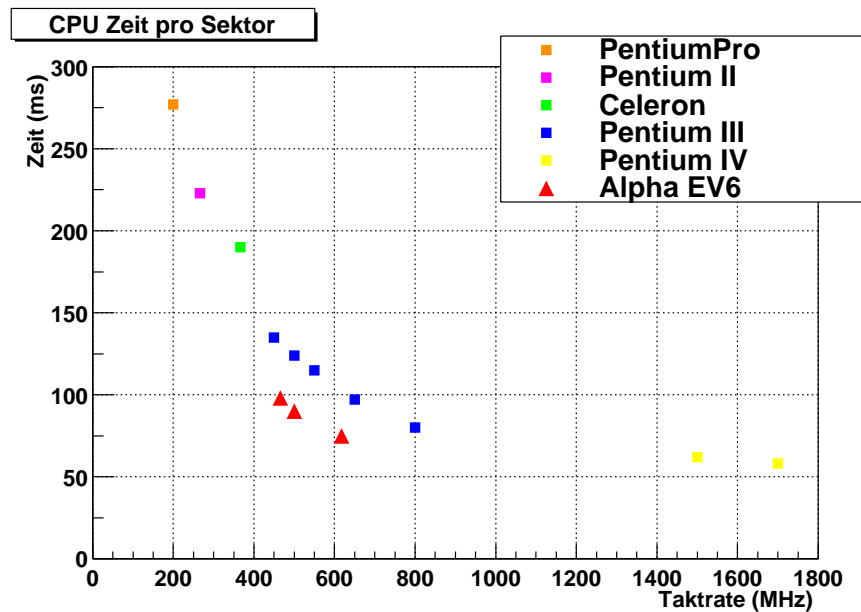


Abbildung 4.20.: Spurfindungszeit pro Sektor für verschiedene Prozessoren (Simulation mit 400 Spuren pro Sektor)

schen Funktionen (z.B. Quadratwurzel) in Hardware, 2-4 MB Level-2 Cache, und einer sehr hohen Speicherbandbreite von 1,3 GB/s bis zu 5,6 GB/s<sup>28</sup>.

Im Level-3 System werden im vorläufigen Endausbau 36 Compaq DS-10 Server mit 466 MHz Alpha-Prozessoren und 12 DS-10L Server mit 617 MHz Alpha-Prozessoren als SL3 eingesetzt. Als GL3 kommen eine Compaq XP1000 Workstation mit 500 MHz Alpha-Prozessor, ein 600 MHz Pentium Server und ein 800 MHz Dual-Pentium Server zum Einsatz. Der L3EVP ist ein DS-10 (466 MHz) Server.

## 4.13. Netzwerk

Die beiden wichtigen Eckdaten eines Netzwerktyps sind die Bandbreite und die Latenzzeit.

Die Bandbreite gibt an, wieviel Daten pro Zeiteinheit transportiert werden und ist in der Regel von der Frequenz (bei seriellen Verbindungen die einzige Größe) und der Busbreite (bei parallelen Verbindungen) einer Netzwerkverbindung abhängig. Das verwendete Protokoll hat auch Einfluss auf die Bandbreite, falls dies in seiner

<sup>28</sup>Spitzenwerte, abhängig von der Konfiguration des Speicherinterfaces.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

Datenmenge nicht vernachlässigbar gegenüber der Menge der transportierten Daten ist. Wenn das Protokoll mit Rechenaufwand auf Sender und/oder Empfängerseite verbunden ist (z. B. bei Berechnung der Parität) kann eine zu langsame CPU auch die Bandbreite bremsen.

Die Latenzzeit gibt die Zeit an, die zwischen Senden und Empfang einer Nachricht vergeht. Die Latenzzeit hängt vor allem davon ab, wie schnell eine Nachricht von einer Netzwerkkarte verarbeitet wird und wie schnell das Betriebssystem eines empfangenden Knotens auf einen *Interrupt* der Netzwerkkarte reagieren kann.

##### 4.13.1. Anforderungen

Im DAQ-System von STAR werden große Datenmengen verarbeitet (vgl. Kap. 3.3), die mit 6-10 MB pro Ereignis und einer Ereignisrate von bis zu 100 Hz, Datenraten bis zu 1 GB/s erreichen.

Hohe Datenraten im DAQ-System fallen beim Bau eines Ereignisses, beim Transfer der Clusterdaten zu den SL3-CPU's und beim Transfer der Spurdaten von den SL3 zu einer GL3-CPU an.

##### **Bandbreite**

Die benötigten Bandbreiten betragen:

- Bauen von Ereignissen:  
Beim Bau von Ereignissen ist die Rate durch die allokierte Speicherrate nach RCF auf 30 MB/s limitiert, dies gibt die Bandbreitenanforderung an.
- Transfer von Clusterdaten:  
Bei einer durchschnittlichen Größe der Clusterdaten zentraler Ereignisse von ca. 2 MB für die gesamte TPC und einer Verteilung dieser Menge auf 12 Supersektoren, die diese Daten parallel an 12 SL3-CPU's liefern, ergibt sich pro Ereignis eine Datenmenge von 150-200 kB. Bei einer maximalen Rate von 100 Hz ergäbe dies also eine durchschnittlich erforderliche Bandbreite von 15-20 MB/s.
- Transfer von Spurdaten:  
Beim Transfer von Spurdaten fallen ca. 0,5 MB pro zentraler Kollision an. Bei einer Rate von 100 Hz wären dies 50 MB/s, die an einen GL3 geschickt würden. Da mehrere GL3 eingesetzt werden ist die Rate pro GL3 aber geringer.



Die Bandbreitenanforderung liegen also in der Größenordnung von 20-50 MB/s. Betrachtet man die Zeit, die der Transfer dieser Datenmengen kostet, benötigen die 0,5 MB Spurdaten bei einer Netzwerkbandbreite von 100 MB/s 5 ms. Dies ist ein nicht zu vernachlässigender Anteil, der zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit eines Ereignisses. Es gibt verschiedene schnelle Netzwerke auf dem Markt, deren Bandbreite bisher durch die Bandbreite des PCI-Busses der verbundenen Rechner limitiert war<sup>29</sup>, sodass je nach PCI-Implementation Bandbreiten in der Größenordnung 60-120 MB/s erreicht werden können.

## Latenzzeit

Die Latenzzeit ist vor allem für Nachrichten bestimmend, die aufgrund ihrer geringen Größe nicht durch die Bandbreite limitiert sind. Das STAR-DAQ-System ist nicht auf eine sehr präzise Synchronisation angewiesen, da sämtliche Nachrichten und Datentransfers in ein Protokoll eingebunden sind, welches den Ablauf kontrolliert. Deshalb gibt es keine absolut zwingenden Anforderungen an eine maximale Latenzzeit des Netzwerks, es wurde jedoch eine Obergrenze von 100  $\mu$ s gesetzt [Lev99], die in jedem Fall noch eine effiziente Kommunikation ermöglichen würde.

### 4.13.2. Myrinet

Myrinet ist ein Netzwerk, das eine Bandbreite von 1.28 GBit/s<sup>30</sup> im Netzwerk zur Verfügung stellt. Dies entspricht theoretisch 160 MB/s, was durch die beschränkte Bandbreite der PCI-Busse in Empfänger und Sender limitiert ist. Die Verbindung läuft über 8-Bit breite, differenzielle Kabel, die in zwei verschiedenen Konfigurationen verfügbar sind: SAN-Kabel, mit kleinerer Steckerbaugröße, ohne Abschirmung und einer maximalen Länge von 3 m (10 ft), zum Einsatz innerhalb von Elektronikschränken, und die LAN-Kabel mit Abschirmung, mit bis zu 10.5 m (35 ft) Länge<sup>31</sup>.

Die Netzwerktopologie ist switch-basiert, dies bedeutet unter anderem, dass eine Planung und Erweiterung eines Netzwerks einfach durchzuführen ist.

---

<sup>29</sup>Die Entwicklung des PCI Busses ist in den letzten Jahren schnell vorangetrieben worden. Während die ursprüngliche Implementation mit 32-Bit Breite und 33 MHz Frequenz, mit einer theoretisch maximalen Bandbreite von 132 MB/s meist nur auf 60-70 MB/s kam, kann inzwischen mit 64-Bit, 66 MHz PCI Bussen bis zu 200 MB/s transportiert werden.

<sup>30</sup> Mittlerweile gibt es eine neuere Version von Myrinet (Myrinet2000), die eine maximale Bandbreite von 2 GBit/s zur Verfügung [Myr02] stellt, dies wird aber bisher nicht in STAR eingesetzt.

<sup>31</sup>Myrinet2000 ermöglicht mit seriellen, optischen Verbindungen eine Kabellänge von bis zu 200 m.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

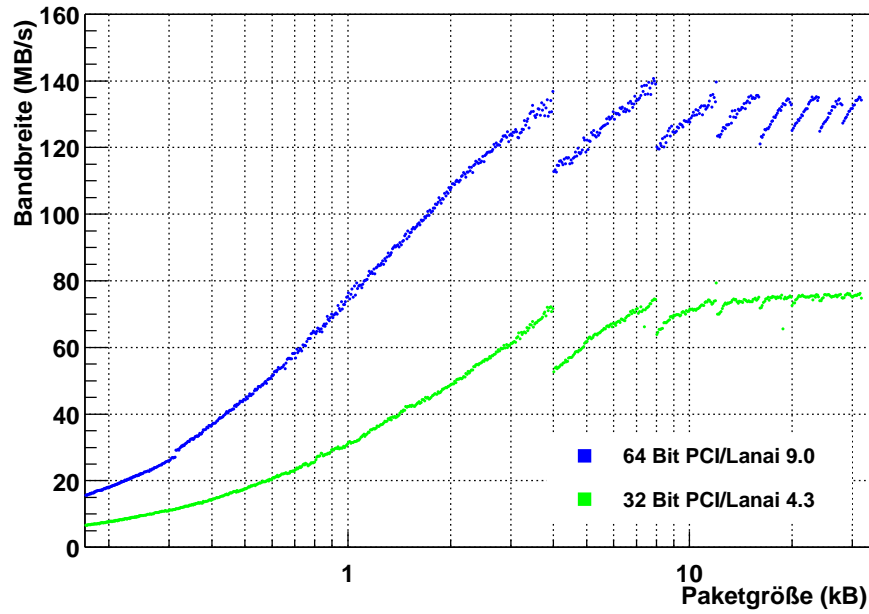


Abbildung 4.21.: Myrinet Bandbreite bei verschiedenen Paketgrößen.

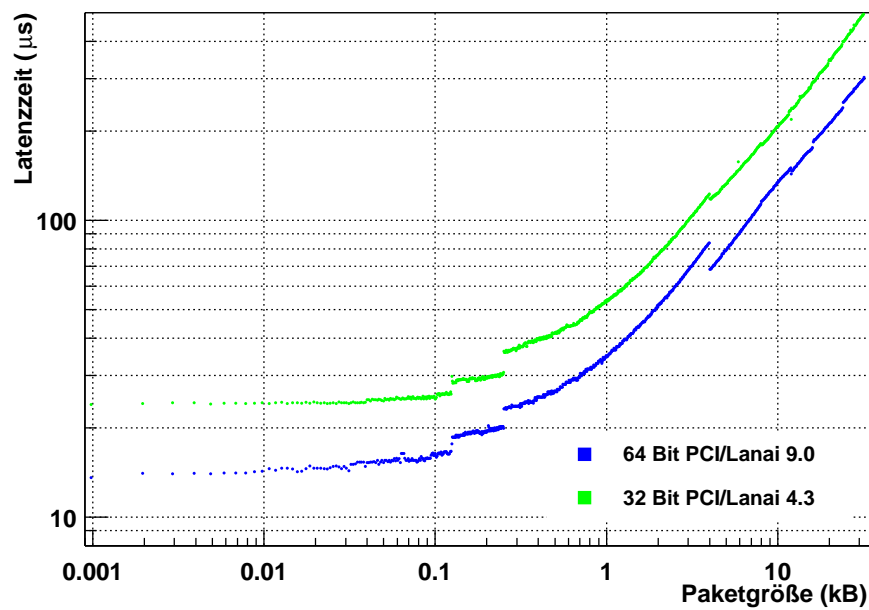


Abbildung 4.22.: Myrinet Latenzzeit bei verschiedenen Paketgrößen.

Die Netzwerkkarten beinhalten eine RISC-CPU, welche die Kommunikation steuert und Datentransfers zwischen Karte und Arbeitsspeicher über DMA<sup>32</sup>-Zugriffe vollzieht. Zum einen ermöglicht dies, einen Datentransfer mit minimaler Wirtsrechner-CPU-Lastung für Sender und Empfänger, zum anderen ermöglicht die RISC-CPU auf der Netzwerkkarte eine Flußkontrolle, Fehlerkorrektur und eine Lebenskontrolle der Verbindung.

Die Latenzzeit zwischen Netzwerkkarten ist sehr gering (im Bereich von 1  $\mu$ s), auch bei Durchquerung eines Switch. Dazu kommen Latenzzeit-Beiträge der Verarbeitung auf der Karte und des Datentransfers im Wirtsrechner, sodass sich eine Latenzzeit im Bereich von 10-30  $\mu$ s ergibt. Diese Zeiten sind in erster Linie von der Schnelligkeit der RISC-CPU und der Qualität der PCI-Implementation auf dem Wirtsrechner abhängig.

In Abbildung 4.22 sind gemessene Bandbreiten und Latenzzeiten auf zwei unterschiedlichen Konfigurationen gezeigt. Die Werte für die 64-Bit-Karte mit Lanai 9.0 CPU<sup>33</sup> wurden zwischen zwei Compaq DS-10 466 MHz Workstation mit Alpha-CPU, 64-Bit breitem PCI-Bus bei 33 MHz PCI-Taktfrequenz ermittelt. Die Werte für die 32-Bit/Lanai 4.3 Karten wurde zwischen zwei Dell Pentium III Servern mit 600 resp. 800 MHz CPU und 32-Bit/33 MHz-PCI-Bus ermittelt. Bandbreite und Latenzzeit wurden für verschiedene Datenpaketgrößen von 1 Byte bis 34 kB ermittelt.

Die Bandbreite wurde ermittelt, indem die Zeit gemessen wurde, die zum Versand eines Paketes benötigt wird. Die Latenzzeit wurde bestimmt, indem ein Paket an einen Rechner geschickt wurde, sobald dieses angekommen war, wurde es an den Sender zurückgeschickt. Die Zeit zwischen Versand und Empfang des Pakets auf der Senderseite wurde gemessen. Da dies der doppelten Latenzzeit entspricht, wurden die gemessenen Werte halbiert. Somit entspricht die Latenzzeit der Zeit die vergeht, zwischen dem Beginn des Sendevorgangs beim Sender und dem Ende des Empfangsvorgangs beim Empfänger.

Die Bandbreite wächst bei ansteigender Paketgröße bis zu einer Größe von 4 kB, danach fällt sie ab und wächst wieder bis zu einer Paketgröße von 8 kB. Dieses „Sägezahnmuster“ wiederholt sich mit einer Periode von 4 kB. Dies ist dadurch zu erklären, dass Myrinet auf dem Netzwerk Pakete von konstant 4 kB Größe einsetzt. Bis zu einer Datenpaketgröße von 4 kB wird ein Paket aufgefüllt, je mehr Daten pro Paket transportiert werden, desto größer ist die Bandbreite. Wird ein Datenpaket größer als 4 kB, wird es in 2 Pakete unterteilt, von denen das zweite zunächst nicht gefüllt ist, was den Abfall der Bandbreite erklärt.

Im Mittel erreichen die 32-Bit Karten bei großen Datenpaketen eine Bandbreite von 75 MB/s. Die 64 Bit Karten erreichen eine mittlere Bandbreite von 130 MB/s.

---

<sup>32</sup>DMA: Direct Memory Access,(engl.): Direkter Speicher Zugriff über den PCI Bus.

<sup>33</sup>Lanai ist der Name der auf dem Myrinetkarten eingesetzten RISC-CPU.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

Die Latenzzeit ist vor allem für kleine Nachrichten von Bedeutung. Wichtig ist also der Wert, der bei kleiner werdenden Paketen asymptotisch erreicht wird. Für die 32-Bit Karten liegt dies bei  $24 \mu\text{s}$ , bei den 64-Bit Karten liegt er bei  $14 \mu\text{s}$ . Die Sprünge, die sich in der Latenzzeit bei größer werdenden Paketgrößen zeigen, können nicht durch die Netzwerkpaketgrößen erklärt werden. Sie sind vermutlich auf karteninterne oder PCI-Bus spezifische Unterschiede in der Behandlung unterschiedlich großer Datenmengen zurückzuführen.

##### 4.13.3. Software

Myrinet stellt einen Open-Source-Treiber für die Netzwerkkarten zur Verfügung, der auch eine Schnittstelle für die Benutzer-Programmierung (API) enthält (GM genannt). GM stellt ein Konzept von Nachrichten zur Verfügung, welches verschiedene Typen von Nachrichten, entsprechend der Größe und Priorität unterscheiden kann.

Datentransfers können als Versand großer Nachrichten betrachtet und durchgeführt werden. Dies beinhaltet aber ein internes zeitraubendes Umkopieren der empfangenen Daten. Es gibt aber die Möglichkeit eines Remote-DMA. Dabei gibt der Sender direkt die Speicheradresse des Empfängers an, an der die Daten erscheinen sollen. Damit dies möglich wird, muss zuerst ein Speicherbereich allokiert werden, der für zu sendende und empfangene Daten genutzt wird. Dieser muss im physikalischen Arbeitsspeicher des Rechners gehalten werden, darf also nicht wie normaler virtueller Arbeitsspeicher auf die Festplatte ausgelagert werden.

Die Steuerung des Sende- und Empfangsvorgangs wird über mehrere Funktionen möglich.

Das GM-API ist aufgrund seiner Flexibilität relativ unübersichtlich zu programmieren, weshalb von Jeff Landgraf eine Funktionsbibliothek geschrieben wurde (MyriLib)[Lan00], die die innerhalb STAR nötigen Funktionen in einige wenige Funktionen bündelt.

Zunächst findet eine Initialisierung der benötigten Datenspeicher und Strukturen statt. Danach kann mit jeweils einer Funktion der Versand einer Nachricht bzw. eines Datenblock vorgenommen werden.

MyriLib stellt eine Programmierschnittstelle zur Verfügung, die auf allen im STAR DAQ-System (und inzwischen auch dem Triggersystem) eingesetzten Rechnerarchitekturen gleich zu verwenden ist.

## 4.14. Zeitbilanz des Gesamtsystems

Die ursprünglich angestrebte Rate der Ereignisverarbeitung lag bei 100 Hz, was das Limit der TPC-Ausleserate darstellt. Diese Rate ist praktisch nicht erreichbar, da sofort nach Beendigung der TPC-Totzeit, ein neuer Trigger ausgelöst werden müßte, was eine extrem hohe Luminosität voraussetzen würde. Bei dem angestrebten Wert für die Luminosität bei RHIC ergibt sich eine maximale Ereignisrate von 50-70 Hz (abhängig von der Zentralität der Kollisionen) für TPC-Daten<sup>34</sup>. Die maximale Rate, mit der das Level-3 System laufen kann, und eine Aufstellung des Zeitverbrauchs in den einzelnen Teilen ist natürlich wichtig, um die Einsatzmöglichkeiten des Systems beurteilen zu können.

Die Rate, die das System bearbeiten kann, ist von der Ereignisgröße und somit von der Art des Triggers abhängig. Die größte Herausforderung liegt dabei in der Analyse zentraler Au+Au-Kollisionen, während ein *MinimumBias*-Trigger, aufgrund der durchschnittlich viel kleineren Teilchen-Multiplizität sehr viel schneller zu bearbeiten ist.

Aufgrund von Erfahrungen im Jahre 2000 (mit nur 12 Spurfindungs/SL3-Prozessoren) wurde für den Endausbau des Systems (48 SL3-Prozessoren), eine realistische Rate von ca. 50 Hz bei zentralen Kollisionen abgeschätzt.

Um einen Eindruck der Zeitbilanz des Systems zu ermöglichen, sollen zuerst die Teile, die Zeit verbrauchen, einzeln betrachtet werden, danach wird das Gesamtsystem betrachtet.

### 4.14.1. Clusterfinder

Dem Clusterfinder werden die Rohdaten bereitgestellt, und er sollte möglichst schnell anfangen, diese zu rekonstruieren. Die Zeit die er im Mittel zur Verfügung hat, ergibt sich aus der Rate neuer Ereignisse. Fluktuationen können über den Datenpuffer, den das VRAM auf den Mezzaninekarten mit Platz für 12 Ereignisse darstellt, abgefangen werden. Bei einer Rate von 50 Ereignissen/s ergibt sich eine maximale mittlere Rekonstruktionszeit von 20 ms.

In Abbildung 4.23 ist die CPU-Zeit des Clusterfinders auf den i960 CPUs gegen die Anzahl der Cluster pro CPU aufgetragen. Es zeigt sich (bis auf einige Ausreißer) ein linearer Zusammenhang. Die mittlere CPU-Zeit beträgt dabei 5 ms. Die benötigte mittlere CPU Zeit für zentrale Kollisionen kann abgeschätzt werden, indem man die Ereignisse aussucht, welche die höchste Clusterzahl be-

---

<sup>34</sup>Es wäre aber z. B. denkbar nur mit den Triggerdetektoren (EMC etc.) Daten zu nehmen, dann wäre eine sehr viel höhere Rate möglich.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

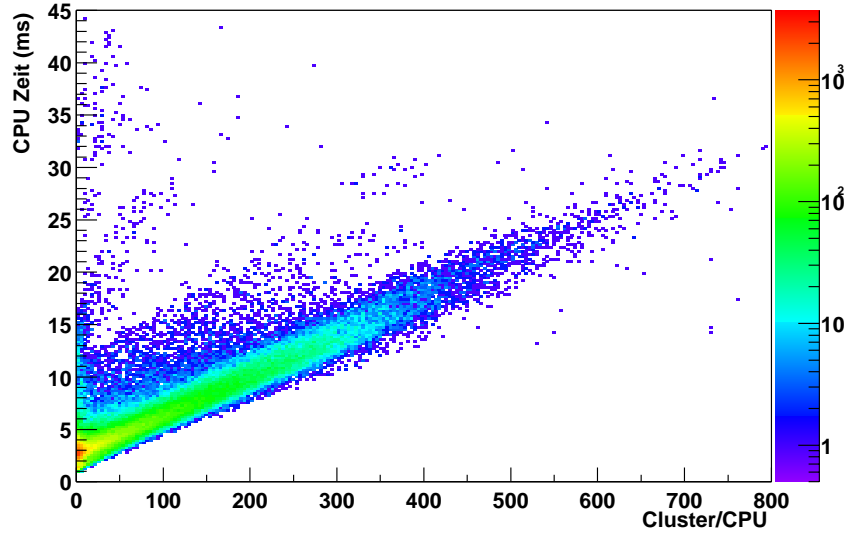


Abbildung 4.23.: CPU-Zeit des Clusterfinders auf den i960 Prozessoren aufgetragen gegen die Anzahl der Cluster pro CPU, für Au+Au Kollisionen bei  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV (Minimum Bias Trigger).

sitzen. Nimmt man die 10 % der Ereignisse mit der höchsten Clusterzahl, ergibt sich eine mittlere CPU-Zeit von 13 ms bei einer mittleren Clusterzahl pro CPU pro Ereignis, von 270 Clustern. Verschärft man die Selektion auf die Ereignisse mit der 5 % höchsten Clusterzahl, ergibt sich eine mittlere CPU-Zeit von 15 ms, bei einer mittleren Clusterzahl von 330 Clustern pro CPU.

Vergleicht man die mittlere Anzahl von Clustern in zentralen Ereignissen (ca. 100000), mit diesen Zahlen und berücksichtigt, dass diese Cluster auf insgesamt 432 i960-CPU's aufgeteilt werden, ergibt sich eine mittlere Anzahl von 230 Clustern pro i960 CPU. Damit scheint die oben genannte Abschätzung eher konservativ, und man kann davon ausgehen, dass eine Abschätzung von 15 ms Clusterfinderzeit eine realistische Obergrenze darstellt.

#### 4.14.2. Trackfinder

Der Spurfindungsprozess ist der zeitaufwändigste Teil der Level-3 Analyse. Somit bestimmt die Zeit die im Durchschnitt vom *Trackfinder* benötigt wird, die Rate mit der das Gesamtsystem arbeiten kann.

Die vom Tracker benötigte Zeit pro Supersektor in Abhängigkeit der Anzahl von Spuren pro Ereignis ist in Abbildung 4.24 für Monte-Carlo-Spuren aufgetra-

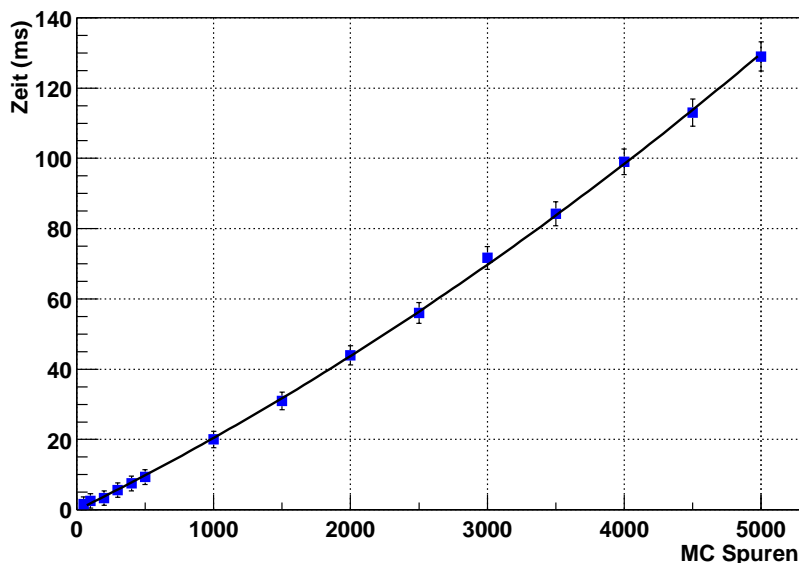


Abbildung 4.24.: Benötigte Zeit des *Trackfinders* für Ereignisse mit simulierten Spuren. Es ist die durchschnittliche Zeit pro Supersektor, abhängig von der Gesamtzahl der Spuren gezeigt.

gen. Dabei wurden Spuren von  $\pi^+$  mit einem transversalen Impuls zwischen 100 MeV und 2 GeV generiert und durch die STAR Simulationskette prozessiert. Man sieht, dass die Spurfindungszeit fast linear mit der Anzahl der Spuren ansteigt, tatsächlich wird der Verlauf durch ein Polynom 2.Ordnung beschrieben.

Die mittlere benötigte Zeit des Level-3-*Trackfinders* für zentrale Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV, liegt bei ca. 75 ms pro Supersektor. Bei einer Kollisionsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV liegt die mittlere benötigte Zeit bei ca. 94 ms.

### 4.14.3. Triggeralgorithmen

Da die Triggeralgorithmen ständig modifiziert oder mit neuen Parametern eingesetzt werden, ist es nicht möglich, eine pauschale Zeitabschätzung anzugeben. Es soll jedoch ein Beispiel eines Algorithmus gezeigt werden, der auf der Berechnung der invarianten Masse eines zerfallenen Teilchens besteht, also z. B. für die Suche nach  $\Upsilon$  oder  $J/\psi$  eingesetzt werden könnte.

Abbildung 4.25 zeigt die benötigte Zeit in Abhängigkeit der Anzahl von möglichen Tochterspuren, die miteinander zur invarianten Masse kombiniert werden. Dabei werden zuerst mögliche Kandidatenspuren aus der Gesamtheit der Spuren einer

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

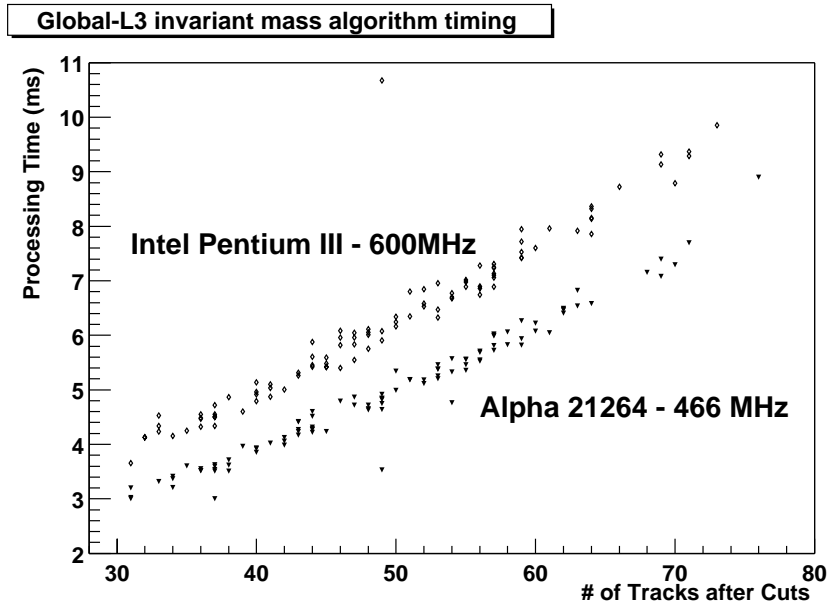


Abbildung 4.25.: Benötigte Zeit für einen Invariante-Masse berechnenden Algorithmus in Abhängigkeit, der zu kombinierenden Spuren (aus [Adl02b]).

zentralen Kollision ausgewählt (z. B. über Impuls- und Ladungs-Bedingungen). Die Berechnung der invarianten Masse inklusive der Auswahl der Kandidatenspurten dauert in jedem Fall unter 10 ms.

Zu der Zeit, die von den Triggeralgorithmen verbraucht wird, kommt auf dem GL3 noch die Zeit hinzu, die für das Umformatieren der Spuren, das Füllen der Ergebnisdaten etc. anfällt. Für zentrale Kollisionen bei  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV werden hierfür im Mittel 20 ms benötigt.

#### 4.14.4. Datentransfers

Datentransfers im Level-3-System finden zwischen den *Detektor Brokern* und den SL3 statt, wenn Clusterdaten transferiert werden, und zwischen den SL3 und einem GL3, wenn die Spurdaten gesendet werden.

Die mittlere Größe der Clusterdaten beträgt in zentralen Kollisionen ( $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV) ca. 1 MB pro Ereignis, oder 85 kB pro Supersektor. Die maximale Bandbreite zwischen DET und SL3 ist aufgrund einer ineffizienten PCI-Implementierung auf den VME PowerPC-Karten geringer als die Bandbreite zwischen



PCs (wie in Kapitel 4.13.2 besprochen), und beträgt nur 30-40 MB/s. Damit ergibt sich eine durchschnittliche Zeit für den Transfer der Clusterdaten von ca. 3 ms.

Die Spurdaten haben in zentralen Kollisionen eine mittlere Größe von 20 kB pro Supersektor, also ca. 240 kB für ein komplettes Ereignis, welches auf einen GL3 geschickt werden muss. Die Bandbreite richtet sich hierbei nach der Art der eingesetzten Myrinetkarten. Werden auf den SL3 32-Bit Myrinetkarten eingesetzt, die Daten auf einen GL3 mit 32-Bit Myrinetkarte schicken, ergibt sich eine Bandbreite von ca. 70 MB/s<sup>35</sup>. Bei Verwendung von 32 Bit Karten in den SL3 und einer 64-Bit Karte im GL3 erhöht sich die Bandbreite auf 90 MB/s. Bei Verwendung von 64-Bit Karten auf beiden Seiten lässt sich eine Bandbreite von 120 MB/s erzielen.

Mit diesen Werten ergibt sich eine mittlere Dauer des Transfers von Spurdaten von ca. 3 ms (32-32 Bit), 2,5 ms (32-64 Bit) bzw. 2 ms (64-64 Bit).

#### 4.14.5. Gesamtsystem

Für das Gesamtsystem gilt, dass alle Systeme, d. h. Clusterfinder, Trackfinder, GL3 und Netzwerk unabhängig voneinander arbeiten können, da jeder Datentransfer gepuffert ist. Deshalb bestimmt das langsamste System die Rate, mit der das Gesamtsystem Daten verarbeiten kann.

Eine weitere Zeitbeschränkung ist durch die maximale Verweildauer der Daten in den Puffern der Mezzaninekarten gegeben. Dies ist durch die mittlere Zeit, nach der ein neues Ereignis bearbeitet werden kann (das Inverse der Rate des langsamsten Systems) und durch die Anzahl der Ereignispuffer auf den Mezzaninekarten gegeben. Im Fall einer Rate von  $100 \text{ s}^{-1}$  wären dies  $10 \text{ ms} \times 12 \text{ Puffer} = 120 \text{ ms}$ . Im Fall einer Rate von  $50 \text{ s}^{-1}$ , verdoppelt sich diese maximale Zeit auf 240 ms. Dies gibt die maximal zur Verfügung stehende Zeit an, die bei der Bearbeitung eines Ereignisses verbraucht werden darf. Diese Zeit beinhaltet alle Kontributionen der Teilsysteme, also Clusterfinder, Netzwerk, *Trackfinder* und GL3-Analyse.

Erste Erfahrung im laufende Betrieb wurden im Jahr 2000 gesammelt. Zu diesem Zeitpunkt existierten 12 SL3 CPUs und eine GL3 CPU.

Das langsamste System war die Spurrekonstruktion auf den SL3, die im Mittel 75 ms Bearbeitungszeit pro Supersektor benötigte. Damit kann die maximale mitt-

---

<sup>35</sup>Die hier zitierten Werte sind gemessene Werte für realistische Datentransfers. Der Unterschied zu den Werten in Kapitel 4.13.2 kommen durch die Segmentierung (mehrere Wirte senden parallel auf einen Wirt) der Datentransfers und einem geringen Effizienzverlust durch den Überbau der MyriLib-Bibliothek zustande.

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

lere Rate auf  $13 \text{ s}^{-1}$  abgeschätzt werden. Die dabei zur Verfügung stehende Zeit bis zur Entscheidung beträgt  $75 \text{ ms} \times 12 \text{ Puffer} = 900 \text{ ms}$ , was sehr viel länger ist als die mittlere Gesamtbearbeitungszeit von ca.  $110 \text{ ms}$ . Diese Zeitbeschränkung stellte also keine Einschränkung dar.

Im Jahr 2000 wurden zentrale Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GeV}$  tatsächlich mit einer Rate von  $10\text{-}12 \text{ s}^{-1}$  aufgezeichnet, wobei die Auslastung der SL3 CPUs  $80\text{-}90\%$  betrug. Die Abschätzung ergibt also realistische Werte.

Für das Jahr 2001 ergibt sich aufgrund der längeren Spurrekonstruktionszeit pro Ereignis von  $94 \text{ ms}$  bei  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ , eine Rekonstruktionsrate von  $10,6 \text{ s}^{-1}$ , die aufgrund der 4 parallel arbeitenden SL3 CPUs pro Supersektor, auf  $42 \text{ s}^{-1}$  vervierfacht werden muss. Diese maximale Rate des Systems ergibt eine maximale Bearbeitungszeit von  $280 \text{ ms}$ , bevor ein Ereignis überschrieben würde. Im Vergleich zu der Summe der einzelnen Beiträge von ca.  $140 \text{ ms}$  besteht auch hier keine Gefahr, dass das Zeitlimit überschritten würde.

Bei der Datennahme ergab sich eine L0-Triggerrate von  $30\text{-}40 \text{ s}^{-1}$ , die aber zu einer Detektor-Totzeit von  $50\text{-}60\%$  führte. Unter diesen Bedingungen wurde nur eine Datenrate von  $17\text{-}20 \text{ s}^{-1}$  gemessen. Dies liegt darin begründet, dass aufgrund der Totzeit, im Schnitt nur jeder zweite L0-Trigger vom Detektor verarbeitet werden konnte. Diese hohe Totzeit zusammen mit einer zu niedrigen Luminosität des Beschleunigers verhinderte damit, dass das Level-3 System seine Möglichkeiten entfalten konnte. Diese hohe Totzeit sollte aber für kommende Datennahmen durch Optimierungen im DAQ-System stark reduziert werden [Lju02].

### 4.15. Kontroll-Software

Im Level-3-System ist es nötig, die Prozesse neu starten zu können, die Rechner rebooten zu können oder sonstige Kommandos auf allen Rechnern ausführen zu können. Bei über 50 Rechnern ist es nicht mehr möglich sich auf jedem Rechner einzuloggen und das gewünschte Kommando einzugeben.

Andererseits ist es notwendig den Zustand der Rechner und Prozesse überwachen zu können, um bei Problemen schnell zu einer Lösung zu kommen.

#### 4.15.1. Überwachung

Die Überwachung der Prozesse geschieht über Logdateien, in die die Prozesse Eintragungen vornehmen, wenn bestimmte Prozessschritte erreicht sind. Die Ausführlichkeit dieser Berichterstattung kann dabei gesteuert werden: während einem

The screenshot displays a terminal window with a blue background. At the top, it shows the window title 'xterm ->' and some system information like 'Level 3 CPU 1' and 'Samples 61, addresses 1'. Below this, there are several sections of data, each starting with a label 'BL2' followed by a range of CPU numbers (e.g., 1-13, 14-23, 24-33, 34-43, 44-53). Each section contains a list of metrics for each CPU, such as 'In Rate', 'In CPU', 'Data In', 'Data Out', 'CPU %', 'In %', 'Out %', 'Rate In', 'Rate Out', and 'Rate CPU'. The values are mostly '0' or 'N.A.'. In the first section (CPUs 1-13), the 'Rate CPU' row for CPU 14 is highlighted in yellow and shows the word 'PRESENT'. This indicates a system error or non-functional state.

Abbildung 4.26.: Monitorprogramm, um den Zustand der Level-3 CPUs zu kontrollieren. Jede CPU stellt Daten wie aktuelle Rate, Datendurchsatz, CPU-Auslastung, etc. zur Verfügung, die hier angezeigt werden. Eine inverse Darstellung zeigt an, dass dieses System nicht funktionsbereit ist.

normalen Run wird nur bei außergewöhnlichen Vorkommnissen bzw. Fehlern ein Eintrag vorgenommen, zur Fehlerfindung im System kann aber auch jeder Prozessschritt notiert werden.

Da es schwierig ist den Überblick über 50 verschiedene Logdateien zu behalten, gibt es einen Server im System, an den die Subsysteme Nachrichten schicken, welche dann auf dem Server in eine zentrale Datei eingetragen werden.

Diese Logdateien sind notwendig, um Ursachen aufgetretener Fehler zu rekonstruieren, bieten aber wenig Möglichkeit, den aktuellen Zustand des Systems zu verfolgen.

Um Informationen über den Zustand des Systems, wozu die aktuelle Datenrate, CPU-Auslastung, Anzahl verarbeiteter Ereignisse, gehören, überschaubar zu machen, wird ein Monitor benutzt, der Daten aller beteiligten Systeme anzeigt. Dazu führt jedes System intern Statistiken über die interessierenden Größen und

#### 4. Das Level-3-Trigger-System

schickt diese einmal pro Sekunde an einen Server. Auf diesem läuft ein Monitorprogramm (vgl. Abbildung 4.26), welches die Daten aller CPUs gleichzeitig anzeigt.

##### 4.15.2. Steuerung

Um das System steuern zu können, wurden verschiedene *Perl*- und *Expect*-Skripte benutzt, die es ermöglichen, sich automatisch auf allen CPUs einzuloggen und dort ein bestimmtes Kommando auszuführen.

Auch bei einer eingefrorenen CPU können die Alpha-Server über Netz neugestartet werden, da sie über eine RMC (Remote Management Control) Schnittstelle verfügen, die über einen seriellen Port ansprechbar ist. Darüber ist ein Ein- bzw. Ausschalten und Neustart möglich.

Ansonsten ist die Steuerung der Prozesse der *Run Control* überlassen, die bei Bedarf die Prozesse stoppen und neu starten kann.

### 4.16. Integration weiterer Detektoren

Die Rekonstruktionsalgorithmen des Level-3-Systems wurden für die TPC geschildert, während in Zukunft mehr Detektoren Daten ans Level-3-System liefern sollen.

Schon erwähnt wurden FTPC und SVT, die im Jahr 2001 schon Level-3-Clusterdaten produzierten, die jedoch noch nicht zu einer Online-Datenanalyse genutzt wurden. Weiterhin soll das EMC ab Herbst 2002 Daten ans Level-3 System liefern.

#### 4.16.1. FTPC

##### Clusterfinder

Die FTPC lässt sich entsprechend der TPC in einer Sektor-Padreihe-Pad-Timebin-Geometrie darstellen. Die Rohdaten der FTPC werden tatsächlich analog zu dem Format der TPC Rohdaten im selben Format produziert. Dies ermöglicht es, den TPC Clusterfinder ohne grundsätzliche Änderungen für die FTPC zu verwenden. Im Jahre 2001 wurde dies mit gutem Ergebnis durchgeführt, wobei einzelne Parameter noch optimiert werden müssen.

## Trackfinder

Die Akzeptanz der FTPC hat praktisch keinen Überlapp mit der TPC, sodass die Teilchen, die in der FTPC Spuren hinterlassen von keinem anderen Detektor erfasst werden. Damit kann man keine TPC Spuren in die FTPC extrapolieren, sondern es müssen eigenständige Spuren in den FTPCs gesucht werden.

Im Prinzip unterscheidet sich der Spurfindungsprozess in der FTPC nicht von dem in der TPC, weshalb dasselbe Spurfindungsprogramm wie in der TPC mit wenigen Änderungen eingesetzt werden kann.

Ein Problem bei der FTPC stellt aber die aufwändigere Transformation von natürlichen Koordinaten (Sektor, Padreihe, Pad, Timebin) in kartesische Koordinaten dar, da die Driftgeschwindigkeit in der FTPC, aufgrund der radialen Drift, nicht konstant ist. Die Koordinatentransformation geschieht zwar wie bei der TPC über Look-Up-Table, diese müssen jedoch bei Luftdruckschwankungen aktualisiert werden.

Die Anpassung des Spurfindungsprogramms an die Geometrie der FTPC wurde schon begonnen. Die Möglichkeiten müssen aber noch evaluiert werden.

## Integration

Die FTPCs werden in je ein *Sector Crate* pro Seite ausgelesen. Die Daten einer FTPC werden dann an einen SL3 gesandt, der für die Spurfindung verantwortlich ist. Somit wird die FTPC im Level-3-System wie zwei zusätzliche TPC-Sektoren behandelt.

### 4.16.2. SVT

#### Clusterfinder

Auch beim SVT lässt sich die Geometrie aus Halbschale, Wafer, Anode und Timebin direkt auf die TPC Geometrie abbilden, auch hier kann also der TPC Clusterfinder eingesetzt werden. Dies war ebenfalls schon im Jahr 2001 implementiert, bereitete aber aufgrund von hohem Rauschen in der Ausleseelektronik Probleme, da zuviele Cluster gefunden wurden. Entsprechende Verbesserungen und Anpassungen des Clusterfinders sollten aber ab dem Jahr 2002 einen Betrieb mit SVT Clusterfinder ermöglichen.

### **Integration in die Spurrekonstruktion**

Der Nutzen des SVT für die Level-3 Analyse würde in einer Verbesserung der Spurrekonstruktion in Vertexnähe liegen. Eine Erweiterung des Spurfindungsprogramms müsste nur eine Klasse von Hits mit anderen Fehlern zulassen, dann könnten die SVT Lagen bei der Spurrekonstruktion wie zusätzliche Padreihen verwendet werden.

Qualität und Nutzen müssen aber erst noch untersucht werden.

### **Integration der Daten**

Da die SVT-Daten von der Spurrekonstruktion wie drei zusätzliche Padreihen behandelt werden sollen, müssen sie auf den jeweiligen SL3 zur Verfügung stehen. Da die SVT Clusterdaten im Vergleich mit den TPC-Clusterdaten vernachlässigbar klein sind, könnten sie problemlos an jeden SL3 geschickt werden.

### **4.16.3. EMC**

Das EMC liefert zum einen ADC-Werte der einzelnen Türme durch die Triggerdaten. Zum anderen hat das EMC Shower-Max-Detektoren, die die Lokalisation des Schauers ermöglichen.

Zunächst ist geplant, die ADC-Daten der Türme innerhalb der GL3-Analyse-Umgebung zur Verfügung zu stellen. Damit diese von einem Algorithmus verwendet werden können, werden Funktionen zur Verfügung gestellt, die es ermöglichen Spuren zu bestimmten Türmen zu extrapolieren. Eine ADC-Wert-Energieumrechnung muss vorhanden sein, um das EMC sinnvoll in Analysen einsetzen zu können. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist jedoch nicht geplant, die Shower-Max-Detektoren auf Level-3-Ebene auszuwerten.

# 5. Physikalische Anwendungen

## 5.1. Messung von Quarkonium in Au+Au Kollisionen

Als Quarkonium werden die gebundenen Zustände von schweren  $q\bar{q}$ -Quark-Antiquark-Paaren mit Charm- oder Bottom-Flavour bezeichnet. Sie spielten in der Entwicklung des Quark-Modells eine wichtige Rolle, da die Entdeckung des  $J/\Psi$ , 1974 unter der Leitung von B. Richter am SLAC in  $e^+e^-$ -Kollisionen und unter der Leitung von S. Ting am BNL in p-A-Kollisionen, die Vorhersage des Charm-Quarks bestätigte.

1977 wurde schliesslich am Fermilab unter der Leitung von L. Lederman eine Resonanz entdeckt, die  $\Upsilon$  genannt wurde, und einen gebundenen  $b\bar{b}$ -Zustand darstellt.

Aus theoretischer Sicht waren diese Teilchen insbesondere interessant, da die Impulse der Konstituentenquarks nichtrelativistisch sind, die Masse also durch die Ruhemasse der Quarks gegeben ist. Damit stellen die Quarkonium-Zustände eine Art Positronium der starken Wechselwirkung dar, dessen Anregungsspektrum detailliert untersucht werden konnte. Tatsächlich fanden sich Resonanzen, die den  $2s$  ( $\Psi'$  bzw.  $\Upsilon'$ )  $3s$  ( $\Psi''$  bzw.  $\Upsilon''$ ) und auch p-Zuständen ( $\chi_c$  bzw.  $\chi_b$ ) entsprechen.

### 5.1.1. Motivation

Für die relativistische Schwerionenphysik gewann das  $J/\Psi$  an Bedeutung, als T. Matsui und H. Satz 1986 eine Unterdrückung der  $J/\Psi$ -Produktion durch ein Quark-Gluon-Plasma, als eine erfolgversprechende Signatur desselben vorschlugen [Mat86]. Die Idee war, dass ein Quark-Gluon-Plasma ein Zustand freier Farbladungen ist, die entsprechend dem Mechanismus der Debye-Abschirmung<sup>1</sup> die

---

<sup>1</sup>Dieser Effekt wurde in der Elektrodynamik beobachtet. Bringt man eine Ladung in einen Bereich freier Ladungsträger, ordnen diese sich so um die Ladung, dass sie abgeschirmt

## 5. Physikalische Anwendungen

Wechselwirkung zwischen dem  $q\bar{q}$ -Paar abschirmt und dieses somit „schmilzt“. Dabei wird die Annahme gemacht, das  $J/\Psi$  werde zu Beginn der Kollision durch harte Prozesse ( $q\bar{q}$ -Annihilation,  $g$ - $g$ -Fusion) produziert, da nur in diesen genug Energie zur Erzeugung des schweren  $c\bar{c}$ -Paares zur Verfügung steht. Der  $c\bar{c}$ -Zustand soll nach einer gewissen Zeit im Bereich von 0,5 fm/c die Resonanz bilden. Während dieser Zeit erreicht das  $q\bar{q}$ -Paar einen Abstand, dem Bindungsradius der Resonanz entsprechend, und kann über Gluon-Austausch seine Farbe neutralisieren.

In einer Plasmaphase würde entweder die Bildung einer Resonanz verhindert oder eine gebildete Resonanz aufgelöst.

Das NA38 Experiment am CERN untersuchte die  $J/\Psi$ -Produktion in Kollisionen leichter Kerne (O, S) mit Uran und in p-A Kollisionen. Das Nachfolgeexperiment NA50 untersuchte die  $J/\Psi$ -Produktion in Pb+Pb Stößen. Dabei wurde klar, dass schon bei p+A Kollisionen und Kollisionen leichter Kerne, bei denen nicht mit einer Bildung eines Quark-Gluon-Plasma zu rechnen ist, eine Unterdrückung zu messen war. Verschiedene „herkömmliche“ Mechanismen (z. B. Präresonanz-Absorption, „Hadronic-Comover“-Absorption) wurden vorgeschlagen, um dies zu erklären (siehe z. B. [Kha97]). In Pb+Pb Reaktionen wurde eine zusätzliche Unterdrückung gemessen, die nicht durch „herkömmliche“ Mechanismen erklärbar war, was als Hinweis auf die Existenz eines Quark-Gluon-Plasmas in diesen Kollisionen interpretiert wurde [Abr00].

Andere Modelle beschreiben die Produktion und somit auch die Unterdrückung anders, z. B. durch eine rein thermische Produktion [Gaz99], oder eine Produktion von  $c\bar{c}$  durch harte Prozesse, darauf folgende Auflösung und statistische Hadronisierung [Bra00].

Für die Messung des  $J/\Psi$  in Au+Au Kollisionen am RHIC ergibt sich zusätzlich zu bestehenden Unsicherheiten in der Erklärung des Produktionsmechanismus, noch die Möglichkeit, dass auch in sekundären harten Prozessen genug Energie vorhanden ist, um  $c\bar{c}$ -Paare zu bilden. Dadurch ergibt sich ein weiterer systematischer Unterschied zu p+p Kollisionen und eine Aussage über eine Unterdrückung wird erschwert, bzw. die Möglichkeit besteht, dass es sogar eine Überhöhung der  $J/\Psi$ -Produktion gibt.

Eine Messung des  $J/\Psi$  mit dem STAR-Detektor stellt eine große Herausforderung dar. Das  $J/\Psi$  wird im  $e^+e^-$ -Kanal nachgewiesen; ohne gute Elektronenidentifikation ist aber zu viel hadronischer Untergrund vorhanden, als dass es messbar wäre. Deshalb erlaubt erst eine vollständige Installation des EMC die Messung des  $J/\Psi$  [Jac99].

---

wird und für größere Abstände verschwindet. Der Debye-Radius ist die charakteristische Größe, die diesen Effekt quantitativ beschreibt, für Abstände größer dem Debye-Radius ist die Ladung nicht mehr sichtbar.



Für das  $\Upsilon$  gilt bezüglich Produktions- und Unterdrückungsmechanismus dasselbe wie für das  $J/\Psi$ . Das Upsilon spielte am SPS keine Rolle, da der Produktionsquerschnitt bei  $\sqrt{s_{NN}}=17$  GeV vernachlässigbar ist, am RHIC sollte es aber bei genügender Statistik zu sehen sein. Das  $\Upsilon$  hat gegenüber dem  $J/\Psi$  den Vorteil, dass es aufgrund seiner hohen Masse, nicht in „sekundären harten“ Stößen produziert werden kann. Ursprünglich wurde auch sehr wenig Untergrund in der Region der  $\Upsilon$ -Masse erwartet. Hier soll Anhand von Modellvorhersagen und bisherigen Erfahrungen, die Möglichkeiten der  $\Upsilon$ -Messung in STAR abgeschätzt werden.

### 5.1.2. Ratenabschätzung

Das  $\Upsilon$  kann am besten über seinen leptonicen Zerfall identifiziert werden. Das Verzweigungsverhältnis in  $e^+e^-$  beträgt 2,38%, in  $\mu^+\mu^-$  2,48% [PDG02]. Der für RHIC Au+Au-Kollisionen vorhergesagte  $\Upsilon$ -Produktionswirkungsquerschnitt ist modellabhängig. Für eine Produktion über harte Prozesse wird bei  $\sqrt{s} = 200$  GeV ein p+p-Wirkungsquerschnitt inklusive leptonicem Verzweigungsverhältnis  $(Bd\sigma/dy)_{y=0} \approx 100$  pb pro Zerfallskanal vorhergesagt (z. B. [Gav95]). Um aus dem p+p-Wirkungsquerschnitt einen A+A-Wirkungsquerschnitt zu erhalten, wird mit der Anzahl binärer Kollisionen skaliert:

$$\sigma_{AA} = (AA)^\alpha \times \sigma_{pp} \quad (5.1)$$

wobei  $\alpha = 1$ , wenn nukleare Absorptionseffekte vernachlässigt werden. Für STAR ergibt sich:

$$\sigma_{\Upsilon AuAu} = (197 \cdot 197) \cdot \sigma_{pp} \approx 3,9\mu b \quad (5.2)$$

In 1 Million Kollisionen erhält man damit:

$$dN_{\Upsilon}/dy = 10^6 \cdot \sigma_{\Upsilon AuAu}/\sigma_{geo} \approx 10^6 \cdot 3,9\mu b/7,2b = 0,54 \quad (5.3)$$

Dies gilt für einen *minimum Bias* Trigger. Für zentrale Kollisionen muss berücksichtigt werden, dass der Wirkungsquerschnitt für harte Prozesse nicht wie der geometrische Wirkungsquerschnitt skaliert, der bei der Zentralitätsselektion benutzt wird. Bei einem Trigger auf  $f_{geo} = 10\%$  der zentralen Ereignisse, erhält man noch  $f_{AB} = 41\%$  des Wirkungsquerschnitts harter Prozesse [Vog99]. In einer Million zentralen Kollisionen werden dementsprechend

$$dN_{\Upsilon}/dy = 10^6 \cdot \frac{\sigma_{\Upsilon AuAu}}{\sigma_{geo}} \cdot \frac{f_{AB}}{f_{geo}} \approx 10^6 \cdot \frac{3,9\mu b}{7,2b} \cdot \frac{41\%}{10\%} = 2,2 \quad (5.4)$$

## 5. Physikalische Anwendungen

2,2  $\Upsilon$  pro Rapiditätseinheit produziert.

### 5.1.3. $\Upsilon$ -Identifikation im STAR-Detektors

Die hohe Masse des  $\Upsilon$  von  $m_\Upsilon = 9,46 \text{ GeV}/c^2$  geht aufgrund der geringen Masse der Leptonen fast vollständig in den Impuls der Tochterteilchen. Zur Identifikation des  $\Upsilon$  müssen also zwei Spuren von Leptonen mit unterschiedlicher Ladung und hohem Impuls identifiziert werden. Die verschiedenen Detektoren STARS bieten dafür die folgenden Möglichkeiten:

- **TPC:**

Die TPC liefert über die Rekonstruktion der Teilchenspur Information über den Impuls. Für die Genauigkeit mit der dies möglich ist, ist die Impulsauflösung ausschlaggebend. Diese ist nicht konstant sondern impulsabhängig. Je größer der transversale Impuls, desto schlechter wird die Impulsauflösung. Die Verteilung der Impulse der Töchter ist aber von der Kinematik des  $\Upsilon$  abhängig, die nicht a priori bekannt ist, sondern nur über Modelle abgeschätzt werden kann.

Eine weitere Messgröße, welche die TPC liefern kann ist die spezifische Ionisation eines Teilchens, die  $dE/dx$ -Information. In Abbildung 5.7 ist zu sehen, dass Elektronen für Impulse größer  $1,5 \text{ GeV}/c$  oberhalb der  $\pi, \mu, K, p$ -Bänder liegen. Bei noch höheren Impulsen nähern sich aber insbesondere die Pionen dem Elektronenband, sodass die Separation wieder erschwert wird.

- **EMC:**

Das EMC bietet die Möglichkeit über Energiemessung Elektronen zu identifizieren, da Hadronen nur wenig Energie im elektromagnetischen Kalorimeter verlieren. Im Zusammenspiel des EMC mit der TPC lässt sich das Verhältnis von Impuls (in der TPC bestimmt) und deponierter Energie im EMC bestimmen, das für Elektronen bei 1,0 liegen sollte. Die Genauigkeit dieser Messung hängt von der Energieauflösung des EMC und der Impulsauflösung der TPC ab. Die Energieauflösung des EMC hängt von der Position des Schauers relativ zum Zentrum eines Turmes ab, da bei einem Schauer am Rande eines Turms Energie in den nächstliegenden Turm verloren geht. Um diesen Effekt kompensieren zu können ist die Information des SMD nötig.

- **EEMC:**

Das EEMC (Endcap Kalorimeter) könnte die Akzeptanz für Elektronen in

Forwärtsrichtung erhöhen. Aber auch hier lassen sich nützliche Information nur im Verbindung mit TPC-Spuren gewinnen. Die Effizienz der Spurfundung in der TPC lässt für  $|\eta| > 1$  stark nach, da weniger Padrows zur Verfügung stehen. Deshalb kann das EMC nur unter starken Einschränkungen genutzt werden.

- **SVT:**

Der SVT kann bei niedrigen Impulsen  $dE/dx$ -Information zur Elektron-Identifikation beitragen, die komplementär zu den TPC-Informationen sind [Las97]. Zu höheren Impulsen lässt die e/h-Separation jedoch nach. Bei Impulsen, die bei  $\Upsilon$ -Töchtern zu erwarten sind, sind die Fähigkeiten des SVT noch nicht evaluiert.

- **RICH:**

Der RICH-Detektor bietet die Möglichkeit Protonen bis zu einem Impuls von 5 GeV/c, und somit einen Teil des Untergrundes, zu identifizieren. Allerdings ist die Akzeptanz zu gering um einen Nutzen zu erzielen, es ist auch nicht geplant RICH-Informationen im Level-3-Triggersystem zu verwerten.

- **FTPC:**

Die FTPC ermöglicht Spurfundung bei hohen Rapiditäten. Die Impulsauflösung ist aber aufgrund des geringen transversalen Impulsanteils entsprechend schlecht und reicht mit einer mittleren Auflösung von  $\Delta p_{\perp}/p_{\perp} \approx 12\%$  nicht für die Bestimmung der invarianten Masse aus.

Die wichtigste Information für die Messung des  $\Upsilon$  ist die Spur- und Impulsinformation der TPC. Die  $dE/dx$ -Messung in der TPC kann zur Elektronidentifikation beitragen. Das EMC bietet die Möglichkeit die TPC Information durch Hadronenidentifikation zu ergänzen.

#### 5.1.4. Berechnung der invarianten Masse

Um einen Zerfall aus der kinematischen Information der Tochterteilchen zu rekonstruieren, wird die invariante Masse der Töchter  $i$  ausgerechnet:

$$m_{inv}^2 c^4 = \left( \sum_i E_i \right)^2 - \left( \sum_i p_i \right)^2 c^2. \quad (5.5)$$

## 5. Physikalische Anwendungen

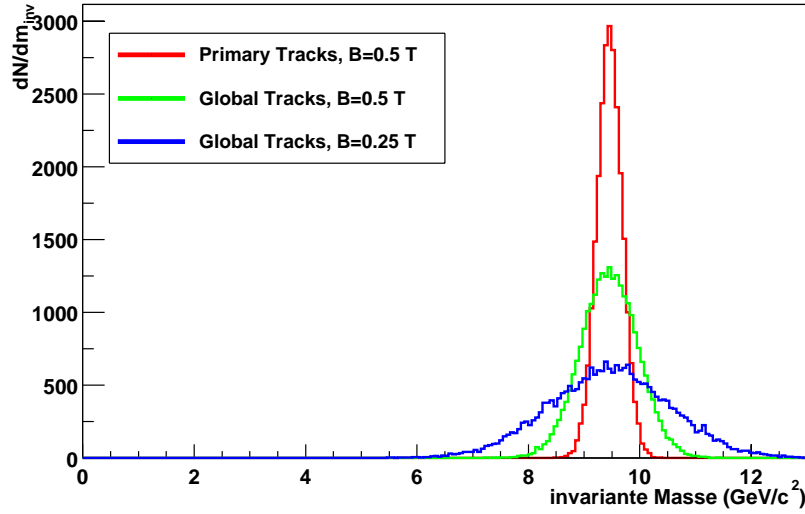


Abbildung 5.1.: Breite der invarianten Masse Verteilung bei unterschiedlicher Impulsauflösung. Primary Tracks haben den Ereignisvertex als zusätzlichen Punkt, Global Tracks sind für ganzes Magnetfeld ( $B=0,5$  T) und halbes Feld ( $B=0,25$  T) gezeigt.

Für einen Zerfalls in zwei Tochterteilchen ergibt sich:

$$m_{inv}c^2 = [m_1^2c^4 + m_2^2c^4 + 2(E_1E_2 - (p_{x1}p_{x2} + p_{y1}p_{y2} + p_{z1}p_{z2}))c^2]^{1/2} \quad (5.6)$$

mit der Ruhemasse der Tochterteilchen  $m_1, m_2$ , der Gesamtenergie der Tochterteilchen  $E_1, E_2$  und deren Impulskomponenten  $p_{1xyz}, p_{2xyz}$ .

Zur Rekonstruktion eines Zerfalls, wird aus allen Kombinationen von möglichen Kandidaten für Tochterteilchen, die invariante Masse berechnet. Die invariante Massenverteilung zeigt im Bereich der Ruhemasse des Mutterteilchens eine Überhöhung gegenüber dem Untergrund.

Aufgrund der beschränkten Impulsauflösung der Detektoren, ist die Berechnung der invarianten Masse zwangsläufig mit einem Fehler behaftet, der zu einer Verbreiterung der rekonstruierten Masse führt.

Um einen Eindruck zu geben sind in Abbildung 5.1 invariante Massenverteilungen von zerfallenden  $\Upsilon$  bei unterschiedlicher Impulsauflösung gezeigt. Die beste Auflösung ergeben primäre Spuren (die den Ereignisvertex als zusätzlichen Spurpunkt haben). Globale Spuren sind für ganzes (0,5 T) und halbes (0,25 T) Magnetfeld gezeigt. Um diese Verteilungen zu erhalten, wurde ein Monte Carlo

Programm benutzt, welches Upsilon mit einer bestimmten kinematischen Verteilung generiert und in Elektronen zerfallen lässt. Die Elektronen werden ins Laborsystem transformiert und dort wird der transversale Impuls der Tochterteilchen entsprechend einer Parameterisierung, der mit der Einbettungsmethode gewonnenen Impulsaufösungen, verschmiert. Daraufhin wurde die invariante Masse rekonstruiert.

Eine ausreichende Impulsaufösung ist notwendig, um das Signal über dem Untergrund sichtbar zu machen. Die Impulsaufösung der mit Level-3 rekonstruierten Spuren bei vollem Feld sollten sich im Bereich der primären bzw. globalen Spuren bewegen (vgl. Abschnitt 62).

### Impuls-Schnitt auf Tochterteilchen

Aufgrund der begrenzten Auflösung der invarianten Masse ergibt sich das Problem, dass Kombinationen eines Teilchens mit einem Impuls in der Nähe der Mutter-Ruhemasse mit Tochterkandidaten niedrigen Impulses, fast immer die „richtige“ invariante Masse ergeben. Dies führt dazu, dass viel Untergrund erzeugt wird, der das Signal überdeckt. Deshalb wird die Bedingung gestellt, dass eine Tochterkandidatin einen Mindestimpuls besitzt. Wie dieser Schnitt zu wählen ist wird im nächsten Abschnitt gezeigt.

#### 5.1.5. Akzeptanz des STAR Detektors für $\Upsilon$

Um abzuschätzen, wieviel  $\Upsilon$  in STAR gemessen werden können, ist es notwendig die Akzeptanz des Detektors für diese Messung abzuschätzen. Die Akzeptanz ist eine Funktion des  $\Upsilon$ -Impulses und seiner Flugrichtung im Laborsystem, wobei in der Regel der transversale Impuls  $p_{\perp}$  und der longitudinale Impuls in Form der Rapidität  $y$  oder der Pseudorapidität  $\eta$ , zur Definition der Kinematik benutzt werden.

In Abbildung 5.2 ist die Effizienz, ein  $\Upsilon$  innerhalb der STAR-TPC ( $-1,0 < \eta < 1,0$ ) zu messen, gezeigt. Im unteren Bild ist zusätzlich die Bedingung gestellt, dass der Impuls der Zerfallsprodukte mindestens 3 GeV/c betragen muss. Es ist zu sehen, dass aufgrund der begrenzten  $\eta$ -Akzeptanz, der sichtbare Rapiditätsbereich des  $\Upsilon$  auf weniger als  $\pm 1$  Einheit beschränkt ist. Das untere Bild zeigt, wie ein Schnitt im Tochterimpuls die Akzeptanz verändert.

Die höhere Akzeptanz bei hohen transversalen Impulsen, ergibt sich durch einen kleineren Öffnungswinkel zwischen den Töchtern (vgl. Abb. 5.3), zusammen mit einer stärkeren „Fokussierung“ auf den sensitiven Bereich  $|\eta| < 1$ .

## 5. Physikalische Anwendungen

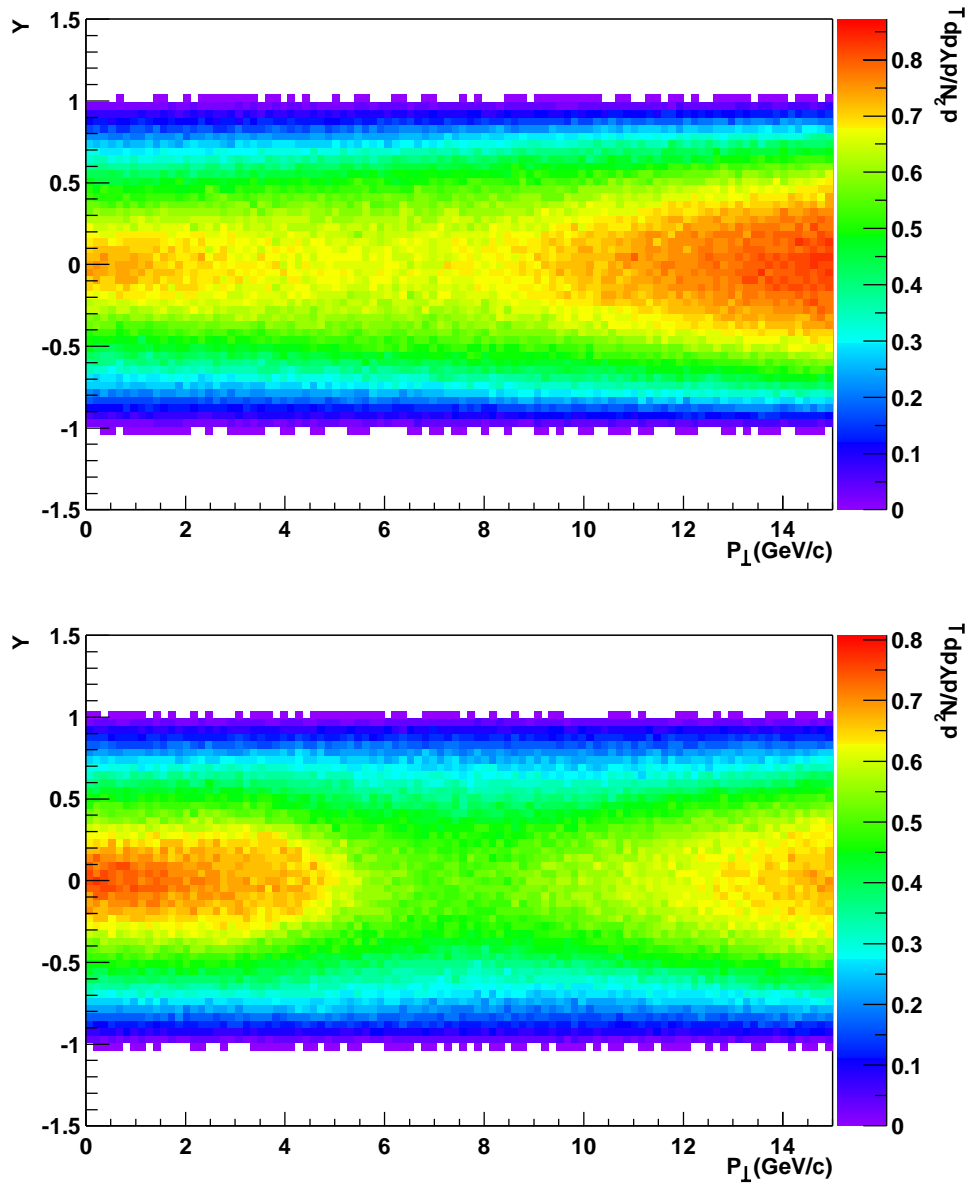


Abbildung 5.2.: Akzeptanz der STAR-TPC für  $\Upsilon$  bei einer flachen  $p_{\text{perp}}$ - $Y$ -Verteilung. Oben: kein Schnitt auf dem Impuls der Töchter, unten:  $p_{\text{Tochter}} > 3 \text{ GeV}$ .

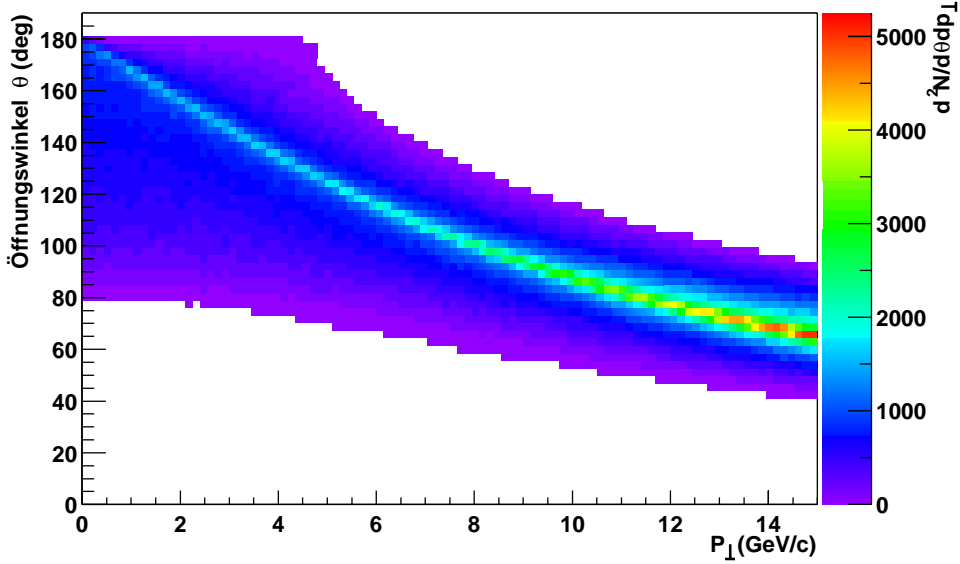


Abbildung 5.3.: Öffnungswinkel zwischen den Tochterpartikeln, gegen den transversalen Impuls des  $\Upsilon$  aufgetragen ( $|\eta_\Upsilon| < 1$ ,  $p_{\text{Tochter}} > 3$  GeV/c).

Um eine Abschätzung der Detektionseffizienz des STAR-Detektors für  $\Upsilon$  zu erhalten, muss eine realistischere kinematische Verteilung benutzt werden. Da die Kinematik von  $\Upsilon$  in Schwerionenkollisionen bei  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV nicht bekannt ist, muss dies auf Modellvorhersagen beruhen.

Es wurden  $\Upsilon$  generiert, deren  $p_\perp$  und Y-Verteilung an eine Parameterisierung für  $p_\perp$  und Y entsprechend

$$\frac{d\sigma}{dp_\perp} \propto \frac{p_\perp}{[1 + (p_\perp/p_o)^2]^{3.5}} \quad (5.7)$$

und

$$\frac{d\sigma}{dy} \propto \begin{cases} 1 & : y \leq y_o \\ e^{-\frac{(y-y_o)^2}{2}} & : y > y_o \end{cases} \quad (5.8)$$

mit  $p_o = 4,7$  und  $y_o = 0,2$  [Ull02] angelehnt ist. Diese Vorhersage beruht auf einer Skalierung von kinematischen Verteilungen in Protonkollisionen auf  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. Es liegt die Annahme zugrunde, dass die Kinematik der produzierten  $\Upsilon$

## 5. Physikalische Anwendungen

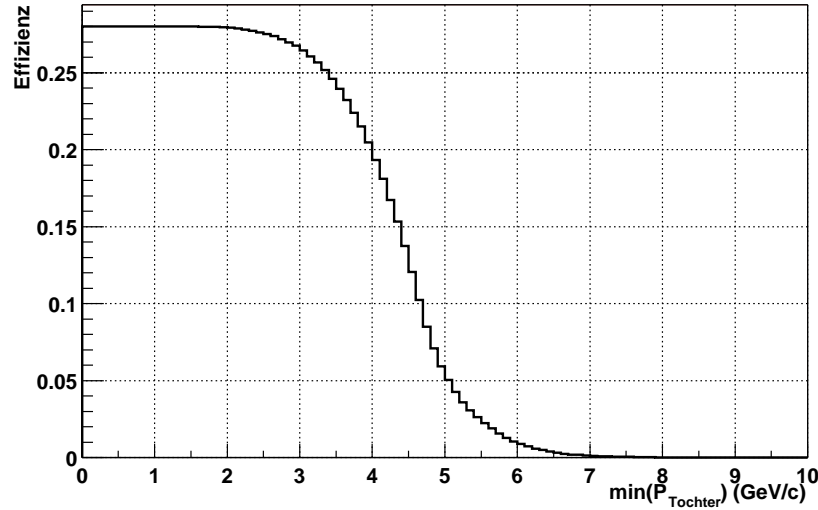


Abbildung 5.4.: Detektionseffizienz für  $\Upsilon$  (generiert nach den Verteilungen in 5.7 und 5.8), aufgetragen gegen einen Schnitt im Impuls der Tochterteilchen. Dabei wurde die Effizienz über die geometrische Akzeptanz integriert.

in den harten Stößen zu Beginn der Schwerionenkollision festgelegt und nicht modifiziert wird, was für statistische Produktionsmodelle keine Gültigkeit hat.

Mit dieser kinematischen Verteilung kann die Detektionseffizienz für  $\Upsilon$  im STAR-Detektor abgeschätzt werden. Insbesondere interessiert die Auswirkung eines Schnittes auf den Impuls der Tochterteilchen. Dieser sollte möglichst hoch gesetzt werden, um den Untergrund zu minimieren, aber niedrig genug sein, sodass möglichst wenig Signal verworfen wird. Die Detektionseffizienz ist in Abbildung 5.4 gegen den minimalen zugelassenen Impuls der Tochterteilchen aufgetragen. Ein Schnitt auf die Tochterimpulse von 3 GeV/c scheint eine vernünftige Wahl zu sein. Damit liegt die Wahrscheinlichkeit, dass ein  $\Upsilon$  in der Akzeptanz des STAR-Detektors liegt bei ca. 25 %.

In Abbildung 5.5 ist die Anzahl messbarer  $\Upsilon$  gegen Rapidität und  $p_{\perp}$  bzw. gegen den Zerfallswinkel und  $p_{\perp}$  aufgetragen. Dabei wurden nur Tochterteilchen mit einem Impuls von mindestens 3 GeV/c zugelassen. In der unteren Abbildung zeigt sich, dass Zerfallswinkel kleiner als  $90^{\circ}$  selten vorkommen.



## 5.1. Messung von Quarkonium in Au+Au Kollisionen

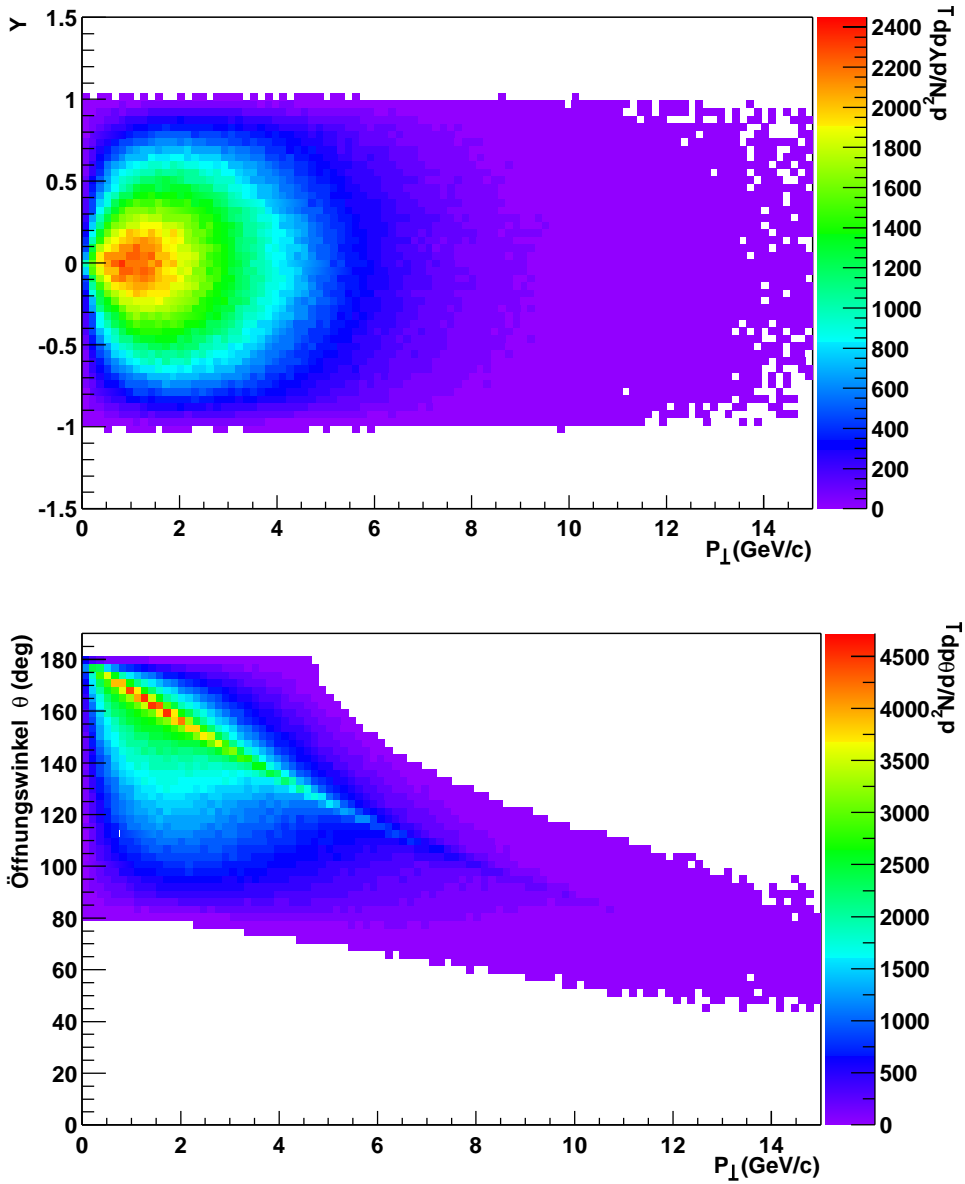


Abbildung 5.5.: Messbare  $\Upsilon$  im STAR Detektor mit einem Schnitt auf  $p_{Tochter} > 3$  GeV (kinematische Verteilung entsprechend Gl. 5.7 und 5.8). Oben: Anzahl messbarer  $\Upsilon$  gegen Rapidity und  $p_{\perp}$ , unten: Messbare  $\Upsilon$  gegen Zerfallswinkel und  $p_{\perp}$ . (Es wurden  $5 \times 10^6$   $\Upsilon$  generiert.)

## 5. Physikalische Anwendungen

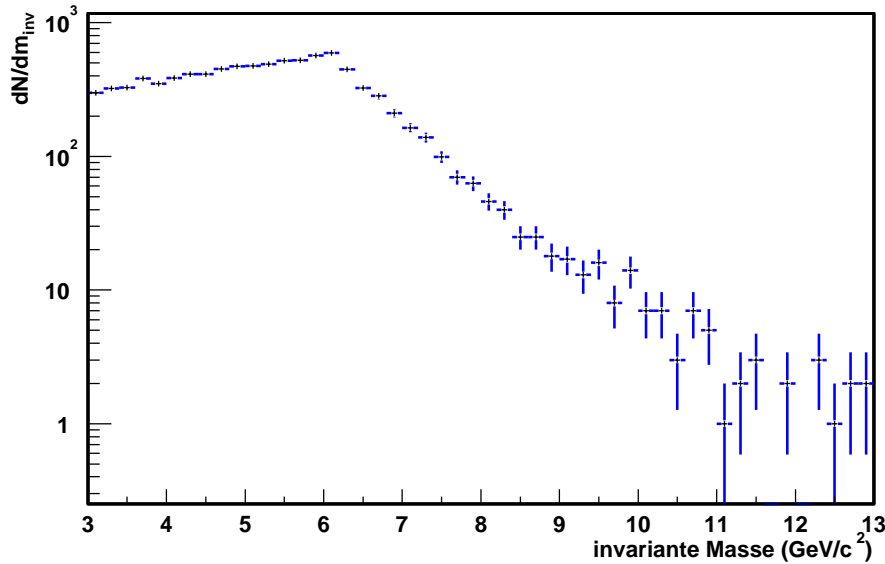


Abbildung 5.6.: Untergrund im invariante Massenspektrum durch unkorrelierte Hadronen in  $10^6$  zentralen Kollisionen (s. Text).

### 5.1.6. Untergrund

Ursprünglich bestand die Annahme, dass im interessierenden invariante Massenbereich für das  $\Upsilon$  kein Untergrund vorhanden sei. Dies stellt sich als falsch heraus, was schon allein durch die Multiplizität geladener Hadronen mit hohem Impuls erklärt werden kann. Bei  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV haben STAR [Adl02c] und PHENIX [Adc02a] die Multiplizität von geladenen Hadronen bis zu einem transversalen Impuls von 6 GeV/c bzw. 5 GeV/c gemessen. Pro zentralem Ereignis werden im Durchschnitt  $\sim 10^{-1}$  Hadronen einer Ladung gemessen, die einen Impuls  $> 3$  GeV besitzen. Damit ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von  $\sim 10^{-2}$ , 2 Hadronen entgegengesetzter Ladung mit einem Impuls größer als 3 GeV in einem Ereignis zu erhalten. Aufgrund von zufällig korreliert auftretenden Hadronen erhielt man eine invariante Massenverteilung entsprechend Abbildung 5.6. Dazu wurden entsprechend der STAR-Parameterisierung für  $dN/dp_{\perp}$  [Adl02c], isotrop Teilchen generiert, die dann entsprechend miteinander kombiniert wurden. Zu sehen sind Ereignisse, bei denen zwei Teilchen mit einem Mindestimpuls von 3 GeV/c auftraten, aus denen die invariante Masse berechnet wurde. Die Einträge in Abbildung 5.6 entsprechen einer Million zentralen Au+Au Kollisionen.

Den Untergrund durch Elektronen abzuschätzen ist möglich, indem man die von PHENIX gemessenen  $dN/dp_{\perp}$ -Werte für identifizierte Elektronen [Adc02b] mit

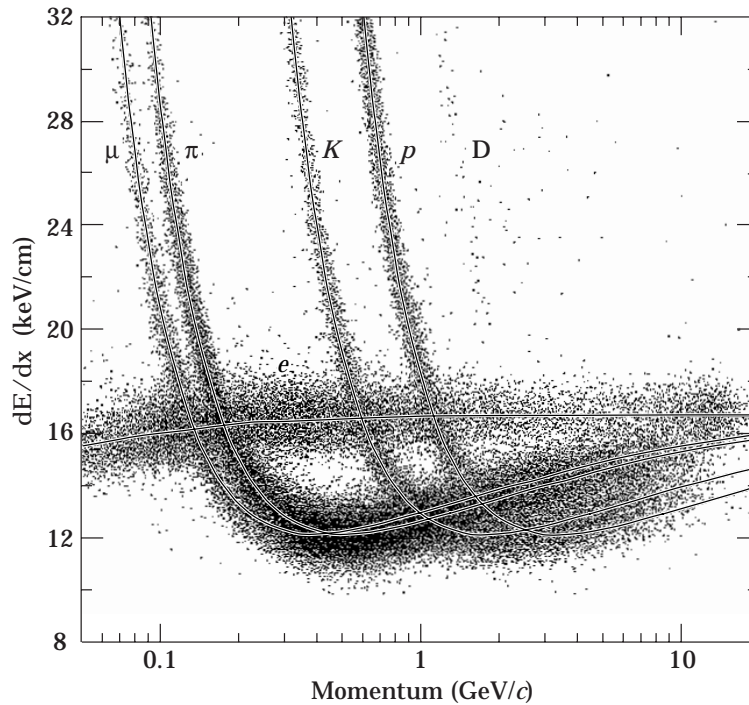


Abbildung 5.7.:  $dE/dx$  gegen Impuls, in der PEP4/9 TPC gemessen (aus [PDG02]).

den Werten für Hadronen vergleicht. Im Bereich  $1 < p_{\perp} < 3$  GeV ergibt sich ein  $e/h$ -Verhältnis von  $\sim 10^{-3}$  [Kol02], womit der Beitrag zum Untergrund durch zufällig korrelierte Elektronen vernachlässigbar ist.

Bei optimaler Impulsauflösung der TPC (vgl. Abbildung 5.1), befinden sich ca. 60 Untergrundeinträge im Bereich der Masse des  $\Upsilon$ .

### 5.1.7. Elektronenidentifikation

Der dominante Beitrag zum Untergrund in der invarianten Masse stammt von Hadronen, weshalb eine Identifizierung der Zerfallsprodukte (bzw. Hadronen) notwendig ist. Wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben, bietet sich hierfür die  $dE/dx$ -Messung in der TPC und das  $p/E$ -Verhältnis im EMC an.

Da ein TPC- $dE/dx$ -Schnitt den  $\mu^+\mu^-$ -Zerfallskanal eliminiert, ist man auf die Identifikation von Elektronen angewiesen.

Abbildung 5.7 zeigt gemessene  $dE/dx$ -Werte in der PEP4/9-TPC bis zu Impulsen von ca. 20 GeV/c. Oberhalb von 1.5 GeV/c sind Elektronen die Teilchen mit der

## 5. Physikalische Anwendungen

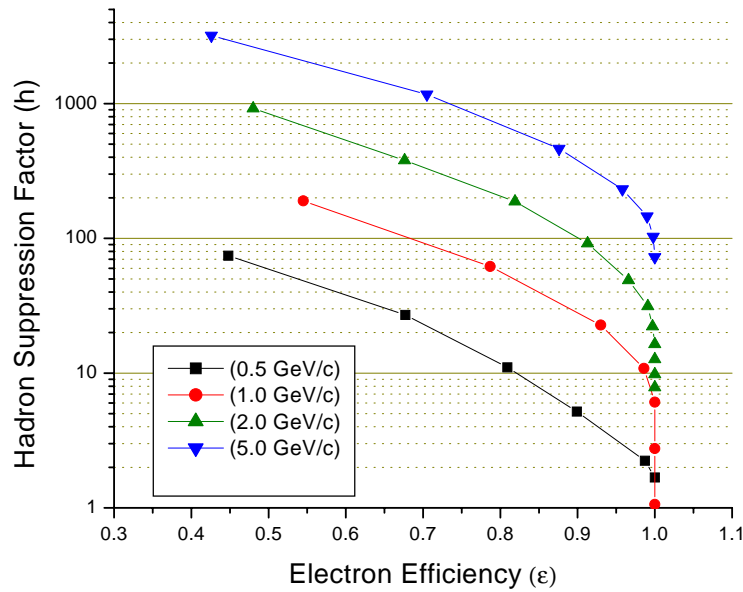


Abbildung 5.8.: Hadronischer Unterdrückungsfaktor gegen Elektroneneffizienz bei verschiedenen Impulsen bei optimaler Analyse (aus [Bed02]).

höchsten spezifischen Ionisation<sup>2</sup>, wobei sich Pionen und Myonen bei höheren Impulsen wieder annähern. Die  $dE/dx$ -Auflösung der STAR-TPC reicht nicht an die gezeigte Auflösung heran, aber es sollte möglich sein, einen Großteil der Hadronen zu unterdrücken.

Die  $dE/dx$ -Werte in diesem Impulsbereich sind in der STAR-TPC nicht mit ausreichender Statistik gemessen worden und es besteht eine Unsicherheit in der Beschreibung des Energieverlustes in der TPC bei hohen Impulsen. Ein  $dE/dx$ -Schnitt verbessert das Signal/Untergrund-Verhältnis in jedem Fall. Bei einem zu starken Schnitt besteht aber die Gefahr, Elektronen und damit das  $\Upsilon$ -Signal zu verlieren. Um diesen Schnitt zu optimieren, ist also eine genauere Kenntnis der spezifischen Ionisation und Teilchenzusammensetzung bei hohen Impulsen notwendig.

Die Fähigkeit des EMC, Hadronen zu unterdrücken, ist eine Funktion des Teilchenimpulses und der Effizienz, dass ein Elektron einen Schnitt überlebt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.8 für verschiedene Impulse dargestellt. In der Abbildung sind die maximal erreichbaren Werte dargestellt. Dies beinhaltet Preshower und SMD Informationen, die mit Hilfe eines neuronalen Netzes analysiert

<sup>2</sup>Leichte Kerne ( $D, He, etc.$ ) liegen über den Elektronen, werden hier aber vernachlässigt.

wurden. Damit können auch kleine Unterschiede zwischen Elektron- und Hadron-schauer genutzt werden, um diese identifizieren. Desweiteren wurde die SMD Information genutzt werden, um die Energieauflösung zu optimieren [Bed02]. Diese Informationen werden einem Level-3-Trigger nicht zur Verfügung stehen und es kann mit einem schlechteren Hadronenunterdrückungsfaktor gerechnet werden.

Unter ausschliesslicher Verwendung der Energieinformation der Türme, ist nach vorläufigen Untersuchungen damit zu rechnen, 80-90% der Hadronen im Impulsbereich  $1.5 \text{ GeV}/c < p < 5 \text{ GeV}/c$  identifizieren zu können [Sua02]. Dies entspricht also einem Hadronenunterdrückungsfaktor von 5-10.

### 5.1.8. $\Upsilon$ -Trigger mit Level-3

Das Level-3 System wurde gerade für Anwendungen wie die Suche nach dem  $\Upsilon$  vorgeschlagen. Da offensichtlich sehr viele Ereignisse notwendig sind, um ein Signal sehen zu können, ist es möglich (abhängig von weiteren Entwicklungen in STAR und an RHIC), dass das  $\Upsilon$  nur nachgewiesen werden kann, wenn die zusätzlichen Ereignisse, die einem Level-3 Trigger zur Verfügung stehen, analysiert werden.

Während des Runs im Jahr 2001 lief ein  $\Upsilon$ -Trigger-Algorithmus, der die invariante Masse der Kombinationen von Spuren mit einem Impuls  $p > 3 \text{ GeV}/c$  berechnete. Ein Schnitt auf den  $dE/dx$ -Wert der Spuren war auch implementiert. Eine Triggerentscheidung sollte fallen, sobald die berechnete invariante Masse innerhalb eines definierten Fensters liegt.

Ein Problem war zunächst die Frequenz der akzeptierten Ereignisse zu senken, was relativ starke Schnitte im  $dE/dx$  erforderlich machte. Bei einer zu hohen Rate, wären fast alle Ereignisse, die STAR aufgezeichnet hätte durch den Level-3-Trigger ausgewählt worden. Da die Selektionskriterien der Level-3 Trigger Einfluss auf das Ergebnis anderer Analysen (z.B. Messung der Multiplizität von Teilchen mit hohen Impulsen) hat, musste ein maximaler Beitrag zu den gespeicherten Ereignissen von ca. 5% eingehalten werden.

Die Impulsauflösung der Level-3-Spuren (und damit die invariante Massenauflösung) war während diesem Run begrenzt, da keine x-y-Vertexinformation für die Impulsbestimmung benutzt wurde. Dies wurde beschlossen, da die Qualität der Bestimmung des Vertex nicht sehr gut bekannt war, und man vermeiden wollte, dass ein systematischer Fehler durch einen falsch bestimmten x-y-Vertex, andere Level-3-Anwendungen beeinträchtigen würde. Die größere Ungenauigkeit in der Impulsbestimmung führt auch zu einer Erhöhung der Triggerrate bei gegeben

## 5. Physikalische Anwendungen

Parametern, da dadurch mehr Spuren niedrigen Impulses die Impulskriterien des Algorithmus (fälschlicherweise) erfüllen.

Der Algorithmus lief während des gesamten *Runs* problemlos. Bei der normalen Datennahme wurden Ereignisse, die den Algorithmus erfüllten, markiert. Gegen Ende der Strahlzeit war die Luminosität des Beschleunigers hoch genug, sodass die Speicherbandbreite von STAR erschöpft war. Damit konnte der Level-3-Trigger genutzt werden um getriggerte Ereignisse anzureichern. Der Analyse standen somit ca.  $3,6 \cdot 10^6$  zentrale Ereignisse während der normalen Datenaufnahme und  $6 \cdot 10^5$  Ereignisse, die zusätzlich nur von Level-3 analysiert wurden, zur Verfügung. Diese Statistik reichte nicht aus, um ein  $\Upsilon$ -Signal zu sehen.

### 5.1.9. Zusammenfassung

Basierend auf den Abschätzungen ist mit ca. 2  $\Upsilon$  pro Rapiditätseinheit pro einer Million zentraler Kollisionen zu rechnen. Aufgrund der Akzeptanz von STAR von 2 Rapiditätseinheiten verdoppelt sich diese Zahl, zusammen mit der Akzeptanz von ca. 25 % reduziert sie sich aber auf 1  $\Upsilon$  pro Million Ereignisse.

Die Spurfindungseffizienz wurde bisher nicht berücksichtigt, liegt aber für Spuren mit hohem Impuls im Bereich von 90-95 %, d.h. die Zahl der sichtbaren  $\Upsilon$  wird nochmals um einen Faktor 0,8-0,9 verringert.

Ohne eine Reduktion des Untergrundes ergibt sich mit den genannten Zahlen eine Anzahl von über 500 Millionen zentralen Ereignissen, die benötigt würden um das  $\Upsilon$  in STAR mit einer Signifikanz von  $3 \sigma$  nachzuweisen.

Bei Designluminosität liefert RHIC in einer 10 Wochen dauernden Strahlzeit mit 50 % *uptime* von RHIC und Detektor, ca.  $5 \cdot 10^9$  Au+Au-Kollisionen oder 250 Millionen zentrale Kollisionen. Aufgrund von Totzeiten sind im STAR-Detektor ca. 40 % dieser Kollisionen (100 Millionen) messbar.

Werden nur 5 Ereignisse pro Sekunde gespeichert, reduziert sich die Anzahl auf ca. 10 Millionen Ereignisse.

Das bedeutet, dass nur 10  $\Upsilon$  in dem gesamten Datensample sind, womit sich ein Signal nicht sicher nachweisen lässt.

Diese Zahlen machen deutlich, dass ein Level-3-Trigger notwendig ist, um eine möglichst hohe Anzahl von Ereignissen untersuchen zu können. Der Untergrund muss jedoch auch bei einem Level-3-Trigger reduziert werden, um das  $\Upsilon$ -Signal zu sehen.

Eine bessere Kenntnis des TPC- $dE/dx$  und der Multiplizitäten verschiedener Teilchensorten im Impulsbereich  $p > 3$  GeV/c ist notwendig, um die Auswirkung eines Schnittes beurteilen zu können. Auch die Fähigkeiten des EMC für den Level-3-Trigger müssen noch besser evaluiert werden. Sind diese bekannt, wird

es möglich sein, eine quantitative Aussage über den  $\Upsilon$ -Produktionswirkungsquerschnitt bei RHIC zu machen.

Alle Zahlen und Abschätzungen sind natürlich nicht sehr präzise. Die Frage ob das  $\Upsilon$  prinzipiell messbar ist, hängt stark vom tatsächlichen Produktionswirkungsquerschnitt ab. Es sei noch einmal betont, dass der Produktionsmechanismus von Quarkonium im Allgemeinen und in Schwerionenkollisionen insbesondere nicht genau bekannt ist. Die Modelle liegen in ihren Vorhersagen über den Produktionswirkungsquerschnitt für  $\Upsilon$  am RHIC weit auseinander.

## 5.2. Suche nach $\overline{^4He}$

Ein weiterer Level-3-Algorithmus, der während des Runs im Jahr 2001 lief, war ein Algorithmus zur Suche nach Anti-Teilchen mit  $Z = -2$ , also  $\overline{^3He}$  bzw.  $\overline{^4He}$ . Diese Messung ermöglicht Aussagen über die Ausdehnung der Quelle der produzierten Teilchen zu geben. Die Größe des Reaktionsvolumen bestimmt die Wahrscheinlichkeit, dass Antinukleonen bzw. Antideuteronen durch Koaleszenz eine Bindung eingehen. Eine direkte Produktion von  $\overline{^3He}$  und  $\overline{^4He}$ , durch Paarerzeugung ist sehr unwahrscheinlich.

Zur Selektion mit dem Triggeralgorithmus wurde in der  $dE/dx$ -Impuls-Ebene (siehe Abbildung 5.9) ein Schnitt definiert, der Teilchen mit  $Z = -2$  oder höherer Ladung selektiert. In Abbildung 5.9 ist das  $\overline{^3He}$ -Band zu sehen. Die blauen Kreuze stellen die Ereignisse dar, die durch den Level-3 Algorithmus zusätzlich getriggert wurden. Die roten Kreuze stammen aus Ereignissen, die unabhängig vom Level-3 Trigger aufgezeichnet wurden.

Die Effizienz des Triggers, vorhandene  $\overline{^3He}$  zu identifizieren ist in Abbildung 5.10 gezeigt. Die Effizienz des Triggers beträgt also im Bereich von  $1 > p > 5$  GeV ca. 80 %.

Näheres zu diesem Trigger-Algorithmus wird in der Doktorarbeit von Christof Struck [Str03] zu finden sein.

## 5.3. RICH-Anreicherungs-Trigger

Eine Aufgabe des RICH-Detektors (siehe Kapitel 3.1.4) ist die Messung von identifizierten Protonen und Anti-Protonen mit hohem Impuls ( $< 5$  GeV/c).

Entsprechend der gemessenen Multiplizität bei  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV [Adl02c], wird in der Akzeptanz des RICH nur alle 300 Ereignisse ein Teilchen mit einem Im-

## 5. Physikalische Anwendungen

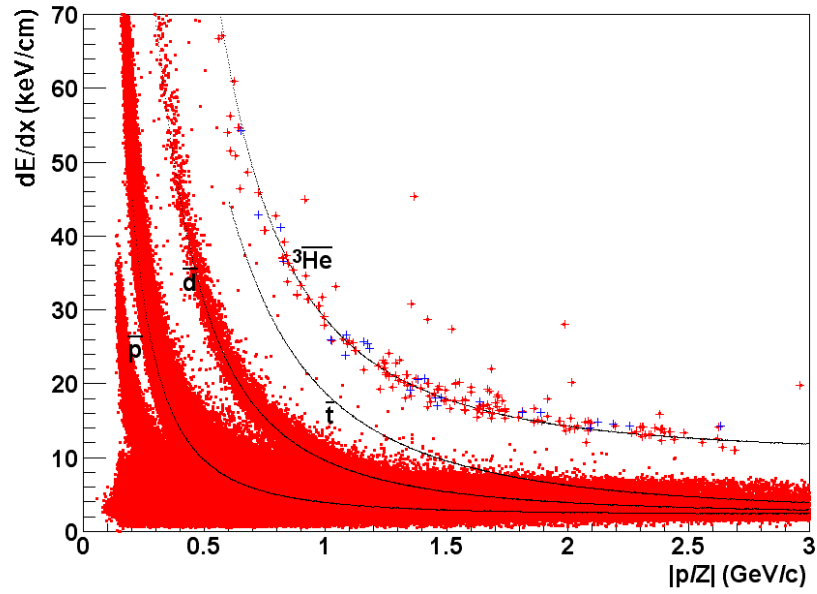


Abbildung 5.9.:  $dE/dx$  gegen Impuls, in der STAR-TPC gemessen. Kreuze sind  $^3\text{He}$ -Kandidaten, blaue Kreuze sind Ereignisse, die durch Level-3 getriggert wurden (aus [Str03]).

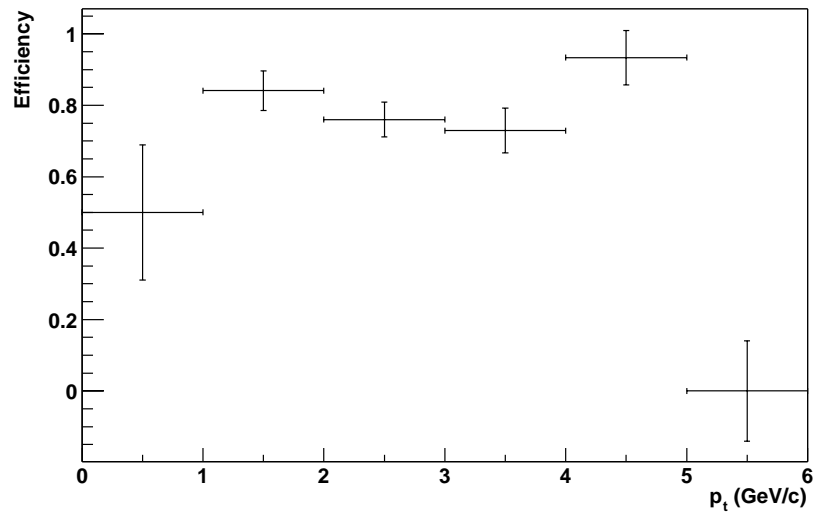


Abbildung 5.10.: Effizienz, ein  $^3\text{He}$  mit dem Triggeralgorithmus zu identifizieren (aus [Str03]).



puls von 3 GeV/c gemessen. Ein Teilchen mit einem Impuls von 5 GeV/c trifft nur ca. alle 50000 Ereignisse den RICH. Um diese Raten zu erhöhen wurde ein Level-3-Trigger implementiert, der die TPC-Impulsinformation nutzt, um Spuren mit einem Impuls  $p_{\perp} > 3$  GeV zu selektieren. Diese werden extrapoliert um zu sehen, ob sie in die Akzeptanz des RICH-Detektors fallen. Ist dies der Fall, wird das Ereignis getriggert.

Auch dieser Trigger lief im Run des Jahres 2001, markierte Ereignisse während der normalen Datenaufnahme und triggerte in den Level-3 Runs. Nähere Informationen zu diesem Triggeralgorithmus und Ergebnisse werden in der Doktorarbeit von Jens Berger [Ber03] zu finden sein.

## 5.4. Messung von $\rho_0$ in ultraperipheren Au+Au Kollisionen

Das elektrische Feld ultrarelativistischer Kerne ist stark lorentzkontrahiert, wodurch es einem vorüberfliegenden Kern als kurzer Puls elektromagnetischer Strahlung erscheint. Dieser Prozess ist nach Weizsäcker [Wei34] und Williams [Wil34] als Fluß (virtueller) Photonen zu beschreiben. Ein Prozess der auf dem Photonaustausch vorüberfliegender Kerne basiert, ist die korrelierte Coulomb Dissoziation, die bei RHIC für die Luminositätsmessung genutzt wird [Adl98].

Es werden aber auch nach den in Abbildung 5.11 gezeigten Prozessen,  $\rho$ -Mesonen (und andere Teilchen) produziert, die in  $\pi\pi$ -Paare zerfallen. Das  $\rho_0$  ist einfach zu messen, da es in ein  $\pi^+\pi^-$ -Paar zerfällt.

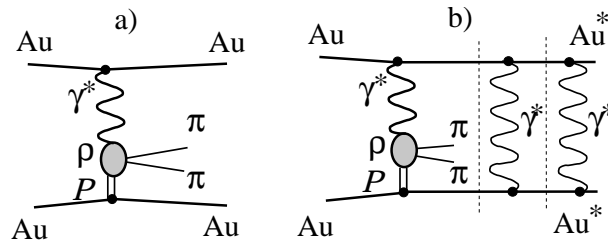


Abbildung 5.11.: Produktion von  $\rho$ -Mesonen in ultraperipheren Au+Au-Kollisionen: a) Photon-Pomeron-Streuung bei unverändertem Endzustand der Kerne, b) gleichzeitige korrelierte Riesenresonanzanregung in beiden Kernen, die zu korrelierter Neutronemission führt (Aus [Adl02d]).

Diese ultraperipheren Kollisionen werden entweder mit einem topologischen CTB-

## 5. Physikalische Anwendungen

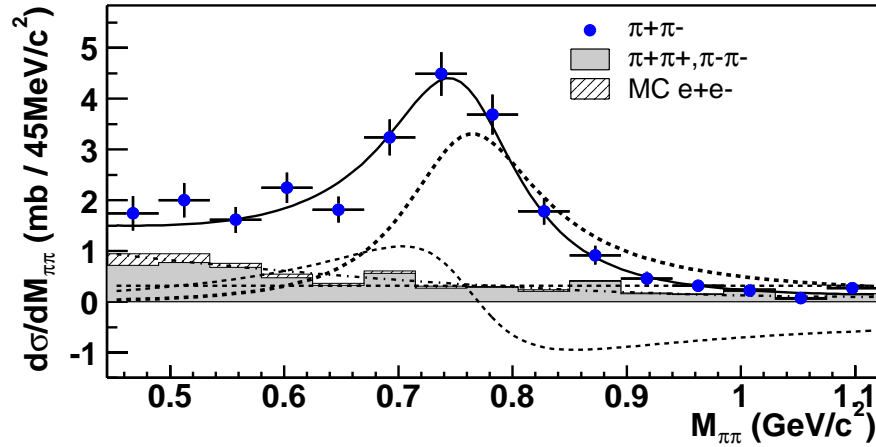


Abbildung 5.12.: Invariante Masse von  $\rho_0$ -Mesonen, produziert in ultraperipheren Au+Au-Kollisionen (aus [Adl02d]). Die durchgezogene Linie stellt die Summe aller Kontributionen (Signal und Untergrund) dar. Die gestrichelten Linien sind die einzelnen Kontributionen.

Trigger (für Prozess a) in Abb. 5.11) oder mit einem ZDC-Koinzidenz-Trigger für Prozess b) getriggert. Letzterer entspricht dem normalen *Minimum Bias*-Trigger. Aufgrund der geringen Multiplizität solcher Ereignisse, ist das Datenvolumen sehr gering. Damit können problemlos viele Millionen von ultraperipheren Kollisionen aufgenommen werden, wobei die maximale Rate durch die TPC-Ausleserate gegeben ist.

Diese hohe Anzahl von Ereignissen, von denen die meisten keinerlei Information beinhalten, führte zu einem Level-3-Trigger, der während der Datennahme,  $\rho_0$ -Zerfallskandidaten selektieren sollte:

Die Triggerbedingung bestand in der Existenz von 2 Spuren entgegengesetzter Ladung, die vom selben Ursprung stammen. Um hadronische Kollisionen auszuschließen wurde eine maximale Anzahl von ca. 20 Spuren verlangt.

Dieser Algorithmus wurde erstmals im Jahr 2000 benutzt, seitdem wird er routinemäßig bei der Datennahme ultraperipherer Kollisionen eingesetzt. Abbildung 5.12 stellt das Resultat dieser Messung im Jahre 2000 dar.

Dies ist ein Beispiel einer Level-3-Trigger Anwendung, die nicht absolut notwendig wäre, um das Signal messen zu können, der aber die Datenanalyse stark vereinfacht.

# 6. Ausblick

## 6.1. Erfahrungen

Das STAR Level-3-Trigger-System hat gezeigt, dass es in der Lage ist, Au+Au-Kollisionen am RHIC in Echtzeit zu rekonstruieren. Die Qualität der Rekonstruktion ist ausreichend, um physikalische Observablen zu analysieren; in vielen Fällen ist die Rekonstruktionqualität mit der Offlineanalyse vergleichbar. Es gibt jedoch folgende Probleme, die noch nicht gelöst sind:

- *Trackmatching*:

Das in Abschnitt 61 angesprochene Zerbrechen von Spuren an Sektorgrenzen reduziert die Rekonstruktionseffizienz. An der zentralen Membran ist das Zusammenfügen von zerbrochenen Spuren (*Trackmatching*) jedoch im Prinzip möglich; anders als in den insensitiven radialen Bereichen zwischen den Sektoren geht hier keine Spurinformaton verloren.

Eine Voraussetzung für ein erfolgreiches *Trackmatching* ist die Kenntnis der korrekten Driftgeschwindigkeit. Eine falsch eingestellte Driftgeschwindigkeit führt zur Verschiebung der Cluster in z-Richtung, wodurch sich die TPC-Hälften nicht mehr nahtlos aneinanderfügen.

Die Driftgeschwindigkeit ist innerhalb einer Genauigkeit von ca.  $\pm 0,2\%$  konstant (vgl. Kap. 3.1.1), was einer Verschiebung der Cluster von  $\pm 1$  cm an der zentralen Membran entspricht. Diese Verschiebung ist ca. zehn mal größer als der Ortsfehler der Cluster in z-Richtung (vgl. Kap. 4.9).

Damit ist eine genauere Kenntnis der Driftgeschwindigkeit Voraussetzung fürs *Trackmatching*. Eine Bestimmung der Driftgeschwindigkeit mit Laserereignissen<sup>1</sup> wäre innerhalb einer Stunde möglich [Dun02].

Der Vorgang des *Trackmatching* verlangt idealerweise die Cluster der Spurstücke, um die neue Spur anzupassen. Dies ist wünschenswert, da die Pa-

---

<sup>1</sup>Kalibrationsereignisse mit Laserspuren werden in regelmässigen Abständen automatisch aufgezeichnet. Die rekonstruierte Lage der Laserspuren kann mit der bekannten Position der Laser verglichen werden. Damit ist eine genaue Bestimmung der Driftgeschwindigkeit möglich.

## 6. Ausblick

parameter kurzer Spurstücke sehr ungenau sind. Die Cluster stehen aber auf dem GL3 nicht zur Verfügung. Ein möglicher Ansatz wäre, Cluster von Spuren, die offensichtlich die zentrale Membran kreuzen, von den SL3 auf den GL3 zu schicken. Die Machbarkeit und Effizienz eines solchen Vorgehens ist momentan noch nicht untersucht.

- Vertexinformation:

Die Information über die Position des x-y-Vertex verbessert die Qualität der Impulsrekonstruktion. In der Offlinerekonstruktionskette, wird der Vertex in einem iterativen Verfahren berechnet, das zu lange dauert, um es in Echtzeit anwenden zu können. Wie in Kapitel 62 beschrieben ist die Information über die Strahlposition ausreichend, um eine Steigerung der Impulsauflösung zu erzielen. Diese Information ist aber auch nicht direkt zugänglich, sondern muss wieder in einem iterativen Verfahren bestimmt werden. Es wurde vorgeschlagen im GL3, den Vertex jeden Ereignisses in wenigen Iterationen (also mit begrenzter Genauigkeit) zu berechnen und den Mittelwert der Ergebnisse über die Ereignisse zu bilden. Damit würde die Vertexinformation im Laufe des Runs immer genauer der Strahlposition entsprechen. Dieses Verfahren musste noch evaluiert werden, da es eine sich ändernde Impulsauflösung, im Laufe eines Runs, nach sich zieht.

Eine andere Möglichkeit wäre, ein separater Kalibrations-Prozess, der mit einem Bruchteil der Ereignisse eine präzise Vertexberechnung vornimmt und diese dem Level-3-System zur Verfügung stellt. Damit könnte ein laufender Mittelwert zur Verfügung gestellt werden.

- Korrekturen:

Die Korrekturen für Verzerrungen in der TPC basieren auf mehreren Analysen, die in der Regel erst am Ende einer Strahlperiode zur Verfügung stehen.

Die Korrektur von TPC-Verzerrungen im Level-3-Trigger ist deshalb nur für *Run*-Bedingungen möglich, die gut bekannt und untersucht sind. So konnten im Jahr 2001 die Korrekturen, die für die Daten des Jahres 2000 bestimmt wurden, nicht übernommen werden, da das Magnetfeld verändert wurde.

Diese Punkte stellen momentan Einschränkungen der möglichen Qualität dar. Lösungsmöglichkeiten für die ersten beiden Punkte müssen noch evaluiert werden. Der letzte Punkt wird an Gewicht verlieren, sobald das Detektorverhalten besser verstanden ist.

Trotz der genannten Einschränkungen wurde das Level-3-System schon erfolgreich zum Triggern benutzt. Im Jahr 2000 wurden in ultraperipheren Au+Au-Kollisionen  $\rho_0$ -Kandidaten selektiert, im Jahr 2001 wurden verschiedene Algorithmen in zentralen Au+Au-Kollisionen eingesetzt.

Erste Analysen der Triggereffizienz entsprechen den Erwartungen und zeigen, dass ein Level-3-Trigger funktioniert.

Eine zunächst nicht geplante Aufgabe des Level-3-Systems stellte sich als sehr wichtig heraus: die Qualitätskontrolle.

Besonders während dem ersten Run im Jahr 2000 wurden viele Probleme während der Datennahme entdeckt, da die rekonstruierten Ereignisse im Level-3 Eventdisplay nicht den Erwartungen entsprachen.

Darüberhinaus faszinierte die Möglichkeit, erstmals optisch, in Echtzeit, verfolgen zu können, was bei Schwerionenkollisionen passiert.

Die intuitive Bedienung und Flexibilität des Eventdisplays führte dazu, dass es inzwischen auch bei der Offlinedatenanalyse zur Verfügung steht.

## 6.2. Neue Entwicklungen im DAQ-System

Die hohe Qualität des Level-3-Clusterfinders führte zu der Idee, nicht mehr TPC-Rohdaten zu speichern, sondern nur noch die rekonstruierten Cluster. Dadurch wird das Datenvolumen um 80 % reduziert und bei gleichbleibender Bandbreite verünftlichtet sich die Rate, mit der Ereignisse gespeichert werden können.

Die Vergleiche des Offline und Level-3-Clusterfinders (vgl. Kap. 4.9) zeigen, dass die Ortsauflösung und Rekonstruktionseffizienz der beiden Clusterfinder vergleichbar ist. Es musste aber untersucht werden, ob sich die Qualität der Spur-rekonstruktion mit anderen Clustern ändert. Diese Untersuchung wurde durchgeführt, wobei direkt der Einfluss auf physikalische Observable untersucht wurde [Mag02]. Das Result war, dass die beiden Clusterfinder zu geringfügig unterschiedlichen Ergebnissen kommen, z. B. ist die Ortsauflösung des Offline Clusterfinders entlang der Padreihe schlechter, in Driftrichtung aber besser als die des Level-3-Clusterfinders. Insgesamt gibt es jedoch keine signifikanten Unterschiede.

Eine weitere Entwicklung im DAQ-System ist eine Erhöhung der Speicher-Bandbreite. Dies wird erreicht, indem die Daten zunächst auf lokale Platten geschrieben werden. Von dort werden die Daten mit der normalen Bandbreite von 30-50 MB/s zu RCF transferiert. Da auch die Zeit, in der das Experiment keine Daten liefert, zum Datentransfer genutzt werden kann, erhöht sich die effektive Bandbreite. Es kann mit einer *Downtime* von RHIC von mehr als 50 % gerechnet werden, was einer Verdoppelung der effektiven Speicherbandbreite entspricht.

## 6. Ausblick

Mit den beiden oben genannten Neuerungen, kann das DAQ-System ca. zehn mal mehr Ereignisse pro Sekunde speichern als bisher, also 30-50 Ereignisse pro Sekunde (in zentralen Kollisionen). Da dies ungefähr der Rate entspricht, die das Level-3 System verarbeiten kann, würde es seine ursprüngliche Aufgabe der Ratenreduktion verlieren.

Es bleibt aber das Problem der Rekonstruktion und Analyse all dieser Daten. Deshalb ist es wahrscheinlich, dass das Level-3 System nach wie vor zur Reduktion der Datenrate eingesetzt wird.

Eine andere Möglichkeit ist das Markieren von Ereignissen mit dem Level-3 System, während alle Ereignisse gespeichert werden. Dies würde später ein schnelleres Navigieren innerhalb der Datensätze ermöglichen.

Da die komplette Rekonstruktion (Produktion) eines *Runs* mehrere Monate in Anspruch nimmt, ist jede Analyse zunächst stark verzögert. Das Level-3-System wäre in der Lage verschiedener Observablen in eigene Datenströme zu sortieren. Bei Interesse an einer bestimmten Observable, kann dann der entsprechende Datensatz schnell rekonstruiert werden.

Die Konsequenz aus dieser Entwicklung ist natürlich die Idee, nur noch Spurinformatoren zu speichern, was das Datenvolumen nochmals um einen Faktor  $\approx 4$  reduziert. Dies ist für STAR nicht geplant.

### 6.3. Perspektiven für ALICE

Die ALICE-TPC hat eine Akzeptanz von  $-0,9 \leq \eta \leq 0,9$  bei voller azimuthaler Abdeckung. Dies ist mit der Akzeptanz der STAR-TPC vergleichbar. Sie ist in 36 Sektoren aufgeteilt, die je 160 Padreihen besitzen. Ein Teilchen hinterlässt somit 160 Ladungscluster in der TPC. Insgesamt besitzt die ALICE-TPC ca. 570000 *Pads*, in Driftrichtung ist sie in 500 *Timebins* unterteilt.

Die Nullunterdrückung der Daten passiert schon auf den *Front-End*-Karten. Von dort werden die Daten eines Sektors über Lichtleiter zu je 6 *Local Data Concentrators* (LDC) transferiert. Die insgesamt 216 LDCs werden gewöhnliche Doppelprozessor-PCs mit Pentium- oder vergleichbaren CPUs sein. Sie sind als flexibles Datenerfassungssystem gedacht, dass je nach Anforderung Daten prozessieren kann, oder nur als Zwischenspeicher dient, bis Rohdaten vom DAQ-System gespeichert werden. Aus Effizienzgründen sollen Rohdaten nur den LDC verlassen, wenn sie auf Band geschrieben werden [Ali00].

Es gibt verschiedene Vorschläge, wie ein System zur Echtzeitrekonstruktion von Spuren in der ALICE-TPC implementiert werden könnte. Ein Beispiel ist die *Tracklett*-Rekonstruktion<sup>2</sup> durch eine Hough-Transformation der Rohdaten mit

---

<sup>2</sup>Als *Tracklett* wird ein kurzes Spurstück bezeichnet.

Hilfe schneller FPGAs in den LDCs [Fra01].

Aufgrund der Erfahrungen in STAR können die Möglichkeiten einer „herkömmlichen“ Herangehensweise (Clusterrekonstruktion mit nachfolgender Spurrekonstruktion) abgeschätzt werden. Für diesen Fall müsste der Clusterfinder auf den LDC-CPU's laufen. Die Clusterdaten könnten entweder auf diesen CPU's zu Track (-Stücken) verbunden werden, oder an eine *Trackfinder*-PC-Farm weitergeleitet werden. Der erste Fall wäre einfacher zu realisieren, sofern die Rechenleistung ausreicht. Allerdings würden aufgrund der Aufteilung eines Sektors auf 6 LDCs Spuren zerbrochen.

Die ALICE-TPC soll bei Schwerionenkollisionen mit einer Rate bis zu 200 Hz ausgelesen werden, damit muss im Durchschnitt alle 5 ms ein Ereignis auf den LDCs rekonstruiert werden. Bei Verwendung von Doppelprozessor-PCs können die beiden Prozessoren abwechselnd je ein Ereignis analysieren, sodass jedem 10 ms zur Verfügung stehen.

Die Daten können im Hauptspeicher der LDC gepuffert werden, bis eine Triggerentscheidung eintrifft. Da dieser Speicher für Rohdaten von 30-70 Ereignissen Platz bietet, kann die nachfolgende Analyse parallelisiert werden. Dies ermöglicht eine einfache Erhöhung der Rechenleistung bei Bedarf.

Für Pb+Pb-Kollisionen bei  $\sqrt{s_{NN}} = 5,5$  TeV wurden Multiplizitäten geladener Teilchen von bis zu  $dN_{ch}/dy = 8000$  vorausgesagt. Betrachtet man gemessene Multiplizitäten in zentralen Schwerionenkollisionen bei verschiedenen Schwerpunktsenergien bis  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, zeigt sich eine logarithmische Energieabhängigkeit [Bac02]. Extrapoliert man diese zu LHC-Energien, ist eine Multiplizität von  $dN_{ch}/dy = 1100 - 1400$  zu erwarten. Für die folgende Abschätzung wird eine Multiplizität von  $dN_{ch}/dy = 2000$  angenommen. Diese Multiplizität wird auch von aktuellen Berechnungen vorhergesagt, z. B. [Bra02b].

## Clusterfinder

Die 3600 primären geladenen Teilchen in der ALICE-TPC hinterlassen je 160 Cluster, womit sich eine Anzahl von 600000 Clustern ergibt. In STAR stellen die Cluster primärer Spuren nur ca. 60% der Gesamtzahl von Clustern in der TPC dar. Der Rest stammt von sekundären Spuren und von Rauschen. Damit wäre für ALICE eine Gesamtzahl von ca.  $1 \cdot 10^6$  Clustern zu erwarten, also 10 mal mehr Cluster als bei STAR. Die Segmentierung in Pad- und Zeitrichtung ist ähnlich wie bei STAR, womit die Cluster-Rekonstruktionszeit mit der Anzahl der Cluster von STAR auf ALICE skaliert werden kann.

In STAR benötigt ein 66 MHz i960-Prozessor im Durchschnitt  $50 \mu s$ , um ein Cluster zu rekonstruieren. Es soll hier angenommen werden, dass die Rechenleistung

## 6. Ausblick

proportional zum Prozessortakt steigt<sup>3</sup>, also bei doppeltem Prozessortakt, die Rekonstruktionszeit halbiert würde. Weiterhin soll angenommen werden, dass ein i960- und ein Pentium-Prozessor bei gleichem Takt dieselbe Rekonstruktionszeit benötigen. Die erste Annahme ist zu optimistisch, die zweite Annahme ist pessimistisch, genauere Abschätzungen müssten jedoch auf Messungen basieren. Die zu erwartende Prozessorleistung im Jahr 2005 (wenn *Hardware* gekauft werden muss) kann, basierend auf Moore's Law<sup>4</sup>, abgeschätzt werden. Die Entwicklung der Prozessor-Taktraten in den letzten 10 Jahren ging etwas langsamer als Moore's Law. Eine Verdoppelung der Taktfrequenz fand alle 19-20 Monate statt. Setzt sich diese Entwicklung fort, erreichen die Prozessoren im Jahre 2005 Taktraten von 10 GHz.

Unter den genannten Annahmen wäre die Clusterrekonstruktion mit 216 CPUs mit 10 GHz in ca. 1.5 ms möglich.

### Trackfinder

Um die Spuren eines Supersektors in STAR bei  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV zu rekonstruieren werden 94 ms benötigt. Für das gesamte Ereignis bräuchte eine einzelne CPU ca.  $12 \cdot 94$  ms = 1,1 s. Mit 650 primären geladenen Teilchen pro Rapiditätseinheit, ergibt sich eine durchschnittliche Zeit pro primärer Spur von ca. 0,9 ms. Diese Zeit gilt für einen ALPHA-Prozessor mit 466 MHz, der equivalent zu einem Pentium Prozessor mit 800 MHz ist.

Um die benötigte Zeit pro Spur auf ALICE-Bedingungen zu skalieren, muss zum einen die Multiplizität berücksichtigt werden, die ca. dreifach höher ist. Zum anderen enthält eine Spur mit 160 Clustern, einen Faktor 3,5 mehr Cluster als bei STAR. Mit dem verwendeten *Trackfinder* steigt die benötigte Zeit zur Spurfindung linear mit der Anzahl der Cluster an [Old01]. Damit ergibt sich eine zehnfach längere Gesamtspurfundungszeit pro Ereignis als bei STAR.

Mit 216 CPUs (10 GHz) dauert die Spurrekonstruktion eines zentralen ALICE Ereignisses 4-5 ms.

### Zusammenfassung

Diese Abschätzungen zeigen, dass es möglich sein könnte, die gesamte Ereignisrekonstruktion auf den LDC-CPU's durchzuführen. Dies beruht auf der Annahme, dass sich Rekonstruktionszeiten mit doppelter CPU-Taktfrequenz halbieren. Ab-

---

<sup>3</sup>Tatsächlich muss auch die I/O-Geschwindigkeit berücksichtigt werden, also wie schnell Daten zum Prozessor gelangen und gespeichert werden können.

<sup>4</sup>Von Gordon Moore im Jahre 1965 postuliertes Gesetz: Moore's Law besagt, dass die Transistordichte pro Chip sich alle 18 Monate verdoppelt.



bildung 4.20 in Kapitel 4.12 zeigt für den *Trackfinder*, dass dies nicht richtig ist. Bei Verdopplung der Taktrate nimmt die Rekonstruktionszeit um einen Faktor 1,6-1,9 ab. Damit ergäbe sich für die Spurrekonstruktion eine Verdoppelung der oben abgeschätzten Zeit auf ca. 10 ms pro Ereignis.

Die Auswirkungen auf den Clusterfinder sind schwieriger abzuschätzen. Aber selbst wenn eine sechsfach längere Zeit zur Clusterrekonstruktion notwendig wäre, könnte diese auf den LDCs durchgeführt werden. In diesem Fall müsste die Spurrekonstruktion auf weitere CPUs verlagert werden. Mit den genannten Zeiten, wäre jedem LDC ein vergleichbarer Doppelprozessor-PC zur Spurrekonstruktion zuzuordnen.

Alternativ könnten die 6 LDCs eines Sektors Clusterdaten auf einen PC senden, der die Spurrekonstruktion des gesamten Sektors übernimmt. Dafür würden 30-60 ms benötigt. Um dennoch Ereignisse mit einer Rate von 200 Hz bearbeiten zu können, müssten in diesem Fall entsprechend 12 CPUs abwechselnd je ein Ereignis bearbeiten. Letzteres Konzept hätte den Vorteil, dass Spuren in ihrer gesamten Länge rekonstruiert werden könnten. Selbst wenn die Clusterrekonstruktion länger dauern sollte als 10 ms (aufgrund höherer Multiplizität), könnte dies durch Verwendung von 4-Prozessor-PCs als LDC ausgeglichen werden. Erst wenn Clusterdichten in der TPC zu hoch für einen einfachen Clusterfinder werden, müsste auf ein anderes Konzept ausgewichen werden [Fra01].

## 6. *Ausblick*

# A. Beispiel eines GL3-Algorithmus

Der hier aufgelistete Algorithmus ist der gl3True Algorithmus. Das Header-file gl3True.h:

```
//-----  
// gl3True.h  
//  
// An L3 algorithm, that always returns true. Useful to bypass  
// L3 processing.  
//  
//-----  
  
#ifndef GL3TRUE  
#define GL3TRUE  
  
#include "gl3Algorithm.h"  
  
class gl3True : public gl3Algorithm  
{  
public:  
    virtual int decide();  
  
    virtual const int  getAlgorithmID()  
        { return L3_ALGORITHM_TRUE; }  
    virtual const char *getAlgorithmName()  
        { return algoName; }  
  
private:  
    static const char algoName[20] = "True";  
};  
#endif
```

und nun gl3True.cxx:

A. *Beispiel eines GL3-Algorithmus*

```
//-----  
// gl3True.cxx  
//-----  
  
#include "gl3True.h"  
  
int gl3True::decide()  
{  
  
    return 1; // always true  
}
```

# Literaturverzeichnis

- [Abr00] M. Abreu *et al.*,  
„Evidence for deconfinement of quarks and gluons from the J/ $\Psi$  suppression pattern measured in Pb-Pb collisions at the CERN-SPS“,  
Phys. Lett. B **477** (2000), 28.
- [Ada97] D. Adams *et al.*,  
„Spin Structure of the Proton from polarizes inclusive deep-inelastic Muon-Proton scatterin“,  
Phys. Rev. D **56** (1997).
- [Adc02a] K. Adcox *et al.* PHENIX Kollaboration,  
„Suppression of Hadrons with Large Transverse Momentum in Central Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV“ Phys. Rev. Lett. **88**, 022301 (2002).
- [Adc02b] K. Adcox *et al.* PHENIX Kollaboration,  
„Measurement of single electrons and implications for charm production in Au+Au Collisions  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV“ Phys.Rev.Lett. (2002)
- [Adl98] C. Adler,  
„Bau und Test einer Null Grad Kalorimeters für RHIC“,  
Diplomarbeit, Institut für Kernphysik der Johann-Wolfgang-Goethe Universität, Frankfurt a. Main, (1998).
- [Adl01] C. Adler, A. Denisov, E. Garcia, M. Murray, H. Ströbele, S. N. White,  
„The RHIC Zero Degree Calorimeter“,  
Nucl. Instrum. Meth. A **470** (2001) 488-499.
- [Adl02a] STAR Collaboration, C. Adler *et al.*,  
„Results from the STAR Experiment“,  
Nucl. Physics. A **698** (2002) 64c-77c.
- [Adl02b] C. Adler *et al.*,  
„The STAR Level-3 Trigger System“,  
wird im RHIC-Band von Nucl. Instrum. Meth. publiziert.

- [Adl02c] STAR Collaboration, C. Adler *et al.*,  
„Centrality dependence of high pT hadron suppression in Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV“,  
nucl-ex/0206011 (2001).
- [Adl02d] STAR Collaboration, C. Adler *et al.*,  
„Coherent  $\rho_0$  Production in Ultra-Peripheral Heavy Ion Collisions“,  
nucl-ex/0206004 (2002).
- [Alg02] C. Allgower *et al.*,  
„The STAR Endcap Electromagnetic Calorimeter“,  
wird im RHIC Band von Nucl. Instrum. Meth. publiziert.
- [Ali00] Alice Collaboration,  
„Time Projection Chamber Technical Design Report“,  
CERN/LHCC 2000-001 (2000).
- [All02] C. R. Allton, S. Ejiri, S. J. Hands, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Ch. Schmidt, L. Scorzato,  
„The QCD thermal Phase transition in the presence of a small chemical potential“,  
hep-lat/0204010, (2002).
- [And02a] M. Anderson *et al.*,  
„The STAR Time Projection Chamber: A unique Tool for Studying High Multiplicity Events at RHIC“,  
wird im RHIC Band von Nucl. Instrum. Meth. publiziert.
- [And02b] M. Anderson *et al.*,  
„A Readout System for the STAR Time Projection Chamber“,  
wird im RHIC Band von Nucl. Instrum. Meth. publiziert.
- [App98] H. Appelshäuser *et al.*,  
„Spectator Nucleons in Pb+Pb Collisions at 158 AGeV“,  
Eur. Phys. J. A **2** (1998), 383-390.
- [Bac01] B. B. Back *et al.*,  
„Charged-particle pseudorapidity density distributions from Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV“,  
Phys. Rev. Lett. **87**, 102303 (2001)
- [Bac02] B. B. Back *et al.*,  
„Energy dependence of particle multiplicities near mid-rapidity in central Au+Au collisions“,  
Phys. Rev. Lett. **88**, 22302 (2002)

- [Bal98] A. J. Baltz, C. Chasman and S. N. White,  
„Correlated forward-backward dissociation and neutron spectra as a  
luminosity monitor in heavy ion colliders“,  
*Nucl. Instrum. Meth. A* **417** (1998) 1-8.
- [Bed02] M. Beddo *et al.*,  
„The STAR Barrel Electromagnetic Calorimeter“,  
wird in dem RHIC Band von *Nucl. Instrum. Meth.* publiziert.
- [Bel96] R. Bellwied *et al.*,  
„Development of Large Linear Silicon Drift Detectors for the STAR  
Experiment at RHIC“,  
*Nucl. Instrum. Meth. A* **377** (1996) 387.
- [Bel02] R. Bellwied *et al.*,  
„The STAR Silicon Vertex Tracker: A Large Area Silicon Drift De-  
tector“,  
wird in dem RHIC Band von *Nucl. Instrum. Meth.* publiziert.
- [Ber98a] J. Berger,  
„Messung von Lepton-Paaren aus Meson-Zerfällen in den Hadronex-  
perimenten NA49 und STAR“,  
Diplomarbeit, Institut für Kernphysik der Johann-Wolfgang-Goethe  
Universität, Frankfurt am Main, (1998).
- [Ber98b] J. Berger *et al.*,  
„Level-3 Trigger System Proposal“,  
interner Bericht (1998).
- [Ber02] J. Berger *et al.*,  
„TPC Data Compression“,  
akzeptiert zur Publikation in *Nucl. Instrum. Meth.* (2002).
- [Ber03] J. Berger,  
Doktorarbeit, Institut für Kernphysik der Johann-Wolfgang-Goethe  
Universität Frankfurt am Main (2002).
- [Bet30] H. A. Bethe,  
*Analen der Physik* **5** (1930) 325.  
F. Bloch,  
*Z. Physik* **81** (1933) 363.  
E. Fermi,  
*Phys. Rev.* **57** (1940) 445.
- [Bia89] S. F. Biagi,  
„A Multiterm Boltzmann Analysis of Drift Velocity, Diffusion, Gain

- and Magnetic-Field Effects in Argon-Methane-Vapour Mixtures“, Nucl. Instrum. Meth. A **283** (1989) 716-722.
- [Bie02] F. S. Bieser *et al.*,  
„The STAR Trigger“,  
wird im RHIC-Band von Nucl. Instrum. Meth. publiziert.
- [Blu93] W. Blum, L. Rolandi,  
„Particle Detection with Drift Chambers“,  
Springer-Verlag (1993).
- [Bot98] M. Botlo, M. J. LeVine, R. A. Scheetz, M. W. Schulz, P. Short,  
J. Woods, D. Crosetto,  
„The STAR cluster-finder ASIC“,  
IEEE Transactions on Nuclear Science , Volume 45, Issue 4, Part 1  
(1998) 1809-1813.
- [Bou99] A. Boucham *et al.*,  
„Proposal for a Silicon Strip Detector for STAR (SSD)“,  
Interner Bericht, STAR Note 400 (1999).
- [Bra02a] A. Braem *et al.*,  
„Identification of High  $p_{\perp}$  Particles with the STAR-RICH Detector“,  
wird im RHIC-Band von Nucl. Instrum. Meth. publiziert.
- [Bra02b] M. A. Braun, F. del Moral, C. Pajares,  
„Centrality Dependence of the multiplicity and transverse momentum  
distributions at RHIC and LHC and the percolation of strings“,  
hep-ph/0208182 (2000).
- [Bra00] P. Braun-Munzinger, J. Stachel,  
„(Non)Thermal Aspects of Charmonium Production and a New Look  
at  $J/\Psi$  Suppression“,  
Phys. Lett. B **490** (2000) 196-202.
- [Cal01] M. Calderon de la Barca Sanchez,  
„Charged Hadron Spectra in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV“,  
Doktorarbeit, Yale University, Dezember 2001.
- [Die02] Th. Dietel,  
private Mitteilung (2002).
- [Dun01] J. C. Dunlop, STAR Collaboration, STAR-RICH Collaboration,  
„High  $p_{\perp}$  Spectra from Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV“,  
Nucl. Phys. A **698** (2002) 515c-518c.



- [Dun02] J. C. Dunlop, D. H. Hardke, J. Lauret,  
private Mitteilungen (2002).
- [Fli01] D. Flierl,  
„L3 Efficiencies“,  
interner Report (2001).
- [Fod02] Z. Fodor, S. D. Katz,  
„Lattice Determination of the critical point of QCD at finite  $T$  and  $\mu$ “,  
JHEP 0203 (2002) 014, hep-lat/0106002.
- [Fra01] U. Frankenfeld, D. Röhrich, Bernhard Skaali, Anders Vestbø,  
„A High-Level Trigger for Heavy Ion Experiments,  
Proceedings der REAL-TIME 2001, Valencia, Spanien.
- [Gav95] R. Gavai, D. Kharzeev, H. Satz, G. A. Schuler, K. Sridhar, R. Vogt,  
„Quarkonium Production in Hadronic Collisions“,  
Int.J.Mod.Phys. A **10** (1995) 3043-3070.
- [Gaz99] M. Gaździcki, M. I. Gorenstein,  
„Evidence for Statistical Production of  $J/\Psi$  Mesons in Nuclear Col-  
lisions at 158-200 AGeV“,  
Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 4009.
- [Gon01] J. E. Gonzales,  
„Calibration of STAR Zero Degree Calorimeters“,  
interner Bericht, STAR Note 0437 (2001).  
Z. Xu,  
private Mitteilung (2002).
- [Gle97] N. K. Glendenning,  
„Compact Stars“ Springer-Verlag, New York (1997).
- [PDG02] K. Hagiwara *et al.*,  
„Review of Particle Physics“,  
Phys. Rev. D **66** (2002).
- [Har02] D. Hardkte: Private Mitteilung.
- [Hei00] U. Heinz, M. Jacob,  
„Evidence for a New State of Matter: An Assessment of the Results  
from the CERn Lead Beam Programme“,  
nucl-th/0002042 (2000).

- [Jac99] P. Jacobs, Th. Ullrich,  
„J/ $\Psi$  Production Cross Sections, Rates and Acceptance in STAR“,  
interner Bericht, STAR Note 391 (1999).
- [Kha97] D. Kharzeev, C. Lourenco, M. Nardi, H. Satz,  
„A quantitative analysis of charmonium suppression in nuclear collisions“,  
Z. Phys. C **74** (1997), 307-318.
- [Kla02] J. Klay,  
Untersuchung der Impulsauflösung bei vollem Feld,  
interner Bericht, STAR (2002).
- [Kol02] Th. Kollegger,  
private Mitteilung (2002).
- [Lan99] J. S. Lange *et al.*  
„The STAR Level-3 Trigger System“,  
Proc. INSTR99, Nucl. Instrum. Meth. A **453** (2000) 397-404.
- [Lan00] J. M. Landgraf,  
private Mitteilung (2000).
- [Lan02a] J. M. Landgraf, *et al.*  
„An Overview of the STAR DAQ System“,  
wird im RHIC-Band von Nucl. Instrum. Meth. publiziert.
- [Lan02b] J. M. Landgraf,  
private Mitteilung.
- [Lan02c] J. S. Lange,  
„Search for New States of Matter with the STAR Experiment at RHIC“,  
Vortrag bei *Nuclei in the Cosmos VII*, Fuji-Yoshida (2002).
- [Las97] „Particle Identification in STAR“ interner Bericht, STAR-Note 312  
(1997).
- [Las99] B. Lasiuk, Th. Ullrich,  
„STAR C++ Class Library, User Guide and Reference Manual“,  
interne Dokumentation (1999).
- [Leo94] W. R. Leo,  
„Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments“,  
Springer-Verlag, 2. Auflage (1994).

- [Lev99] M. J. LeVine,  
private Mitteilung (1999).
- [LeV00] Editors: M. J. LeVine, A. Ljubicic Jr. , J. M. Nelson,  
„DAQ Backbone Communication Protocol, Version 9.01“,  
STAR-internes Dokument (2000).
- [Lin96] V. Lindenstruth *et al.*  
„Trigger/Clock Distribution Tree, Requirement Document“,  
internes STAR-Dokument (1996).
- [Lis96] M. A. Lisa,  
„The STAR-TPC Clusterfinder/Hitfinder“,  
interner Bericht STAR-Note 238 (1996).
- [Lju99] A. Ljubicic Jr.  
private Mitteilung (1999).
- [Lju02] A. Ljubicic Jr. ,  
private Mitteilung (2002).
- [Mag02] D. Magestro, F. Retiere, J. Klay, M. Lopez-Noriega, J. Landgraf,  
S. Panitkin, L. Barnby,  
Vergleiche des Offline und des Online Clusterfinders,  
interner Bericht (2002)
- [Mat86] T. Matsui, H. Satz,  
„J/Ψ suppression by Quark-Gluon Plasma formation“,  
Phys. Lett. B **178**, 1986, 416-422.
- [Mil02] Z. Milosevitch,  
private Mitteilung (2002).
- [Myr02] [www.myri.com/myrinet/](http://www.myri.com/myrinet/)
- [Nic96] B. Nichols, D. Buttlar, J. Proulx Farrell,  
„Pthreads Programming  
A POSIX Standard for Better Multiprocessing“,  
O'Reilly Verlag, erste Auflage (1996).
- [Old01] M. D. Oldenburg,  
„Schnelle Spurrekonstruktion und Messung von anisotropem Fluss  
mit den Vorwärts-Spuredriftkammern des Experiments STAR“,  
Doktorarbeit, Max-Planck-Institut für Physik, Werner-Heisenberg-  
Institut der Universität München (2001).

## Literaturverzeichnis

- [Ros02] T. Roser,  
„RHIC Performance“,  
Nucl. Phys. A **698** (2002) 23c.
- [Sau77] F. Sauli,  
CERN Report 77-09 (1977), Nachdruck in Experimental Techniques  
in High Energy Physics, Th. Ferbel (Hrsg.), Addison-Wesley (1987).
- [Str01] C. Struck,  
private Mitteilung (2001).
- [Str03] C. Struck,  
Doktorarbeit, Institut für Kernphysik der Johann-Wolfgang-Goethe  
Universität,  
Frankfurt (2003).
- [Sua02] A. P. Suaide,  
private Mitteilung (2002).
- [Tho01] J. H. Thomas,  
private Mitteilung (2001).
- [Ull02] Th. Ullrich,  
„Quarkonia Rates and Acceptance“,  
Vortrag bei „STAR Workshop on Future Physics and Detectors“,  
Bar Harbour (2002).
- [Vig98] S. Vigdor,  
„The RHIC Spin Program: Snapshots of Progress“,  
Proceedings of the 13th International Symposium on High Energy  
Spin Physics, World Scientific Pub. Comp., (1999).
- [Vog99] R. Vogt,  
„Relation of hard and total cross sections to centrality“, Heavy Ion  
Phys. 9 (1999) 339-348.
- [War01] H. Ward,  
Interne Berichte zur Kalibration des CTB während der 2001 Strahl-  
zeit.
- [Web96] F. Weber, N. K. Glendenning,  
„Dense Stellar Matter and Structure of Neutron Stars“,  
Vortrag bei 3rd Mario Schönberg School of Physics, Joao Pessoa,  
Brasilien, astro-ph/9609074

- [Wei34] C. F. v. Weizsäcker,  
„Austrahlung bei Stößen sehr schneller Elektronen“,  
Z. Phys. **88** (1934) 612.
- [Wil34] E. J. Williams,  
„Nature of th High Energy Particles of Penetrating Radiation and  
Status of Ionisation and Radiation Formulas“,  
Phys. Rev. **45** (1934) 729. Z. Phys. **88** (1934) 612.
- [Yep96] P. Yepes,  
„A Fast Track Pattern Recognition“,  
Nucl. Instrum. Meth. A **380** (1996) 582.



# Danksagung

Zunächst möchte ich Prof. Dr. Reinhard Stock dafür danken, dass er dieses Projekt ermöglicht hat. Prof. Dr. Herbert Ströbele danke ich dafür, dass er mit Reinhard Stock zusammen die Entscheidung verantwortete, drei Doktoranden nach USA zu schicken, obwohl er sie viel lieber bei NA49 gehabt hätte. Dieter Röhrich und Mike LeVine waren die gedanklichen Väter des Level-3 Triggers und legten den Grundstein für dieses Projekt. Tonko Ljubicic gilt mein besonderer Dank für alles was er mir beigebracht hat, für seine Hilfe bei der Planung der Details des Systems, politischer Hilfestellung und allgemeiner Mentortätigkeit. Jeff Landgraf brachte mir viel über Softwareentwicklung bei und ich danke ihm und Tonko für die gute und konstruktive Zusammenarbeit bei der Integration von DAQ- und Level-3-System. Jens Berger, Dominik Flierl, Thomas Dietel, meinen „Mitdoktoranden“ danke ich für die gute Zusammenarbeit auch neben der Arbeit und dafür, dass die Arbeit soviel Spass machte. Pablo Yepes danke ich für die gute Zusammenarbeit bei allen Trackerproblemen. Thorsten Kollegger danke ich für Diskussionen über die physikalischen Möglichkeiten des Systems. Schliesslich gilt mein Dank Sören Lange, unserem *Group Leader*. John Harris unterstützte uns als Spokesman von STAR. Tim Hallman, gebührt Dank für seine Unterstützung als BNL Group Leader und später als Spokesman von STAR. Mein Dank gilt auch den vielen Leuten, die in Brookhaven eine Hilfe waren: Hank Crawford, Blair Stringfellow, Dennis Reichold, Jeff Porter, John Nelson, Angelika Drees, Andreas Schüttauf, Howard Weimann, Jerome Laurent, James Dunlop, Jim Thomas, Ralph Brown und denen die ich hier vergessen habe. Liz Mogavero und Cora Feliciano waren eine große Hilfe bei allen organisatorischen Problemen in Brookhaven. Bill Christie verdient eine besondere Erwähnung für seine fast väterliche Unterstützung. Markus Oldenburg danke ich für die Bereitstellung einiger Bilder in dieser Arbeit. Mein Dank gilt auch den Frankfurter IKF-Mitarbeitern, Werner Amend, Jutta Berschin, Rainer Renford und Heidrun Rheinfels für die Atmosphäre sowie Marek Gaździcki für Diskussionen. Peter Dinkelaker, Alexander Wetzler, Roland Bramm und Boris Wagner danke ich für die „Wiederaufnahme“ am IKF. Dominik und Steffi haben schliesslich durch kritisches Lesen, die Arbeit wenigstens orthographisch verbessern können. DANKE!!!





# Lebenslauf

<b>Persönliche Informationen</b>	Name:	Clemens Adler
	Familienstand	ledig
	Staatsangehörigkeit:	deutsch
	Geburtsdatum:	27.04.1970
	Geburtsort:	Leonberg
<b>Schulbildung</b>	1976-1980	Spitalgrundschule, Leonberg
	1980-1986	Albert-Schweitzer-Gymnasium, Leonberg
	1986-1987	Alternative Community School, Ithaca, N. Y. , USA
	1987-1990	Technisches Gymnasium, Leonberg
		Abschluss: Abitur
<b>Zivildienst</b>	1990 -1991	Körperbehindertenverein Stuttgart e. V. Individuelle Schwerstbehindertenbetreuung
<b>Studium</b>	4/1992 -	Johann-Wolfgang-Goethe Universität Frankfurt
	9/1993	Studium der Humanmedizin
	10/1993	Johann-Wolfgang-Goethe Universität Frankfurt
		Aufnahme des Studiums der Physik
	3/1996	Vordiplom im Fach Physik
		Note: „Sehr Gut“
	4/1997 -	Diplomarbeit am Institut für Kernphysik
	9/1998	Titel: „Bau und Test eines Null-Grad-Kalorimeters für RHIC“ Betreuer: Prof. Dr. Herbert Ströbele
	1/1999	Diplom im Fach Physik
		Note: „Sehr Gut mit Auszeichnung“
11/1999	Philipp Siedler Preis des Physikalischen Vereins Frankfurt für Diplomarbeit	
3/1999	Beginn der Promotion am Institut für Kernphysik Betreuer: Prof. Dr. Reinhard Stock	
4/1999- 11/2001	Aufenthalt am Brookhaven National Laboratory, USA, zum Aufbau des Level-3 Triggers am Experiment STAR	