

Lehrstuhl für experimentelle Hadronenphysik  
Bochum 2012

Analyse des Zerfalls  $\chi_{cJ} \rightarrow K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0$

bei BES-III

und

Entwicklung der Slow Control für  
das PANDA-Experiment

Florian Feldbauer  
geboren in Bochum

Dissertation zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften in der Fakultät für  
Physik und Astronomie der Ruhr-Universität Bochum

1. Gutachter: Prof. Dr. U. Wiedner
  2. Gutachter: Prof. Dr. W. Meyer
- (Lehrstuhl für experimentelle Hadronenphysik, Ruhr-Universität Bochum)

Tag der mündlichen Prüfung: 12.07.2012





# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Das Standardmodell . . . . .	3
1.2	Quantenchromodynamik . . . . .	4
1.3	Spektrum der Charmonium-Resonanzen . . . . .	6
1.4	Exotische Materie . . . . .	7
<b>II</b>	<b>Analyse des Zerfalls <math>\chi_{cJ} \rightarrow K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0</math> bei BES-III</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Das BES-III-Experiment</b>	<b>13</b>
3.1	Zielsetzung . . . . .	13
3.2	Die Beschleunigeranlage BEPC-II . . . . .	14
3.3	Der BES-III-Detektor . . . . .	15
3.3.1	Die Driftkammer . . . . .	16
3.3.2	Das Flugzeitsystem . . . . .	18
3.3.3	Das elektromagnetische Kalorimeter . . . . .	19
3.3.4	Der Myondetektor . . . . .	20
3.3.5	Auslese und Daten . . . . .	21
3.4	BES-III Offline Software System . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Daten</b>	<b>23</b>
4.1	Messdaten . . . . .	23
4.2	Monte Carlo-Simulationsdaten . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Rekonstruktion des Zerfalls <math>\psi' \rightarrow \gamma \chi_{cJ} \rightarrow \gamma (K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0)</math></b>	<b>25</b>
5.1	Einleitung . . . . .	25
5.2	Selektionskriterien . . . . .	25
5.2.1	Teilchenidentifikation . . . . .	25
5.2.2	Kombinatorik . . . . .	26
5.2.3	Kinematische Anpassung . . . . .	27
5.2.4	$\chi_{cJ}$ -Selektion . . . . .	27

<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Analyse</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Analyse des Zerfalls <math>\chi_{cJ} \rightarrow K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0</math></b>	<b>39</b>
<b>III</b>	<b>Entwicklung der Slow Control für das PANDA-Experiment</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>Einleitung</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Das PANDA-Experiment</b>	<b>45</b>
9.1	Zielsetzung . . . . .	45
9.2	Die Beschleunigeranlage FAIR . . . . .	46
9.3	Der PANDA-Detektor . . . . .	47
9.3.1	Das Targetspektrometer . . . . .	47
9.3.2	Das Vorwärtsspektrometer . . . . .	51
9.4	Datennahme . . . . .	51
<b>10</b>	<b>Software des Kontrollsystems</b>	<b>53</b>
10.1	EPICS . . . . .	53
10.1.1	Prozessdatenbank . . . . .	53
10.1.2	Channel Access . . . . .	54
10.1.3	EPICS Module und Erweiterungen . . . . .	56
10.2	Control System Studio . . . . .	58
10.2.1	OPI Builder . . . . .	61
10.2.2	Archiver und Data Browser . . . . .	62
10.2.3	Alarmhandler . . . . .	65
<b>11</b>	<b>Der Prototyp der EMC Vorwärtssendkappe 'Proto192'</b>	<b>67</b>
11.1	Aufbau des Prototypen . . . . .	67
11.2	Kontrollsystem des Prototypen . . . . .	69
11.3	Weiterentwicklung des THMP . . . . .	76
11.3.1	Neues Design der Platinen . . . . .	76
11.3.2	Auslese und Kalibration . . . . .	77
11.4	Kühlungsregelung . . . . .	80
<b>12</b>	<b>Environmental Database</b>	<b>83</b>
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung der Entwicklung der Slow Control</b>	<b>87</b>
<b>IV</b>	<b>Anhang</b>	<b>89</b>
<b>A</b>	<b>Spektren der verschiedenen Teilchenkombinationen für das <math>\chi_{c1}</math> und das <math>\chi_{c2}</math></b>	<b>91</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>

**Tabellenverzeichnis**

**III**

**Listings**

**V**

**Literaturverzeichnis**

**VII**



# **Teil I**

## **Grundlagen**



# 1 Einleitung

## 1.1 Das Standardmodell

Das Standardmodell ist eine Theorie zur Beschreibung der fundamentalen Elementarteilchen und der Wechselwirkungen zwischen diesen. Es gibt zwölf elementare Teilchen, aus denen Materie aufgebaut ist: sechs Quarks und sechs Leptonen, sowie deren jeweilige Antiteilchen. Diese Teilchen sind Fermionen mit Spin  $\frac{1}{2}$ , die der schwachen, und, im Falle einer von Null verschiedenen elektrischen Ladung, auch der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen.

Die sechs Leptonen Elektron  $e^-$ , Myon  $\mu^-$ , Tau  $\tau^-$  und die drei entsprechenden Neutrinos lassen sich in drei Generationen unterteilen und mit den *Leptonenzahlen*  $L_e$ ,  $L_\mu$  und  $L_\tau$  klassifizieren. Die Quarks lassen sich anhand des *Isospins*  $I_z$  und der *Flavors* (Strangeness  $S$ , Charm  $C$ , Bottom  $B$  und Top  $T$ ) unterscheiden und werden ebenfalls in drei Generationen unterteilt (Tab. 1.1). Die Quarks unterliegen als Träger der starken *Farbladung* auch der starken Wechselwirkung. Die drei möglichen Farbladungen werden als *rot*, *blau* und *grün* bezeichnet.

$q$	$Q$ [ $e$ ]	$I_z$	Flavor				Masse [MeV/ $c^2$ ]	$l$	$Q$ [ $e$ ]	Leptonenzahl			Masse [MeV/ $c^2$ ]
			$C$	$S$	$T$	$B$				$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	
$u$	+2/3	1/2	0	0	0	0	1,5 - 3,3	$e^-$	-1	1	0	0	0,511
$d$	-1/3	-1/2	0	0	0	0	3,5 - 6,0	$\nu_e$	0	1	0	0	$< 2 \times 10^{-6}$
$c$	+2/3	0	1	0	0	0	1270	$\mu^-$	-1	0	1	0	106
$s$	-1/3	0	0	-1	0	0	104	$\nu_\mu$	0	0	1	0	$< 190 \times 10^{-3}$
$t$	+2/3	0	0	0	1	0	$1,71 \times 10^5$	$\tau^-$	-1	0	0	1	1777
$b$	-1/3	0	0	0	0	-1	4200	$\nu_\tau$	0	0	0	1	$< 18$

Tabelle 1.1: Eigenschaften der Quarks ( $q$ ) und Leptonen ( $l$ ) [PDG10]

Die Ladung  $Q$  ist in Einheiten der Elementarladung  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C angegeben. Die jeweiligen Antiteilchen unterscheiden sich im Vorzeichen der Ladung und des Flavors bzw. der Leptonenzahl.

Die drei grundlegenden Wechselwirkungen des Standardmodells sind die schwache Kraft, Elektromagnetismus und die starke Kraft. Die Gravitation wird in der Elementarteilchenphysik vernachlässigt, da ihre Kopplungsstärke 24 Größenordnungen kleiner ist als die der nächststärkeren Wechselwirkung.

Eichtheorien beschreiben die Kräfte im Standardmodell. Die Kraft zwischen zwei Teilchen wird durch den Austausch von virtuellen Vektorbosonen mit ganzzahligem Spin

übertragen (Tab. 1.2). Diese virtuellen Bosonen müssen im Gegensatz zu reellen Teilchen nicht auf der Massenschale liegen, das heißt die Relation  $m^2 = E^2 c^{-4} - p^2 c^{-2}$  muss nicht erfüllt sein. Die Mittlerteilchen der schwachen Wechselwirkung, die an die schwache Ladung koppelt, sind die  $W^\pm$ - und  $Z^0$ -Bosonen. Aus der Unschärferelation folgt aufgrund der hohen Ruhemasse dieser Teilchen ( $m_W = 80,39 \text{ GeV}/c^{-2}$ ,  $m_Z = 91,19 \text{ GeV}/c^{-2}$ ) die geringe Reichweite dieser Kraft. Die schwache Wechselwirkung ist die einzige, die das Flavor der Teilchen ändern kann. Die elektromagnetische Wechselwirkung koppelt an die elektrische Ladung eines Teilchens und wird durch den Austausch virtueller Photonen vermittelt. Diese Kraft ist sowohl im mikroskopischen als auch im makroskopischen Bereich von Bedeutung. Im Standardmodell werden die schwache und die elektromagnetische Kraft zur elektroschwachen Kraft zusammengefasst. Die stärkste Kraft ist die starke Wechselwirkung. Diese koppelt an die starke Farbladung und wird durch acht Gluonen übertragen. Eine Besonderheit der starken Wechselwirkung ist, dass die Mittlerteilchen selbst eine Farbladung tragen und somit untereinander wechselwirken. Diese Selbstwechselwirkung resultiert in der kurzen Reichweite dieser Kraft [Mus88]. Die starke Wechselwirkung wird im folgenden Abschnitt näher besprochen.

Wechselwirkung	relative Stärke	Reichweite [m]	Ladung	Mittlerteilchen
starke Kraft	1	$10^{-15}$	Farbladung	8 Gluonen
Elektromagnetismus	$10^{-2}$	$\infty$	elektrische Ladung	Photon
schwache Kraft	$10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-18}$	schwache Ladung	$W^\pm, Z^0$

Tabelle 1.2: Eigenschaften und Austauscheteilchen der drei fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells [PDG10]

## 1.2 Quantenchromodynamik

Die elektromagnetische Wechselwirkung wird seit 1940 erfolgreich durch die *Quantenelektrodynamik* (QED) beschrieben. Analog dazu wurde für die starke Wechselwirkung die *Quantenchromodynamik* (QCD) entwickelt. Als Mittlerteilchen der starken Kraft dienen die masselosen Gluonen, die an die Farbladung der Quarks koppeln. Die Gluonen tragen jedoch selbst gleichzeitig Farbe und Antifarbe, wobei aus gruppentheoretischen Überlegungen acht mögliche Kombinationen folgen. Aus diesem Grund unterliegen die Gluonen, im Gegensatz zum elektrisch neutralen Photon in der elektromagnetischen Wechselwirkung, selbst der starken Kraft. Diese Selbstwechselwirkung ist ein großer Unterschied der starken Wechselwirkung zu den anderen und führt zu einigen Besonderheiten im Verhalten dieser Kraft. Bei der Betrachtung der Charmonium-Zustände ( $c\bar{c}$ -Zustände) weisen die relativen Abstände der Energieniveaus eine Ähnlichkeit zum Positronium-Spektrum auf. Aus diesem Grund sollte sich das Potential der starken Wechselwirkung bei kleinen Abständen der Quarks Coulomb-artig verhalten und mit  $1/r$  abfallen. Die höheren Zustände des Charmonium-Spektrums weichen allerdings von denen

des Positroniums ab, es liegt also kein reines Coulomb-Potential zu Grunde. Da zudem keine Quarks als freie Teilchen beobachtet werden, wird das Wechselwirkungspotential durch einen linearen Term erweitert [Pov09]:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(r) \hbar c}{r} + kr \quad (1.1)$$

Die Größe  $\alpha_s(r)$  bezeichnet die *Kopplungskonstante* der starken Kraft, die vom Abstand der Quarks zueinander abhängig ist.

Zur Bestimmung der Kopplungskonstante in der QED betrachtet man eine Testladung im Vakuum. Aufgrund der Energie-Zeit-Unschärfe strahlt die Testladung virtuelle Photonen ab, die wiederum Elektron-Positron-Paare bilden. Die dadurch entstehende Ladungswolke wird polarisiert, und schirmt die eigentliche Testladung teilweise ab. Als Konsequenz nimmt die beobachtbare effektive Ladung mit steigendem Abstand zur Testladung ab. Die Kopplungskonstante nimmt im Grenzfall großer Abstände bzw. kleiner Energien den Wert  $\alpha = 1/137$  an.

Analog kann man auch die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung bestimmen. Aufgrund der Selbstwechselwirkung der Gluonen besteht die Ladungswolke jedoch nicht nur aus Gluonen und Quark-Antiquark-Paaren, sondern auch aus Gluonpaaren. Während die Quark-Antiquark-Paare analog zu den Elektron-Positron-Paaren die effektive Ladung für größere Abstände abschwächen, "verwischen" die Gluonen die Farbladung, so dass diese bei kleiner werdenden Abständen abnimmt. Die Kopplungskonstante muss also für kleine Abstände ( $\ll 1$  fm) ebenfalls kleine Werte annehmen. Dies führt zur *asymptotischen Freiheit* der Quarks, die in diesem Bereich als quasi-freie Teilchen betrachtet werden können [Bet08, Pov09]. Bei diesen Abständen lassen sich in der QCD störungstheoretische Methoden anwenden (Bereich der perturbativen QCD). Die Konstituentenquarks in Hadronen haben jedoch grössere Abstände, bei denen die Störungstheorie nicht mehr anwenden ist (Bereich der nicht-perturbativen QCD), da die Kopplung zwischen den Teilchen mit dem Abstand zu nimmt. Dabei wird bei zunehmendem Abstand der Quarks die Feldenergie so groß, dass aus dieser ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht, welches sich mit den ursprünglichen Quarks zu neuen Teilchen verbindet. Dieses Verhalten wird als *Confinement* bezeichnet. Eine Konsequenz des Confinement ist die Nicht-Existenz einzelner freier Quarks.

Die Quarks können nur in gebundenen Zuständen, den Hadronen, beobachtet werden, die nach aussen hin farbneutral sind. Zu den etablierten Hadronen gehören die Mesonen, Quark-Antiquark-Paare, und die Baryonen, die aus drei Quarks bestehen. Weiterhin werden von der QCD auch noch sogenannte exotische Zustände vorhergesagt. Dazu gehören Multiquarkzustände, die aus vier oder fünf Quarks bestehen und Molekülverbindungen eingehen, und Hybride, die zusätzlich zu ihren Quarks auch ein konstituierendes Gluon besitzen. Außerdem werden reine Gluonen-Verbindungen, die Gluonenbälle, vorhergesagt. Für einige dieser exotischen Zustände wurden Kandidaten beobachtet, allerdings konnten diese noch nicht eindeutig zugeordnet werden.

### 1.3 Spektrum der Charmonium-Resonanzen

Charmonium-Resonanzen sind Mesonen, die aus einem gebundenen Charm-Anticharmquark-Paar bestehen. Aufgrund der großen Masse lassen sich diese Mesonen nicht-relativistisch behandeln. Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, zeigt das Charmonium-Spektrum Ähnlichkeiten zu dem des Positroniums.

Die vorhergesagten und beobachteten Zustände [PDG10] des Charmonium-Spektrums sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Das  $\eta_c(1S)$  bildet den Grundzustand mit  $L = 0$  und  $S = 0$ . Zustände mit  $L = 0$  und  $S = 1$  werden  $\psi$  genannt, wobei der niedrigste dieser Zustände das  $J/\psi(1S)$  ist. Die Zustände des  $1P$ -Triplets ( $L = 1$  und  $S = 1$ ) werden als  $\chi_{cJ}$  bezeichnet [Pov09]. Unterhalb der  $D\bar{D}$ -Schwelle wurden bereits alle vorhergesagten Charmonium-Zustände nachgewiesen.

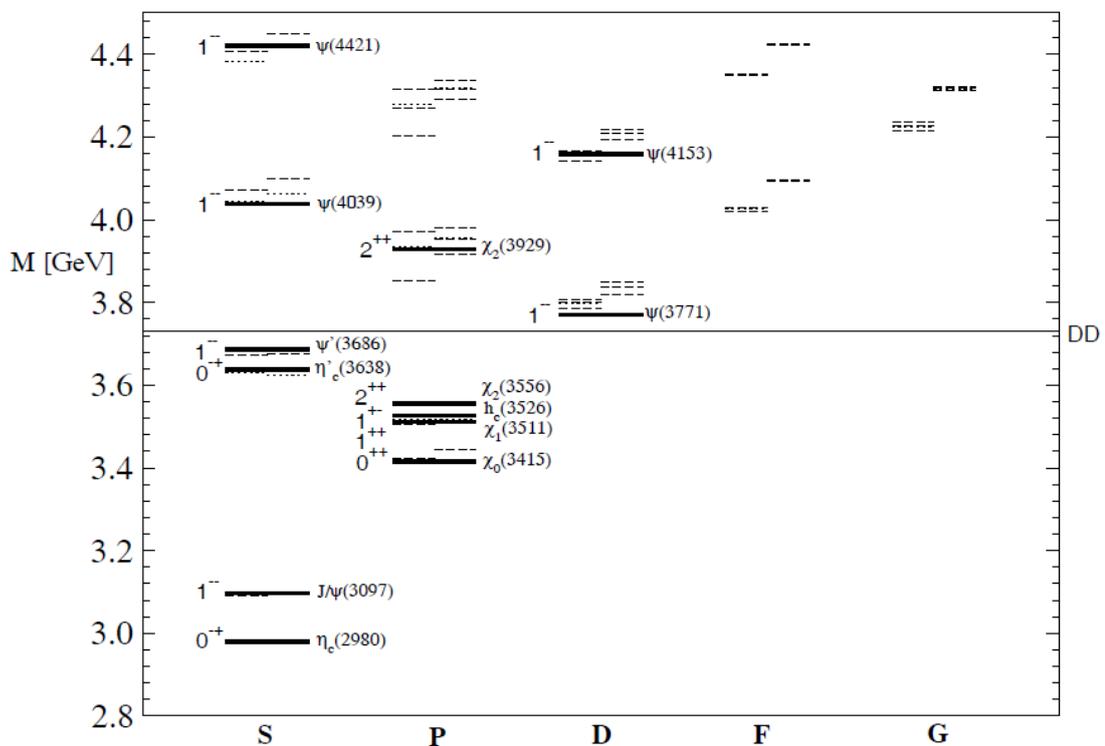


Abbildung 1.1: Vorhergesagte und beobachtete Charmonium-Zustände.

Die durchgezogenen Linien representieren die experimentell gefundenen Zustände, während die unterbrochenen Linien theoretische Vorhersagen sind (Nicht-relativistisches Modell links, Godfrey-Isgur Modell rechts). Spin-Triplets sind in den theoretischen Vorhersagen gestrichelt, Spin-Singlets sind mit gepunkteten Linien dargestellt. Die  $D\bar{D}$ -Schwelle bei 3,73 GeV ist ebenfalls eingezeichnet. [Asn09]

Zur Vorhersage der noch nicht gefundenen Charmonium-Zustände gibt es verschiedene theoretische Modelle. In obiger Abbildung 1.1 sind zwei dieser Modelle dargestellt. Zum

einen ein völlig nicht-relativistisches Potentialmodell, und zum Anderen das relativistische *Godfrey-Isgur Modell* [Asn09].

Oberhalb der  $D\bar{D}$ -Schwelle wurden in den letzten Jahren einige weitere Zustände beobachtet, die im Massenbereich vorhergesagter Charmonia liegen. Jedoch steht eine eindeutige Zuordnung als Charmonium für diese Zustände noch aus, da in diesem Massenbereich auch exotische Charmonium-Hybride,  $c\bar{c}$ -Zustände mit einem zusätzlichen Gluon, vorhergesagt werden.

## 1.4 Exotische Materie

Neben den konventionellen Hadronen, den Mesonen ( $q\bar{q}$ ) und den Baryonen ( $qqq$ ) werden in der QCD noch weitere als *exotisch* bezeichnete Zustände vorhergesagt. Diese exotischen Zustände können in drei Kategorien unterteilt werden.

*Hybride* sind gebundene Quark-Antiquark-Paare mit einem zusätzlichen gluonischen Freiheitsgrad. Aufgrund dessen können Hybride und Gluebälle exotische Spinquantenzahlen ( $J^{PC} = 0^{--}, 0^{+-}, 1^{-+}, 2^{+-}, \dots$ ) besitzen, die für konventionelle Mesonen verboten sind. Der gluonische Freiheitsgrad kann durch eine Feldröhre (engl. *flux tube*) erklärt werden, dessen Schwingungen sich in transversalen farb-magnetischen und transversalen farb-elektrischen Anregungen äußern. Die Quantenzahlen dieser exotischen Zustände können durch einfaches addieren der Quantenzahlen der gluonischen Anregung und des  $q\bar{q}$ -Paares bestimmt werden. Für S-Wellen Mesonen resultiert dies in acht Hybrid-Zustände, von denen drei exotische Quantenzahlen haben [Kop11].

*Gluebälle* dagegen bestehen nur aus Gluonen, ohne ein Valenzquark als Inhalt. Gitter-QCD Rechnungen sagen 15 Gluebälle unterhalb einer Masse von  $5 \text{ GeV}/c^2$  voraus. Es wird erwartet, dass einige davon exotische Quantenzahlen besitzen. Diese Zustände können kaum mit konventionellen Mesonen mischen und sollten schmal sein.

Da Gluebälle keine Valenzquarks besitzen, unterliegen sie nicht der OZI-Regel und können farb-blind in jeden offenen Kanal zerfallen [Kop11, Wie09].

Die letzte Kategorie sind die Multiquark-Zustände, die wiederum in Moleküle, gering gebundene Mesonen, Tetraquarks, fest gebundene ( $qq$ )( $\bar{q}\bar{q}$ )-Zustände, und Pentaquarks ( $qqqq\bar{q}$ ) unterteilt wird.



## Teil II

### Analyse des Zerfalls

$\chi_{cJ} \rightarrow K^+ K_S^0 \pi^- \pi^0$  bei BES-III



## 2 Einleitung

In diesem Teil der Arbeit wird die Analyse des Zerfalls  $\chi_{cJ} \rightarrow K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0$  anhand der Daten des BES-III Experiments vorgestellt, das sich an einem Elektron-Positron-Collider befindet (Details siehe Kapitel 3). Im Folgenden werden die Prozesse diskutiert, die bei der Wechselwirkung von Elektron und Positron zur Entstehung von Hadronen und Leptonen führen. Der einfachste Prozess ist die direkte Elektron-Positron-Annihilation in ein virtuelles Photon oder, bei ausreichend hoher Strahlenergie, ein virtuelles  $Z^0$ , das anschließend hadronisiert (Abb. 2.1a). Ein weiterer Prozess ist die *Initial State Radiation* (ISR), bei der eines der einlaufenden Leptonen ein Bremsstrahlungsphoton abstrahlt (Abb. 2.1b). Aufgrund dieser Abstrahlung steht für die folgende Elektron-Positron-Annihilation eine geringere Schwerpunktsenergie zur Verfügung. Die Energie des abgestrahlten Photons ist bei jedem ISR-Prozess unterschiedlich, so dass Teilchen in einem großen Massenbereich direkt resonant erzeugt werden können. In beiden Fällen können jedoch nur Teilchen mit den Quantenzahlen  $J^{PC} = 1^{--}$  in *Formation* (d.h. durch die Hadronisierung des virtuellen Photons/ $Z^0$ ) erzeugt werden,

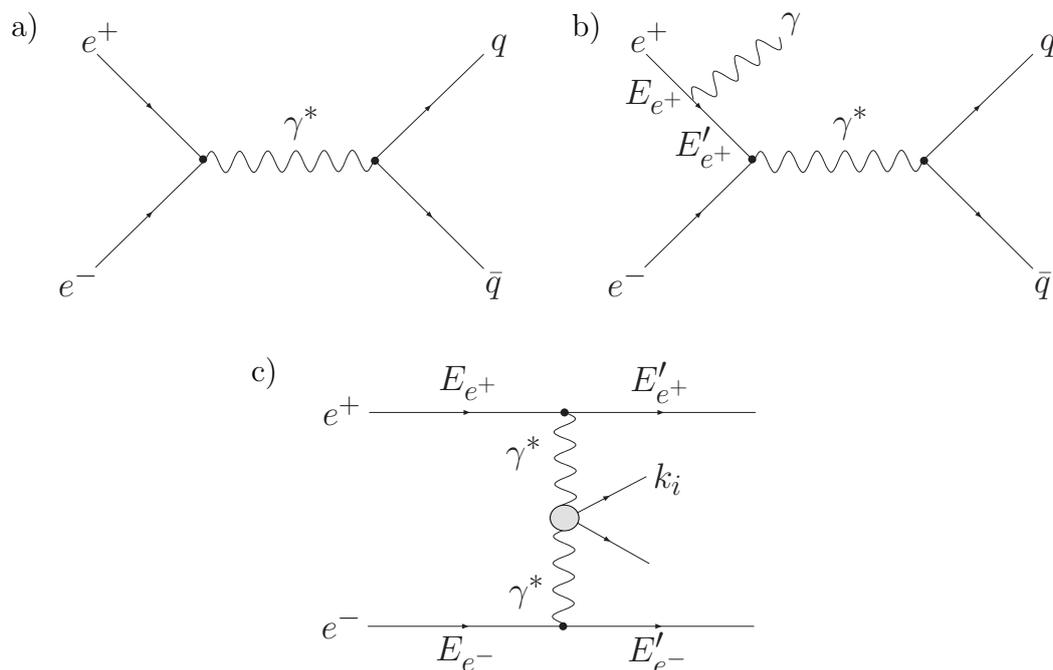


Abbildung 2.1:  $e^+e^-$ -Wechselwirkungen: a) Elektron-Positron-Annihilation; b) Initial State Radiation (ISR); c) 2-Photon-Kollision. [Sch08]

andere Resonanzen werden in *Produktion* (d.h. durch weitere Zerfälle) erzeugt. Neben der Annihilation der beiden einlaufenden Leptonen, können diese in Folge eines Streuprozesses Bremsstrahlung emittieren. Die beiden ausgestrahlten Bremsstrahlungspotonen können miteinander wechselwirken und zu einem  $q\bar{q}$ - oder  $l^+l^-$ -Paar hadronisieren (Abb. 2.1c).

Für die hier vorgestellte Analyse ist nur der direkte Annihilationsprozess von Interesse, da bei den hier verwendeten Daten der Beschleuniger bei einer Schwerpunktsenergie, die der Masse des  $\psi'$ -Charmonium-Zustands entspricht, betrieben wurde. Das bei diesem Prozess ( $e^+e^- \rightarrow \gamma^*$ ) entstehende Photon ist hochgradig virtuell, da für die Masse  $m_\gamma^2 = q_\gamma^2 = (E_{e^+} + E_{e^-})^2 - (p_{e^+} + p_{e^-})^2 = m(\psi')$  gilt. Das  $\psi'$  wird entsprechend in Formation erzeugt. Bei der Analyse wird nach Zwischenresonanzen in den invarianten Massen verschiedener Kombinationen der Zerfallsprodukte des  $\chi_{cJ}$  gesucht, welches in einem radiativen Zerfall des  $\psi'$  entsteht. Der Zerfallsbaum der hier untersuchten Zerfallsmode ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Da das  $K_s^0$  zu 69,2% in  $\pi^+\pi^-$  zerfällt [PDG10], werden

$$\begin{array}{ccc} \psi' & \rightarrow & \gamma\chi_{cJ} \\ & \searrow & \\ & & K^+K_s^0\pi^-\pi^0 \\ & & \swarrow \quad \searrow \\ & & \gamma\gamma \\ & \searrow & \\ & & \pi^+\pi^- \end{array}$$

Abbildung 2.2: Darstellung der untersuchten Zerfallsmode

nur diese Zerfälle des  $K_s^0$  betrachtet. Sofern es nicht anders angegeben wird, sind die ladungskonjugierten Zustände stets mit einzubeziehen.

## 3 Das BES-III-Experiment

### 3.1 Zielsetzung

Das Physikprogramm des BES-III-Experiments deckt Charmoniumphysik,  $D$ -Physik, Spektroskopie leichter Hadronen und  $\tau$ -Physik in einem Energiebereich bis 4 GeV ab. Die totalen Zerfallsbreiten des  $J/\psi$  und des  $\psi'$  sollen mit einer Genauigkeit besser als 1% bestimmt werden. Das  $J/\psi$  hat viele verschiedene Zerfallsmoden. In einem Zwei-Körper-Zerfall kann jedes der Zerfallsteilchen ein Pseudoskalar, Skalar, Vektor, Axialvektor oder Tensormeson sein. Mit BES-III sollen diese Moden sehr viel genauer untersucht werden. Außerdem sollen Fragestellungen bezogen auf den Zerfall von Charmoniumzuständen gelöst werden. Hierzu zählen Zerfälle des  $\psi(3770)$ , die nicht über  $D\bar{D}$  verlaufen, Verletzungen der 12%-Regel und das  $\rho - \pi$  Puzzle [Asn09].

Der Quotient der Verzweungsverhältnisse für Zerfälle des  $J/\psi$  und des  $\psi'$  in leichte Hadronen mit dem Endzustand  $h$  ist durch die 12%-Regel gegeben:

$$Q_h \equiv \frac{\mathcal{B}(\psi' \rightarrow h)}{\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow h)} = Q_{ee} \approx 12\% \quad (3.1)$$

Das  $\rho - \pi$  Puzzle beschreibt eine Verletzung dieser Regel für den Endzustand  $\rho\pi$ , bei dem obiger Quotient zu  $Q_{\rho\pi} < 0,23\%$  gemessen wurde [Che98].

Bei BES-III ergibt sich zudem die Möglichkeit den vor kurzem entdeckten unkonventionellen Charmoniumzustand  $Y(4260)$  näher zu untersuchen, da bei höheren Energien gemessen werden kann.

Weiterhin bietet das BES-III-Experiment aufgrund der großen Datenmengen die Gelegenheit Cabibbo-unterdrückte Zerfälle des  $J/\psi$  zu beobachten. Bei diesen Zerfällen zerfällt das Charmquark über die schwache Wechselwirkung, während das Anticharmquark mit einem anderen Quark zu einem  $D$ -Meson kombiniert. Sollten die Verzweungsverhältnisse für solche Zerfälle größer sein, als vom Standardmodell vorhergesagt, wäre dies eine Möglichkeit neue Physik jenseits des Standardmodells zu entdecken [Asn09].

Da die Konstituentenquarks des  $J\psi$  fast immer in Gluonen annihilieren, machen die großen  $J\psi$ -Datenmengen BES-III zu einer *Gluon-Fabrik*. Dies ist sehr nützlich bei der Suche nach Gluebällen und der Bestimmung gluonischer Inhalte leichter Quarks. Es gibt bereits einige Kandidaten für exotische Zustände, doch bis heute fehlt eine eindeutige Zuordnung dieser Teilchen. Mit den BES-III-Daten kann die Suche nach exotischer Materie durchgeführt und die Quantenzahlen der Kandidaten bestimmt werden. Zudem wurde mit dem Vorgänger BES-II eine ungewöhnliche Erhöhung nahe der Schwelle im  $p\bar{p}$ -Massenspektrum aus dem radiativen Zerfall  $J\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$  gesehen. In anderen baryonischen Systemen wurden ähnliche Erhöhungen beobachtet. Bisher gibt es jedoch keine

zufriedenstellende Erklärung für diese Erhöhung. Mit BES-III werden diese detaillierter untersucht und auf diese Weise soll eine Erklärung gefunden werden [Asn09].

Am BEPC-II-Beschleuniger werden  $D^+$  und  $D^0$  Mesonen in Zerfällen des  $\psi(3770)$  produziert und  $D_s$  Mesonen in der  $e^+e^-$ -Annihilation bei einer Schwerpunktsenergie von etwa 4,03 GeV. In reinen leptonenischen Zerfällen werden die Zerfallskonstanten  $f_D$  und  $f_{D_s}$  gemessen. Die erwarteten systematischen Fehler liegen dabei bei 1,2% bzw 2,1%. Einige theoretische Vorhersagen werden durch inklusive und exklusive semileptonische Zerfälle des  $D$ -Mesons getestet. Zudem können über die Zerfälle  $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$  und  $D^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$  die CKM-Matrixelemente  $V_{cs}$  und  $V_{cd}$  mit einem erwarteten systematischen Fehler von 1,6% bestimmt werden. Es wird außerdem mit BES-III möglich sein  $D - \bar{D}$ -Mischung zu messen und nach  $CP$ -Verletzung zu suchen. Es wird erwartet, dass die Verzweigungsverhältnisse seltener und verbotener Zerfälle signifikant verbessert werden.

Der letzte Punkt des Physikprogramms umfasst die  $\tau$ -Physik. Experimentelle Untersuchungen der inklusiven hadronischen Zerfälle erlauben eine genaue Bestimmung der Masse des Strangequarks und des CKM-Matrixelements  $V_{us}$ . Die Untersuchung leptonenischer Zerfälle dagegen ermöglicht den Test der Allgemeinheit der elektroschwachen Wechselwirkung. Die Messgenauigkeit des Michel-Parameters soll um den Faktor 2 bis 4 verbessert werden und die der  $\tau$ -Masse um einen Faktor 3 [Asn09].

## 3.2 Die Beschleunigeranlage BEPC-II

Der ursprüngliche Beijing Elektron-Positron-Collider (BEPC) wurde designed, um in der  $\tau$ -charm Energieregion zu arbeiten. Der Beschleuniger und die beiden Detektoren, das Beijing Spektrometer (BES) und der Nachfolger BESII, wurden von 1989 bis 2004 betrieben [Ab110a]. BEPC erreichte eine Luminosität von  $\mathcal{L} = 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , womit einige wichtige Erfolge im Bereich der  $\tau$ -charm-Physik erzielt werden konnten.

2003 wurde der Umbau des Beschleunigers beschlossen. Da der BEPCII Beschleuniger im bereits existierenden Tunnel aufgebaut wurde, wurde der Umfang des Rings nur um wenige Meter vergrößert. Der grösste Unterschied zwischen den beiden Beschleunigern stellt die Strahlführung dar. Während bei BEPC sowohl der Elektron- als auch der Positronstrahl in einem gemeinsamen Speicherring geführt wurde, besitzt BEPCII zwei Speicherringe, in denen Elektron- und Positronstrahl getrennt voneinander laufen. Der neue Beschleuniger wurde designed um Elektronen und Positronen in einem Energiebereich von  $\sqrt{s} = (2-4,6) \text{ GeV}$  zu kollidieren. Die Designluminosität beträgt  $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  und ist für eine Energie von  $2 \times 1,89 \text{ GeV}$  optimiert.

Die Elektronen und Positronen werden in einem Linear Beschleuniger (LINAC) auf 1,89 GeV beschleunigt, bevor sie in den Speicherring injeziert werden. Im Zuge der Umbaumaßnahmen wurde der LINAC mit neuen Klystrons, einer neuen Elektronkanone und einer neuen Positronquelle ausgestattet. Um die durchschnittliche Luminosität zu erhöhen, wurde das *top-off* Injektionssystem verwendet. Dadurch kann der Speicherring gefüllt werden, ohne die verbleibenden Strahlpakete zu verlieren. Die Elektroninjektionsrate beträgt 200 mA pro Minute, die der Positronen 50 mA pro Minute. Alle wichtigen

Komponenten des Speicherrings wurden ebenfalls modernisiert. BEPCII wurde beispielsweise mit neuer Strahloptik, supraleitenden RF-Resonatoren und einem supraleitenden “micro- $\beta$  final focusing” System ausgestattet. Bei der micro- $\beta$  Technik wird die vertikale Ausdehnung des Strahl durch supraleitende Quadrupolmagnete, die sehr nahe am Interaktionspunkt platziert werden, komprimiert.

Der Speicherring wird in einem Mutli-Bunch Modus betrieben, dass heißt mehrere Strahlpakete werden gleichzeitig im Ring geführt. Bei BEPCII werden je 93 Pakete in den beiden Ringen mit einem Abstand von 8 ns bzw. 2,4 m gespeichert. Die Elektronen und Positronen werden am Interaktionspunkt mit einem horizontalen Kreuzungswinkel von  $\pm 11$  mrad kollidieren. Im Collider-Modus soll der Strom der beiden Strahlen 0.91 A erreichen [Abl10a]. In Tabelle 3.1 sind einige wichtige Parameter des Beschleunigers zusammengefasst.

Schwerpunktsenergie	2 – 4,6 GeV
Strahlstrom	$2 \times 0,91$ A
Relative Energieunschärfe	$5 \times 10^{-4}$
Design Luminosität	$1 \cdot 10^{33}$ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> bei 1,89 GeV
Kreuzungswinkel	$\pm 11$ mrad

Tabelle 3.1: Parameter des BEPC-II Speicherrings [Abl10a]

Der neue BEPCII Beschleuniger dient auch als Synchrotron-Strahlungsquelle. In diesem Modus werden nur Elektronen im Ring beschleunigt. Der Strahlstrom beträgt in diesem Modus 250 mA bei einer Energie von 2,5 GeV [Abl10a].

### 3.3 Der BES-III-Detektor

Um die physikalischen Ziele des BES-III Experiments erreichen zu können, muss der Detektor über eine gute Ortsauflösung und präzise Energie- und Impulsrekonstruktion zur Identifizierung geladener Teilchen verfügen. Zudem müssen Photonen und neutrale Hadronen nachgewiesen werden können. Aus diesem Grund besteht der Detektor aus mehreren für diese Zwecke optimierten Subsysteme, die in aufeinanderfolgende Schichten zylindersymmetrisch um den Wechselwirkungspunkt angeordnet sind (Abb. 3.1). Von innen nach außen sind dies die folgenden Komponenten:

- Eine mit Heliumgas gefüllte Driftkammer (MDC) mit einer Einzeldraht-Auflösung besser als  $120 \mu\text{m}$  und einer  $dE/dX$ -Auflösung besser als 6%. Die Impulsauflösung ist im 1 T-starken Magnetfeld besser als 0,5% für geladene Spuren mit einem Impuls von  $1 \text{ GeV}/c$
- Ein Flugzeit-System (TOF) mit einer intrinsischen Zeitauflösung von 90 ps
- Ein elektromagnetisches Kalorimeter (EMC) bestehend aus Thallium dotierten Cäsiumiodid-Kristallen (CsI(Tl)) mit einer Energieauflösung von 2,5% und einer Ortsauflösung von 6 mm für 1 GeV Elektronen und Photonen

- Ein Supraleitender Solenoidmagnet mit einem zentralen Feld von 1 T
- Einer 9-lagigen RPC-basierten Myonkammer mit einer Ortsauflösung von 2 cm

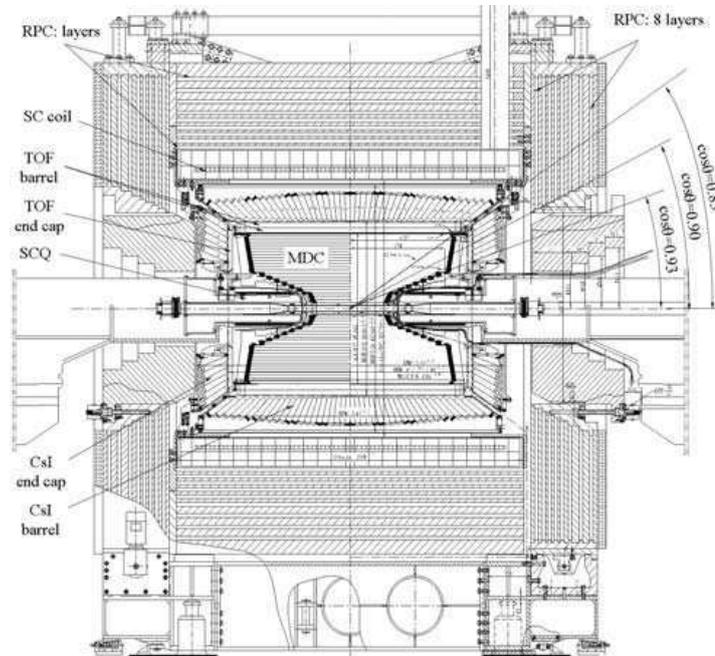


Abbildung 3.1: Schematische Ansicht des BES-III Detektors [Abl10a]

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Subsysteme und deren Aufgaben erläutert. Detaillierte Informationen zum Detektor finden sich in [Abl10a, Asn09].

### 3.3.1 Die Driftkammer

Die Driftkammer (MDC, *Multilayer drift chamber*) ist das innerste und gleichzeitig wichtigste Subsystem des BES-III Detektors. Zu den Hauptaufgaben der Driftkammer gehören die Spurrekonstruktion, die Bestimmung des Impulses und die Messung des Energieverlustes  $dE/dX$  geladener Teilchen. Außerdem dient dieser Subdetektor zur Rekonstruktion langlebiger Hadronen, wie das  $K_s^0$  und  $\Lambda$ , die innerhalb des MDC-Volumens zerfallen.

Die MDC besteht aus einer inneren und einer äußeren Kammer, die sich ein gemeinsames Gasvolumen teilen. Die innere Kammer kann im Falle von Strahlenschäden ausgetauscht werden. Der Innenradius des Detektors beträgt 59 mm und ist damit nur zwei mm vom Strahlrohr entfernt, der Außenradius beträgt 810 mm. Die MDC hat eine Längsausdehnung von 2582 mm und deckt einen Polarwinkelbereich von  $|\cos \theta| \leq 0,93$  ab (Abb. 3.2).

Insgesamt gibt es 43 zylindrische Lagen von Driftzellen, die koaxial mit dem Strahlrohr angeordnet sind. Acht dieser Lagen befinden sich in der inneren Kammer, die restlichen

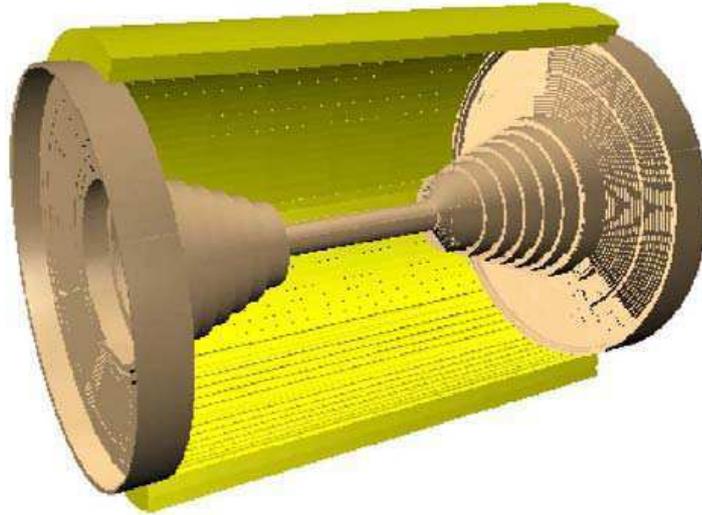


Abbildung 3.2: Driftkammer des BES-III Detektors [Asn09]

35 in der Äusseren. Sie werden in 11 Superlagen von je 4 Lagen zusammengefasst. Nur die äußerste elfte Superlage besteht nur aus 3 Lagen. Eine Driftzelle besteht aus einem Signaldraht, der von acht Potentialdrähten umgeben ist. Die Signaldrähte bestehen aus einer  $25 \mu\text{m}$  dicken vergoldeten Wolfram-Rhenium-Legierung, während die Dicke der Potentialdrähte aus vergoldetem, teilweise gehärtetem Aluminium  $110 \mu\text{m}$  beträgt. Die Kammerwände der Driftkammer sind aus Kohlefaser gefertigt, um die Leistung der nachfolgenden Detektoren nicht zu beeinträchtigen.

Ein geladenes Teilchen, das sich durch das 1 T starke Magnetfeld des Solenoiden bewegt, folgt auf Grund der Lorentzkraft einer helixförmigen Bahn. Durch die Bestimmung des Krümmungsradius der Trajektorie und der Drehrichtung kann die Ladung und der Impuls des Teilchens bestimmt werden. Die Einzeldraht-Auflösung in der  $R - \phi$ -Ebene ist dabei besser als  $120 \mu\text{m}$ , in  $z$ -Richtung beträgt die Auflösung 2 mm. Die Impulsauflösung ist mit

$$\frac{\sigma_{p_t}}{p_t} = 0,32\% p_t \oplus \frac{0,37}{\beta} \quad (3.2)$$

gegeben, wobei der erste Term von der Messgenauigkeit der Trajektorie bestimmt wird, und der zweite Term von der Mehrfachstreuung der Teilchen im Detektorvolumen.

Bei einer Schwerpunktsenergie zwischen 2 und 4,6 GeV ist der Impuls der meisten sekundären geladenen Teilchen unter  $1 \text{ GeV}/c$ . Daher spielt mehrfache Coulombstreuung bei der Bestimmung des Impulses in der MDC eine große Rolle und die Materialbelegung muss minimiert werden. Aus diesem Grund wird das Gasgemisch  $\text{He}/\text{C}_3\text{H}_8$  mit einem Verhältnis von 60:40 verwendet. Die spezifische primäre Ionisation des Gases erlaubt zusätzlich zur Spurrekonstruktion eine präzise Messung des Energieverlustes  $dE/dx$  der durchfliegenden Teilchen. Der Energieverlust der Teilchen hängt über  $\beta = v/c$  von der Geschwindigkeit der Teilchen ab. Zusammen mit dem Impuls kann man aus der  $dE/dx$ -Messung die Teilchenidentität ermitteln. Die Auflösung der  $dE/dx$ -Messung wird durch

das gestutze Mittel einer Landauverteilung bestimmt und ist  $\leq 6\%$ .

### 3.3.2 Das Flugzeitsystem

Um die Driftkammer herum ist das Flugzeitmesssystem (TOF, *Time-of-flight detector system*) montiert. Dieser Detektor misst die Flugzeit geladener Teilchen, um diese zu identifizieren. Außerdem dient das TOF als schneller Trigger und zur Unterdrückung von Signalen, die von kosmischer Strahlung ausgelöst werden. Das TOF besteht aus zwei Teilen: Ein zylindrisches Faß und zwei Endkappen (Abb.3.3). Das Faß des TOF-Detektors deckt einen Winkelbereich von  $|\cos \theta| < 0,83$  ab, während die beiden Endkappen jeweils einen Winkelbereich von  $0,85 < |\cos \theta| < 0,95$  abdecken.

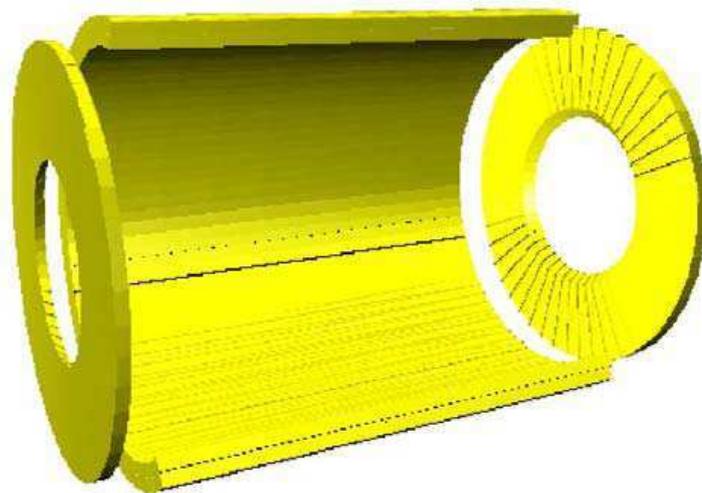


Abbildung 3.3: Flugzeitsystem des BES-III Detektors [Asn09]

Der mittlere Radius des Faßes beträgt etwa 870 mm. Es besteht aus zwei Lagen mit jeweils 88 Plastikszintillatorbalken, die an beiden Enden mit Photomultipliern ausgelesen werden. Die beiden Endkappen sind dagegen nur einlagig und bestehen aus 48 fächerförmigen Plastikszintillatorelementen, die an der Außenseite mit einem Photomultiplier ausgelesen werden. Der Innenradius der Endkappen beträgt 410 mm, der Außenradius 890 mm.

Die intrinsische Zeitauflösung des Fasses liegt bei etwa 90 ps, während die Endkappen eine Zeitauflösung von 70 ps erreichen. Es spielen bei der Auflösung des Detektors allerdings noch andere Faktoren eine Rolle. Eine weitere Unsicherheit beispielsweise stellt die 15 mm Bunchlänge des Beschleunigers dar, so dass man insgesamt eine Auflösung von ca 100 ps mit dem TOF erreicht.

### 3.3.3 Das elektromagnetische Kalorimeter

Das elektromagnetische Kalorimeter (EMC, *Electro-magnetic Calorimeter*) stellt das dritte Subsystem des BES-III-Detektors dar. Mit dem EMC werden die Energie und Flugrichtung von Photonen, Elektronen und Positronen bestimmt. Das EMC trägt auch zur Teilchenidentifizierung bei, indem es Elektronen und Pionen unterscheidet. In radiativen Zerfallsprozessen (z.B.  $J/\psi \rightarrow \gamma\pi\pi$ ) müssen direkte Photonen von denen getrennt werden können, die in Zerfällen von  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\rho$ , usw. entstehen. Als aktives Detekormaterial dienen insgesamt 6272 Thallium dotierte Cäsium-Iodid Kristalle (CsI(Tl)). Genau wie das TOF, ist das EMC in ein offenes Faß und zwei Endkappen aufgeteilt (Abb. 3.4).

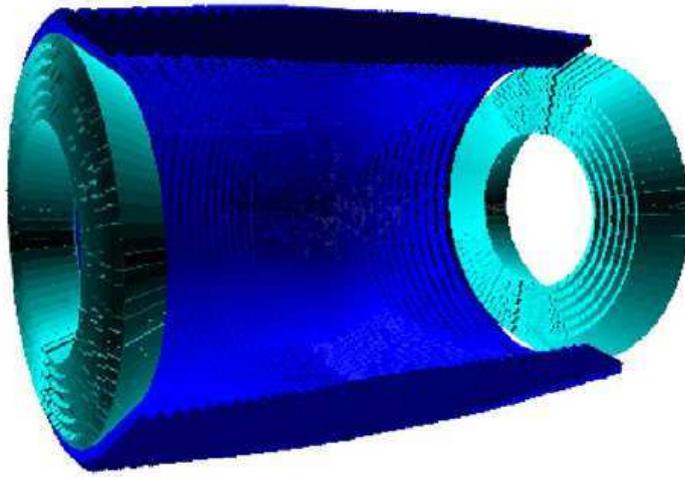


Abbildung 3.4: Elektromagnetisches Kalorimeter des BES-III Detektors [Asn09]

Das Faß hat einen Innenradius von 940 mm und eine Länge von 2,7 m. Es ist aus 44 Ringen mit jeweils 120 Kristallen zusammengesetzt, die mit Large area Photodioden ausgelesen werden. Abgesehen von den beiden zentralen Ringen sind die Frontflächen der Kristalle nicht exakt auf den Wechselwirkungspunkt ausgerichtet, sondern leicht versetzt. Dadurch wird verhindert, dass ein Teilchen vom Wechselwirkungspunkt undetektiert zwischen zwei Kristallen hindurch fliegt. Die Endkappen befinden sich jeweils etwa 1,4 m vom Wechselwirkungspunkt in Strahlrichtung entfernt und bestehen aus sechs Ringen, die in zwei Halbkreise aufgeteilt sind. Dies erlaubt es, die Endkappen zu öffnen, um Zugang zur Driftkammer zu ermöglichen. Das gesamte EMC deckt 93% des Raumwinkels ab und misst die Energien der Photonen, Elektronen und Positronen in einem Bereich von 20 MeV bis 2 GeV. Die Energieauflösung beträgt dabei  $\sigma_E = 2,3\%/\sqrt{E} [\text{GeV}] \oplus 1\%$ . Die Ortsauflösung des EMC beträgt  $\sigma_{xy} \leq 6 \text{ mm}/\sqrt{E} [\text{GeV}]$ .

### 3.3.4 Der Myondetektor

Die äußersten Komponenten des Detektors bestehen aus einer supraleitenden Magnetspule und einem instrumentierten Eisenjoch (*Muon identifier*). Die Spule besteht aus einer Niob-Titan-Legierung und wird in einem Kryostaten mit flüssigem Helium auf 4,5 K gekühlt. Im zentralen Bereich des Detektors erzeugt die Spule ein homogenes Magnetfeld mit einer Feldstärke von 1,0 T.

Neben der Rückführung des magnetischen Flusses dient das Eisenjoch auch dem Nachweis und der Identifizierung von Myonen. Die Myonen müssen deutlich von Hadronen (z.B. durchschlagende Pionen) unterschieden werden können. Dabei muss die Impulsschwelle so gering wie möglich sein. Das instrumentierte Eisenjoch besteht aus neun Stahlplatten, die entlang der Strahlachse in Form eines oktagonalen Fasses angeordnet sind. Das Fass wird an beiden Enden durch zwei ebenfalls oktagonale Endkappen aus neun Stahlplatten abgeschlossen (Abb. 3.5). Die Endkappen sind in Quadranten unterteilt, von denen jeweils zwei Quadranten zu einer verschiebbaren Tür zusammengefasst werden. Insgesamt deckt dieser Detektor 89% des Raumwinkels ab.

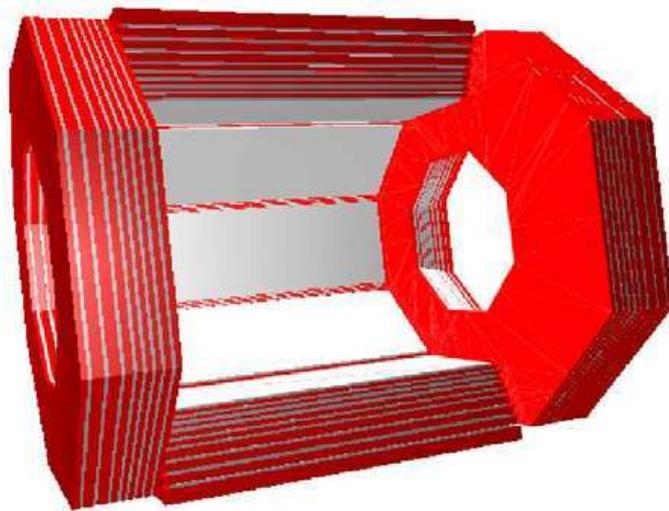


Abbildung 3.5: Myonkammer des BES-III Detektors [Asn09]

Von innen nach außen nimmt die Stärke der Stahlplatten von 3 cm auf 15 cm zu. In den 4 cm breiten Zwischenräumen zwischen den einzelnen Stahlplatten sind *Resistive Plate Chambers* (RPC) eingesetzt. Im Fass gibt es eine zusätzliche nullte RPC-Lage zwischen dem EMC und der ersten Stahlplatte. In den Endkappen wurde auf diese nullte Lage verzichtet, da es wünschenswert ist, die Stahlplatten so nahe wie möglich an die supraleitende Spule heranzubringen, um die Gleichförmigkeit des Magnetfeldes des Solenoiden zu verbessern. Die RPCs bestehen im Prinzip aus zwei Elektroden und einem gasgefüllten Zwischenraum. Infolge der Ionisation durch ein geladenes Teilchen entsteht ein Spannungssignal, das zur Zeit- und Ortsbestimmung des Teilchens genutzt wird. Auf Grund der Mehrfachstreuung niederenergetischer Myonen im EMC sind die Anforderungen an die Ortsauflösung der RPCs gering. Die typische Breite der Auslesestreifen in den

RPC-Modulen beträgt daher 4 cm.

Zusammen mit der rekonstruierten Spur aus der MDC und der Energiemessung des EMC lassen sich so Myonen mit einem geringen Impuls identifizieren.

### 3.3.5 Auslese und Daten

Um Ereignisse von Interesse zu selektieren und Untergrundereignisse vom Beschleuniger oder kosmischer Strahlung sofort zu verwerfen, durchlaufen die mit dem BES-III-Experiment aufgenommenen Daten ein zwei-stufiges Triggersystem. Die erste Triggerstufe (L1) nutzt die Informationen aus allen vier Subdetektoren. Die Signale der einzelnen Detektoren, die den L1-Trigger passieren, werden an eine online Computerfarm übertragen. Dort werden die Ereignisse aus den Signalen rekonstruiert und klassifiziert und von der zweiten Triggerstufe L3, ein Softwaretrigger, weiter gefiltert. Die akzeptierten Daten werden anschließend nach Schwerpunktsenergie und Datum strukturiert und dem Benutzer zugänglich gemacht.

## 3.4 BES-III Offline Software System

Das BES-III Offline Software System (BOSS) basiert auf dem GAUDI-Paket, welches Standardschnittstellen und Programme zur Eventsimulation, Datenverarbeitung und Physikanalysen bietet.

Die Event- bzw. Detektorsimulation besteht aus vier Teilen: Event-Generatoren, Detektorbeschreibung, Teilchenspuren und das Ansprechverhalten des Detektors. Die Teilchenspuren und ihre Interaktion mit dem Detektormaterial werden mit dem GEANT4-Paket bearbeitet. Das Ansprechverhalten des Detektors wird dabei vom sogenannten Digitalisierungs-Code simuliert, der alle Detektorkomponenten inklusive der Ausleseelektronik und realistischer Situationen wie Rauschen und defekte Kanäle berücksichtigt. Eine Simulation des Triggersystems ist ebenfalls implementiert.

Das Rekonstruktions-Paket besteht ebenfalls aus vier Teilen: Zum Einen enthält es einen Spurerkennungs-Algorithmus und einen Kalman-Filter basierten Spuranpassungs-Algorithmus, um den Impuls geladener Teilchen zu bestimmen. Zur Teilchenidentifikation dient ein Algorithmus, der auf dem gemessenen Energieverlust  $dE/dx$  und der Flugzeit (TOF) basiert. Der dritte Teil ist ein Algorithmus, der Shower und Cluster im EMC erkennt und zur Messung der Energie und Position dient. Der vierte und letzte Teil ist ein Algorithmus zur Erkennung von Myonen-Spuren.



## 4 Daten

### 4.1 Messdaten

Die hier durchgeführte Analyse basiert auf den Messdaten, die vom BES-III-Experiment im Zeitraum von März bis April 2009 und Januar bis März 2012 aufgezeichnet wurden. Die integrierte Luminosität dieser Messperioden beträgt  $606,4 \text{ pb}^{-1}$  bei einer Schwerpunktsenergie von  $3,686 \text{ GeV}$ . Dies entspricht etwa 406 Millionen rekonstruierten  $\psi'$  Zerfällen [Abl10b, Son12]. Damit stellt das BES-III Experiment den zur Zeit größten Datensatz zur Untersuchung der  $\psi'$  Zerfälle zur Verfügung (Tab. 4.1).

MARKIII	CBAL	BESI	BESII	CLEO-c	BESIII
1,0	1,8	4	14	28	406

Tabelle 4.1: Anzahl in Millionen der rekonstruierten  $\psi'$  Zerfälle verschiedener Experimente [Li12]

Zusätzlich wurde zur Bestimmung von Kontinuum-Untergrund ( $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ) ein unabhängiger Datensatz, der bei einer Schwerpunktsenergie von  $3,65 \text{ GeV}$  aufgenommen wurde, mit einer integrierten Luminosität von  $42,6 \text{ pb}^{-1}$  analysiert. Sowohl die realen als auch die simulierten Daten wurde mit dem Software-Release 6.6.2 des BES-III-Frameworks BOSS rekonstruiert und analysiert.

### 4.2 Monte Carlo-Simulationsdaten

**$\psi'$ -Monte Carlo-Daten:** Insgesamt wurden 106 Millionen  $\psi'$  Zerfälle simuliert. Mit diesem Monte Carlo-Datensatz können die Untergrundkanäle identifiziert werden, und deren Unterdrückung durch die Event-Selektion.

**$\chi_{cJ}$ -Signal Monte Carlo-Daten:** Zur Effizienzbestimmung wurden jeweils eine Million  $\chi_{cJ}$ -Zerfälle simuliert. Dabei wurde für den radiativen Zerfall des  $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{cJ}$  die korrekt Winkelverteilung zwischen Photon und  $\chi_{cJ}$  verwendet. Die Zerfälle des  $\chi_{cJ}$  und der sekundären Teilchen (z.B.  $K_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ ) wurden phasenraumverteilt simuliert.

Um eine Akzeptanzkorrektur der betrachteten Winkelverteilungen vornehmen zu können wurden zusätzlich vier Millionen  $\chi_{cJ}$ -Zerfälle generiert, bei denen alle Zerfälle phasenraumverteilt simuliert wurden.



## 5 Rekonstruktion des Zerfalls

$$\psi' \rightarrow \gamma \chi_{cJ} \rightarrow \gamma (K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0)$$

### 5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Rekonstruktion und anschließende Selektion des in Abbildung 2.2 dargestellten Zerfallsbaums des  $\psi'$  beschrieben. Dieser Teil der Analyse gliedert sich in mehrere Schritte. Zunächst werden die Daten anhand der Anzahl geladener Spuren vorselektiert und es werden  $\psi'$ -Kandidaten entsprechend dem Zerfallsbaum gebildet. Die Resonanzkandidaten werden anhand vorgegebener Massenfenster selektiert und eine kinematische Anpassung für den rekonstruierten Zerfallsbaum durchgeführt, um die Anzahl ungeeigneter Kombinationen zu reduzieren. Die relevanten Informationen zu den akzeptierten Kandidaten werden in N-Tupel geschrieben. Ein N-Tupel ist prinzipiell eine Tabelle, in der jede Zeile ein Ereignis mit allen zugehörigen Messgrößen und Variablen in den folgenden Spalten enthält. Im letzten Schritt der Rekonstruktion werden zusätzliche Selektionskriterien auf die im N-Tupel gespeicherten Daten angewandt und Massenfenster für die drei  $\chi_{cJ}$ -Kandidaten definiert, um saubere  $\chi_{cJ}$ -Spektren mit geringem kombinatorischem Untergrund zu erhalten, aus denen Resonanzen bestimmt werden können.

### 5.2 Selektionskriterien

#### 5.2.1 Teilchenidentifikation

Das  $K_s^0$  wird über den Zerfall  $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  rekonstruiert. Aus diesem Grund werden zunächst alle Ereignisse verworfen, die weniger als vier Spuren von geladenen Teilchen enthalten. Alle Teilchenkandidaten werden anschließend in entsprechende Listen (hier: Photonen, geladene Kaonen und geladene Pionen) eingeteilt.

Alle neutralen Teilchen werden als Photonen angenommen und anhand der im EMC gemessenen Energie selektiert. Dabei sind die Kriterien:

- $E_\gamma > 25$  MeV im Fass des EMC ( $|\cos \theta| < 0,8$ )
- $E_\gamma > 50$  MeV in den Endkappen des EMC ( $|\cos \theta| > 0,8$ )

Die Liste der Photonenkandidaten muss mindestens drei Einträge enthalten. Die maximale Anzahl der Photonkandidaten wird nicht beschränkt, um Signal-Ereignisse nicht auf Grund von elektromagnetischen oder hadronischen Splitoffs zu verwerfen, die fälschlicherweise

als Photonkandidaten rekonstruiert wurden.

Anschließend wird die Liste der geladenen Kaonkandidaten erstellt. Dabei beruht die Identifizierung der geladenen Kaonen auf den von den einzelnen Detektoren gemessenen Energieverlusten  $dE/dx$ , und den Informationen des MDC- und TOF-Detektors. Die rekonstruierten Spuren der Kaonkandidaten müssen folgende Kriterien erfüllen:

- Abstand zur z-Achse:  $\Delta_{xy} < 1$  cm
- Abstand zur xy-Ebene:  $\Delta_z < 10$  cm
- $|\cos\theta_K| < 0,93$

Der Ursprung des BES-Koordinatensystems ( $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ ) wird in den nominellen Wechselwirkungspunkt gelegt. Die z-Achse verläuft parallel zum Magnetfeld in Richtung des Elektronenstrahls. Die Größe  $\Delta_{xy}$  bezeichnet den Abstand, den die durch eine Helix parametrisierte Spur eines Teilchens bei der geringsten Annäherung an die z-Achse ( $(x, y) = (0, 0)$ ) zu dieser aufweist. Die kleinste Annäherung der Spur an die xy-Ebene mit  $z = 0$  wird entsprechend mit  $\Delta_z$  bezeichnet. Alle Kaonkandidaten, die die obigen Bedingungen erfüllen, werden anschließend einem Akzeptanztest unterzogen. Dabei werden zu jedem Kandidaten mehrere Hypothesen  $H$  zur Teilchensorte aufgestellt: Das Teilchen ist ein Kaon ( $H = K$ ), ein Pion ( $H = \pi$ ) oder ein Proton ( $H = p$ ). In BOSS stehen Methoden zur Verfügung, die die Wahrscheinlichkeit  $P$  jeder Hypothese zu einem Kandidaten, basierend auf den Messwerten der oben genannten Detektorkomponenten berechnen. Damit ein Kandidat als Kaon akzeptiert wird, muss für die Wahrscheinlichkeiten

$$P_K > 0,001 \quad \wedge \quad P_K > P_\pi \quad \wedge \quad P_K > P_p$$

gelten. Jedes Ereignis muss mindestens ein akzeptiertes Kaon beinhalten.

Die Pionliste wird mit allen geladenen Teilchenkandidaten gefüllt. Es werden keine weiteren Selektionskriterien für Pionkandidaten vorgenommen.

## 5.2.2 Kombinatorik

Zu jedem nachgewiesenen Teilchenkandidaten stehen die Viererimpulse zur Verfügung. Die invariante Masse einer zerfallenen Resonanz lässt sich durch Addition der Viererimpulse der Zerfallsprodukte berechnen.

Der erste Schritt der Rekonstruktion ist die Kombination verschiedener Teilchenkandidaten zu den jeweiligen zerfallenen Teilchen. Dabei werden zwei Photonen zu einem  $\pi^0$  und zwei geladene Pionen mit entgegengesetzter Ladung zu einem  $K_s^0$  kombiniert. Anschließend werden das geladene Kaon, ein entgegengesetzt geladenes Pion, das neutrale Pion, und das  $K_s^0$  zu einem  $\chi_{cJ}$  kombiniert, welches zusammen mit einem Photon ( $\gamma_{rad}$ ) zum  $\psi'$  zusammengesetzt wird. Dabei wird innerhalb von BOSS darauf geachtet, dass kein Teilchen doppelt in den Kombinationen verwendet wird. Aus der mit allen Kombinationsmöglichkeiten gefüllten Liste der  $\psi'$ -Kandidaten kann anschließend auf die Töchterteilchen zugegriffen werden, um folgende weitere Selektionskriterien auf diese anwenden zu können:

- $\gamma_{rad}$  Energie im Schwerpunktsystem des  $\psi'$ :  $50 \text{ MeV} < E_{CM}(\gamma_{rad}) < 500 \text{ MeV}$
- $K_s^0$  Masse:  $450 \text{ MeV}/c^2 < m(K_s^0) < 580 \text{ MeV}/c^2$
- $\pi^0$  Masse:  $90 \text{ MeV}/c^2 < m(\pi^0) < 160 \text{ MeV}/c^2$

### 5.2.3 Kinematische Anpassung

Die beiden geladenen Pionen, die zum  $K_s^0$  kombiniert wurden, werden zunächst einem Vertex-Fit unterzogen. Beim Vertex-Fit wird versucht die Spuren der Teilchen im Rahmen ihrer Unsicherheiten so zu verschieben, dass sie einen gemeinsamen Vertex (Ursprungsort) aufweisen. Da die Lebensdauer des  $K_s^0$  so lang ist, dass Flugstrecken von mehreren mm zurückgelegt werden können, wird hierbei von einem sekundären Vertex gesprochen. Das  $\pi^0$  und das  $K_s^0$  sind ladungsneutral, weshalb zu diesen Teilchen keine Spuren existieren. Für die Ermittlung des primären Vertex werden deshalb nur das geladene Kaon und das geladene Pion aus der  $\chi_{cJ}$ -Rekonstruktion herangezogen. Anschließend wird eine kinematische Anpassung mit sechs Randbedingungen (6C-Fit) durchgeführt, die auf der Lagrange-Multiplier-Methode basiert [He06]. Die Gesamtenergie und die Komponenten des Gesamtimpulses des exklusiv rekonstruierten Ereignisses muss dem ursprünglichen, bekannten Viererimpuls des  $e^+e^-$ -Systems entsprechen. Da der Viererimpuls vier Komponenten enthält, wird diese Bedingung bereits als vier Randbedingungen gezählt. Die restlichen beiden Randbedingungen sind die Fixierungen der invarianten Masse des  $K_s^0$  für das entsprechende  $\pi^+\pi^-$ -Paar und der invarianten Masse des  $\pi^0$  für die beiden Photonen (Mass-Constraints).

Die aus der kinematischen Anpassung erhaltenen Viererimpulse der nachgewiesenen Teilchen werden anschließend in einem  $N$ -*Tuple* zur weiteren Analyse gespeichert.

### 5.2.4 $\chi_{cJ}$ -Selektion

Aus allen Kombinationsmöglichkeiten des Ereignisses wird anhand des  $\chi^2$ -Wertes der kinematischen Anpassung der beste Kandidat bestimmt. Anschließend wird aus dem  $\chi^2$  des 6C-Fits die Fit-Wahrscheinlichkeit berechnet, und alle Ereignisse, bei denen diese kleiner als 5% ist, werden verworfen.

Alle Ereignisse, bei denen der Zerfallsvertex des  $K_s^0$  weniger als 1 mm vom nominellen Wechselwirkungspunkt entfernt ist, werden ebenfalls verworfen. Dies soll sicherstellen, dass das  $\pi^+\pi^-$ -Paar nicht direkt im  $\chi_{cJ}$ -Zerfall, sondern über eine Resonanz (hier das  $K_s^0$ ) erzeugt wird.

Die jeweiligen  $\chi_{cJ}$  werden abschließend durch einen Schnitt auf die Energie des Photons aus dem radiativen Zerfall  $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{cJ}$  im Schwerpunktsystem des  $\psi'$  selektiert. Die jeweiligen Schnitte sind:

- $\chi_{c0}$ -Selektion:  $230 \text{ MeV} < E_{CM}(\gamma_{rad}) < 290 \text{ MeV}$
- $\chi_{c1}$ -Selektion:  $150 \text{ MeV} < E_{CM}(\gamma_{rad}) < 190 \text{ MeV}$
- $\chi_{c2}$ -Selektion:  $110 \text{ MeV} < E_{CM}(\gamma_{rad}) < 140 \text{ MeV}$



## 6 Ergebnisse der Analyse

Im Folgenden werden die invarianten Massen verschiedener Teilchenkombinationen der Zerfallsprodukte auf Resonanzen untersucht. Dazu werden jeweils zwei solcher invarianter Massen gegeneinander aufgetragen und untersucht. Die entsprechenden Projektionen auf die jeweiligen Achsen werden ebenfalls untersucht und mit dem Phasenraum aus den Monte Carlo-Simulationsdaten verglichen. Die Schwerpunktsenergie des radiativen Photons  $E_{CM}(\gamma_{rad})$  im Schwerpunktsystem des  $\psi'$  und die invariante Masse des  $K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0$ -Systems sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

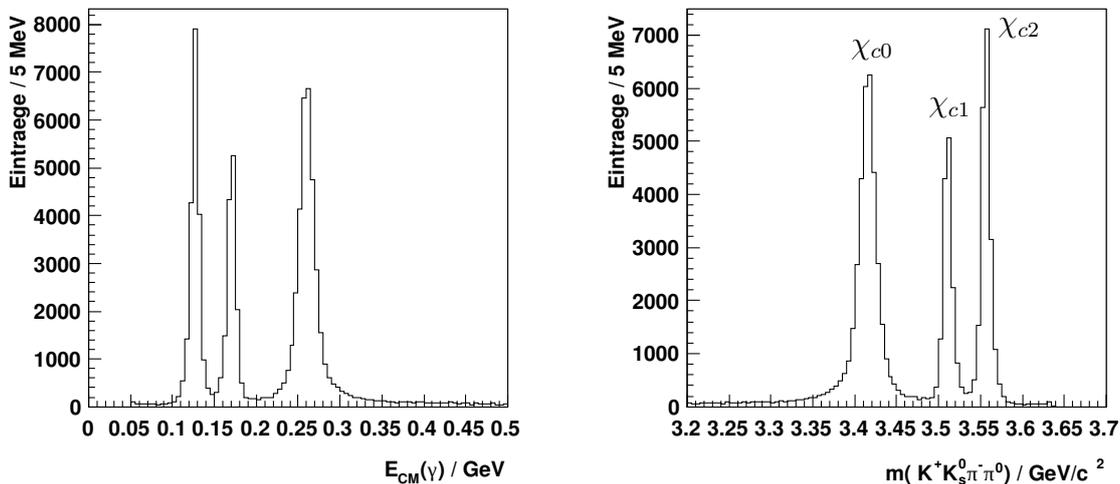


Abbildung 6.1: Schwerpunktsenergie des radiativen Photons (links) und invariante Masse des  $K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0$ -Systems (rechts)

Um die Anzahl der rekonstruierten  $\chi_{cJ}$ -Kandidaten zu bestimmen, wurde an die invariante Masse eine Novosibirsk-Funktion (Gl. (6.1)) und ein Chebychev-Polynom (Gl. (6.2)), zur Beschreibung des nichtresonanten Untergrunds, angepasst.

$$A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\log \left[ 1 + \tau \cdot \frac{x-x_0}{\sigma} \cdot \frac{\sinh\{\tau \cdot \sqrt{\log(4)}\}}{\tau \cdot \sqrt{\log(4)}} \right]}{\tau} \right)^2 + \tau^2 \right\} \quad (6.1)$$

$$T_0(x) + \sum_{i=1,n} a_i T_i(x) \quad \text{mit } T_0(x) = 1; \quad T_1(x) = x; \quad T_{i+1}(x) = 2xT_i(x) - T_{i-1}(x) \quad (6.2)$$

Die Anzahl der jeweils rekonstruierten  $\chi_{cJ}$ -Kandidaten und die Rekonstruktionseffizienz sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

Da die Strukturen der jeweiligen invarianten Massen für alle drei  $\chi_{cJ}$ -Zustände ähnlich sind, werden hier nur die Spektren aus den  $\chi_{c0}$ -Zerfällen (Abb. 6.5 - Abb. 6.7) diskutiert. Die Spektren der  $\chi_{c1}$ - und  $\chi_{c2}$ -Zerfälle sind in Anhang A dargestellt.

$\chi_{cJ}$	Anzahl	$\epsilon/\%$
$J = 0$	$29081 \pm 161$	9,34
$J = 1$	$12743 \pm 116$	10,77
$J = 2$	$18242 \pm 127$	10,08

Tabelle 6.1: Anzahl rekonstruierter  $\chi_{cJ}$ 's und Rekonstruktionseffizienzen

Für die Zerfallskette  $P \rightarrow QY \rightarrow (DZ)Y$  kann der Zerfallswinkel der Resonanz  $Q$  im Helizitätssystem über die Gleichung (6.3) beschrieben werden. Dabei sind  $P$ ,  $Q$  und  $D$  die Viererimpulse der entsprechenden Teilchen. Das so gewählte Bezugssystem ist hierbei das Ruhesystem mit der Flugrichtung als Quantisierungsachse  $z$  der zerfallenden Resonanz  $Q$  (Abb. 6.2) [Ryd05].

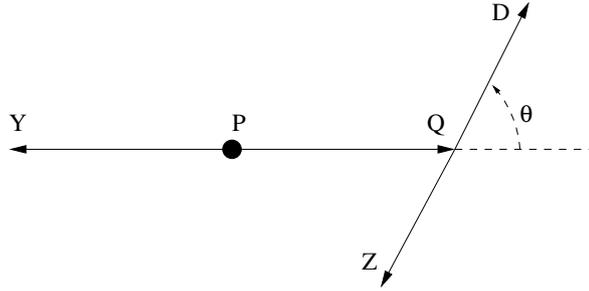


Abbildung 6.2: Definition des Zerfallswinkels [Ryd05]

$$\cos \theta_z = \frac{(P \cdot D) \cdot m_Q^2 - (P \cdot Q) \cdot (Q \cdot D)}{\sqrt{[(P \cdot Q)^2 - m_P^2 \cdot m_Q^2] \cdot [(Q \cdot D)^2 - m_Q^2 \cdot m_D^2]}} \quad (6.3)$$

Die Zerfallswinkelverteilungen können entsprechend des Spins und der Helizität mit den  $d$ -Funktionen  $d_{\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3}^J$  beschrieben werden. Details zum Helizitätsformalismus finden sich in [Kut96].

An die Zerfallswinkelverteilung des radiativen Photons aus dem Zerfall  $\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c0}$  (Abb. 6.4) wurde die Gleichung

$$I(\cos \theta_\gamma) = a \cdot \left[ (d_{11}^1)^2 + (d_{1-1}^1)^2 + (d_{-11}^1)^2 + (d_{-1-1}^1)^2 \right] = a \cdot (1 + \cos^2 \theta_\gamma) \quad (6.4)$$

angepasst. Obwohl diese Funktion die Zerfallswinkelverteilung des radiativen Photons im Falle des  $\chi_{c0}$  gut beschreiben müsste liegt der  $\chi^2/ndf$ -Wert dieser Anpassung bei 1,476. Dies liegt am Untergrund, der ca. 30% aller Einträge im Histogramm ausmacht (Abb. 6.3).

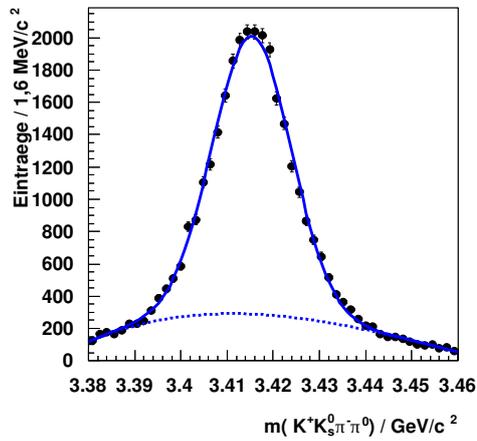


Abbildung 6.3: Invariante Masse des  $K^+K_s^0\pi^-\pi^0$ -Systems im Bereich des  $\chi_{c0}$

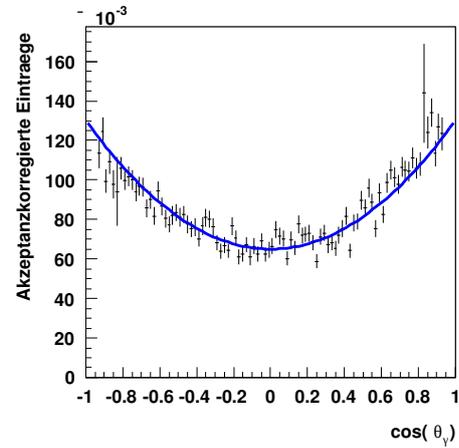


Abbildung 6.4: Zerfallswinkel des radiativen Photons aus dem Zerfall  $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c0}$

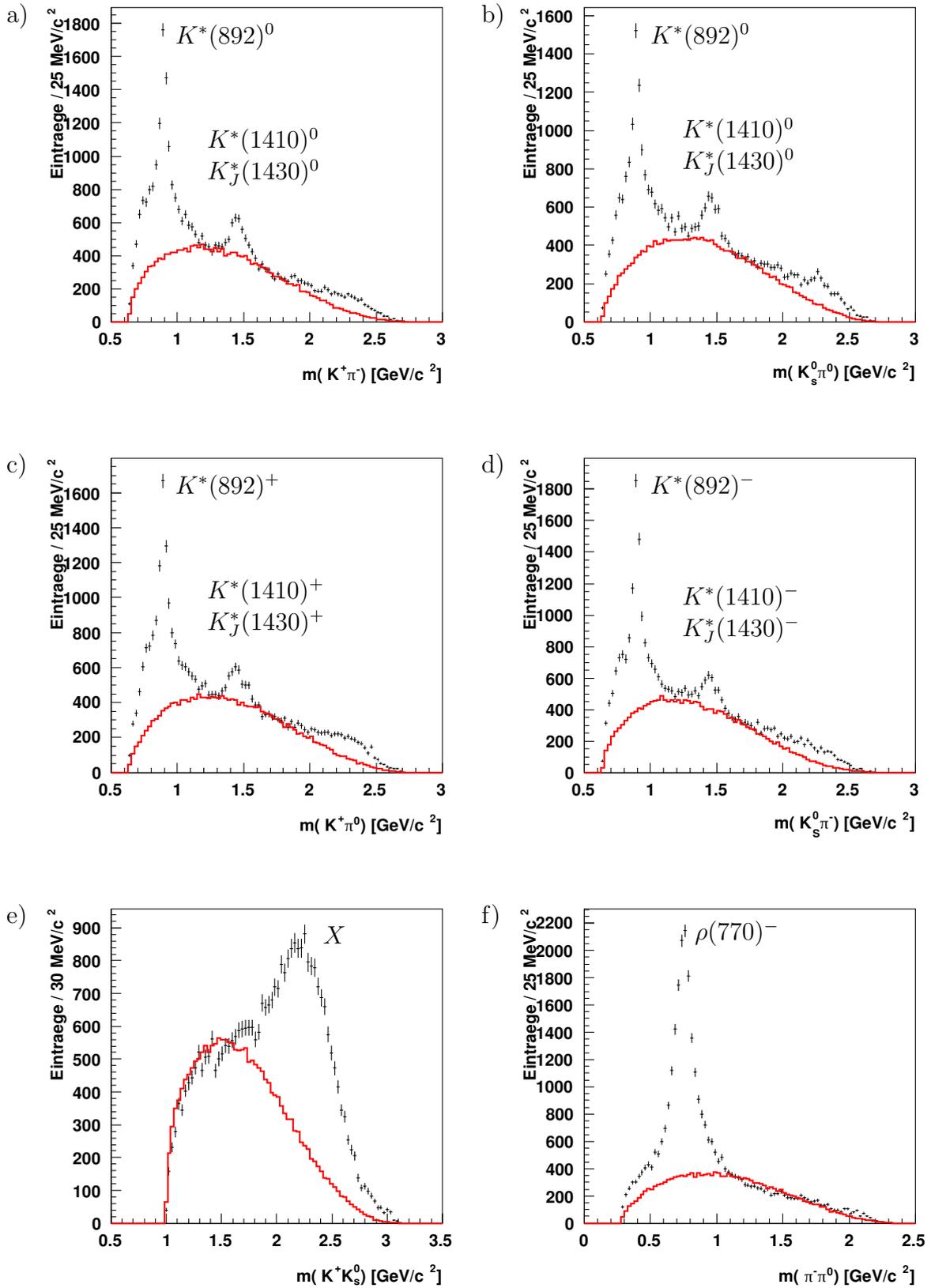


Abbildung 6.5: Invariante Massen der Zweiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c0}$ . Der nicht-resonante Phasenraumbeitrag der jeweiligen Kombination ist in Rot dargestellt

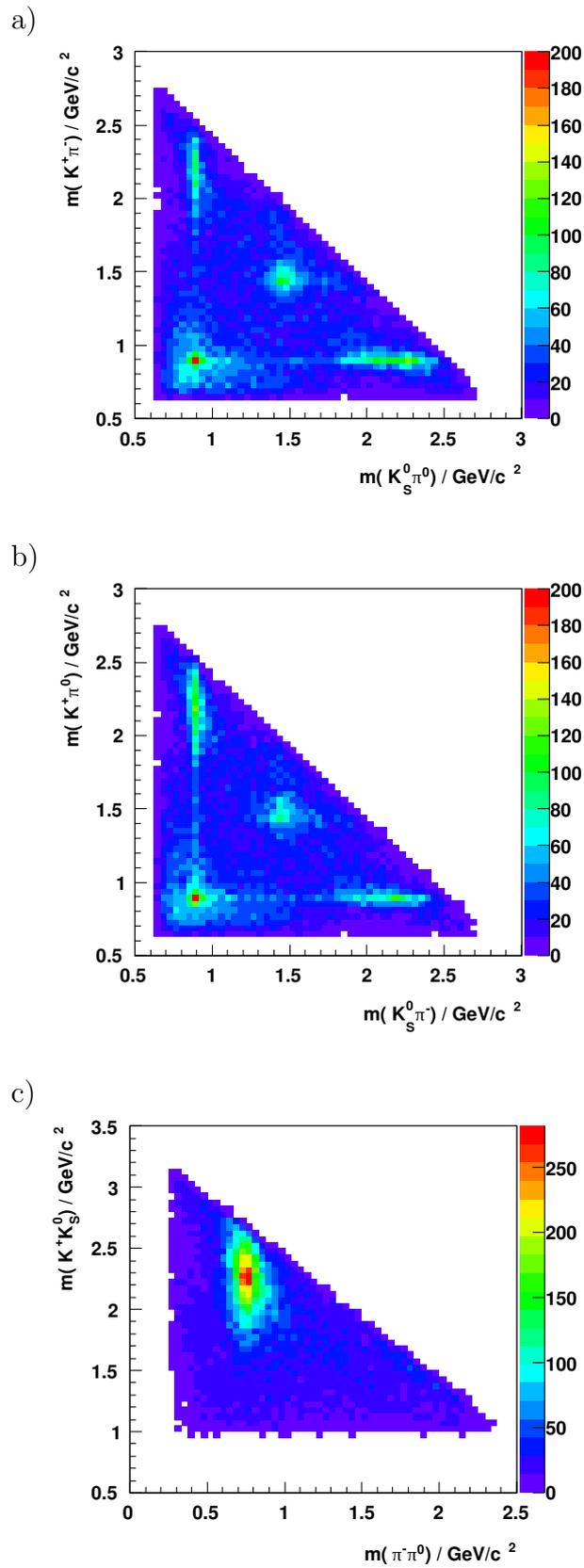


Abbildung 6.6: Zweidimensionale invariante Massenspektren der Zweiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c0}$

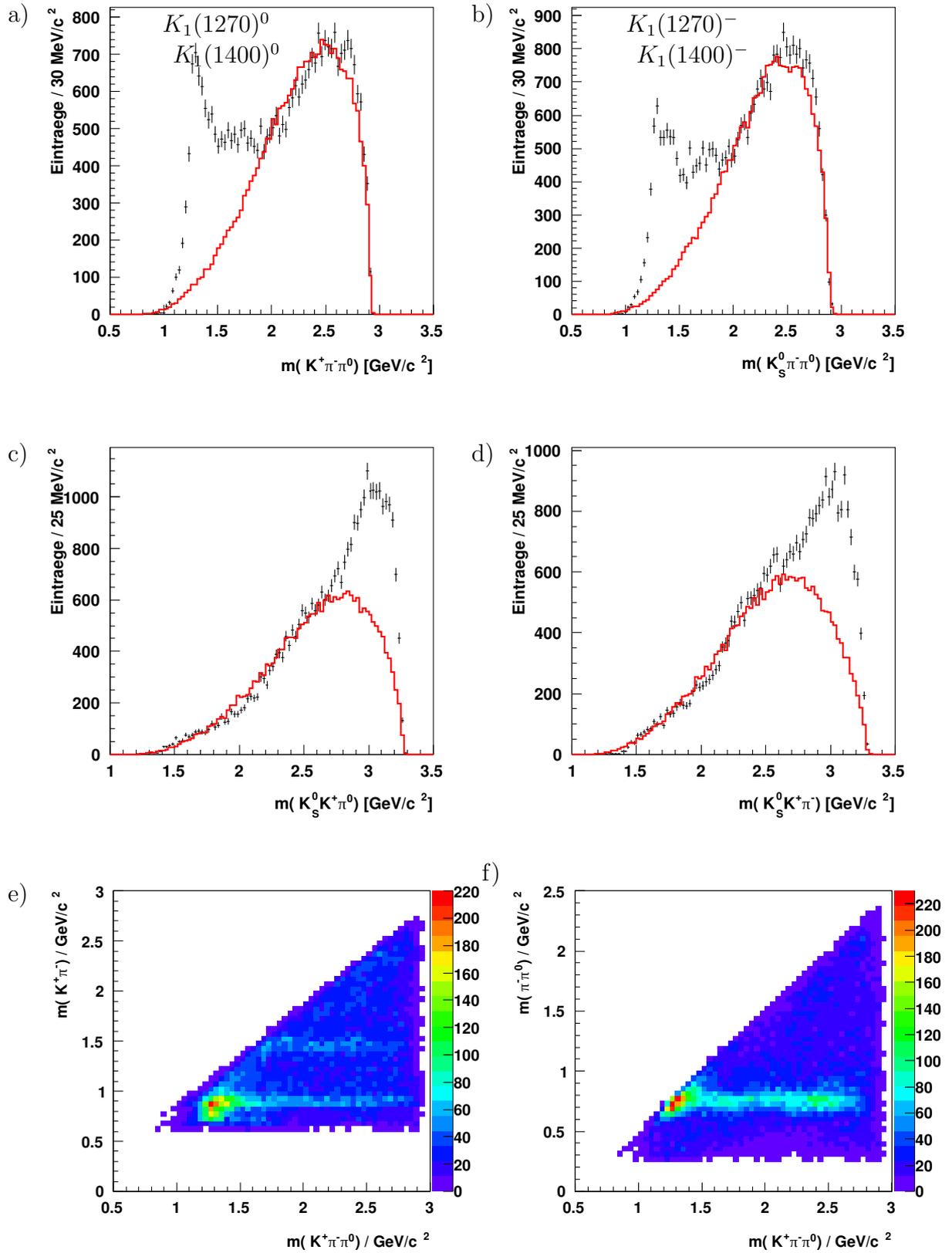


Abbildung 6.7: Invariante Massen der Dreiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c0}$ . Der nicht-resonante Phasenraumbeitrag der jeweiligen Kombination ist in Rot dargestellt

In allen vier möglichen Kaon-Pion-Kombinationen (Abb. 6.5a-d und Abb. 6.6a-b) sind deutliche Erhöhungen im Spektrum der invarianten Masse im Bereich von 875-925 MeV/c<sup>2</sup> zu erkennen. Diese Erhöhung deutet auf das  $K^*(892)$  hin, welches nahezu ausschließlich in  $K\pi$  zerfällt [PDG10]. Zudem ist in diesen Spektren eine Erhöhung im Massenbereich von 1415-1475 MeV/c<sup>2</sup> zu sehen. Hier trägt mindestens einer der beiden  $K_J^*(1430)$ -Zustände oder das  $K^*(1410)$  bei, welche ebenfalls in  $K\pi$  zerfallen. Die beiden Teilchen  $K^*(1410)$  und  $K_2^*(1430)$  können zusätzlich über  $K^*(892)\pi$  bzw.  $K\rho(770)$  zerfallen. Dazu muss das  $\chi_{cJ}$  in  $K^*(1410)K$  bzw.  $K_2^*(1430)K$  zerfallen, was für das  $\chi_{c0}$  und das  $\chi_{c2}$  auf Grund der Paritätserhaltung im starken Zerfall verboten ist. Das  $K_1(1400)$  zerfällt ebenfalls über  $K^*(892)\pi$  bzw.  $K\rho(770)$  in einen  $K\pi\pi$ -Zustand. In den entsprechenden Spektren der beiden  $K\pi\pi$ -Kombinationen (Abb. 6.7a-b, e-f) kann ebenfalls eine leichte Erhöhung bei dieser Masse erahnt werden. Im Massenbereich 1250-1340 MeV/c<sup>2</sup> ist eine weitere Erhöhung bei den beiden  $K\pi\pi$ -Kombinationen zu sehen. Hier ist das  $K_1(1270)$  zu vermuten, welches ebenfalls entweder über  $K\rho(770)$  oder  $K^*(892)\pi$  nach  $K\pi\pi$  zerfällt. Das  $\rho(770)^-$  lässt sich auch sehr deutlich in der invarianten Masse des  $\pi^-\pi^0$ -Systems (Abb. 6.5f) erkennen. Die Anzahl der  $\rho(770)^-$ -Kandidaten wurde mit einer relativistischen Breit-Wigner- und einer Garnet-Funktion ermittelt.

$$f(x) = \frac{Nx}{(x^2 - m_0^2)^2 + m_0^2 g^2} + (x - a)^b \cdot \exp(-cx - dx^2) \quad (6.5)$$

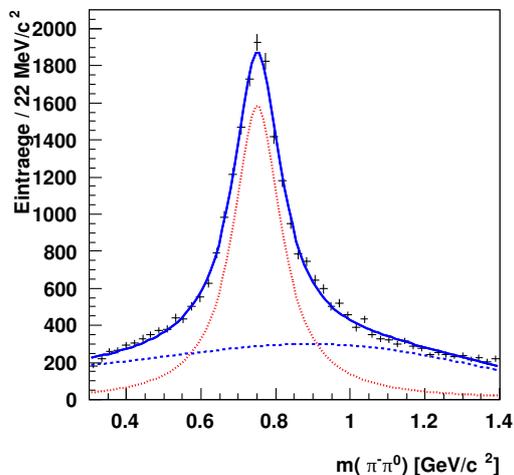


Abbildung 6.8: Invariante  $\pi^-\pi^0$ -Masse. Die durchgezogene blaue Linie zeigt die gesamte, angepasste Funktion, die blaue gestrichelte Linie den Untergrund und die rote gestrichelte Linie das reine Signal.

Insgesamt konnten  $13311 \pm 1141$   $\rho(770)^-$  in den  $\chi_{c0}$ -Zerfällen rekonstruiert werden (Abb. 6.8). Dies macht  $(45,77 \pm 3,93)\%$  aller rekonstruierter  $\chi_{c0}$  aus, so dass der Zerfall  $\chi_{c0} \rightarrow$

$K^+K_s^0\rho(770)^-$  den Hauptbeitrag zu dem hier untersuchten Zerfallskanal liefert. Abbildung 6.9 zeigt einen Dalitzplot für das  $K^+K_s^0\rho(770)^-$ -System. Im Dalitzplot erkennt

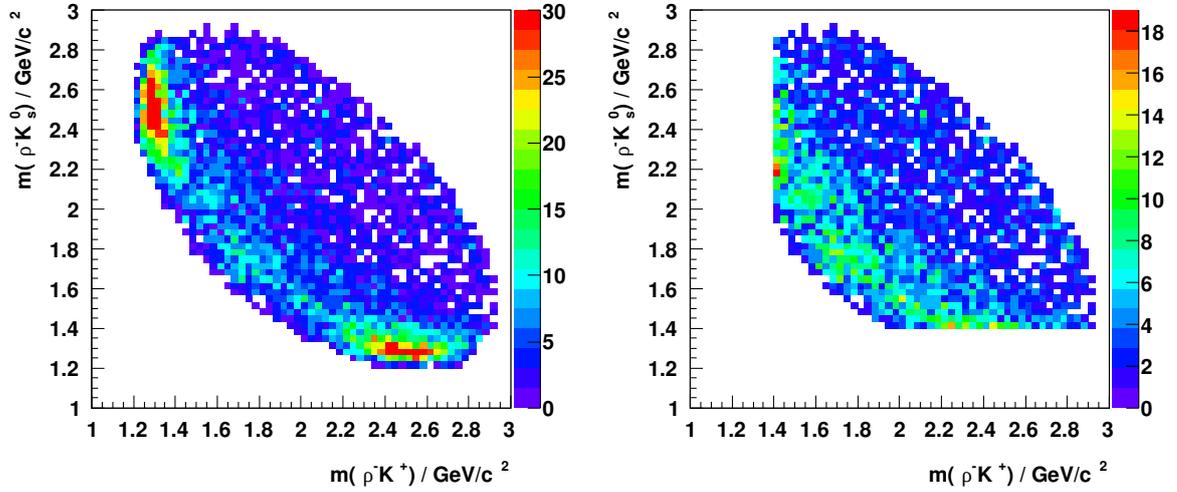


Abbildung 6.9: Dalitzplot des  $K^+K_s^0\rho(770)^-$ -Systems. Links: Ohne weitere Schnitte; Rechts: Mit Veto auf das  $K_1(1270)$ .

man einen deutlichen Beitrag des  $K_1(1270)$ , aber auch ein schwaches Band in der Diagonalen. Dieses Band deckt sich mit der Erhöhung (im Folgenden  $X$  genannt) in der  $K^+K_s^0$ -Masse bei 2-2,5  $\text{GeV}/c^2$ , die in den Abbildungen 6.6c und 6.5e zu sehen ist. Für ein besseres Verständnis wurden die Zerfallswinkelverteilungen des  $X$  und des  $\rho(770)^-$  näher untersucht.

Die Winkelverteilung des  $X$ -Teilchens wurde zum Einen ohne weitere Einschränkungen der Daten und zum Anderen mit einem Veto auf das  $K_1(1270)$  untersucht (Abb. 6.10). Dies soll sicherstellen, dass die Winkelverteilung nicht zu stark durch Beiträge des  $K_1(1270)$  verfälscht wird. Da das  $\chi_{c0}$  einen Spin  $J = 0$  aufweist, besitzt es die Helizität  $\lambda = 0$ . Das  $\rho(770)^-$  dagegen hat einen Spin von  $J = 1$  und damit gilt für die Helizität  $\lambda = 0, \pm 1$ . Da die Helizität eine additive Erhaltungsgröße ist, muss für die Helizität des  $X$   $\lambda(X) = -\lambda(\rho(770)^-)$  gelten. Für das  $X$  wurden verschiedene Spins untersucht. Die Zustände  $J^P = 0^-, 2^-$  sind auf Grund der Paritätserhaltung im Zerfall  $X \rightarrow K^+K_s^0$  verboten, und die Zustände  $J^P = 0^+, 2^+$  im Zerfall  $\chi_{c0} \rightarrow X\rho(770)^-$ . Aus diesem Grund kommen nur  $J = 1, 3$  in Frage. Die angepassten Funktionen an die Winkelverteilungen sind:

$$J = 1 : \quad a(d_{00}^1)^2 + b(d_{\pm 10}^1)^2 + c = a \cdot (\cos \theta)^2 + b \cdot \left(-\frac{\sin \theta}{\sqrt{2}}\right)^2 + c \quad (6.6)$$

$$J = 3 : \quad a(d_{00}^3)^2 + b(d_{\pm 10}^3)^2 + c = a \cdot (3 \cos \theta + 5 \cos(3\theta))^2 + b \cdot ([5 \cos(2\theta) + 3] \sin \theta)^2 + c \quad (6.7)$$

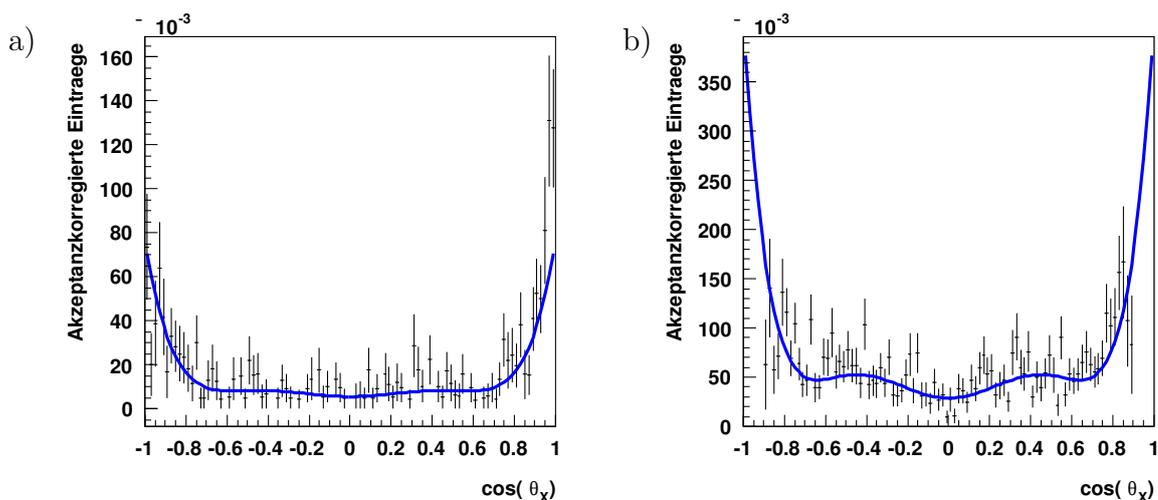


Abbildung 6.10: Zerfallswinkelverteilung für den Zerfall  $\chi_{c0} \rightarrow X \rho(770)^- \rightarrow (K^+ K_s^0) (\pi^- \pi^0)$ : a) des  $X$ ; b) des  $X$  mit Veto auf das  $K_1(1270)$

Die beste Anpassung konnte mit einem Spin von  $J = 3$  erzielt werden (Abb. 6.10), wobei  $J = 1$  nicht ausgeschlossen werden kann (Tab. 6.2). Die Winkelverteilungen wurden vor den Anpassungen der obigen Gleichungen einer Akzeptanzkorrektur unterzogen. Dazu werden die Daten auf die Winkelverteilung von Monte Carlo-Simulationsdaten normiert, die nicht resonant, phasenraumverteilt simuliert wurden.

$J$	1	3
$\chi^2/ndf$	1,40	0,80
$\chi^2/ndf$ mit $K_1(1270)$ -Veto	0,71	0,61

Tabelle 6.2:  $\chi^2/ndf$ -Werte der Anpassungen an die Zerfallswinkelverteilungen des  $X$

Sowohl der Spin  $J = 3$  als auch die Masse von etwa  $2,3 \text{ GeV}/c^2$  legen die Vermutung nahe, dass es sich bei dem  $X$  um das  $\rho_3(2250)^+$  handelt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die in der Winkelverteilung beobachteten Überhöhungen bei  $\cos \theta = -1$  und  $\cos \theta = +1$  von einer Reflexion des stark produzierten  $K_1(1270)$  verursacht wird. Auf Grund des Dalitzplots (Abb. 6.9) liegt der Schluss nahe, dass das  $\rho(770)^-$  zum Einen über das  $K_1(1270)$  und zum Anderen zusammen mit dem  $\rho_3(2250)^+$  produziert werden könnte.



## 7 Zusammenfassung der Analyse des Zerfalls $\chi_{cJ} \rightarrow K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0$

Im Rahmen dieser Analyse wurden die invarianten Massen verschiedener Teilchenkombination aus dem Zerfall  $\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c0} \rightarrow \gamma (K^+ K_s^0 \pi^- \pi^0)$  auf Resonanzen untersucht. In den Spektren konnten Hinweise auf die Resonanzen  $K^*(892)$ ,  $K_1(1270)$ ,  $K_1(1400)$ ,  $K^*(1410)$ ,  $K_J^*(1430)$  und  $\rho(770)$  gefunden werden.

Dabei stellt der Zerfall  $\chi_{cJ} \rightarrow K^+ K_s^0 \rho(770)^-$  mit mehr als 36% den Hauptbeitrag zu diesem Kanal dar. Die invariante Masse des  $K^+ K_s^0$ -Systems und der Dalitzplot des  $K^+ K_s^0 \rho(770)^-$ -Systems liefern Hinweise auf eine mögliche Resonanz bei etwa  $2,3 \text{ GeV}/c^2$ , die in  $K^+ K_s^0$  zerfällt. Die Zerfallswinkelverteilung dieser Resonanz wurde näher untersucht, um weitere Aufschlüsse zur Art des Teilchens zu erhalten. Das beste Ergebnis konnte mit einem Spin  $J = 3$  erzielt werden, wobei  $J = 1$  auf Grund des Resultats der Anpassung nicht ausgeschlossen werden kann.

$$\chi^2/ndf(J = 1) = 0,71 \qquad \chi^2/ndf(J = 3) = 0,61$$

Zudem ist es möglich, dass die Überhöhungen an den Rändern der Winkelverteilung durch eine Reflexion des  $K_1(1270)$  verursacht werden. Um eine genauere Aussage über diese mögliche Resonanz und auch die anderen beitragenden Resonanzen treffen zu können, sollte eine Partialwellenanalyse dieses Zerfallskanals durchgeführt werden. In einer weiteren Analyse müssen genauere Studien zum Untergrund durchgeführt werden.



## **Teil III**

# **Entwicklung der Slow Control für das PANDA-Experiment**



## 8 Einleitung

Dieser Teil der Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und dem Aufbau der Slow Control für das PANDA-Experiment.

Das PANDA-Experiment ist ein zukünftiges Experiment, das Teil des neuen FAIR Beschleunigerzentrums sein wird. Diese Anlage wird in den nächsten Jahren als Ausbau der GSI (Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung) in Darmstadt entstehen. Insgesamt sind etwa 3000 Wissenschaftler aus über 40 Ländern an diesem Projekt beteiligt.

Das PANDA-Experiment wird von einer Kollaboration aus über 450 Wissenschaftlern aus 17 Ländern entwickelt und aufgebaut. PANDA wird am Antiproton-Speicherring HESR stehen, und dessen Antiprotonen auf ein ruhendes Wasserstoff- oder Nuklidtarget treffen, so dass  $\bar{p}p$ - bzw.  $\bar{p}N$ -Reaktionen untersucht werden können. Die Antiprotonen des HESR sollen in einem Impulsbereich von 1,5 GeV/c bis 15 GeV/c zur Verfügung stehen. Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit befindet sich PANDA in der Design- und Prototypenphase.

Die Slow Control soll in einem laufenden Experiment alle äußeren Parameter überwachen und steuern. Dazu gehören beispielsweise Temperaturen innerhalb der Detektorkomponenten, die Spannungsversorgungen der einzelnen Detektoren und der Status von Kühlern und der Ausleseelektronik.

Die PANDA Slow Control wird auf dem Softwarepaket EPICS aufgebaut [Pro11]. EPICS ist ein open-source Softwarepaket zum Aufbau von netzwerkbasierten Kontrollsystemen. Die Entwicklung und Tests der Slow Control wurden am Proto192, einem Prototypen der Vorwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters, durchgeführt. Für den Prototypen müssen Hochspannungsversorgungen für die Photodetektoren, VME Crates für die Ausleseelektronik (ADCs und Shaper) und Kühler überwacht und gesteuert werden. Zusätzlich müssen innerhalb des Prototypen Temperatur und Luftfeuchtigkeit überwacht werden. Die graphischen Benutzeroberflächen für das Kontrollsystem wurden mit der EPICS-Erweiterung *MEDM* (Motif Editor and Display Manager) gestaltet. Diese sollen durch das Toolset Control System Studio (CSS) ersetzt werden. CSS ist ein auf Java und Eclipse basiertes Toolset, das u.a. einen Editor für Benutzeroberflächen und Anwendungen zur Archivierung der Daten und zur Überwachung des Alarmstatus des Kontrollsystems liefert. Für das PANDA-Experiment wurde ein spezifisches Produkt aus den CSS Plugins zusammengestellt und konfiguriert.

Um die von der Slow Control archivierten Daten innerhalb von C++-Programmen nutzbar zu machen, wurde im Rahmen dieser Arbeit zudem die *Environmental Database Library* (libEnvDB) programmiert. Die libEnvDB ist eine shared-library, die sich durch ein transparentes Benutzerinterface und minimale Abhängigkeiten auszeichnet. Der Benutzer benötigt zur Nutzung der Bibliothek kein Know-How zur Datenbank, in der die archivierten Daten hinterlegt sind.



# 9 Das PANDA-Experiment

## 9.1 Zielsetzung

Mit dem PANDA-Experiment soll die Theorie der QCD im nicht-perturbativen Bereich untersucht werden, um ein besseres Verständnis der Physik zu gewinnen. Die  $\bar{p}p$ -Annihilation als gluonreicher Prozess eignet sich für diese Untersuchungen hervorragend. Im Gegensatz zum BES-III Experiment (Kap. 3) können hier gleichzeitig Zustände aller Quantenzahlen direkt in Formation erzeugt werden. Somit eignet sich dieser Prozess auch zur Hadronenspektroskopie. Das PANDA-Experiment soll Antworten auf ein breites Spektrum verschiedener Fragestellungen liefern [Ern09a]:

*Mesonen-Spektroskopie im Charmonium-Bereich:* Auf Grund der hohen Strahlenergie werden bei PANDA täglich tausende  $c\bar{c}$ -Zustände sowohl unterhalb als auch oberhalb der Open Charm Schwelle erzeugt werden. Die Massen dieser Zustände sollen durch Scans im Bereich von 100 keV präzise bestimmt werden, sowie deren Breiten mit einer Genauigkeit besser als 10%.

*Suche nach gluonischen Anregungen:* Da  $\bar{p}p$  Annihilationen gluonreiche Prozesse sind, ist die Erzeugung von Glueballs und Hybriden stark begünstigt. Dies bietet die Möglichkeit Zustände mit exotischen Quantenzahlen zu beobachten und zu klassifizieren.

*Studien zu Hadronen in nuklearer Materie:* Die Untersuchung von Modifizierungen von Hadronen in hadronischer Materie soll neue Erkenntnisse über den Ursprung der Massen von Hadronen liefern. Bisher gab es nur Untersuchungen mit leichten Quarks. Mit PANDA wird es erstmals möglich sein, dieses Vorgehen auch auf den Charm-Bereich zu erweitern.

*Open Charm-Spektroskopie:* Bei Strahlimpulsen oberhalb von 6,4 GeV/c und der vollen Luminosität des HESR werden viele  $D$ -Meson-Paare erzeugt werden. Aufgrund der großen Anzahl und der vollständig bekannten Kinematik dieser erzeugten Paare wird es möglich sein, die Spektren der  $D$ - und  $D_s$ -Mesonen präzise zu vermessen.

*Hypernuklearphysik:* Hypernukleonen unterscheiden sich von konventionellen Nukleonen durch ein  $s$ -Quark, das eines der  $u$ - oder  $d$ -Quarks im Kern ersetzt. Es konnten bereits solche Zustände mit einem oder zwei strange-Quarks pro Nukleon beobachtet werden, jedoch bisher nur in geringer Zahl. Mit dem Antiprotonstrahl werden am HESR deutlich mehr solcher Zustände erzeugt werden können, so dass sich neue Möglichkeiten der Spektroskopie dieser Nukleonen sowie der Studien der Kräfte zwischen Hyperonen und Nukleonen bieten.

*Elektromagnetische Formfaktoren:* Das PANDA Experiment wird neben der Spektroskopie auch in der Lage sein, den elektromagnetischen Formfaktor des Protons im

zeitartigen Bereich zu bestimmen. Elektromagnetische Prozesse wie  $\bar{p}p \rightarrow e^+e^-$  und invertierte weitwinklige Compton-Streuung ermöglichen Messungen über einen großen Impulsbereich  $q^2$  hinweg.

## 9.2 Die Beschleunigeranlage FAIR

Die zukünftige Beschleunigeranlage FAIR wird die existierende Anlage der GSI deutlich erweitern (Abb. 9.1). Es werden eine Reihe von Experimenten durchgeführt, die nicht nur Protonen- bzw. Antiprotonenstrahlen verwenden, sondern auch Schwerionenstrahlen und seltene Isotope. Die Experimente lassen sich wie folgt gliedern:

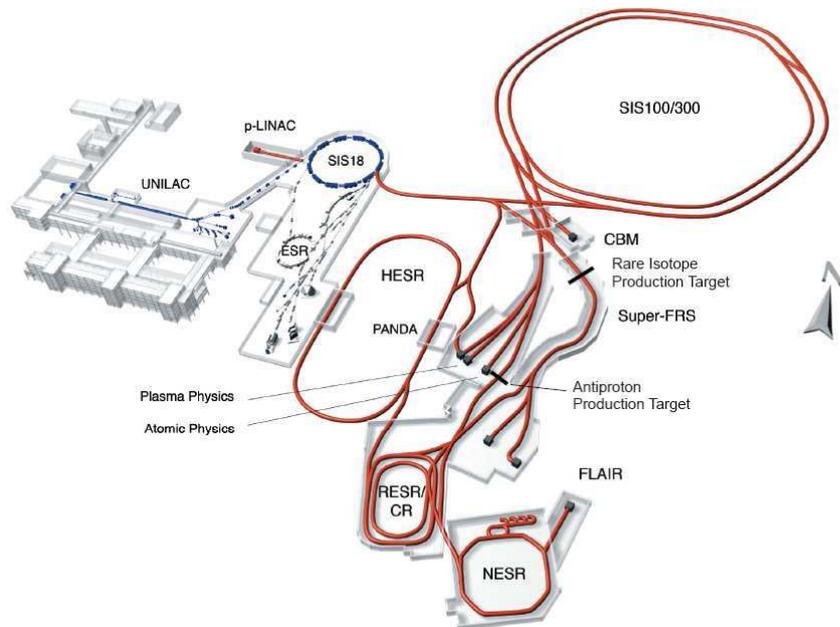


Abbildung 9.1: Übersicht über die FAIR Beschleuniger-Anlage mit dem HESR Speicherring (Mitte) und dem PANDA Experiment. Die existierende Beschleunigeranlage der GSI ist in Blau, die zukünftigen Anlagen in Rot dargestellt.

*APPA (Atomic, Plasma Physics and Applications):* Wie der Name bereits andeutet, wird sich APPA mit Fragestellungen aus der Atom- und Plasmaphysik sowie deren Anwendungen, insbesondere im medizinischen Bereich, beschäftigen. Zu diesem Forschungsschwerpunkt gehören die Experimente BIOMAT, FLAIR, HEDgeHOB, SPARC und WDM.

*Physik komprimierter Kern-Materie:* Anhand von Kern-Kern Kollisionen sollen Fragestellungen zum Phasendiagramm komprimierter hadronischer Materie basierend auf Ergebnissen des CBM-Experiments untersucht werden.

*NUSTAR:* NUSTAR widmet sich astrophysikalischen Reaktionen und der Struktur von Nukleonen. Die Experimente dieses Schwerpunkts sind DESPEC/HISPEC, ELISE,

EXL, ILIMA, LaSpec, MATS, R3B und SuperFRS.

*Physik mit hochenergetischen Antiprotonen:* Dieser Bereich wird vom PANDA Experiment abgedeckt. Die Antiprotonen werden in einem Produktionstarget erzeugt, das mit einem 30 GeV/c Protonenstrahl aus dem SIS100 Speicherring beschossen wird. Im *Collector Ring* (CR) werden diese gesammelt, und mit Hilfe von stochastischer Kühlung wird der Phasenraum der  $\bar{p}$  reduziert. Anschließend werden die gekühlten Antiprotonen im *Recycled Experimental Storage Ring* (RESR) auf die nötige Intensität, die von den Experimenten benötigt wird, akkumuliert, und mit einem Impuls von 3,7 GeV/c in den *High Energy Storage Ring* (HESR) weitergeleitet. Der HESR kann die Antiprotonen auf Impulse von 1,5 bis 15 GeV/c beschleunigen und speichern [Ern08]. Dabei stehen zwei Betriebsmodi des Speicherrings zur Verfügung: Der *High Luminosity Mode* mit Strahlintensitäten von bis zu  $10^{11}$  gespeicherten Antiprotonen und der *High Resolution Mode* mit einer Impulsunschärfe von  $\sigma_p/p \sim 10^{-5}$ . Diese geringe Impulsungenauigkeit wird mit stochastischer- und Elektronen-Kühlung erreicht. Die Elektronenkühlung wird jedoch nur im Impulsbereich unterhalb von 9 GeV/c verfügbar sein. Aus diesem Grund können höhere Impulse nur im High Luminosity Mode erreicht werden. Je nach Betriebsmodus ergeben sich unterschiedliche Werte für die Luminositäten. Im High Luminosity Mode wird diese  $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  bei einer mittleren Impulsungenauigkeit von  $\sigma_p/p \approx 10^{-4}$  betragen. Im High Resolution Mode beträgt die Luminosität  $2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  bei einer mittleren Impulsungenauigkeit von  $\sigma_p/p \leq 2 \cdot 10^{-5}$  [Ern09a].

## 9.3 Der PANDA-Detektor

Der PANDA Detektor ist als modulares System konzipiert, so dass auch nach der Konstruktionsphase einzelne Module modifiziert werden können. Dazu zählen Erweiterungen, Verbesserungen oder der Austausch oder Ausbau einzelner Komponenten. Im Folgenden wird jedoch die zu Beginn des Experiments verwendete Standard-Konfiguration beschrieben, die u.a. zur Mesonen-Spektroskopie verwendet wird. Da bei PANDA der Antiprotonenstrahl auf ein ruhendes Target trifft, haben die Reaktionsprodukte im Laborsystem einen *Boost* in Vorwärtsrichtung. Das bedeutet, dass die Produkte nicht wie bei einem Kollider, z.B. BEPC-II, in alle Richtungen gleich häufig fliegen, sondern vorzugsweise in Strahlrichtung. Aus diesem Grund ist der Detektor in ein  $\phi$ -symmetrisch um den Wechselwirkungspunkt angeordnetes Target-Spektrometer und ein Vorwärts-Spektrometer, das in Vorwärtsrichtung steht, aufgeteilt (Abb. 9.2). Auf diese Weise erreicht man eine hohe Impulsauflösung über einen großen Impulsbereich, und eine nahezu vollständige Abdeckung des Raumwinkels.

### 9.3.1 Das Targetspektrometer

Das Target-Spektrometer dient dem Nachweis von Teilchen mit einem hohen Transversal-Impuls  $p_T$ . Es ist aus mehreren Subsystemen, die in aufeinanderfolgenden Schichten zylindersymmetrisch um das Target angeordnet sind, aufgebaut (Abb. 9.3).

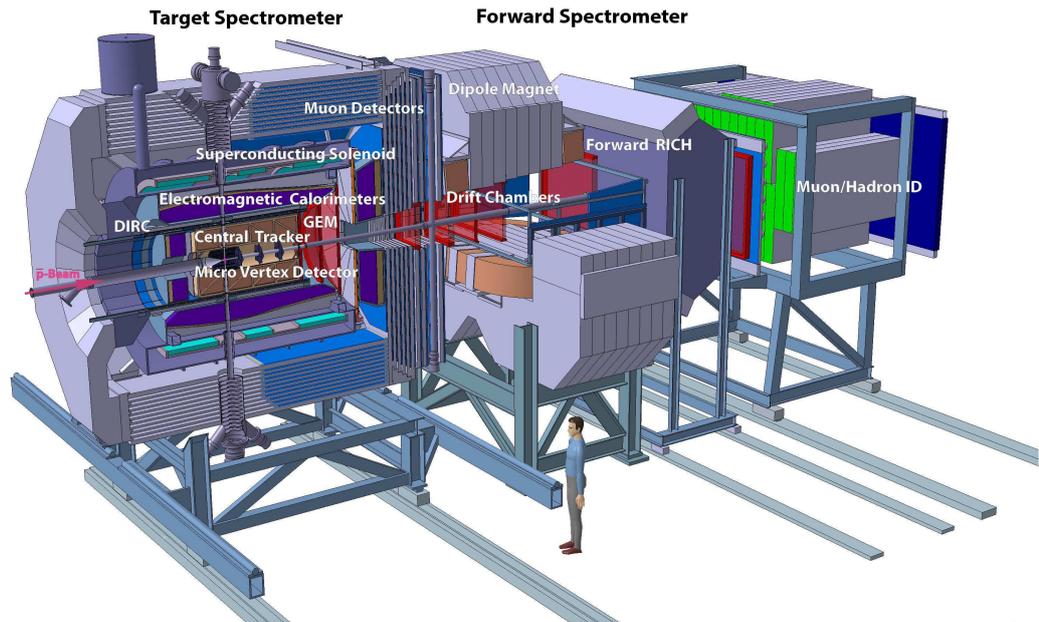


Abbildung 9.2: Übersicht über den PANDA Detektor [Ern09b]

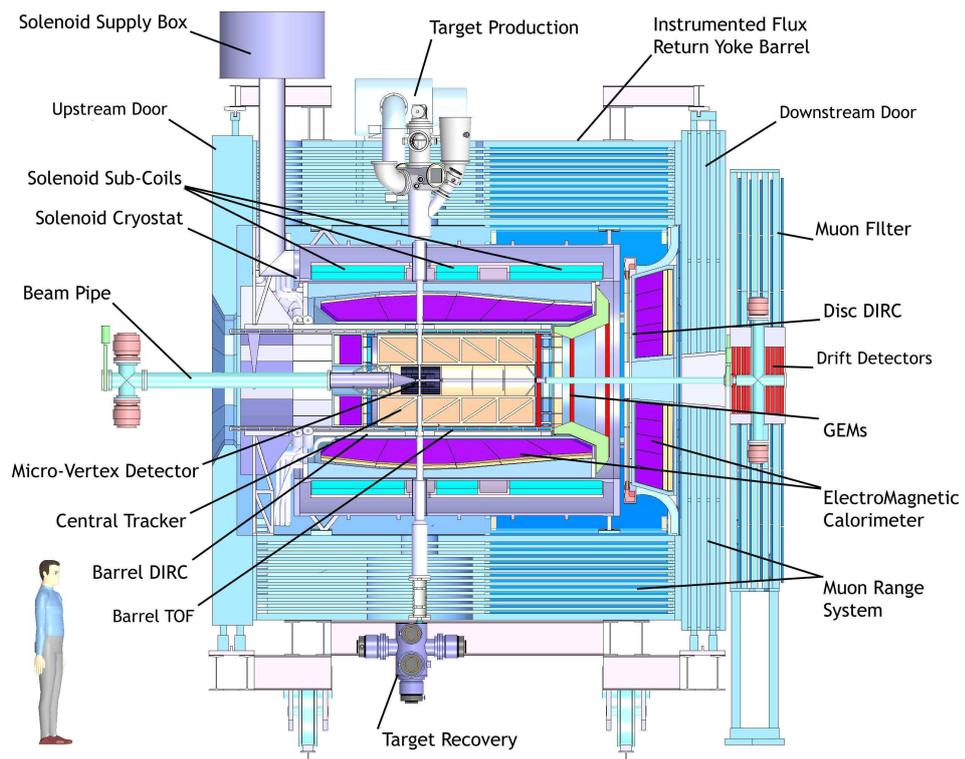


Abbildung 9.3: Das PANDA Targetspektrometer [Ern09b]

## Target

Für das Wasserstoff-Target sind zwei verschiedene Systeme in Diskussion: ein Cluster-Jet Target und ein Pellet-Target.

Beim Pellet-Target werden ca.  $1 - 1,5 \cdot 10^4$  gefrorene Wasserstoff-Pellets pro Sekunde transversal durch den Antiprotonenstrahl geführt. Die Pellets haben typischerweise eine Größe von 25-40  $\mu\text{m}$ . Die Vorteile dieses Targetsystems sind zum Einen höhere Ereignisraten auf Grund der größeren Dichte, und zum Anderen die exakte Bestimmung des Wechselwirkungspunktes durch Bahnverfolgung der einzelnen Pellets.

Beim Cluster-Jet Target kondensiert gasförmiger Wasserstoff beim Übergang in ein Vakuum und bildet so Anhäufungen von  $10^3 - 10^4$  Wasserstoff-Molekülen. Dieses System hat den Vorteil einer homogenen Dichte bei minimaler Aufheizung des Strahls [Ern08].

## Microvertex Detektor

Der Microvertex Detektor (MVD) ist der innerste Detektor des Targetspektrometers. Er dient der Spurrekonstruktion und der exakten Bestimmung der Vertices. Der MVD wird aus mehreren Lagen von Halbleiterdetektoren bestehen und einen Innenradius von 2,5 cm und einen Außenradius von 13 cm aufweisen. Vier Lagen aus strahlenharten Pixeldetektoren innen und Silizium-Streifen-Detektoren außen werden zylindrisch um das Strahlrohr angeordnet sein. In Vorwärtsrichtung werden acht Lagen senkrecht zum Strahl angeordnet, um Teilchen unter kleinen Winkeln nachweisen zu können. Die inneren Lagen werden genau wie im zylindrischen Teil aus Pixeldetektoren bestehen, und die beiden letzten aus Streifendetektoren.

## Zentraler Detektor zur Spurrekonstruktion

Als zentraler Detektor zur Spurrekonstruktion geladener Teilchen wird im Fassbereich um den MVD herum ein *Straw Tube Tracker* (STT) zum Einsatz kommen. In Vorwärtsrichtung werden mehrlagige *Gas Electron Multiplier* (GEM) verwendet. Selbst bei maximaler Luminosität von  $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  müssen diese Detektoren alle Teilchenspuren mit einer Impulsauflösung im einstelligen Prozentbereich erkennen. Zudem müssen sie sekundäre Vertices von Teilchen, die außerhalb des MVD zerfallen (z.B.  $K_s^0$  oder  $\Lambda$ ), mit geringen Unsicherheiten rekonstruieren können.

Der STT besteht aus 24 Lagen gasgefüllter aluminisierter Mylarröhrchen. Innerhalb dieser Röhrchen ist ein Signaldraht gespannt. Die gesamte Struktur, bestehend aus 4200 Röhrchen, ist dabei auf Grund des Gasdrucks selbsttragend. Der Detektor wird eine Länge von 150 cm, einen Innenradius von 15 cm und einen Außenradius von 42 cm aufweisen. Die Röhrchen werden einen Durchmesser von 10 mm haben. Dadurch wird die Spurrekonstruktion mit einer Auflösung von 3 mm in  $z$ -Richtung und 150  $\mu\text{m}$  in der  $x$ - $y$ -Ebene möglich sein.

In Vorwärtsrichtung werden die Teilchenspuren von den GEM Detektoren registriert, die unter einem Winkel  $< 22^\circ$  zur Strahlachse emittiert werden. Dazu sind drei GEM Detektoren in den Abständen 1,1 m, 1,4 m und 1,9 m vom Wechselwirkungspunkt

vorgesehen. Diese Detektoren sind besonders strahlenhart und können eine um drei Größenordnungen größere Rate im Vergleich zu Drahtkammern verarbeiten [Ern09b].

### Cherenkov und Flugzeit Detektoren

Für das PANDA Experiment ist es wichtig über einen großen Impulsbereich geladene Teilchen identifizieren zu können. Teilchen mit einem Impuls  $> 1 \text{ GeV}/c$  werden mit einem DIRC Detektor (*Detection of Internally Reflected Cherenkov Light*) identifiziert. Die DIRC Detektoren bestehen aus einem 1,7 bis 2 cm dicken Quarz-Radiator, in dem die Teilchen Cherenkov-Licht emittieren. Dieses Licht wird durch Totalreflexion intern zu den Enden geleitet und dort von Photomultipliern nachgewiesen. Die Radiatoren werden zum Einen radial um das Strahlrohr herum angeordnet, zum Anderen im Disc-DIRC als runde Platten in Vorwärtsrichtung.

Teilchen, deren Impuls unterhalb der Cherenkov-Schwelle liegt, werden einerseits anhand von Energieverlust Messungen in den Detektoren zur Spurrekonstruktion, als auch mit einem Flugzeit-Detektor (TOF) im Fass identifiziert [Ern09b].

### Elektromagnetisches Kalorimeter

Das elektromagnetische Kalorimeter (EMC) verwendet als Szintillatoren Bleiwolframat-Kristalle ( $\text{PbWO}_4$ , kurz PWO). Bleiwolframat zeichnet sich durch kurze Abklingzeiten und eine kurze Strahlungslänge aus. Dadurch ist dieses Material in der Lage die hohen Zählraten in PANDA bei einer sehr kompakten Bauweise zu verarbeiten. Die Kristalle sind ca. 20 cm lang, dies entspricht 22 Strahlungslängen. Das Fass hat einen Innenradius von 57 cm und wird aus 11360 keilförmigen Kristallen mit 11 unterschiedlichen Formen und einer Frontfläche von etwa  $2,1 \times 2,1 \text{ cm}^2$  bestehen. Um eine möglichst vollständige Raumwinkel-Abdeckung zu erreichen, wird das Fass zu beiden Seiten mit einer Endkappe abgeschlossen. In der Endkappe in Vorwärtsrichtung werden ca. 3600 Kristalle ähnlicher Dimension verbaut, in der Endkappe in Rückwärtsrichtung werden 592 quaderförmige Kristalle eingesetzt. Die Kristalle werden im Fass mit jeweils zwei Large Area Avalanche Photodioden (LAAPD) ausgelesen. In der Endkappe werden im inneren Teil Vakuum-Phototetroden und im äußeren Randbereich ebenfalls zwei LAAPDs pro Kristall verwendet.

Ein Nachteil der verwendeten Kristalle ist die geringe Lichtausbeute bei Raumtemperatur. Diese entspricht nur 0,6% der Lichtausbeute von Natriumiodid-Kristallen. Die Lichtausbeute kann durch Herabkühlen der Kristalle verbessert werden, allerdings steigen dabei auch die Abklingzeiten. Ein Kompromiss zwischen steigenden Abklingzeiten und Lichtausbeute wird bei  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht. Bei dieser Temperatur ist die Lichtausbeute ungefähr um einen Faktor vier höher als bei Raumtemperatur. Die Energieauflösung des EMC soll

$$\frac{\sigma_E}{E} = 1\% \oplus \frac{2\%}{\sqrt{E [\text{GeV}]}} \quad (9.1)$$

in einem Energiebereich von  $\sqrt{s} = 5 \text{ MeV} - 15 \text{ GeV}$  erreichen. Bei Impulsen oberhalb von  $0,5 \text{ GeV}/c$  wird zudem mit dem EMC eine gute  $e-\pi$  Separation möglich sein [Ern08].

## Supraleitende Spule und instrumentiertes Eisenjoch

Den äußersten Teil des Targetspektrometers stellen der supraleitende Solenoidmagnet und das instrumentierte Eisenjoch dar. Der Solenoid erzeugt im Inneren des Targetspektrometers ein homogenes, 2 T starkes Magnetfeld. Das Fass des instrumentierten Eisenjochs wird in 13 Lagen unterteilt, mit jeweils 3 - 6 cm Dicke, was in diesem Bereich zur Absorption von Pionen ausreichend ist. In Vorwärtsrichtung wird jedoch aufgrund der höheren Impulse mehr Material benötigt. Aus diesem Grund werden zwischen dem Solenoiden und dem Dipol noch fünf weitere Lagen eingebracht. Zwischen den Eisenplatten werden gasgefüllte Drahtkammern aus Aluminium, die an beiden Seiten ausgelesen werden, zur Detektion geladener Teilchen eingesetzt [Ern09b].

### 9.3.2 Das Vorwärtsspektrometer

Das Vorwärtsspektrometer dient dem Nachweis von Teilchen mit einem hohen Longitudinalimpuls in Vorwärtsrichtung, die unter Winkeln von weniger als  $5^\circ$  in der vertikalen und  $10^\circ$  in der horizontalen Ebene emittiert werden (Abb. 9.4). Um geladene Teilchen abzulenken, wird ein Dipolmagnet verwendet. Die gekrümmten Spuren der Teilchen werden mit Drahtkammern, die entweder als einzelne Zellen oder als STT realisiert werden, bestimmt. Zwei Drahtkammern werden vor, zwei innerhalb und zwei hinter dem Dipolmagneten platziert. Dadurch lassen sich die Spuren der Teilchen mit kleinen Impulsen sowie mit maximalem Impuls rekonstruieren. Für Protonen mit einem Impuls von  $3 \text{ GeV}/c$  wird eine Impulsauflösung von  $\delta p/p = 0,2\%$  erwartet. Zur Identifizierung der Teilchen dienen ein Cherenkov-Detektor und ein Flugzeit-Detektor. Der Cherenkov-Detektor (RICH) besteht aus zwei Radiatoren, Silica-Aerogel und  $\text{C}_4\text{F}_{10}$ -Gas, die eine gute  $\pi/K/p$ -Separation in einem breiten Impulsbereich von 2 bis  $15 \text{ GeV}/c$  ermöglichen. Zur Bestimmung der Flugzeit werden sowohl innerhalb des Dipolmagneten als auch 7 m hinter dem Target Plastikszintillatoren eingesetzt. Dies ermöglicht eine zusätzliche  $\pi/K$ - und  $K/p$ -Separation bei Impulsen bis zu  $2,8 \text{ GeV}/c$  bzw.  $4,7 \text{ GeV}/c$  auf einer Skala von  $3\sigma$ . Als elektromagnetisches Kalorimeter wird im Vorwärtsspektrometer ein Shashlyk-Kalorimeter zum Einsatz kommen. Das von den Szintillatoren emittierte Licht wird dabei durch Lichtleiter, die gleichzeitig als Wellenlängenschieber dienen, auf Photomultiplier geleitet. Das Kalorimeter soll eine Energieauflösung von  $4\%/\sqrt{E}$  erreichen. Den Abschluss des Detektors bildet ein Myon-Detektor, der ähnlich zu den Myon-Detektoren im Target-Spektrometer aus mehreren Lagen Absorbermaterial besteht, in dessen Zwischenräume Drahtkammern eingelassen werden.

## 9.4 Datennahme

Bei der Datennahme müssen auf Grund des breiten Physikprogramms unterschiedlichste Ereignis-Topologien berücksichtigt werden und gleichzeitig eine möglichst hohe Rate verarbeitet werden. Daher wird ein flexibles, sich selbst triggendes Ausleseverfahren angewandt. Die Ausleseelektronik wird dabei kontinuierlich die Detektordaten digitalisieren und selbstständig Ereignisse mit frei konfigurierbaren Filtern selektieren. In dieser

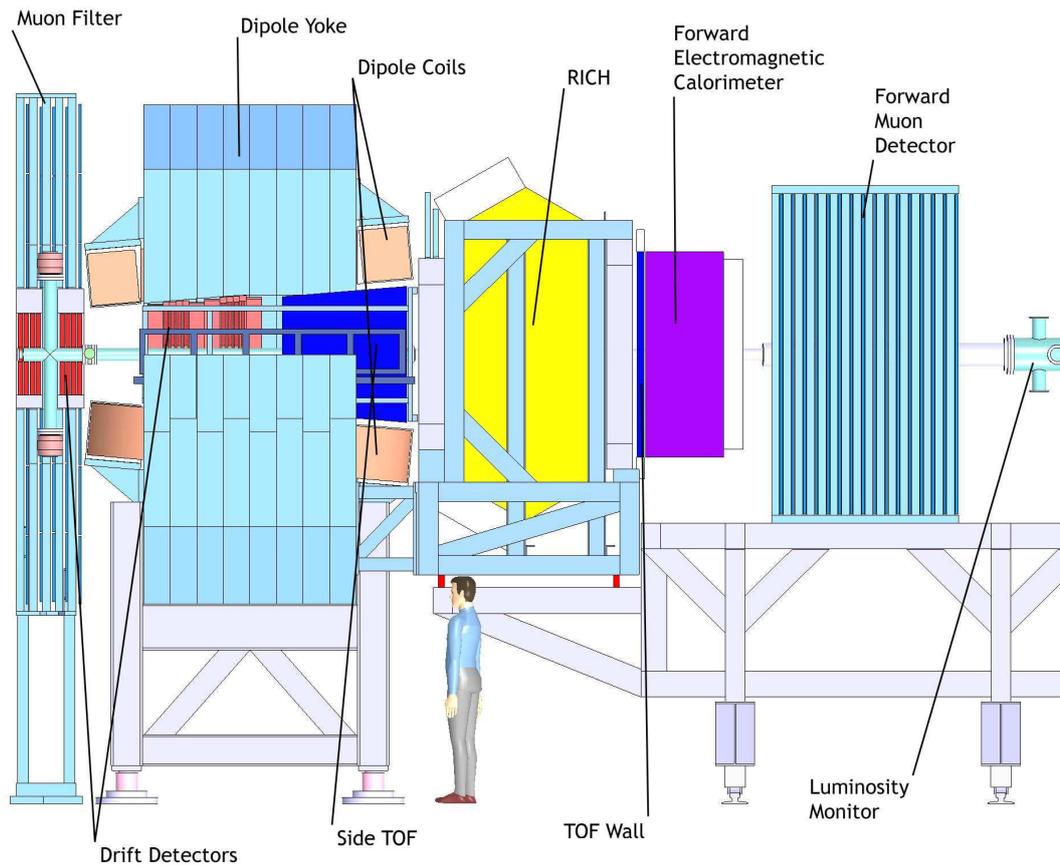


Abbildung 9.4: Das PANDA Vorwärtsspektrometer [Ern09b]

Online-Selektion werden Parameter wie Energie-Cluster oder Spur-Fragmente direkt extrahiert und berücksichtigt. Dadurch werden Zeitfenster mit relevanten Ereignissen online erkannt und in folgenden Schritten anhand weiterer Daten vollständig rekonstruiert. Anschließend werden die vollständig online rekonstruierten und physikalisch sinnvollen Ereignisse gespeichert. Dieses Verfahren bietet eine große Flexibilität bei der Selektion der unterschiedlichen Ereignis-Topologien, die mit dem PANDA Detektor erfasst werden können.

# 10 Software des Kontrollsystems

## 10.1 EPICS

Die Slow Control des PANDA-Experiments wird mit dem *Experimental Physics and Industrial Control System* (EPICS), einem open-source Softwarepaket, realisiert. EPICS liefert eine Infrastruktur zum Aufbau dezentralisierter Kontrollsysteme, um beispielsweise Teilchenbeschleuniger, große Experimente oder Teleskope zu steuern. Es wurde Anfang 1989 im Los Alamos National Laboratory (LANL) entwickelt und 1991 an der Advanced Photon Source des Argonne National Laboratory (ANL) weiterentwickelt [Cla08]. Heute wird EPICS an vielen Laboren, darunter das LANL, ANL, Brookhaven National Laboratory (BNL), Paul Scherrer Institut und dem International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), verwendet.

EPICS besitzt eine dezentrale Architektur, der ein netzwerkbasiertes Client-Server-Modell mit unabhängigen Front-End-Prozessoren zu Grunde liegt. Ein derartiges Netzwerk besteht typischerweise aus vielen Fileservern, Bedienkonsolen, und hunderten von Front-End-Prozessoren, die über hunderte Meter verteilt sind (Abb. 10.1). Den Kern der EPICS Software-Architektur stellen das *Channel Access-Kommunikationsprotokoll* und die *Prozessdatenbank* dar. Auf jeder Ebene dieser Architektur stellt EPICS Schnittstellen bereit, um Erweiterungen der jeweiligen Nutzer zu unterstützen. Detaillierte Informationen zu EPICS finden sich in den Referenzen [Cla08, Dal93, Kno94].

### 10.1.1 Prozessdatenbank

Die sogenannte Prozessdatenbank ist das Herzstück eines EPICS *Input Output Controllers* (IOC). Dabei ist der Begriff Datenbank irreführend, da es sich nicht um eine Datenbank im eigentlichen Sinne handelt. Die Prozessdatenbank eines EPICS IOC besteht aus einem erweiterbaren Satz von Funktionsblöcken, die *Records* genannt werden. Jeder Record-Typ ist in der Programmiersprache *C* implementiert, und wird mittels einer Record-Library während des Startprozesses in die entsprechende IOC geladen. Eine Record-Konfigurationsdatei beschreibt in Textform die Eigenschaften jedes Records. Diese Dateien werden *EPICS Datenbank* genannt. Während der Initialisierung des IOC werden diese Konfigurationsdateien von einem Parser eingelesen und die entsprechenden Record-Instanzen werden kreiert. EPICS liefert ein breites Band an verschiedenen Record-Typen für Input-, Output- und Kontrollblöcke, die bereits ausreichen um ein komplettes Kontrollsystem aufzubauen. Zudem existieren offene Schnittstellen zur Prozessdatenbank, die es dem Nutzer erlauben eigene Record-Typen zu implementieren und hinzuzufügen. Alle logischen und lokalen Werte der Records werden in der lokalen

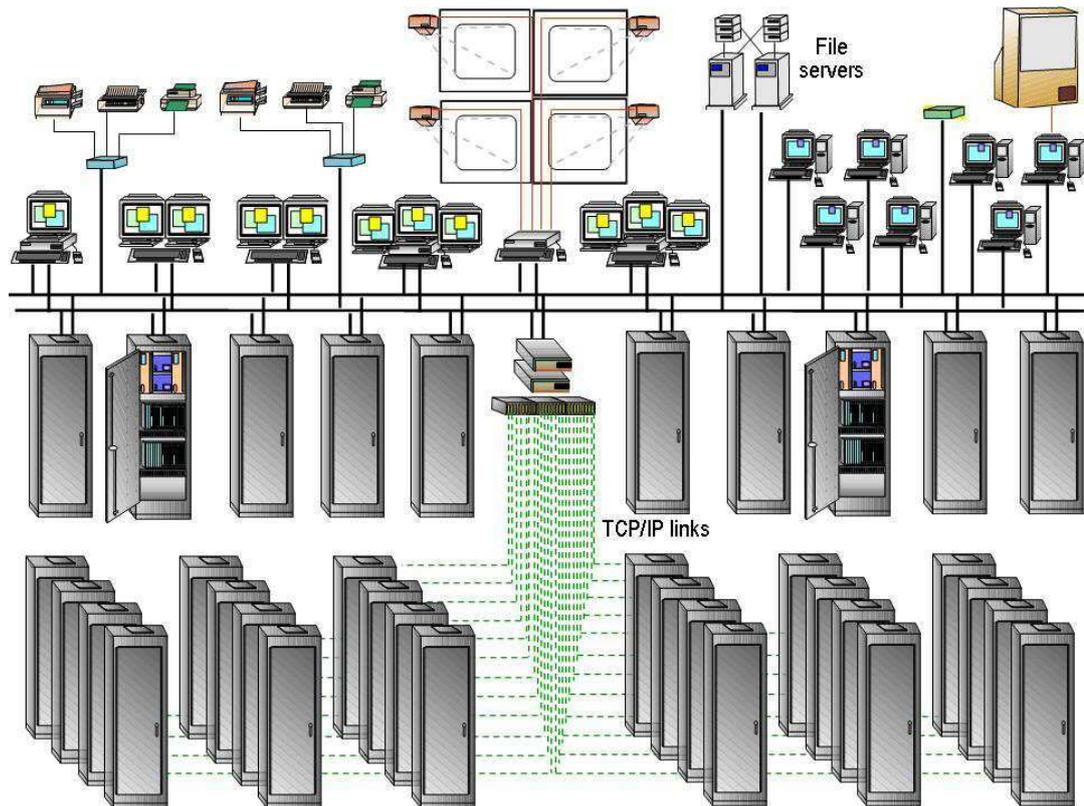


Abbildung 10.1: EPICS Architektur [Cla08]

Prozessdatenbank des IOC gespeichert und dem gesamten Netzwerk über den Channel Access Server zur Verfügung gestellt.

Es gibt drei verschiedene Varianten, ein Record zu prozessieren: Im Scan-Modus wird das Record regelmäßig abgearbeitet. Es gibt einige Standard-Scanintervalle, die vom Benutzer erweitert werden können. Die einzige Limitierung hierbei stellen die Prozessorgeschwindigkeit und die Tick-Rate des Betriebssystems dar. Die zweite Variante ist das Prozessieren eines Records, ausgelöst durch einen I/O Interrupt, beispielsweise durch Empfangen einer Nachricht auf einer Hardware-Schnittstelle. Records können auch passiv sein. In diesem Fall werden die Records entweder von anderen Records durch Prozesslinks (*Forward Links*) oder durch einen Schreibzugriff über einen Channel Access Client aktiviert.

Die unterstützten Hardware-Schnittstellen reichen von einfachen speicherbezogenen Elementen, so wie VME, bis hin zu komplexen Fernsystemen, die ein asynchrones Kommunikationsprotokoll benötigen [Cla08].

### 10.1.2 Channel Access

Der *Channel Access* (CA) ist das Netzwerkkommunikationsprotokoll von EPICS und basiert auf dem *User Datagram Protocol* (UDP) und dem *Transmission Control Proto-*

*col* (TCP). Es bietet die drei grundlegenden Kommandos 'get' (lesen), 'put' (schreiben) und 'monitor' (überwachen), die über die Channel Access Library zur Verfügung stehen. Diese Bibliothek wurde ursprünglich in C geschrieben, es gibt aber auch eine Implementierung für Java und Wrapper für Perl, Python und Tcl/Tk.

Jeder IOC stellt automatisch einen CA Server bereit, während der IOC selbst auch als CA Client fungiert. Auf diese Weise können alle IOC in einem Netzwerk Daten untereinander austauschen.

Beim CA verbindet sich ein Client nicht mit einem Record auf dem Server bzw. der IOC, sondern mit einer sogenannten *Process Variable* (PV). Records sind innerhalb der IOC in Felder (fields) aufgeteilt, die einen Teil der Daten des Records beinhalten. Beispiele für diese Felder sind das VAL-Feld (Value), das den aktuellen Wert des Records speichert, und das EGU-Feld (engineering unit), das die physikalische Einheit des Wertes in Textform speichert. Wieviele bzw. welche Felder ein Record besitzt, hängt von seinem Typ ab (s. [Sta12]). Eine Process Variable ist ein Wert mit Attributen. Der Wert der PV kommt typischerweise von einem Feld des entsprechenden Records, meistens dem VAL-Feld. Der CA Client hat dabei keinerlei Informationen über den Recordtypen, von dem der Wert stammt, sondern nur über Datentypen. Tabelle 10.1 zeigt eine Auflistung der vom CA unterstützten "primitiven" Datentypen.

CA Datentyp	Beschreibung
DBR_CHAR	8 bit character
DBR_SHORT	16 bit integer
DBR_ENUM	16 bit unsigned integer
DBR_LONG	32 bit signed integer
DBR_FLOAT	32 bit IEEE floating point
DBR_DOUBLE	64 bit IEEE floating point
DBR_STRING	40 character string

Tabelle 10.1: Primitive Channel Access Datentypen [Hil12]

Diese Datentypen stellen den Wert der PV ohne jegliche Attribute dar. Zu jedem dieser Datentypen gibt es vier Datenstrukturen, die neben dem Wert unterschiedliche Attribute besitzen (Tab. 10.2).

CA Datenstruktur	Attribute
DBR_STS_<primitive type>	Alarmstatus und Alarmschweregrad
DBR_TIME_<primitive type>	Alarmstatus, Alarmschweregrad und Zeitstempel
DBR_GR_<primitive type>	Alarmstatus, Alarmschweregrad, Einheit, Anzeigegenauigkeit, Anzeigegrenzen
DBR_CTRL_<primitive type>	Alarmstatus, Alarmschweregrad, Einheit, Anzeigegenauigkeit, Anzeigegrenzen, Kontrollgrenzen

Tabelle 10.2: Channel Access Datenstrukturen und ihre Attribute [Hil12]

Um eines der Kommandos auszuführen, stellt der CA Client zunächst eine Sammelanfrage an alle im Netzwerk befindlichen CA Server, wer die entsprechende PV hat. Der Name einer PV muss daher im gesamten Netzwerk eindeutig sein. Diese Anfrage wird entweder, falls keiner der Server die entsprechende PV besitzt, durch eine Zeitüberschreitung (timeout) beendet, oder einer der Server antwortet dem Client, dass die PV vorhanden ist. In diesem Fall bauen Client und Server eine Verbindung, die *Channel* genannt wird, auf. Je nach Art des Kommandos, kann der Client nun entweder Daten zum Schreiben senden, oder eine Anfrage zum Lesen. Der CA arbeitet dabei so viele Anfragen parallel ab, wie es die zur Verfügung stehende Netzwerkbandbreite erlaubt. Während Remote Procedure Call (RPC) basierte Protokolle auf synchrone Aufrufe wie 'get' oder 'put' limitiert sind, bietet der EPICS CA zusätzlich eine asynchrone, ereignisgesteuerte 'monitor'-Anfrage, die die effizienteste Art der Kommunikation zwischen einem Client und einem Server darstellt.

Es gibt drei verschiedene Arten der 'monitor'-Anfrage: Der Monitor, der für Anzeigen verwendet wird, sendet dem Client jedesmal den neuen Wert der entsprechenden PV, wenn die letzte Änderung eine im IOC definierte Schwelle (MDEL-Feld) überschritten hat. Der Monitor, der zu Archivierungszwecken verwendet wird, verhält sich genauso, wie der erste Monitor. Allerdings gibt es für Archivierungszwecke eine extra Schwelle im IOC (ADEL-Feld). Der dritte Monitor dient der Überwachung des Alarm-Status der jeweiligen PV und wird mit Hilfe einer Alarm-Schwelle konfiguriert. Alle diese drei Schwellen werden im IOC definiert und während jeder Prozessierung der entsprechenden Records überprüft. Auf diese Weise wird der Netzwerk-Traffic auf ein Minimum reduziert.

### 10.1.3 EPICS Module und Erweiterungen

Zu EPICS gibt es ein breites Spektrum an Modulen und Erweiterungen. Dabei wird der Begriff Modul für Programme verwendet, die in eine IOC integriert werden, und der Begriff Erweiterung für Channel Access Clients, wie beispielsweise grafische Anzeigen oder Archivierungssoftware. In diesem Abschnitt sollen die Module und Erweiterungen, die in der PANDA Slow Control Verwendung finden, näher beschrieben werden.

#### Sequencer

Der *Sequencer* führt Programme, die in der *State Notation Language* (SNL) geschrieben sind, aus. SNL ähnelt der Sprache *C* und ermöglicht das Programmieren von sequentiellen Operationen. Die Sequencer-Programme interagieren mit EPICS PVs durch Lese- und Schreibzugriffe und erlauben es auf Änderungen der Werte oder des Status der PVs zu reagieren. Ein solches SNL-Program besteht aus einer Anzahl von Zustandssets, die alle einen unabhängigen Zustandsautomaten (engl. state machine) repräsentieren. Die Zustandssets listen alle möglichen Zustände, die für dieses Set erlaubt sind, zusammen mit den Bedingungen für einen Übergang in andere Zustände des selben Sets auf. Zudem beinhalten sie Programmcode, der bei einem solchen Zustandsübergang ausgeführt wird. Zustandsübergänge können als Antwort sowohl auf den aktuellen internen Zustand, als

auch auf externe Ereignisse oder Bedingungen erfolgen. Ein einfaches Beispiel einer solchen State Machine ist in Listing 10.1 aufgeführt.

Listing 10.1: Beispiel eines Sequencerprogramms

```

1 program level_check
  float v;
  assign v to "Input_voltage";
  monitor v;
  short light;
6 assign light to "Indicator_light";

  ss volt_check {
    state light_off {
      when (v > 5.0) {
11      /* turn light on */
        light = TRUE;
        pvPut(light);
      } state light_on
    }
16
    state light_on {
      when (v < 5.0) {
        /* turn light off */
21      light = FALSE;
        pvPut(light);
      } state light_off
    }
  }
}

```

In diesem Beispiel wird der Wert einer Eingangsspannung abgetastet. Ein Licht wird eingeschaltet, wenn die Spannung größer ist als 5 V und der Zustand “Licht ist aus” (light\_off) ist. Ist der Zustand “Licht ist an” (light\_on) und die Spannung sinkt unter 5 V, so wird das Licht ausgeschaltet. Die Aktion hängt also nicht nur von der Eingangsspannung bzw. einer Bedingung ab, sondern auch vom aktuellen Zustand. Jedes SNL-Programm beginnt mit dem Word “program” und dem Namen des Programms (program level\_check). Anschließend werden die Variablen deklariert und durch assign mit einer Process Variable assoziiert. Ein Zustandsset wird mit “ss” gefolgt von dessen Name definiert (ss volt\_check { ... }). Innerhalb des Zustandssets werden die einzelnen Zustände (state ...) und die bedingten Aktionen (when (...)) definiert [Lup12].

## StreamDevice

*StreamDevice* ist ein allgemeiner Device Support für Geräte mit einer “Byte stream” basierten Kommunikationsschnittstelle. Dies bedeutet, die Geräte werden durch Senden und Empfangen von Strings im weitesten Sinne gesteuert. Diese Strings können auch nicht druckbare Zeichen und Null-Bytes enthalten. Beispiele für diese Art von Schnittstellen sind serielle Schnittstellen (RS232, RS485, ...), IEEE-488 (GPIB, HP-IP) oder

auf TCP/IP aufsetzende, Telnet-ähnliche Schnittstellen.

Konfiguriert wird StreamDevice mit einer Protokolldatei, worin in einfachem ASCII-Text die Kommandos stehen, die ein Gerät versteht, und die Antworten, die das Gerät sendet. Formatierung und Parsen von Werten wird von Formatkonvertern ähnlich der beiden C-Funktionen `printf()` und `scanf()` übernommen.

Jedes Record, das StreamDevice verwendet, führt ein in der Protokolldatei definiertes Protokoll aus, um seine Werte zu lesen oder zu schreiben. Die Protokolle können dabei einfach nur aus einem einzigen String bestehen, der gesendet werden soll, oder aus mehreren Strings, um an das Gerät zu senden und von diesem zu lesen. Dabei ist zu beachten, dass ein Protokoll immer linear, das heißt vom Anfang zum Ende, abgearbeitet wird. Es gibt keine Schleifen oder Verzweigungen.

StreamDevice konvertiert die Werte der Records aus bzw. in Strings, jedoch wird der eigentliche Austausch der Strings mit dem jeweiligen Gerät vom `asynDriver` (Asynchronous Driver Support) übernommen. Alle Standardrecords mit Device Support werden von StreamDevice unterstützt [Zim12, Kas01].

### **Grafische Benutzeroberflächen und Archivierung**

Die grafischen Benutzeroberflächen des Kontrollsystems sind für die ersten Messungen mit dem CA Client *MEDM* (Motif Editor and Display Manager) gestaltet worden. MEDM dient dem Design und der Implementierung von Benutzeroberflächen und bietet diverse Bedienelemente wie Buttons, Schieberegler, Textanzeigen und -eingaben. Es besitzt zwei Betriebsmodi: EDIT und EXECUTE. Im EDIT-Modus lassen sich die Displays erzeugen und bearbeiten, im EXECUTE-Modus werden diese ausgeführt.

Die Daten der Slow Control wurden mit dem *EPICSArchiver* in eine MySQL-Datenbank geschrieben. Der EPICSArchiver ist ein Python-basierter Channel Access Client, der die Process Variablen monitoriert und direkt in die Datenbank schreibt.

## **10.2 Control System Studio**

Die grafischen Benutzeroberflächen (*Operator interface*, OPI), die Archivierung der Daten, und die Überwachung der Alarmstatus des Kontrollsystems mit unterschiedlichen Programmen zu realisieren, hat den Nachteil, dass jedes dieser Programme individuell bedient werden muss und keine einheitliche Benutzerschnittstelle vorhanden ist. Aus diesem Grund sollen diese Aufgaben in Zukunft mit dem *Control System Studio* (CSS) realisiert werden. CSS ist eine Eclipse-basierte Sammlung von Programmen zum Überwachen und Bedienen großer Kontrollsysteme. Dabei definiert CSS eigene Schnittstellen, um Abhängigkeiten von speziellen Implementierungen zu vermeiden. Dieses Design stellt sicher, dass eine Anwendung einfach integriert oder ausgetauscht werden kann. CSS verwendet als grundlegendes Framework die *Rich Client Platform* (RCP) Eclipse. Die Eclipse RCP ist in Java geschrieben und kann auf jedem Betriebssystem, für das eine Java Virtual Machine verfügbar ist, ausgeführt werden. Eclipse basiert auf einer Plugin-Technologie und ist damit einfach erweiterbar. Die Eclipse Runtime ist die Basis einer

jeden Eclipse RCP Installation (Abb. 10.2). Runtime steuert und lädt alle verfügbaren Plugins, die der Applikation Funktionalität bereitstellen. Um neue Funktionalitäten zu

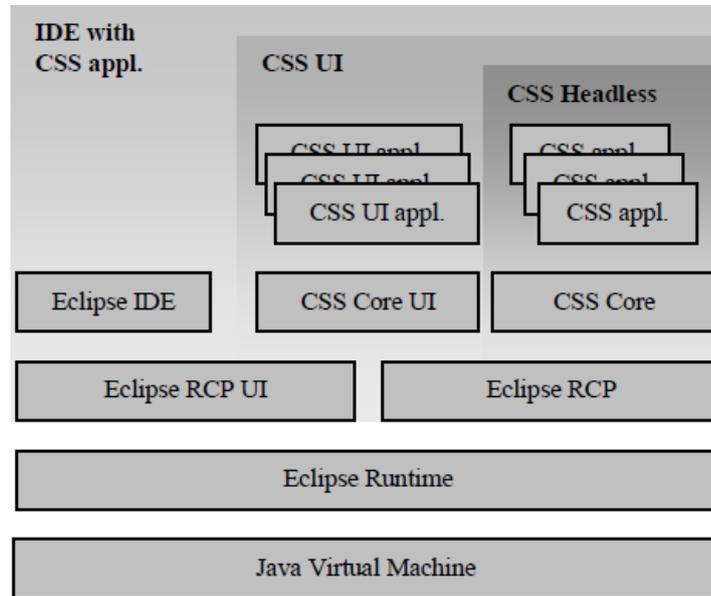


Abbildung 10.2: Eclipse IDE und Control System Studio Architektur [Hat07]

einem System hinzuzufügen, verwendet Eclipse den Extension-Point-Mechanismus. Ein Plugin definiert einen Extension Point, und ein anderes Plugin kann diesen Extension Point implementieren und zusätzliche Dienste anbieten. Ein Extension Point besteht aus Regeln für die jeweilige Erweiterung in einem XML Dokument. Im Allgemeinen muss auch ein Interface implementiert werden. Der Vorteil der Extension Points ist, dass neue Plugins mit einer Implementierung der Erweiterung einfach hinzugefügt werden können, ohne das existierende System zu ändern.

Die Eclipse RCP stellt viele allgemeine Funktionen und Anwendungen wie Menus, Einstellungen und ein Hilfesystem zur Verfügung, die über den Extension-Point-Mechanismus von CSS verwendet werden. Jedes CSS Plugin, das diese Extension Points implementiert, wird daher automatisch dem Menu bzw. der Hilfe hinzugefügt. Die Update Site der Eclipse RCP ermöglicht auf einfache Weise zusätzliche Funktionen einem existierenden CSS Programm hinzuzufügen. Dabei löst die Update Site automatisch Abhängigkeiten der zu installierenden Plugins auf und installiert diese mit. CSS definiert eigene Datentypen für “Process Variables” oder “Front-End Controller”. Eclipse beinhaltet einen Drag-and-Drop- und Object-Contribution-Mechanismus. Diese Mechanismen werden in CSS ebenfalls über Extension Points genutzt. Abbildung 10.3 zeigt ein Beispiel für den Object-Contribution-Mechanismus. Jede Zeile der Tabelle repräsentiert ein Objekt vom Typ “Process Variable”. Mit einem Rechtsklick auf eine Zeile öffnet sich ein Menu mit allen Plugins, die mit diesem Datentyp umgehen können.

Der Zugriff auf das Kontrollsystem wird über den *Data Access Layer* (DAL) realisiert und ermöglicht einen transparenten Zugriff auf alle Kontrollsystemprotokolle. Dadurch

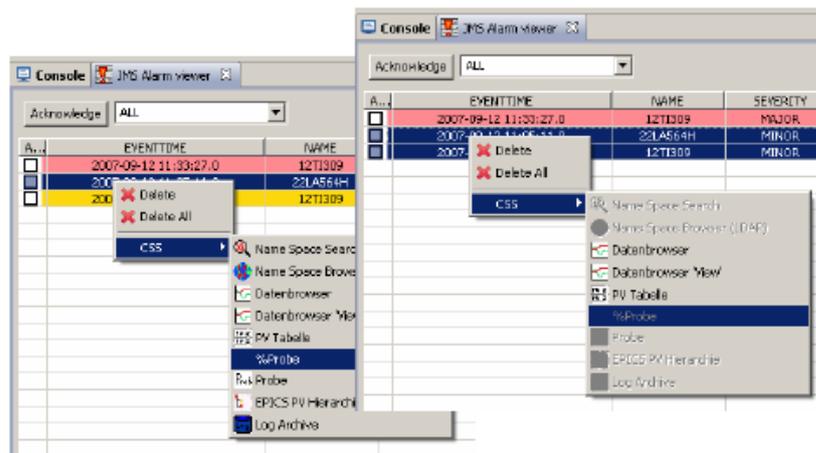


Abbildung 10.3: Beispiel für den Object-Contribution-Mechanismus [Hat07]

kann CSS nicht nur für EPICS sondern auch für andere Kontrollsysteme verwendet werden. Die Anwendungsprogrammierer-Schnittstelle (*Application Programmer Interface*, API) des DAL entkoppelt den eigentlichen Datenzugriff von der Implementierung des jeweiligen Kontrollsystems (Abb. 10.4). Die API wird im entsprechenden Plugin über

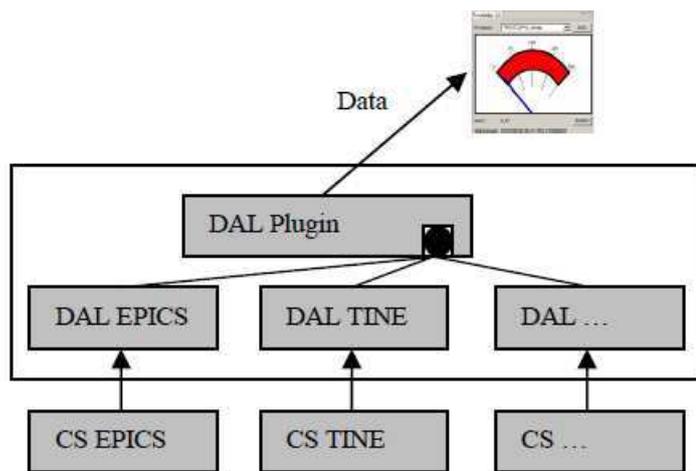


Abbildung 10.4: Architektur des Data Access Layer [Hat07]

einen Extension Point integriert. Dadurch lässt sich ein Plugin mit einer Implementierung für ein weiteres Kontrollsystem hinzufügen, ohne die CSS Core Plugins neu kompilieren zu müssen. Damit CSS entscheiden kann, welche Implementierung angewendet werden soll, müssen die Namen der Process Variablen (PV) mit dem Prefix <Kontrollsystem>://<Process Variable> beginnen. Eine *Factory*<sup>1</sup> parst den Prefix und liefert die entsprechende DAL-Implementierung zurück. Wird kein Prefix angegeben,

<sup>1</sup>Eine Factory bezeichnet in der Softwareentwicklung eine Methode, durch deren Aufruf man ein Objekt erzeugt, anstatt dieses Objekt durch Aufruf des Konstruktors zu erzeugen.

wird die in den Einstellungen angegebene Standardimplementierung verwendet. Aktuell gibt es Implementierungen für EPICS, TANGO und TINE.

CSS fügt zusätzliche Funktionen und Services für die Anwendungen hinzu. Die CSS Core Plugins beinhalten allgemeine Bibliotheken, wie die *Java Database Connectivity* (JDBC) oder *Java Message Service* (JMS), um zu verhindern, dass jede Anwendung seine eigenen Bibliotheken mitbringt. Die JDBC-Bibliothek ist eine Datenbankschnittstelle, die eine einheitliche Schnittstelle zu Datenbanken verschiedener Hersteller bietet (z.B. MySQL, PostgreSQL, Oracle SQL).

CSS bietet einen Logging Mechanismus, der auf LOG4J basiert. Dieser kann genutzt werden, um Informationen zum Laufzeitstatus der Anwendung oder zu auftretenden Fehlern zu erhalten. Die verfügbaren Methoden entsprechen der LOG4J Loglevel-Hierarchie: DEBUG, INFO, WARN, ERROR und FATAL. Die Lognachrichten können entweder über die Eclipse Konsole, das Dateisystem oder über einen JMS-Server ausgegeben werden. Aus Sicherheitsgründen ist es wichtig, Beschränkungen zu setzen, so dass nicht jeder Nutzer alle Kommandos ausführen oder alle Einstellungen ändern kann. Um dies zu gewährleisten, beinhaltet CSS einen Autoresierungs- und Authentifikationsmechanismus. Für die Authentifikation gibt es eine Implementierung, die einen Kerberos Server verwendet, die Autoresierung verwendet einen LDAP Server [Hat07, Kas07].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für das PANDA Experiment eine spezifische Version eines CSS-Produktes entwickelt. Da sich das PANDA Experiment noch in der Prototypen-Phase befindet, wird in diesem Produkt aktuell eine Dummy-Autoresierung und Authentifikation verwendet, so dass jeder Benutzername und jedes Passwort gültig sind, und keine LDAP oder Kerberos Server benötigt werden. In dieser Phase wird häufig der Standort für Strahltests gewechselt. Daher sind die Server (JMS- und Datenbankserver) auf *localhost* konfiguriert, das heißt, die Server müssen auf dem selben Rechner laufen, auf dem auch CSS ausgeführt wird. Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungen dieses CSS Produkts näher beschrieben.

### 10.2.1 OPI Builder

Die Anwendung BOY (*Best OPI, Yet*) ist eine Entwicklungs- und Laufzeitumgebung für Benutzeroberflächen (Operator Interface, OPI). Sie stellt die primäre Benutzeroberfläche einer CSS Installation dar.

BOY beinhaltet viele verschiedene Widgets zur Anzeige und Steuerung der zugrunde liegenden Kontrollsysteme (Abb. 10.5). Neben den Widgets bietet BOY auch die Möglichkeit, Regeln (Rules) zu definieren. Regeln erlauben es, die Eigenschaften der Widgets dynamisch zu gestalten. Dabei kann beispielsweise die Hintergrundfarbe eines Widgets vom Wert einer Process Variable des Kontrollsystems abhängig gestaltet werden. Die Regeln werden dabei durch Bedingungen und entsprechenden Aktionen aufgebaut. Intern werden diese Rules von BOY in Javascript umgewandelt und in das OPI eingebettet. Listing 10.2 zeigt ein solches Javascript, das aus einer Regel erstellt wurde. Die Regel ändert je nach Wert der Process Variable die Hintergrundfarbe des Widgets auf grün oder rot. Der Name der Process Variable steht in der Variable pvs[0]. Pro Wid-

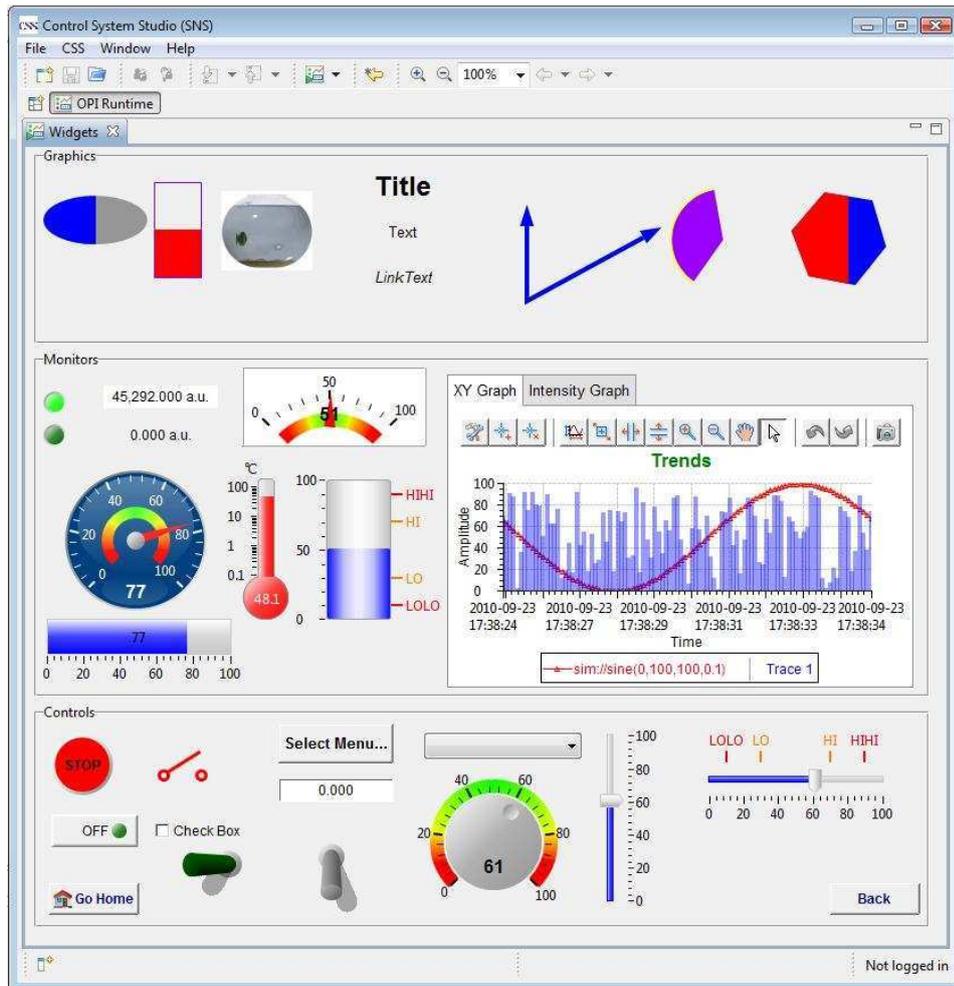


Abbildung 10.5: Beispiele der BOY Widgets [Kas11]

get können beliebig viele Rules definiert werden.

Zudem kann man die bereits vorhandene Funktionalität eines OPI durch eigene Scripte, die in Javascript oder Python Script geschrieben werden, erweitern.

Textbasierte Eigenschaften können in BOY sogenannte Macros enthalten. Zu diesen Eigenschaften zählen u.a. die Namen der Process Variablen, Tooltips und Rules. Macros werden in der Form  $\{\text{macro}\}$  oder  $\$(\text{macro})$  angegeben. Während der Laufzeit werden diese Macros mit den entsprechenden Werten ersetzt. Dies erlaubt es zum Beispiel auf einfache Weise ein OPI zu duplizieren, indem man nur den Wert der Macros ändert [Kas11].

### 10.2.2 Archiver und Data Browser

Zur Archivierung der Daten dient die Anwendung *BEAUTY* (Best Ever Archive Toolset, Yet). Eine sogenannte *Archive Engine* sammelt die PV-Datensamples von einem Front-End-Computer, z.B. einer EPICS IOC über Channel Access, und speichert diese in einem

Listing 10.2: Erzeugtes Javascript einer Regel in CSS-Boy

```

importPackage(Packages.org.csstudio.opibuilder.scriptUtil);
var pv0 = PVUtil.getDouble(pvs[0]);
if( pv0 == 30 )
    widget.setPropertyValue("background_color", "Green");
5 else
    widget.setPropertyValue("background_color", "Red");

```

Datenspeicher (Abb. 10.6). Ein möglicher Datenspeicher der BEAUTY-Engines sind relationale Datenbanken (RDB). Der Zugriff auf die Datenbank erfolgt über die JDBC-Bibliothek und ermöglicht somit die Nutzung von MySQL, PostgreSQL oder Oracle SQL Datenbanken. Die Konfiguration einer Engine wird dabei in der selben Datenbank

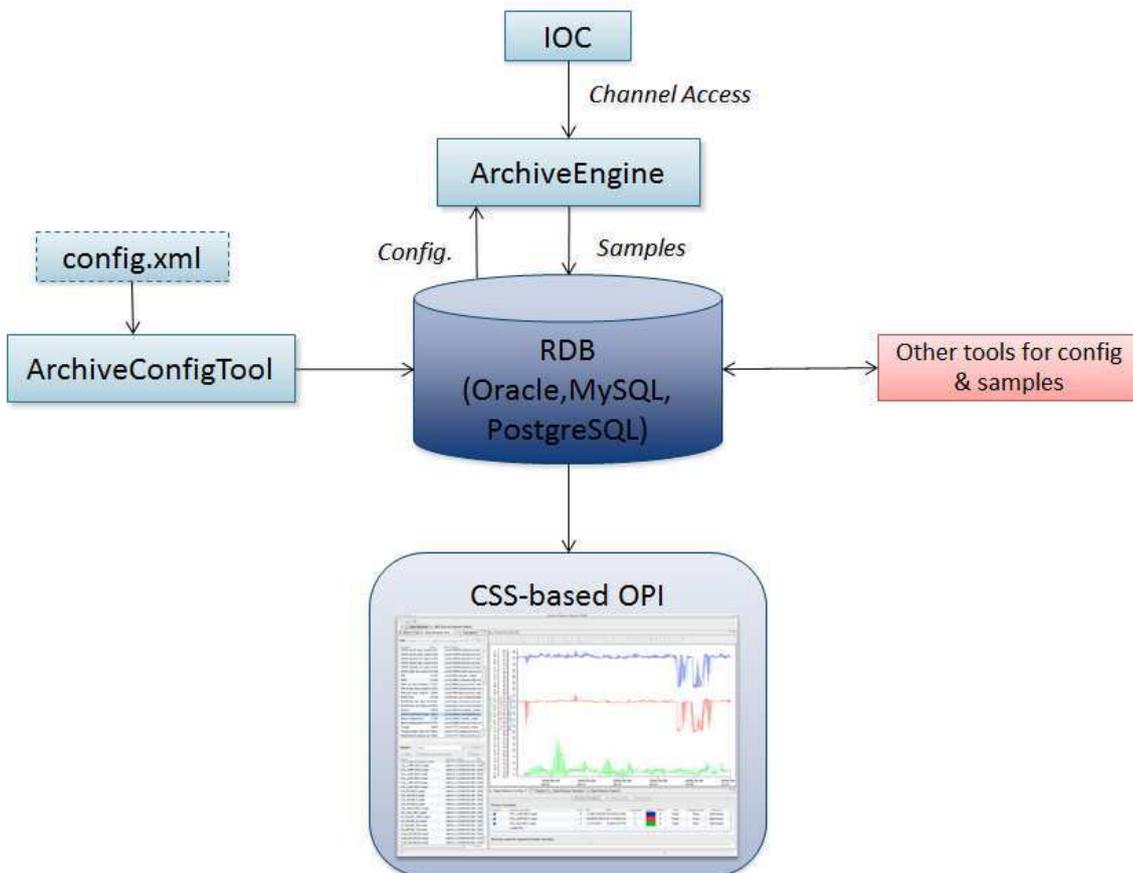


Abbildung 10.6: Übersicht über das Archivierungssystem BEAUTY [Kas11]

gespeichert. Diese Konfiguration kann aus einem XML Dokument importiert, oder in ein XML Dokument exportiert werden. Für das PANDA Experiment wird aktuell eine PostgreSQL-Datenbank verwendet.

Jede Archive Engine-Konfiguration beinhaltet mindestens eine Gruppe, in der Kanäle zusammengefasst werden. Gruppen sind dabei nicht hierarchisch, das heißt es gibt keine Untergruppen innerhalb einer Gruppe. Die Gruppen dienen in erster Linie nur der Gliederung der Konfiguration, sie sind nach außen für den Endnutzer nicht sichtbar. Die Archivierung aller Kanäle einer Gruppe kann, basierend auf einem Kanal dieser Gruppe, aktiviert bzw. deaktiviert werden, ohne die Konfiguration der Engine zu ändern. Diese Funktionalität kann genutzt werden, um beispielsweise die Archivierung des Rauschens einer Spannungsversorgung zu vermeiden, während diese ausgeschaltet ist. Ein Kanal ist im Grunde der Wert einer PV. Die Kanäle werden durch ihre Namen identifiziert. Daher müssen die Namen gültigen PV Namen des Kontrollsystems entsprechen. Die Samples, die für einen Kanal gespeichert werden, beinhalten nicht nur den Wert, sondern auch den Zeitstempel, Alarmstatus und Alarmschweregrad.

BEAUTY unterstützt verschiedene Samplemodi. Diese Modi entscheiden, welche Samples in die Datenbank geschrieben werden. BEAUTY hat dabei keinen Einfluss darauf, welche Änderungen vom Kontrollsystem gesendet werden. Da jedoch Speicherplatz und andere Ressourcen (CPU Leistung, Netzwerkbandbreite, etc.) begrenzt sind, ist es oft wichtig, nicht alle Samples zu speichern. Daher bietet BEAUTY die folgenden Modi, um Samples von einem Kanal zu sammeln:

Im Modus “monitored” wird jedes empfangene Sample gespeichert. Die einzige Bedingung zur Speicherung liefert hier das Kontrollsystem. Im Falle von EPICS wird dies über das *ADEL*-Feld des jeweiligen zugrundeliegenden Records gesteuert (s. Abschn. 10.1.2). In diesem Modus muss die vorraussichtliche Zeitspanne zwischen den Änderungen der PV konfiguriert werden, damit die Archive Engine einen angemessenen Speicherpuffer reservieren kann.

Der zweite Modus ist der “monitored with threshold” Modus. Dieser Modus ähnelt dem ersten “monitored”-Modus, allerdings wird hier eine weitere Schwelle hinzugefügt. Idealerweise übernimmt bereits das Kontrollsystem die Schwellwertbildung, so dass nur signifikante Änderungen über das Netzwerk an die Archive Engine gesendet werden. In einigen Fällen kann dies jedoch nicht möglich sein. In diesen Fällen kann die Archive Engine selbst die Änderungen der Werte überprüfen und nur Samples speichern, die vom zuletzt gespeicherten Sample um eine konfigurierbare Schwelle abweichen.

Der “scanned” Modus erhält immer noch alle Änderungen vom Kontrollsystem, allerdings speichert er nur das jeweils letzte empfangene Sample nach einer gewissen Zeit, zum Beispiel alle fünf Minuten. Dieser Modus stellt jedoch nur einen Kompromiss dar und wurde für Kanäle entwickelt, bei denen sich keine geeignete Schwellen-Konfiguration finden lässt.

Die Samples, die von den verschiedenen Modi gesammelt werden, werden nicht direkt in die Datenbank geschrieben. Stattdessen werden diese im Speicher des Computers zwischengespeichert und werden im Ganzen in die Datenbank geschrieben. Die Schreibperiode ist standardmäßig 30 Sekunden [Kas11].

Die von BEAUTY gesammelten Samples können innerhalb von CSS mit dem *Data Browser* angezeigt werden. Der Data Browser ist eine Anwendung zur graphischen Darstellung der Trends einer Process Variable. Er kann sowohl den zeitlichen Verlauf der Werte von Process Variablen “live” darstellen, als auch historische Daten.

Livedarstellung bedeutet, dass der Data Browser Samples der jeweiligen Process Variable vom Kontrollsystem sammelt und deren zeitlichen Verlauf aufträgt. Der Data Browser kann aber auch auf andere Datenquellen zugreifen, um den zeitlichen Verlauf vor dem Livesamplepuffer anzuzeigen. Eine dieser Datenquellen ist die von BEAUTY genutzte Datenbank.

### 10.2.3 Alarmhandler

Der Alarmhandler *Best Ever Alarm System Toolkit* (BEAST) stellt die Alarme und die dazugehörigen Informationen dar. Der Aulsöser eines Alarms sind die Process Variablen (PV) des Kontrollsystems. Der Alarmhandler überwacht solche PVs und löst einen Alarm aus, sollte eine von ihnen einen nicht normalen Schweregrad (engl. *Severity*) aufweisen.

EPICS bietet hierfür zwei Schweregrade: “MINOR” und “MAJOR”. Mit den Feldern HIGH, HIHI, LOW und LOLO lassen sich verschiedene Grenzen zur Auslösung eines Alarms definieren. Jeder dieser Grenzen kann mit den Feldern HHSV, HSV, LSV und LLSV ein Schweregrad zugeordnet werden. Der Schweregrad “MINOR” wird dabei als Warnung, und der Schweregrad “MAJOR” als Alarm verwendet.

Der Alarmhandler wird typischerweise einen Alarm beibehalten, selbst wenn die Bedingungen für den Alarm innerhalb der PV nicht mehr erfüllt sind, also der Wert der PV wieder innerhalb der Alarmgrenzen liegt. Sollte die PV anschließend in einen Alarmstatus eintreten, wird kein neuer Alarm ausgelöst. Die Benutzeroberfläche des Alarmhandlers zeigt den aktuellen Alarmstatus der PV an. Sobald der Benutzer auf den ursprünglichen Alarm reagiert hat, kann er den Alarm quittieren. Damit wird der Alarmstatus innerhalb von BEAST zurückgesetzt.

Ein Alarm kann aber auch so konfiguriert werden, dass dieser nicht beibehalten wird und damit auch nicht quittiert werden muss. Der Alarmstatus wird zurückgesetzt, sobald die PV wieder zu ihrem normalen Status zurückkehrt. Dieser Modus wird für PVs verwendet, deren Alarmstatus bereits im Kontrollsystem beibehalten wird. Ein Beispiel einer solchen PV ist die “trip”-Bedingung einer Spannungsversorgung, die einen manuellen Reset des Gerätes erfordert. Dieser manuelle Reset ist äquivalent mit der Quittierung des Alarms.

Den wichtigsten Teil von BEAST stellt der *Alarm Server* dar (Abb. 10.7). Der Alarm Server liest seine Konfiguration aus einer relationalen Datenbank und überwacht die Alarmstatus der PVs im Kontrollsystem. Der Alarm Server führt das oben beschriebene Beibehalten des Alarms aus. Wenn sich der Scheregrad einer PV ändert, aktualisiert der Server die Benutzeroberfläche (GUI) über den JMS (Java Message Service), der Alarm wird jedoch beibehalten. Wird ein Alarm in der GUI quittiert, sendet diese eine Quittierungsanfrage über JMS an den Server. Der Server antwortet mit dem aktualisierten, zurückgesetzten Alarmstatus. Zusätzlich aktualisiert der Alarm Server auch die Alarmstatus in der relationalen Datenbank (RDB). Dies erlaubt es, neu gestarteten Alarm-GUIs den anfänglichen Status aller Alarme zu erhalten. Der anhaltende Alarmstatus in der RDB erlaubt es ausserdem, den Alarm Server neu zu starten, ohne die aktuellen Alarmstatus zu verlieren. Die Alarm-GUIs können die Alarmhandler Konfiguration in

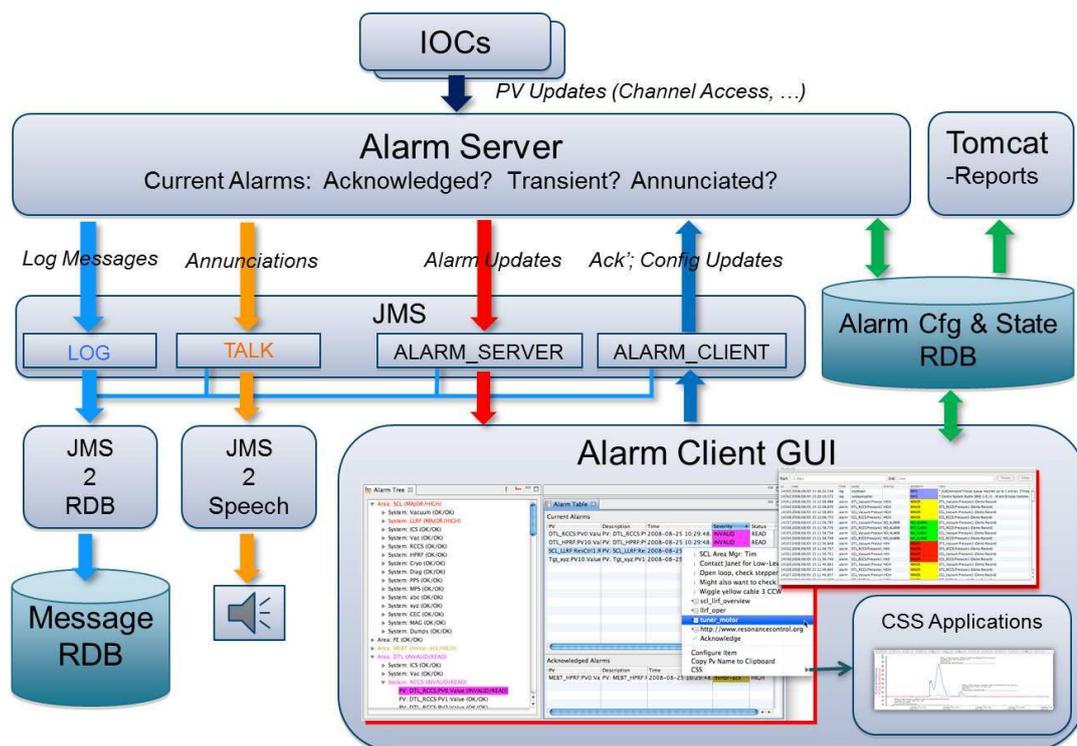


Abbildung 10.7: Übersicht über den Alarmhandler BEAST [Kas11]

der RDB ändern. Der Alarm Server und andere Alarm-GUIs werden über JMS über die Änderungen informiert und lesen die neue Konfiguration aus der Datenbank. Der Alarmmelder (engl. annunciator) wird über Alarme, die gemeldet werden sollen, ebenfalls über JMS vom Alarm Server informiert. Da die gesamte Kommunikation der einzelnen Teile des Alarmhandlers über JMS abläuft, kann ein einfacher JMS-zu-RDB Logger alle Nachrichten zur späteren Prüfung und Analyse in eine Datenbank schreiben [Kas11].

# 11 Der Prototyp der EMC

## Vorwärtsendkappe 'Proto192'

### 11.1 Aufbau des Prototypen

Der *Proto192* ist ein Prototyp der Vorwärtsendkappe des PANDA-EMCs, der aus 216 PWO-Kristallen besteht und den inneren Teil eines Quadranten nachbildet. Mit dem *Proto192* sollen die Konstruktion, Montage, Kühlung und die Auslese der Kristalle getestet und eventuelle Schwierigkeiten geklärt werden.

Die Auslese der Kristalle wird zur Zeit mit vier verschiedenen Photodetektortypen durchgeführt, um den für PANDA am Besten geeigneten zu finden. Dabei werden Large Area Avalanche Photodioden (LAAPD), Vakuum Phototrioden (VPT) und Vakuum Phototetroden (VPTT) von der Firma Hamamatsu und VPTTs der Firma RIE eingesetzt. Die PWO-Kristalle werden in  $4 \times 4$ -Matrizen gruppiert (Subunits). Jede dieser Matrizen wird von einer Kohlefaser-Struktur, einer *Alveole* gehalten. Der Aufbau einer solchen Subunit ist in Abbildung 11.1 gezeigt. Die Alveolen haben die Form eines Pyramidenstumpfes,

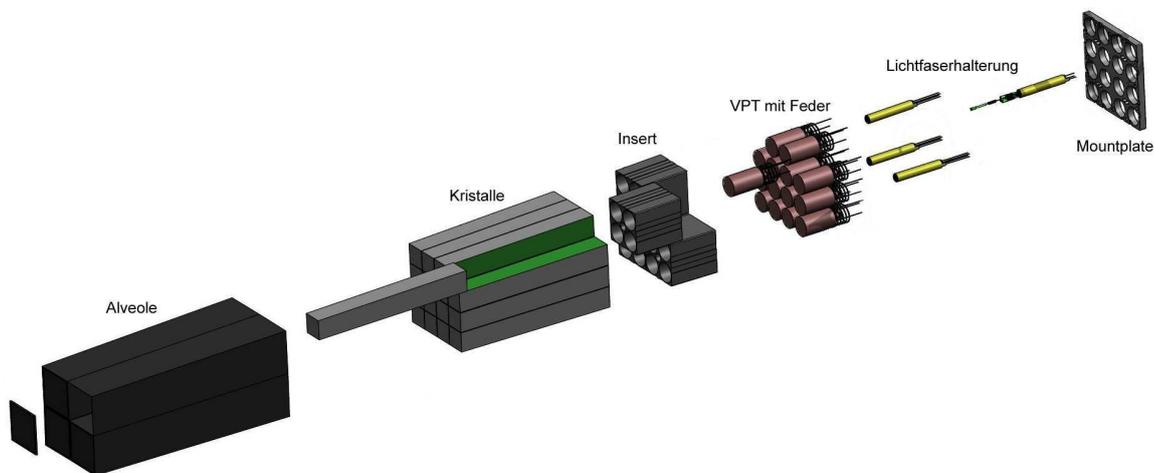


Abbildung 11.1: Explosionsansicht einer Alveole

in dem sich jeweils 16 Kristalle befinden. Um die Kristalle in Position zu halten, befinden sich zwischen diesen Kohlefaserkreuze (in obiger Abbildung als grüne Fläche auf den Kristallen dargestellt). Hinter den Kristallen werden die sogenannten *Inserts* in die Alveole eingeklebt. Die Inserts dienen dabei der Halterung der Photodetektoren und der Lichtfasern und ermöglichen die Montage einer Alveole an der *Mountplate*.

Die Lichtfasern leiten die Signale eines Lichtpulsers auf die Kristalle, welcher der Kalibration und der Überwachung der optischen Transmission der Kristalle dient. Da die Kristalle im Experiment hoher Strahlung ausgesetzt sind, entstehen in ihnen Strahlenschäden, die u.a. die Transmission beeinträchtigen [Fel09]. Details zum Lichtpulsersystem können in [Mot12] nachgelesen werden.

Die Längsachse der Kristalle zeigt im PANDA-Experiment nicht auf den eigentlichen Wechselwirkungspunkt, sondern auf einen Punkt auf der Strahlachse, der sich 10 cm hinter dem Wechselwirkungspunkt in Strahlrichtung befindet. Dies soll verhindern, dass Teilchen, die direkt vom Wechselwirkungspunkt kommen, zwischen zwei Kristallen hindurch fliegen ohne detektiert zu werden. Die Alveolen werden deshalb mit verschiedenen Winkelstücken an der *Backplate* montiert. Die Backplate ist dabei ein wichtiger Teil der Endkappe bzw. des Prototypen. Sie stellt nicht nur die eigentliche Haltestruktur für alle Alveolen dar, sondern auch das Hauptkühlungssystem. Im Inneren der Backplate sind mehrere parallel verlaufende Kühlkanäle gebohrt, durch welche die Kühlflüssigkeit geleitet wird. Diese Konstruktion stellt den optimalen Wärmeübergang von der Kühlflüssigkeit zu den Kristallen dar. Der Prototyp wird genau wie die Endkappe auf  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  gekühlt (s. Abschnitt 9.3.1). Es ist daher wichtig, die Luft im Inneren des Prototypen trocken zu halten, so dass sich durch den Abkühlprozess kein Eis bilden kann. Zu diesem Zweck wird der Prototyp mit getrockneter Druckluft gespült [Fri12]. Um den Prototypen mit der Druckluft nicht aufzuwärmen, wird die Luft vorher ebenfalls auf  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  gekühlt. Insgesamt gibt es im Prototypen drei unabhängige Kühlkreisläufe: Die Hauptkühlung in der Backplate, die Kühlung der Druckluft, und eine Front-Kühlung [Bec12]. Es ist wichtig zu beachten, dass der Prototyp luftdicht geschlossen wird, damit keine Luftfeuchtigkeit von außen in das Innere des Prototypen diffundiert. Zudem sollten Wärmeübergänge minimiert werden. Alle elektrischen Verbindungen, die das Innere des Prototypen mit der Außenwelt verbinden, werden daher mit Platinen realisiert. Die Platinen werden in einen Alurahmen eingeklebt, der in einen Kunststoffrahmen geschraubt wird, um die Platinen luftdicht mit der Backplate und der hinteren Hülle des Proto192 verbinden zu können (Abb. 11.2). Dabei wurden drei verschiedene Typen von Platinen entwickelt. Eine Platine dient der Hoch- und Niederspannungsversorgung der Photodetektoren und Vorverstärker, eine der Durchführung der Signale der Photodetektoren und eine Letzte der Durchführung der Signale und Versorgungsungen von Sensoren. Die Sensoren dienen der Überwachung der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und des Drucks im Inneren des Prototypen. Details zum Aufbau des Proto192 werden in [Sch12] näher beschrieben.

Die Lichtausbeute der Kristalle variiert bei  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  um etwa  $4\%/K$ . Aus diesem Grund muss ein Temperaturgradient  $< 0,1\text{ K/cm}$  entlang der Kristalle gewährleistet werden. Die Temperatur muss sowohl räumlich als auch zeitlich konstant gehalten werden. Dies erfordert es, die Temperatur entlang der Kristalle zu messen, um auf eventuelle Temperaturschwankungen reagieren zu können. Zudem ist auf Grund der großen Temperaturabhängigkeit der Lichtausbeute der Kristalle eine genaue Kenntnis der Temperatur für die Kalibration des EMC vonnöten.

Zwischen den Kristallen und der Alveole sind nur ungefähr  $100\text{ }\mu\text{m}$  Platz, so dass kommerzielle Temperatursensoren nicht eingesetzt werden können. Daher wurden für das

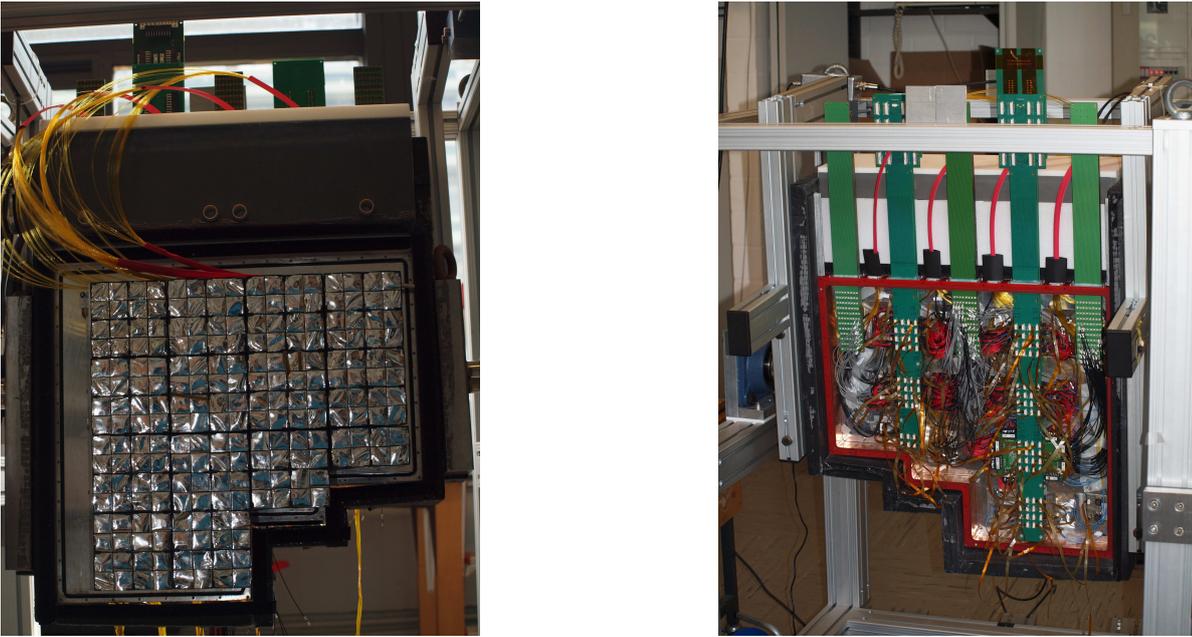


Abbildung 11.2: Der Prototyp der EMC Vorwärtsendkappe 'Proto192'. Links: Ansicht von vorn bei geöffneter Fronthülle; Rechts: Ansicht von hinten bei geöffneter Hülle. Auf dem Bild sind die Platinen zur Durchführung elektrischer Signale zu sehen.

EMC spezielle PT100-Temperatursensoren entwickelt. Diese Sensoren werden direkt mit einem Kabel verbunden und durch kleine Nuten an den Außenseiten der Inserts, an der Mountplate vorbei, durch ein Loch in der Backplate, zu einer der Sensor-Platinen geführt. Das Trägermaterial des Sensors und Kabels besteht aus einer mit Kupfer beschichteten Polyamidfolie, auf die vier Leiterbahnen mit einem Pitch von 1 mm als Kabel geätzt werden. Der Sensor selbst besteht aus einem 25  $\mu\text{m}$  dicken Platindraht. Details zur Fertigung der Sensoren und Kabel finden sich in den Referenzen [Fri12, Sch12].

Die PT100-Sensoren werden mittels einer Vierdraht-Messung ausgelesen. Dabei werden die Sensoren über zwei Drähte mit einem Konstantstrom von 1 mA versorgt, und über zwei weitere Drähte wird der Spannungsabfall über den Sensor stromlos gemessen. Durch dieses Verfahren kann der Widerstand des Kabels vernachlässigt werden. Da der Strom bekannt ist, kann man auf den Widerstand des Sensors schließen. Die Stromversorgung und die Digitalisierung des gemessenen Spannungsabfalls werden mit dem *Temperature and Humidity Monitoring Board for PANDA* (THMP) durchgeführt (s. Abschnitt 11.3). Der THMP dient auch der Auslese der Luftfeuchtigkeits- und Drucksensoren.

## 11.2 Kontrollsystem des Prototypen

Das Kontrollsystem des Proto192 ist mit EPICS realisiert worden. Da EPICS-Kontrollsysteme auf Grund der netzwerkbasierter Architektur nahezu frei skalierbar sind, kann der Pro-

to192 auch als Prototyp der PANDA Slow Control angesehen werden.

Mit der Slow Control werden im Prototypen die Hochspannungsversorgungen der Photodetektoren, ein VME-Crate, ein Lichtpulser, drei Kühler und die THMPs überwacht und gesteuert.

Die Hochspannungsversorgung, das VME Crate, der Lichtpulser und die THMPs werden über einen CAN-Bus (Controller Area Network) ausgelesen bzw. gesteuert. Die drei Kühler sind über serielle Schnittstellen (RS232) mit dem PC verbunden.

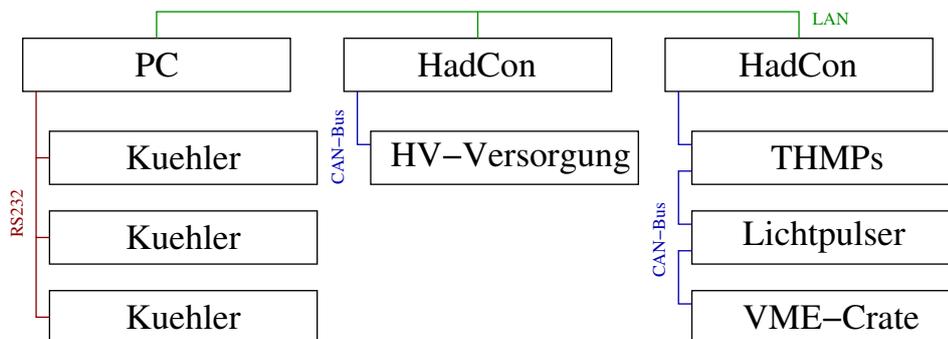


Abbildung 11.3: Schematischer Aufbau des Kontrollsystems des Proto192

Der *HadCon* (HADES Control general purpose board), ein Vielzweck-I/O-Modul für Kontroll- und kleine Datenerfassungssysteme, wird im CAN-Bus als Kontrollrechner eingesetzt. Den wichtigsten Teil des HadCons stellt die ICU (Integrated Control Unit), *ETRAX 100LX MCM 4+16* der Firma AXIS, dar. Der HadCon verfügt über eine TCP/IP Verbindung und kann über das Telnet-Protokoll gesteuert werden. EPICS und dessen Module können für die Axis' Cris-Architektur cross-kompiliert werden, so dass sich diese ICU als Front-End Computer in einem EPICS basierten Kontrollsystem einsetzen lässt. Die ICU ist über eine serielle Schnittstelle mit einem Mikrocontroller (AT90CAN128 der Firma ATMEL) verbunden, der einen integrierten CAN-Bus Controller besitzt. Die Kommunikation zwischen ICU und Mikrocontroller basiert auf ASCII-Zeichenketten, die mit dem Zeilenvorschubzeichen (line-feed, LF) abgeschlossen werden. Die zu übertragenden Daten werden dabei in einer Hexadezimalschreibweise als ASCII-Zeichen übertragen. Da der Mikrocontroller nicht nur über einen CAN-Bus Controller, sondern auch über andere Schnittstellen und Funktionalitäten verfügt, beinhalten die ersten vier Zeichen einer Übertragung ein Schlüsselwort, das die entsprechende Aktion auf dem Mikrocontroller kodiert. Zum Senden einer Nachricht über den CAN-Bus wird beispielsweise das Schlüsselwort SEND verwendet, während empfangene Nachrichten vom Mikrocontroller mit dem Schlüsselwort RECV versehen werden [Zum12].

Eine Nachricht auf dem CAN-Bus wird als *Frame* bezeichnet und besteht aus sieben Kennfeldern. Man unterscheidet die Frames nach Länge des Identifiers: Standard-Frames (2.0A) haben einen 11 Bit-Identifier und Extended-Frames (2.0B) einen 29 Bit-Identifier. Zusätzlich unterscheidet man zwischen Data- und Remote-Frames. Zur Unterscheidung dieser vier Typen dienen die beiden Felder IDE (Identifier extension bit), das zwischen Standard und Extended Frames unterscheidet, und RTR (Remote Transmission Re-



Abbildung 11.4: HADES Control general purpose board, HadCon [Zum12]

quest), das zwischen Data und Remote Frames unterscheidet [ME12]. Remote Frames stellen dabei nur eine Aufforderung zum Senden dar und beinhalten kein Datenfeld. Tabelle 11.1 zeigt den Aufbau der verschiedenen Frames. Obwohl der Data Length Code (DLC) vier Bit umfasst, ist die maximale Länge eines CAN-Frames auf acht Datenbytes beschränkt.

Die Programmierung des Mikrocontrollers auf dem HadCon unterstützt aktuell nur Standard Frames. Die Zeichenketten zum Senden bzw. Empfangen von CAN Nachrichten sind:

```
SEND id id-msk rtr dlc  $d_0$  ...  $d_7$ 
```

```
RECV mob id dlc  $d_0$  ...  $d_7$ 
```

Dabei repräsentieren  $d_0 - d_7$  die acht möglichen Datenbytes eines Frames. Die Felder id-msk und mob haben derzeit keine Funktion. Alle Felder werden in diesen Zeichenketten durch ein Leerzeichen voneinander getrennt.

Im Folgenden werden Details zur Implementierung des EPICS-Kontrollsystems für die jeweiligen Geräte präsentiert. Auf die Ansteuerung des Licht-Pulsers wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen. Details hierzu finden sich in [Mot12]. Die Ansteuerung des THMP wird in Abschnitt 11.3.2 genauer beschrieben. Um die Auslese aller Geräte, die am selben CAN-Bus angeschlossen, sind zu koordinieren, werden Sequence-Records eingesetzt. Diese Records erlauben es, mehrere Output-Links zu definieren, die mit individuellen Verzögerungen ausgeführt werden. Da der Kontrollrechner des CAN-Bus alle Nachrichten empfangen und verarbeiten muss, ist es wichtig darauf zu achten, dass die einzelnen Records nicht gleichzeitig, sondern nacheinander ausgeführt werden.

Feldname	Länge in Bit	Zweck
Standard (2.0A)		
Start	1	Markiert den Beginn eines Frames
Identifizier	11	Identifizier und Priorität der Nachricht
RTR	1	Bestimmt ob Data(0) oder Remote(1) Frame
IDE	1	Muss 0 sein
Reserviert	1	
DLC	4	Anzahl der Datenbytes (0-8)
Daten	0-64	Muss bei Data Frames der DLC entsprechen
CRC	15	Cyclic Redundancy Check
ACK	2	Acknowledgement der Transmitter und Receiver
EOF	10	Markiert das Ende eines Frames
Extended (2.0B)		
Start	1	Markiert den Beginn eines Frames
Identifizier A	11	Erster Teil des Identifiers
Substitute RTR	1	Muss 1 sein, dient der Kompatibilität zu 2.0A
IDE	1	Muss 1 sein
Identifizier B	18	Zweiter Teil des Identifiers
RTR	1	Bestimmt ob Data(0) oder Remote(1) Frame
Reserviert	2	
DLC	4	Anzahl der Datenbytes (0-8)
Daten	0-64	Muss bei Data Frames der DLC entsprechen
CRC	15	Cyclic Redundancy Check
ACK	2	Acknowledgement der Transmitter und Receiver
EOF	10	Markiert das Ende eines Frames

Tabelle 11.1: Aufbau der CAN Frames [ME12]

### Steuerung der Hochspannungsversorgung

Je nach Typ der Photodetektoren werden unterschiedliche Hochspannungen (HV) als Betriebsspannung benötigt. Zur Erzeugung dieser Hochspannungen werden zwei verschiedene Module der Firma ISEG eingesetzt: Das *EHS 8 210p-F* ist ein 8-Kanal HV Netzteil mit einer maximalen Ausgangsspannung von 1 kV und einem maximalen Strom von 8 mA pro Kanal. Das zweite Modul ist das *ISEG EHS 8 620p-F*, welches eine maximale Ausgangsspannung von 2 kV und maximal 4 mA pro Kanal, bei acht Kanälen, liefert. Zur Steuerung und Versorgung befinden sich diese Module in einem Crate mit einem eigenen Controller, der das CAN-Interface beinhaltet (Abb. 11.5). Pro Crate können bis zu acht Module eingesetzt werden, die je nach Steckplatz eine CAN-ID zugewiesen bekommen. Die ID wird dabei von links nach rechts mit 0 beginnend hochgezählt. Am Crate Controller selbst befindet sich ein Kodierschalter mit acht Positionen, mit dem die CAN-ID zusätzlich verändert werden kann. Somit lassen sich bis zu acht Crates (64 Module) an einem gemeinsamen CAN-Bus betreiben. Die Module verwenden Standard-Datenframes zur Kommunikation. Die CAN-ID setzt sich dabei folgendermaßen zusammen:



Abbildung 11.5: Hochspannungsversorgung von ISEG. Rechts im Crate ist der Crate Controller mit angeschlossenem CAN-Bus zu sehen. Links sind vier Module eingesetzt

Bit	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Wert	0	1	$A_5$	$A_4$	$A_3$	$A_2$	$A_1$	$A_0$	0	0	$DD$

Die Bits 6-8 bzw. deren Werte  $A_5 - A_3$  stellen dabei den Wert des Kodierschalters des Crate Controllers dar, während  $A_2 - A_0$  die jeweilige Moduladresse innerhalb des Crates repräsentieren. Die Richtung der Daten (Lese- oder Schreibzugriff) wird mit dem letzten Bit ( $DD$ ) kodiert. Die Module verwenden zur Filterung der CAN Frames einen Akzeptanzfilter, so dass nur Nachrichten mit dem entsprechenden Identifier empfangen werden. Die Firmware der Module bietet aber auch die Möglichkeit Broadcast-Nachrichten zu versenden, die von allen Modulen empfangen werden. Diese Broadcast-Nachrichten können dazu genutzt werden, alle Module gleichzeitig ein- bzw. auszuschalten, oder alle Module auf dieselbe Spannung zu setzen. Welches Kommando gesendet wird, wird in den ersten beiden Datenbytes der Frames definiert.

Die Werte der Spannungen, Ströme und die Modultemperatur werden als 32-Bit IEEE Fließkommazahlen (**float**) kodiert. Dies stellt bei der Übertragung mit dem Had-Con ein Problem dar, da diese Fließkommazahlen in vier Bytes aufgeteilt und in eine ASCII-Zeichenkette in hexadezimaler Schreibweise konvertiert werden müssen. Zur Konvertierung in ASCII-Zeichen kann der Formatkonverter `%x` von StreamDevice verwendet werden. Dieser Formatkonverter gibt vorzeichenlose, ganzzahlige Werte (**unsigned int**)

als Hexadezimalwert in ASCII-Zeichen aus. Um eine Spannung setzen zu können, muss jedoch das float in vier unsigned int Werte zerlegt werden. Für diese Zerlegung werden Subroutine-Records verwendet. Diese Recordtypen besitzen keine eigene Prozedurmethode, sondern können einen einfachen, in C geschriebenen Code ausführen. Listing 11.1 zeigt die entsprechende Subroutine, die zur Zerlegung der floats verwendet wird.

Listing 11.1: Subroutine zur Zerlegung eines floats in vier bytes

```

union conv{
    float float_val;
    unsigned int int_val;
};
5
static long splitFloat ( subRecord* prec ) {
    union conv floatToInt;
    floatToInt.float_val = (float)prec->val;
10
    prec->a = ( floatToInt.int_val & 0xFF000000 ) >> 24;
    prec->b = ( floatToInt.int_val & 0x00FF0000 ) >> 16;
    prec->c = ( floatToInt.int_val & 0x0000FF00 ) >> 8;
    prec->d = ( floatToInt.int_val & 0x000000FF );
15
    return 0;
}

```

Der Rückgabewert einer Subroutine ist vom Typ **long** und hat im Normalfall den Wert 0. Als Parameter wird der Methode ein Pointer auf das Record, welches diese Methode aufruft, übergeben. Der aktuelle Wert des VAL-Feldes des Records wird in einer **union** als **float** gespeichert. Eine **union** erlaubt in C verschiedenen gleichgroßen Datentypen einen gemeinsamen Speicherbereich zu teilen. In diesem Fall teilen sich die 32-Bit großen Datentypen **float** und **unsigned int** einen gemeinsamen Speicherbereich. Dadurch kann der zuvor als **float** gespeicherte Wert des VAL-Feldes anschließend als **unsigned int** weiterverwendet werden. Der Wert wird mit bitweisem Und-Operationen in seine vier Byte aufgeteilt und diese in die Felder A, B, C und D des Subroutine-Records geschrieben. Eine entsprechende Subroutine wird verwendet, um vier empfangene Bytes zu einem **float** zusammensetzen. Da Subroutine-Records keinen eigenen Device-Support bieten, werden Analog Input (ai) bzw. Analog Output (ao) Records zur Kommunikation verwendet. Dabei wird ausgenutzt, dass StreamDevice über einen Redirection-Mechanismus verfügt. Dieser erlaubt es, innerhalb eines Protocols auf Felder eines anderen Records, der in derselben IOC existiert, zuzugreifen. Der Status der Module bzw. der einzelnen Kanäle wird mit 16-Bit Wörtern kodiert. Jedes einzelne Bit stellt dabei einen anderen Status dar (Trip, Voltage Control, Current Control,...). Diese Status werden in EPICS von mbbiDirect (Mutli-Bit Binary Input Direct) Records verarbeitet. Die mbbiDirect-Records erlauben es im Gegensatz zu mbbi-Records auf jedes einzelne der 16 Bit zuzugreifen. Um im OPI eine detaillierte Übersicht über die jeweiligen Statusbits zu ermöglichen, werden die jeweiligen Bits mit bi (Binary-Input) Records weiter verarbeitet. Den bi-Records

dient als Input das entsprechende Bit des mbbiDirect-Records. Die Binary-Input-Records bieten die Möglichkeit den beiden erlaubten Werten Strings zuzuweisen, die dann im OPI anstelle des Zahlenwertes (0 oder 1) dargestellt werden.

### Steuerung des VME Crate

Die Shaper und Analog-Digital-Wandler (ADC), die die Signale der Photodetektoren verarbeiten, werden über ein VME-Crate der Firma Wiener versorgt und ausgelesen. Die Niederspannungen des VME-Crates, sowie die Drehzahl der Lüfter und die Temperatur des Crates werden von der Slow Control überwacht. Zur Auslese der einzelnen Werte des Crates werden Standard-Remote-Frames gesendet. Da Remote-Frames kein Datenfeld beinhalten, werden Kommandos in der CAN-ID kodiert. Jedes Crate hat somit mehrere CAN-IDs, auf die der Controller mit unterschiedlichen Antworten reagiert. Insgesamt können 127 Crates an einen CAN-Bus angeschlossen werden.

Die Data Frames, die der Controller als Antwort auf die Remote Frames sendet, enthalten immer Informationen zu mehreren Kanälen. Möchte man beispielsweise die Temperatur des Crates auslesen, so werden in den bis zu acht Datenbytes alle gemessenen Temperaturen als ganzzahlige 8-Bit Werte gesendet. Die Länge des Data Frames hängt dabei vom DLC des empfangenen Remote Frames ab. Ein VME-Crate kann bis zu acht Temperatursensoren besitzen, wobei das in dieser Arbeit angesteuerte Crate nur einen Temperatursensor besitzt.

Aus diesem Grund wird hier ebenfalls der Redirection-Mechanismus von StreamDevice ausgenutzt. Für jede Nachricht wird ein ai-Record verwendet, welches die Kommunikation mit dem Crate über StreamDevice übernimmt. Die jeweiligen Antworten werden dann an CALC-Records (Calculation) oder mbbiDirect-Records zur Verarbeitung der Statusbytes mittels StreamDevice weitergeleitet.

Die Spannungen und Ströme der Niederspannungen werden als ganzzahlige 16-Bit Werte in V/100 bzw. A/100 gesendet. Damit ist eine Konversion, wie bei der Hochspannungsversorgung, nicht nötig. Die eingelesenen Spannungen und Ströme werden in CALC-Records in V bzw. A umgerechnet.

### Steuerung der Kühler

Die drei Kühlkreisläufe des Proto192 werden mit Kühlaggregaten der Firma Julabo betrieben. Dabei werden für die Kühlkreisläufe der Front- und Luftkühlung die Kühler FP50 und für die Hauptkühlung der Kühler LH47 eingesetzt. Da die Kühler über ein anderes Netz als die Computer und Elektronik versorgt werden, ist eine galvanische Trennung der seriellen Schnittstelle erforderlich. Hierzu wurde eine Platine basierend auf dem ADM3251E der Firma Analog Devices entwickelt. Der ADM3251E ist ein isolierter RS232-Line-Driver und Receiver mit interner galvanischer Trennung und internem DC-DC-Wandler. Bis zu vier serielle Schnittstellen des Computers werden über einen 4-Kanal RS232-Line-Driver und Receiver (MAX238) in TTL Signale umgesetzt, die anschließend von jeweils einem ADM3251E wieder in RS232-Signale umgesetzt werden. Die Badtemperatur, die aktuelle Pumpstufe und die verwendete Heizleistung werden

vom Kontrollsystem überwacht. All diese Werte werden über ai-Records eingelesen. Die Solltemperaturen werden ebenfalls mit ai-Records eingelesen bzw. mit ao-Records an die Kühler gesendet. Den Status senden die Kühler als String mit einer für jede Statusmeldung eindeutigen Nummer beginnend. Die Statusmeldung wird dabei von einem stringin-Record eingelesen. Diese Recordtypen verfügen allerdings über keinen Alarmstatus. Um dennoch den Status des Kühlers mit dem Alarmhandler überwachen zu können, wird die Statusnummer an ein ai-Record weitergeleitet. Dabei repräsentieren alle negativen Zahlen eine Fehlermeldung, und alle positiven Zahlen einen regulären Status.

## 11.3 Weiterentwicklung des THMP

### 11.3.1 Neues Design der Platinen

Das *Temperature and Humidity Monitoring Board for PANDA* (THMP) wurde zur Überwachung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Inneren des PANDA-EMC im Rahmen der Arbeiten [Fel09, Fri09] entwickelt. Es ist ein modulares System, das aus einem Mainboard und bis zu acht Huckepackplatinen besteht. Je nach Sensortyp gibt es verschiedene Huckepackplatinen. Während der Testmessungen mit dem Proto192 sind jedoch einige Probleme bei der Temperaturmessung aufgetreten, die eine Weiterentwicklung des THMP erforderten.

Im ursprünglichen Design wurde vorgesehen, dass der THMP im Inneren der Endkappe, und damit im gekühlten Bereich, positioniert wird. Aus diesem Grund wurden Low-Dropout-Regler zur Erzeugung der von den ICs benötigten  $\pm 5$  V und  $+3,3$  V eingesetzt. Die  $+5$  V-Regler haben jedoch häufiger nicht geschaltet und somit keine Spannung ausgegeben. Dadurch erzeugten die Instrumentenverstärker der Temperaturplatinen einen "negativen" Strom am Ausgang, der die auf dem Mainboard folgenden Multiplexer und Operationsverstärker der Filter beschädigt hat. Da im Inneren des EMC nicht genug Platz für die THMPs zur Verfügung steht, werden diese außerhalb platziert. Daher muss die Verlustleistung des THMP nicht minimiert werden und so können auch Standard-Spannungsregler eingesetzt werden, die eine höhere Dropout-Spannung benötigen und damit eine höhere Verlustleistung erzeugen. Da die Standard-Regler vom Typ 7805, 7833 und 7905 das oben beschriebene Verhalten nicht zeigen, wurde beschlossen diese in einem zukünftigen Design des THMP zu verwenden. Dadurch steigt die benötigte Versorgungsspannung des THMP auf mindestens  $\pm 8$  V anstelle von  $\pm 6$  V. Details zur Fehlersuche und zu den Änderungen an den beiden Huckepackplatinen können in Ref. [Fri12] nachgelesen werden.

Zudem trat beim ursprünglichen Design Übersprechen zwischen den Kanälen einer Huckepackplatine auf. Dieses Übersprechen ist durch die relativ große Integrationszeit des aktiven Filters zwischen Multiplexer und ADC bedingt. Da der Filter hinter dem Multiplexer aufgebaut ist, durchlaufen alle acht Signale der Huckepackplatine diesen Filter. Im ursprünglichen Design wurde dieses Problem behoben, in dem nach Umschalten des Multiplexers eine Sekunde gewartet wurde, bevor der ADC ausgelesen wurde. Im neuen Design wird die Reihenfolge der Multiplexer und Filter vertauscht. Das heißt, die Signa-

le der Huckepackplatinen werden erst gefiltert, und anschließend gemultiplext. Dadurch sind jedoch nicht mehr acht sondern 64 aktive Filter auf dem Mainboard nötig. Um ein eventuelles Rauschen des Multiplexers vor dem ADC zu filtern, wird zwischen Multiplexer und ADC ein passiver Filter mit einer kleinen Integrationszeit eingesetzt.

Eine weitere Änderung des Mainboards stellt das galvanisch getrennte CAN Interface dar. Als CAN Transmitter und Receiver wird im neuen Design der ADM3051 der Firma Analog Devices eingesetzt. Dieser besitzt eine interne galvanische Trennung der beiden CAN-Bus-Leitungen, und einen internen DC-DC-Wandler zur Erzeugung der sekundären Betriebsspannung auf der CAN-Bus-Seite des Chips. Außerdem werden alle Huckepackplatinen und Mainboards mit einer digitalen Seriennummer versehen. Dazu wird auf jeder Platine der Chip DS2401 der Firma Maxim eingesetzt, der über ein 64-Bit ROM mit einer eindeutigen 6 Byte langen Seriennummer verfügt. Das ROM wird über einen OneWire-Bus ausgelesen. Um im späteren Betrieb des THMP eine eindeutige Zuordnung der Seriennummer zum jeweiligen Steckplatz bzw. zum Mainboard durchführen zu können, werden die einzelnen Chips nicht über einen gemeinsamen Bus ausgelesen, sondern jeder Chip wird über einen eigenen OneWire-Bus angesteuert. Da der AT90CAN128, der auf dem THMP als Mikrocontroller eingesetzt wird, kein integriertes OneWire-Interface besitzt, wurde ein Software-Treiber in die Firmware integriert, der einen beliebigen I/O-Pin des Mikrocontrollers für ein OneWire-Interface verwendet. Dieser Software-Treiber basiert auf der Application Note 318 "Dallas 1-Wire master" der Firma Atmel. Die Seriennummern erlauben es dem Kontrollsystem zu überprüfen, ob die Anordnung der Huckepackplatinen und Mainboards mit der Konfiguration des Kontrollsystems übereinstimmt. Dies ist besonders für die Kalibration (s. folgenden Abschn.) wichtig.

Bereits in den Testmessungen wurden digitale Signale zur Steuerung weiterer Schaltungen benötigt und nachträglich über freie LED-Ausgänge, die zur Anzeige von Fehlern auf dem THMP vorgesehen waren, nach außen geführt. Für das neue Design des THMPs wurde aus diesem Grund eine dritte Huckepackplatine entworfen, die als I/O Board fungiert. Auf dieser Platine wird ein 16-Bit I/O Expander eingesetzt, der mit dem Mikrocontroller des Mainboards über einen I<sup>2</sup>C-Bus verbunden ist. Da die 16 Bit nicht nur als digitale Outputs, sondern auch als Input dienen sollen, werden Änderungen der Pegel dem Mikrocontroller via Interrupt-Signal vom Expander gemeldet. Zwei der insgesamt acht Steckplätze für Huckepackplatinen sind mit einer Leitung für das Interrupt-Signal und den I<sup>2</sup>C-Bus versehen. Die Adresse der Expander im I<sup>2</sup>C-Bus kann über drei Inputs variiert werden, so dass sich theoretisch acht Expander an einem I<sup>2</sup>C-Bus betreiben lassen. Um nicht jedes I/O Board individuell designen zu müssen, werden Lötjumper eingesetzt, um diese Inputs entweder mit der Masse (logisch 0) der Platine oder der Versorgungsspannung (logisch 1) zu verbinden.

### 11.3.2 Auslese und Kalibration

Während der Initialisierung liest der Mikrocontroller des THMP die Seriennummern aller angeschlossenen Huckepackplatinen und des Mainboards aus und speichert diese ab. Anschließend liest der THMP jede Sekunde alle acht Kanäle des ADCs aus, und

stellt die Adressbits der Multiplexer auf den nächsten Kanal ein. Somit werden alle 64 Kanäle des THMP in einem 8 Sekunden-Rhythmus ausgelesen. Die ausgelesenen ADC-Konversionen werden in einem Puffer auf dem Mikrocontroller zwischengespeichert und bei jedem neuen Auslesezyklus überschrieben. Sendet das Kontrollsystem einen Data Frame an den THMP, so wird abhängig vom ersten Datenbyte eine der folgenden Aktionen ausgeführt:

- Datenbyte hat den Wert 0xff:  
Firmwareversion des THMP wird zurückgesendet.
- Datenbyte hat den Wert 0x01:  
Die digitalen Seriennummern werden zurückgesendet.  
Jede Seriennummer wird zusammen mit einer Nummer, die den Steckplatz der Huckepackplatine enthält (das Mainboard wird mit '8' markiert) als ein Data Frame gesendet.
- Datenbyte hat den Wert 0x02:  
Setzen der I/O Pins.
- Datenbyte hat den Wert 0x03:  
Lesen der I/O Pins.
- Das Datenbyte hat keinen der anderen Werte:  
Die ADC-Konversionen werden zurückgesendet.  
Jeder der 64 Puffer wird zusammen mit der entsprechenden Kanalnummer als eigener Data Frame gesendet.

Die 64 ADC-Konversionen werden im Kontrollsystem mit einem I/O-Interrupt von ai-Records empfangen. Dabei dienen sowohl die CAN-ID als auch die jeweilige Kanalnummer als Filter der Nachricht, so dass jeder ai-Record die richtige Nachricht empfängt. Die ADC-Konversionen werden anschließend in einen dem Sensortyp entsprechenden Wert umgerechnet.

Für diese Umrechnung ist eine Kalibration sowohl des Sensors als auch des Auslesesystems vonnöten. Die Druck- und Luftfeuchtigkeitssensoren werden dabei bereits kalibriert bestellt. Die Kalibrationsfunktion dieser Sensortypen ist von der Form

$$f(U) = p_0 + p_1 \cdot U \quad . \quad (11.1)$$

Zur Kalibration der ultra-dünnen PT100 Temperatursensoren werden diese in einem Metallblock eingespannt, durch den eine Kühlflüssigkeit strömt. Mit einem Kühler kann man die Temperatur der Flüssigkeit regulieren, und somit den Widerstand der Sensoren bei unterschiedlichen Temperaturen messen. An die Messwerte wird ein Polynom 3. Grades angepasst:

$$R(T) = p_0 + p_1 \cdot T + p_2 \cdot T^2 + p_3 \cdot T^3 \quad (11.2)$$

Eine detaillierte Beschreibung der Kalibration der Temperatursensoren kann in Ref. [Sch12] gefunden werden.

Die Huckepackplatinen werden zusammen mit dem Mainboard als eine Einheit kalibriert. Aus diesem Grund gelten die Kalibrationswerte auch nur für die entsprechende Konfiguration. Dabei ist sowohl das Mainboard als auch der entsprechende Steckplatz entscheidend. Zur Kalibration der Feuchtigkeitsplatine werden konstante Spannungen als Sensorsignal verwendet und gegen die entsprechende ADC-Konversion aufgetragen. Die Temperaturplatinen werden kalibriert, in dem man verschiedene bekannte Widerstände misst. Da der Strom und die Verstärkung der Huckepackplatine konstant sind, ergibt sich auch hier eine lineare Abhängigkeit zwischen Widerstand und ADC-Konversion  $x$  [Fri12]. Damit lassen sich beide Kalibrationen der Huckepackplatinen mit der Gleichung

$$U(x) = mx + y \quad \text{bzw.} \quad R(x) = mx + y \quad (11.3)$$

beschreiben. Alle Kalibrationsparameter werden für die jeweiligen Sensoren bzw. Huckepackplatinen in einer Datenbank gespeichert. Ein Konfigurationsprogramm liest diese Werte aus, und berechnet daraus entsprechende Kalibrationsparameter für das Kontrollsystem. Die Daten werden in ein sogenanntes Substitution-File geschrieben, welches EPICS beim Start parst und die Werte in die entsprechenden Felder der Records einträgt. Zur Kalibration der Feuchtigkeits- und Drucksensoren werden die beiden Gleichungen (11.1) und (11.3) zu einem Polynom 1. Grades zusammengesetzt. Die beiden Parameter dieses Polynoms sind entsprechend  $P_0 = p_0 + p_1 \cdot y$  und  $P_1 = p_1 \cdot m$ . Da ai-Records eine lineare Konversion des Input-Wertes erlauben, kann zur Berechnung der Luftfeuchtigkeit bzw. des Drucks die empfangene ADC-Konversion an ein ai-Record weitergeleitet werden, welches die beiden Parameter als Slope bzw. Offset enthält. Die Gleichung zur Kalibration der Temperatursensoren ist entsprechend der Gleichungen (11.2) und (11.3)

$$x(T) = P_0 + P_1 \cdot T + P_2 \cdot T^2 + P_3 \cdot T^3 \quad (11.4)$$

mit  $P_0 = (p_0 - y)/m$ ,  $P_1 = p_1/m$ ,  $P_2 = p_2/m$  und  $P_3 = p_3/m$ . Zur Bestimmung der Temperatur müssen die Nullstellen dieses Polynoms berechnet werden. Hierzu wird die C-Bibliothek *GNU Scientific Library* (GSL) verwendet. Die GSL-Bibliothek enthält die Methode

**int** gsl\_poly\_solve\_cubic ( **double** a, **double** b, **double** c, **double\*** x0, **double\*** x1, **double\*** x2 ), die eine kubische Gleichung der Form

$$0 = c + b \cdot x + a \cdot x^2 + x^3 \quad (11.5)$$

löst, und die reellen Lösungen in die Speicher der drei double-Pointer x1, x2 und x3 schreibt. Der Rückgabewert dieser Methode ist die Anzahl der gefundenen Lösungen. Da mehr als eine Lösung dieser Gleichung möglich, aber physikalisch nicht sinnvoll ist, werden alle gefundenen Lösungen mit einem Näherungswert verglichen. Die Nullstelle, die die geringste Differenz zu diesem Näherungswert hat, wird als korrekte Lösung der Gleichung betrachtet. Für die Näherung wird angenommen, dass sich der Widerstand des PT100 Sensors linear mit der Temperatur um den Faktor  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}/\Omega$  ändert. Dieser Wert wird mit den Kalibrationsparametern der Huckepackplatine in  $[\text{ }^\circ\text{C}/\text{ADC-Kanal}]$  umgerechnet und in das Feld F des Sub-Records eingetragen. Die vier Kalibrationsparameter

der Gleichung 11.4 werden in die Felder A, B, C und D des Sub-Records geschrieben. Die ADC-Konversion wird in Feld E gespeichert. Die verwendete Subroutine ist in Listing 11.2 dargestellt.

Listing 11.2: Subroutine zur Berechnung der Temperatur

```

static long SolveCubic( subRecord* prec ) {
  double a = prec->c / prec->d;
  double b = prec->b / prec->d;
  double c = (prec->a - prec->e) / prec->d;
5  double mean = prec->f * ( prec->e - prec->a );
  double temp = 100000.;
  double buffer;
  double x[3];
  double dx[3];

10
  int numRoots = gsl_poly_solve_cubic ( a, b, c, &x[0], &x[1], &x[2] );

  /* Determine best root */
  for ( unsigned int i = 0; i < numRoots; i++ ) {
15     dx[i] = fabs( mean - x[i] );
     if ( temp > dx[i] ) {
         temp = dx[i];
         buffer = x[i];
     }
20 }
  prec->val = buffer;

  return 0;
}

```

## 11.4 Kühlungsregelung

Die für die drei Kühlkreisläufe verwendeten Kühler der Firma Julabo lassen sich nur auf ihre interne Badtemperatur oder auf die Temperatur eines externen, am Kühler angeschlossenen PT100 Sensors regeln. Da jedoch die Temperatur im Inneren des Prototypen homogen gehalten werden muss, ist es nötig, zumindest die beiden Kühler der Front- und Hauptkühlung von einem gemeinsamen Regler getrennt zu steuern. Zu diesem Zweck wurde eine Software geschrieben, die basierend auf den aktuellen Temperaturen des Prototypen und einem vom Benutzer vorgegebenen Sollwert, die Regelung der beiden Kühler steuert. Diese Software ist in fünf kleine Pakete aufgeteilt (Abb. 11.6). Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Interface-Paket dieser Software entwickelt. Das Interface besteht aus einer abstrakten Basisklasse und abgeleiteten Klassen, die die Implementation des Interfaces für verschiedene Kontrollsysteme enthalten. Aktuell gibt es eine Implementation für das EPICS-Kontrollsystem des Prototypen, und eine Implementation für das Simulations-Paket dieser Software. Da die Software nur eine Instanz

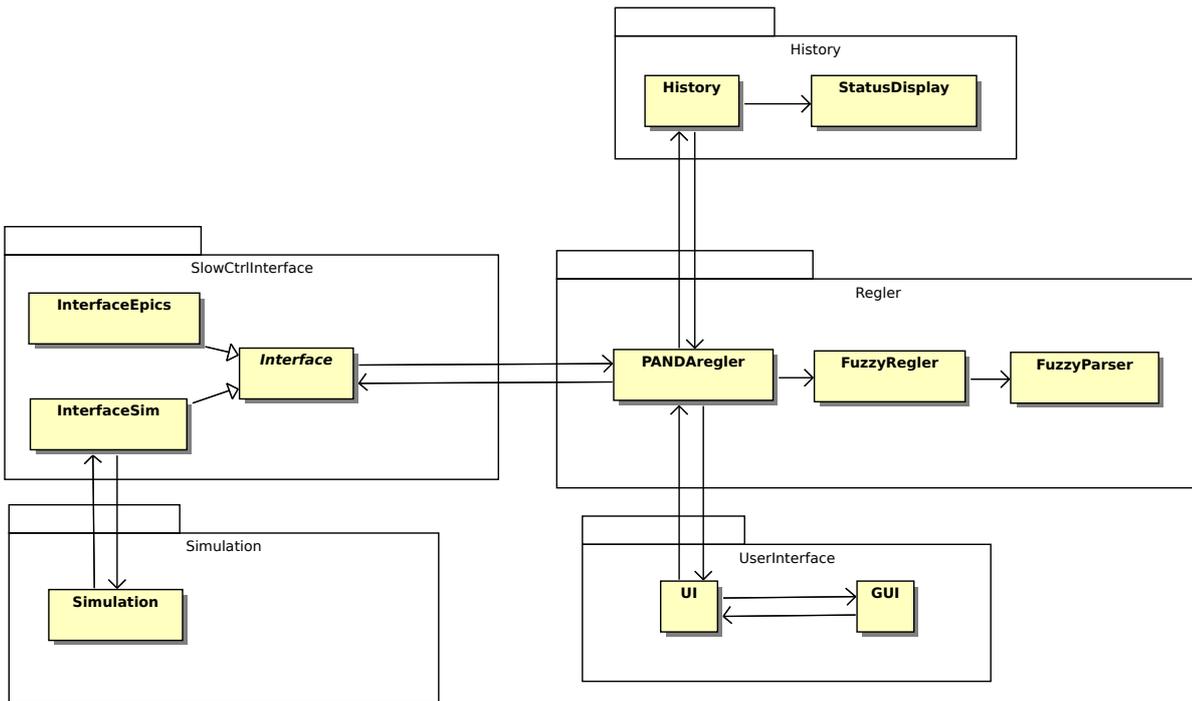


Abbildung 11.6: Vereinfachtes Klassendiagramm der Kühlungsregelungssoftware

des Interfaces benötigt, wurden die Interface-Klassen im *Singleton-Design-Schema* programmiert. Das Singleton-Design erlaubt nur eine Instanz der Basisklasse. Dies wird ermöglicht, indem Konstruktoren und Destruktoren der Klassen **private** bzw. **protected** sind. Die abstrakte Basisklasse enthält zudem einen statischen Pointer vom selben Typ (Interface\*), der zu Beginn des Programms mit NULL initialisiert wird. Die abgeleiteten Klassen besitzen eine create-Methode, die zunächst den Wert des Pointers überprüft. Ist dieser NULL wird der Konstruktor der entsprechenden, abgeleiteten Klasse aufgerufen, und dem Pointer die Adresse der so erzeugten Instanz dieser Klasse zugewiesen. Existiert bereits eine Instanz, so liefert die create-Methode lediglich den Wert des Pointers zurück. Auf diese Weise kann der Benutzer nur eine Instanz der Interface-Klassen erzeugen. Eine Setup-Routine parst eine Konfigurationsdatei, in der ausgewählt wird, welches Interface erzeugt werden soll. Die Methoden, die von außerhalb der Klasse erreichbar sein müssen, werden in der abstrakten Basisklasse als pure **virtual**-Methoden definiert (Listing 11.3). Auf diese Weise gibt er Compiler eine Fehlermeldung aus, sollte eine dieser Methoden nicht in den abgeleiteten Klassen implementiert werden. Alle Methoden die für die jeweilige Implementierung nötig sind, werden nur in der jeweiligen abgeleiteten Klasse definiert.

Das Interface zum EPICS-Kontrollsystem wird alle Temperaturen, Luftfechtigkeiten im Inneren des Prototypen und die Parameter der Kühler via 'CA monitor' überwachen. Da Informationen über den aktuellen Status und der Zeitstempel der letzten Änderung der PVs hierbei wichtig ist, wird der CA-Datentyp DBR.TIME.DOUBLE verwendet (s. Abschn. 10.1.2). Über eine Event-Callback-Methode werden die empfangenen Werte

Listing 11.3: Deklaration der abstrakten Basisklasse CtrlSysAccessInterface

```

class CtrlSysAccessInterface {
public:
    enum eTemperature { backplate, front, gradient };
    enum eChiller { main, front };

5
    static Interface* getInstance();
    static bool exists();

    virtual double meanTemperature( const eTemperature ) = 0;
10
    virtual double worstHumidity() = 0;
    virtual ChillerStatus* chiller( const eChiller ) = 0;
    virtual void setTemperature( const double&, const double& ) = 0;
    virtual void setPumpstage( const double&, const double& ) = 0;

15
    virtual void init( std::string ) = 0;
    virtual void close() = 0;

protected:
    Interface ();
20
    Interface ( const Interface& );
    virtual ~Interface ();

    static Interface* pinstance_;
};

```

des 'CA monitor' in einem Standard-Vector gespeichert. Eine STL-Map dient dabei der Zuordnung der CA eigenen Channel-Id zu der entsprechenden Position innerhalb des vectors.

Das Regler-Paket kann mit dem Interface die aktuelle Durchschnittstemperatur nahe der Backplate, im vorderen Teil des Prototypen und den Gradienten zwischen beiden Temperaturen abfragen. Zudem können alle Parameter der beiden Kühler abgefragt werden. Diese werden in Form der Klasse ChillerStatus an den Regler weitergeleitet. Zudem bietet das Interface die Möglichkeit die Pumpstufe und die Badtemperatur der Kühler zu setzen.

## 12 Environmental Database

Das Kontrollsystem des PANDA-Experiments überwacht alle äußeren Parameter wie Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Spannungen und Ströme der Spannungsversorgungen und die Status der Crates. Alle diese Werte werden mit einem Archiver in einer Datenbank gespeichert.

Diese Daten werden an verschiedenen Stellen im Experiment benötigt. Zur Kalibration in der Event-Rekonstruktion ist beispielsweise die Temperatur des EMC wichtig, da die Lichtausbeute der PWO-Kristalle von dieser abhängt. Auch die Verstärkung der LAAPDs hängt von der Temperatur, aber auch von der Versorgungsspannung ab. Auch im Rahmen des Kontrollsystems, bei der Online-Kontrolle des Detektors und der State-Machine der Detektorontrolle ist ein späterer Zugriff auf diese Daten nötig.

Damit nicht jedes Programm, das auf die Datenbank zugreifen muss, ein eigenes Interface bereitstellen muss, wurde die C++-Bibliothek *Environmental Database* (EnvDB) geschrieben. Diese Bibliothek zeichnet sich durch ein transparentes Benutzerinterface und minimale Abhängigkeiten von externen Paketen aus. Das Ziel der Programmierung war es, ein Interface zum Zugriff auf die archivierten Daten des Kontrollsystems zu schaffen, das einfach zu benutzen ist. Dabei sollte die EnvDB einfach in bestehende Programme oder Frameworks integriert werden können.

Die EnvDB-Bibliothek kann in drei Unterpakete aufgeteilt werden: Datenbank-API, Sensor-Koordinaten und Sensor-Status (Abb. 12.1). Die Sensor-Koordinaten beschrei-

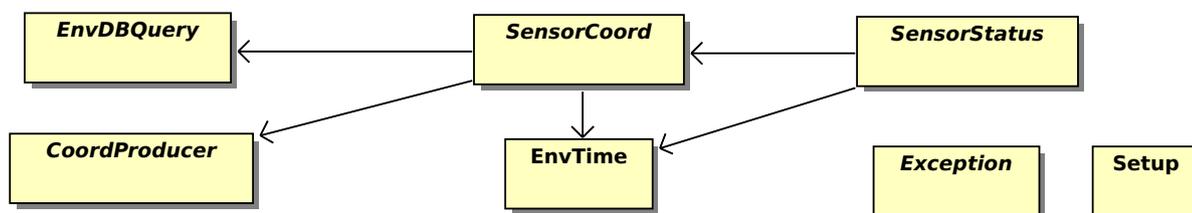


Abbildung 12.1: Vereinfachtes Klassendiagramm der Environmental Database Bibliothek

ben die jeweiligen Sensortypen des Detektors und dienen der Identifizierung eines bestimmten Sensors eines Typs. Zu jedem Koordinatentyp gibt es einen entsprechenden Statustypen, der die Daten zu einer bestimmten Zeit und Koordinate enthält. Zur Abstraktion der Zeit innerhalb dieser Bibliothek dient die Klasse *EnvTime*, die auf der BOOST-Bibliothek *Date-Time* basiert. Aktuell sind nur Koordinaten- und Status-Typen des EMC implementiert.

- *VmeCrate*: Die *VmeCrate*-Koordinate steht für alle Sensoren bzw. Daten eines

VME Crates. Diese Koordinate wird mit der jeweiligen CAN-Basis-ID des entsprechenden VME Crates identifiziert.

- Chiller: Die Chiller-Koordinate repräsentiert die Kühler des EMC. Hier dient eine Enumeration `enum` als Identifier des jeweiligen Kühlers.
- Alveole: Der Alveolen-Status beinhaltet alle Temperaturen, die in der entsprechenden Alveole gemessen werden. Zusätzlich beinhaltet der Alveolen-Status die Kristall-Status aller in dieser Alveole befindlichen Kristalle.
- Crystal: Der Kristall-Status beinhaltet alle Daten des Kanals der Hochspannungsversorgung, der die Spannung für den entsprechenden Photodetektor liefert.

Die Datenbank-API besteht aus zwei abstrakten Basisklassen. Die `CoordProducer`-Klasse prüft durch eine Datenbankabfrage in einer Konfigurationsdatenbank, ob eine Sensor-Koordinate für den angegebenen Zeitstempel gültig ist, und erzeugt eine Liste aller zu dieser Koordinate gehörenden PV Namen. Die `EnvDBQuery` fragt anschließend die Werte jeder PV zur angegebenen Zeit aus der Archiv-Datenbank ab, und liefert diese Werte in Form eines Standard-Vectors zurück. Die `EnvDB`-Bibliothek hängt dabei nicht von der Engine der Datenbanken ab. Zu jeder Datenbankengine kann eine Klasse von `CoordProducer` bzw. `EnvDBQuery` abgeleitet werden, in der die Implementation zum Zugriff auf die entsprechende Datenbank programmiert wird. Die Klassen sind im Singleton-Design programmiert, und die jeweiligen Instanzen werden von einer `Setup`-Klasse erzeugt. Diese `Setup`-Klasse basiert auf der `BOOST Spirit`-Bibliothek und parst eine Konfigurationsdatei, in der alle nötigen Daten für den Zugriff auf die beiden Datenbanken enthalten sind. Aktuell gibt es eine Implementierung für `MySQL`- und `PostgreSQL`- Datenbanken. Damit hängt die `EnvDB`-Bibliothek nur von den `BOOST`-Bibliotheken und den eigentlichen Datenbank-Interfaces ab.

Da der `CoordProducer` für jeden Sensortyp unterschiedliche Werte in der Konfigurationsdatenbank abfragen muss, wird die Methode zur Erzeugung der PV Namen (`CoordProducer::pvNames`) für jeden Sensortypen überladen. Ursprünglich sollte der Benutzer dabei nur mit einer abstrakten `SensorCoord`-Klasse arbeiten. Da so ein Aufruf dieser Methode nicht möglich ist, wird sie von jedem Sensortypen über das *Visitor-Design-Schema* aufgerufen. Das *Visitor-Design-Schema* trennt in der Objekt orientierten Programmierung einen Algorithmus von einer Objektstruktur, auf der dieser Algorithmus arbeitet. Der Algorithmus wird dabei innerhalb einer `Member`-Methode der Objektstruktur aufgerufen. Die jeweiligen Objekte übergeben diesem den `this`-Pointer, der eine Referenz auf das Objekt selbst darstellt. Der `this`-Pointer enthält dabei auch den korrekten Typ des Objekts, auch wenn die entsprechende Methode vom Benutzer über eine abstrakte Basisklasse aufgerufen wird, so dass der für diesen Objekttyp richtige Algorithmus verwendet wird.

Die jeweiligen Werte der Datenbank werden dem Benutzer über die Status-Objekte als `C-struct` in der Form

```
template<typename T> struct envData {  
    EnvTime*    timestamp;  
    std::string status;  
    std::string severity;  
5   T          value;  
};
```

zur Verfügung gestellt. Die Template-Klasse T wird mit einem der Datentypen **string**, **int** oder **double** ersetzt. Die Felder `status` und `severity` entsprechen dabei dem Status und Alarmschweregrad der PV des Kontrollsystems. Über diese Felder können die Status-Objekte selbst entscheiden, ob die Werte gültig sind, oder ob zu dem Zeitpunkt ein Fehler oder ein Alarm vorlag. Eine detaillierte Beschreibung aller Klassen und Methoden kann in Ref. [Alb12] nachgelesen werden.



## 13 Zusammenfassung der Entwicklung der Slow Control

Die Slow Control des PANDA-Experiments wird mit dem Softwarepaket EPICS und den EPICS-Modulen AsynDriver, StreamDevice und Sequencer aufgebaut. In ersten Tests wurden die grafischen Benutzeroberflächen mit der EPICS-Erweiterung MEDM aufgebaut. Diese werden durch ein PANDA-spezifisches Control System Studio-Product ersetzt werden. Dieses CSS-Product beinhaltet auch einen Alarm Handler zur Überwachung des Alarmstatus des Kontrollsystems und einen Archiver, mit dem die Daten in einer SQL-Datenbank abgespeichert werden.

Ein vollständiges Kontrollsystem wurde für den Proto192, den Prototypen der Vorwärts-Endkappe des EMCs im Targetspektrometer, aufgebaut und unter Teststrahl-Bedingungen getestet. Da EPICS ein netzwerkbasierendes und damit nahezu frei skalierbares Kontrollsystem ist, kann die Slow Control des PROTO192 als Prototyp für die gesamte PANDA-Slow Control angesehen werden. Subroutinen wurden zur Lösung verschiedener Probleme, wie die Berechnung der mit dem THMP gemessenen Temperatur oder der Konversion einer 32-bit Fließkommazahl in ihre Hexadezimal-Darstellung zur Steuerung der Hochspannungsversorgung, programmiert.

Als CAN-Bus-Interface dient derzeit das HadCon-Board der Hades-Kollaboration. Dieses Interface muss jedoch für das PANDA-Experiment ausgetauscht werden, da die auf dem HadCon verbaute ICU abgekündigt wurde und nicht mehr hergestellt wird. Verschiedene Alternativen sind hier bereits geplant. Zum einen gibt es kommerzielle Lösungen, zum anderen ist die Entwicklung eines Kontrollrechners mit einer leistungstärkeren ICU und direkter Anbindung an einen CAN-Controller geplant.

Der THMP, der zur Überwachung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im EMC dient, wurde weiterentwickelt und verbessert. Neben der Behebung einiger Fehlerquellen wurden alle Platinen dieses modularen Auslesesystems mit Serial-ID-Chips versehen und ein galvanisch getrenntes CAN-Interface eingesetzt. Zusätzlich wurde eine neue Huckepackplatine als digitales I/O-Board entworfen.

Da die von der Slow Control aufgezeichneten Daten an verschiedenen Stellen im Experiment benötigt werden, wurde für den Zugriff eine C++-Bibliothek mit minimalen Abhängigkeiten zu externen Paketen implementiert. Die Bibliothek verfügt über ein transparentes Interface, das kein Know-How über Datenbanken erfordert. Dies wird durch Abstraktion des Datenbankzugriffs erreicht. Dadurch ist die Environmental Database-Bibliothek auch unabhängig von der gewählten zugrundeliegenden Datenbankengine.



# **Teil IV**

## **Anhang**



# A Spektren der verschiedenen Teilchenkombinationen für das $\chi_{c1}$ und das $\chi_{c2}$

An die Zerfallswinkelverteilungen des radiativen Photons aus den Zerfällen  $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c1}$  und  $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c2}$  (Abb. A.1) wird die Gleichung  $I(\cos\theta_\gamma) = a \cdot (1 + \lambda_J \cos^2\theta_\gamma)$  mit  $\lambda_1 = -1/3$  und  $\lambda_2 = 1/13$  angepasst [Abl11]. Die  $\chi^2/ndf$ -Werte der Anpassungen sind

$$J = 1 : \chi^2/ndf = 1,63 \quad J = 2 : \chi^2/ndf = 1,46$$

Die Anzahl bzw. der Anteil der rekonstruierten  $\rho(770)^-$ -Kandidaten für die  $\chi_{c1}$  und  $\chi_{c2}$  sind in Tabelle A.1 aufgelistet. Auch hier liefert der Zerfall  $\chi_{cJ} \rightarrow K^+K_s^0\rho(770)^-$  den Hauptbeitrag.

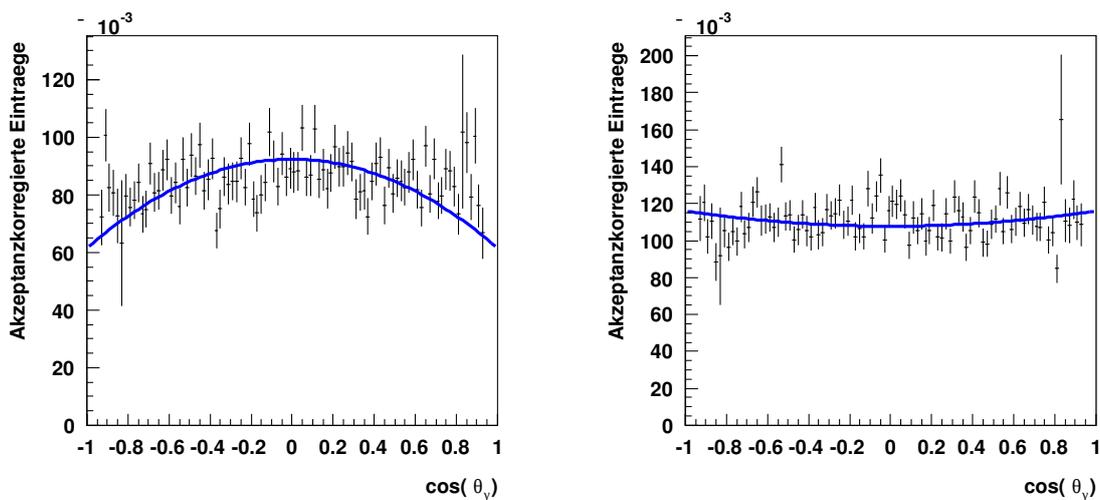


Abbildung A.1: Zerfallswinkel des radiativen Photons aus den Zerfällen  $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c1}$  und  $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c2}$

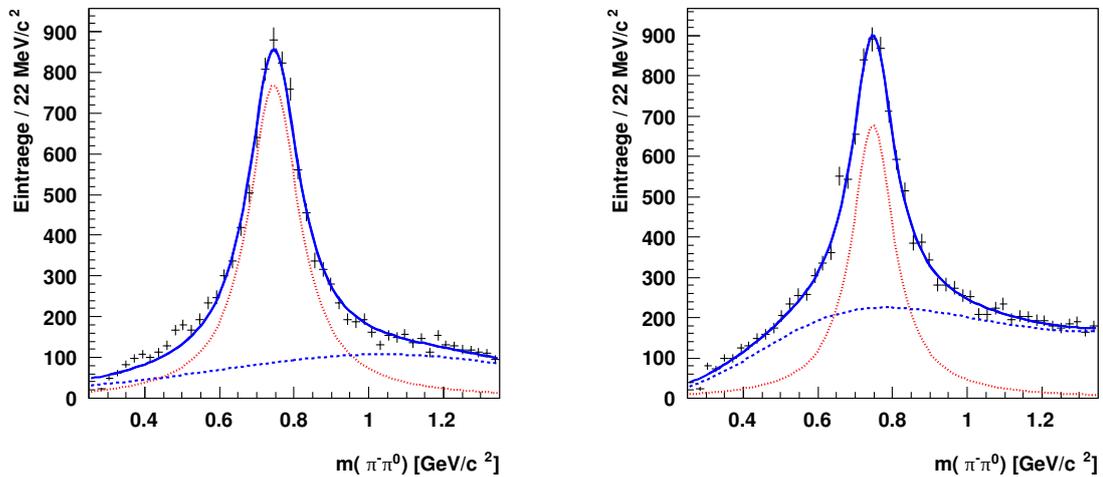


Abbildung A.2: Invariante  $\pi^-\pi^0$ -Masse für  $\chi_{c1}$  (links) und  $\chi_{c2}$  (rechts). Die durchgezogene blaue Linie zeigt die gesamte, angepasste Funktion, die blaue gestrichelte Linie den Untergrund und die rote gestrichelte Linie das reine Signal.

$J$	Anzahl	Anteil
1	$4667 \pm 615$	$(36,62 \pm 4,83) \%$
2	$6732 \pm 578$	$(36,90 \pm 3,18) \%$

Tabelle A.1: Anzahl und Anteil der  $\rho(770)^-$ -Kandidaten für  $\chi_{c1}$  und  $\chi_{c2}$

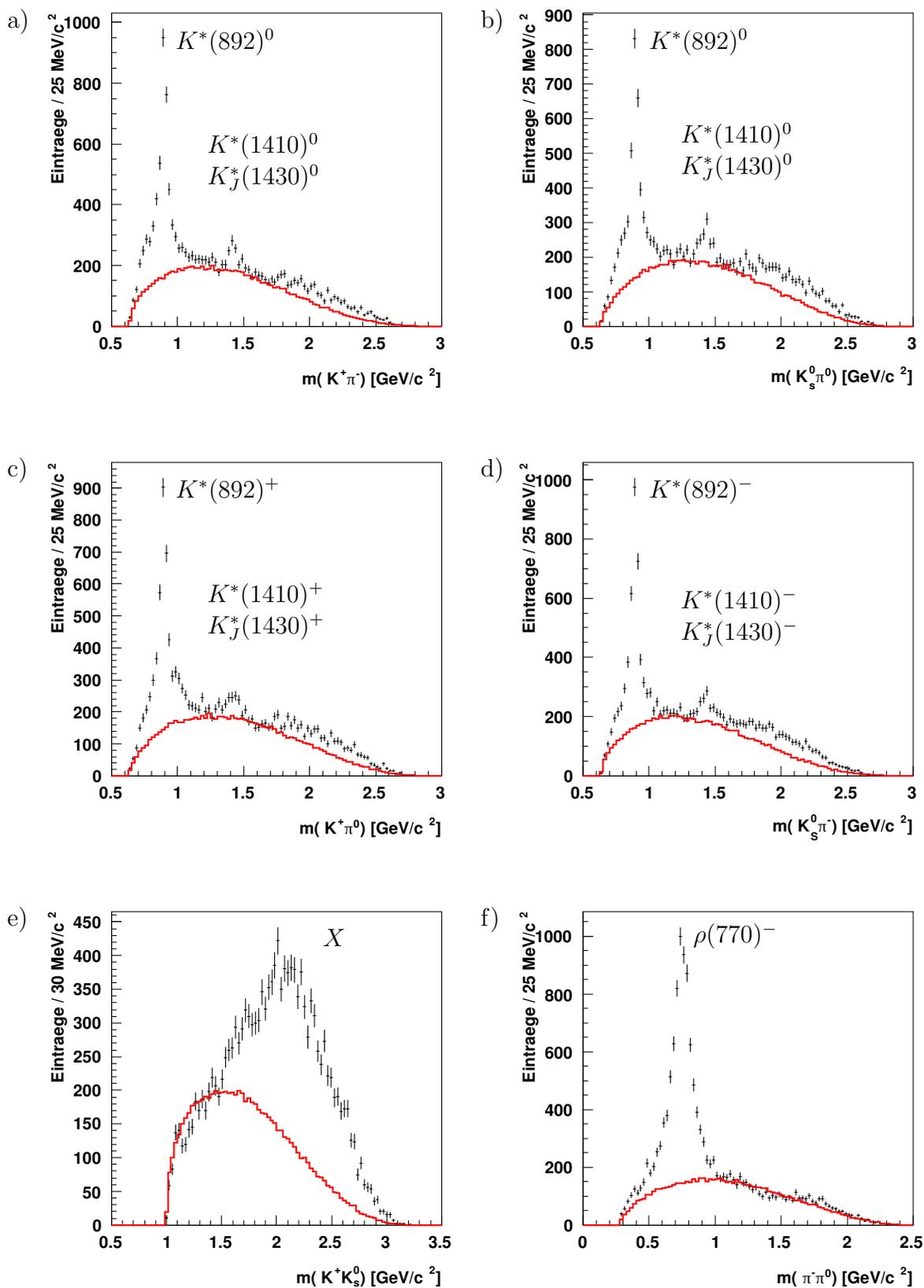


Abbildung A.3: Invariante Massen der Zweiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c1}$ . Der nicht-resonante Phasenraumbeitrag der jeweiligen Kombination ist in Rot dargestellt

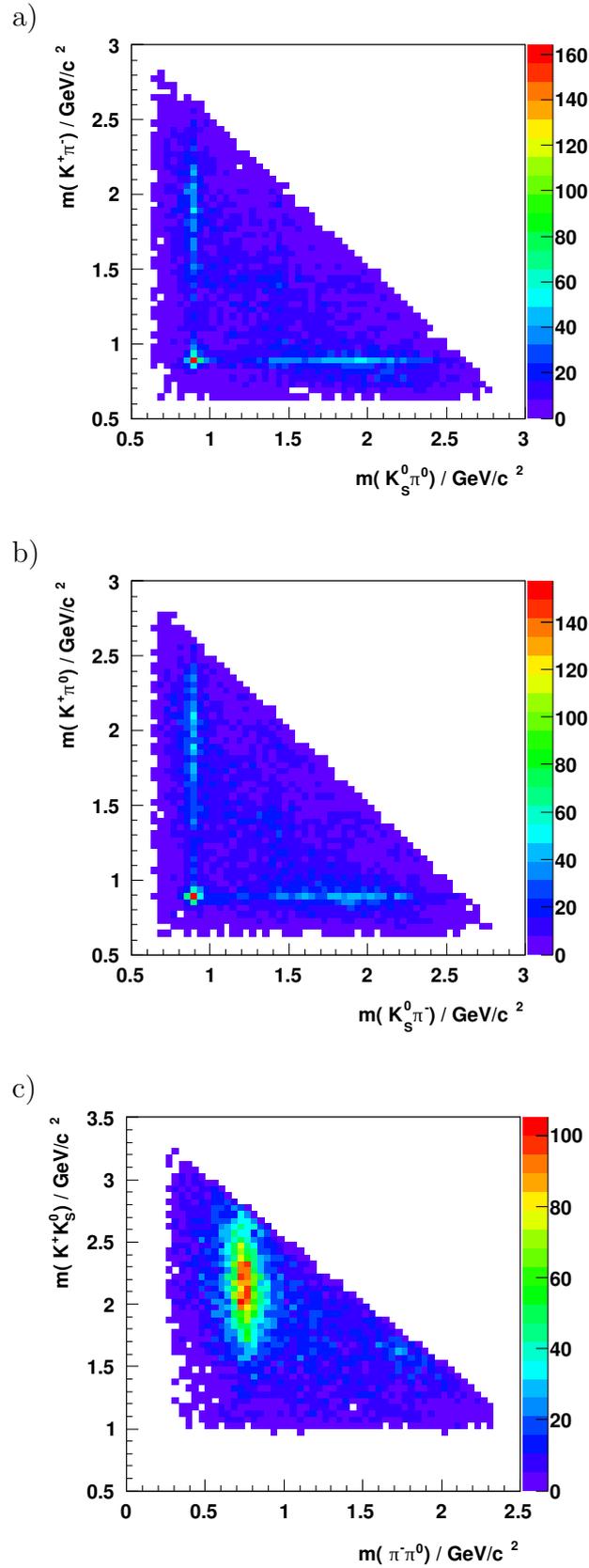


Abbildung A.4: Zweidimensionale invariante Massenspektren der Zweiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c1}$

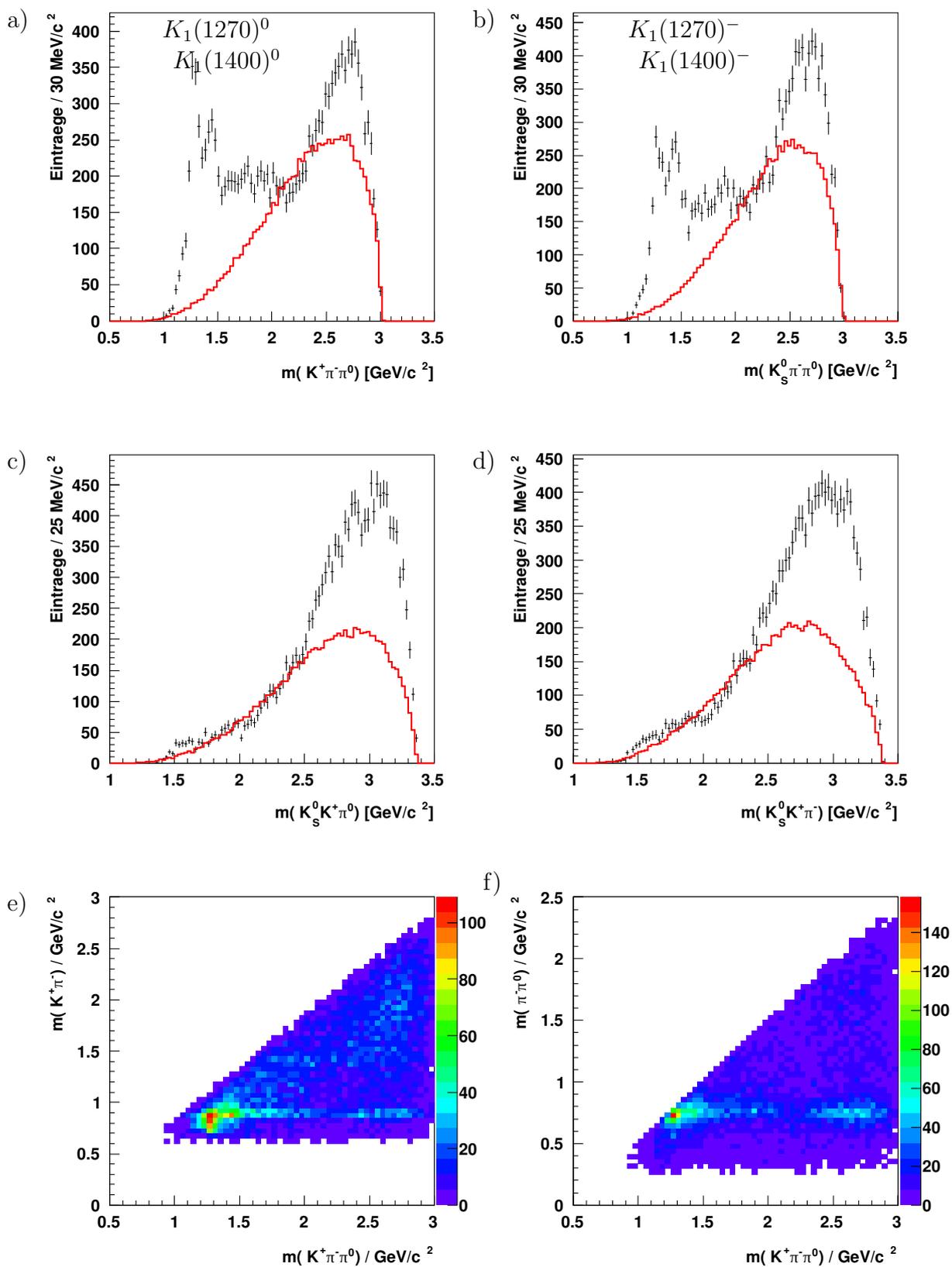


Abbildung A.5: Invariante Massen der Dreiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c1}$ . Der nicht-resonante Phasenraumbeitrag der jeweiligen Kombination ist in Rot dargestellt

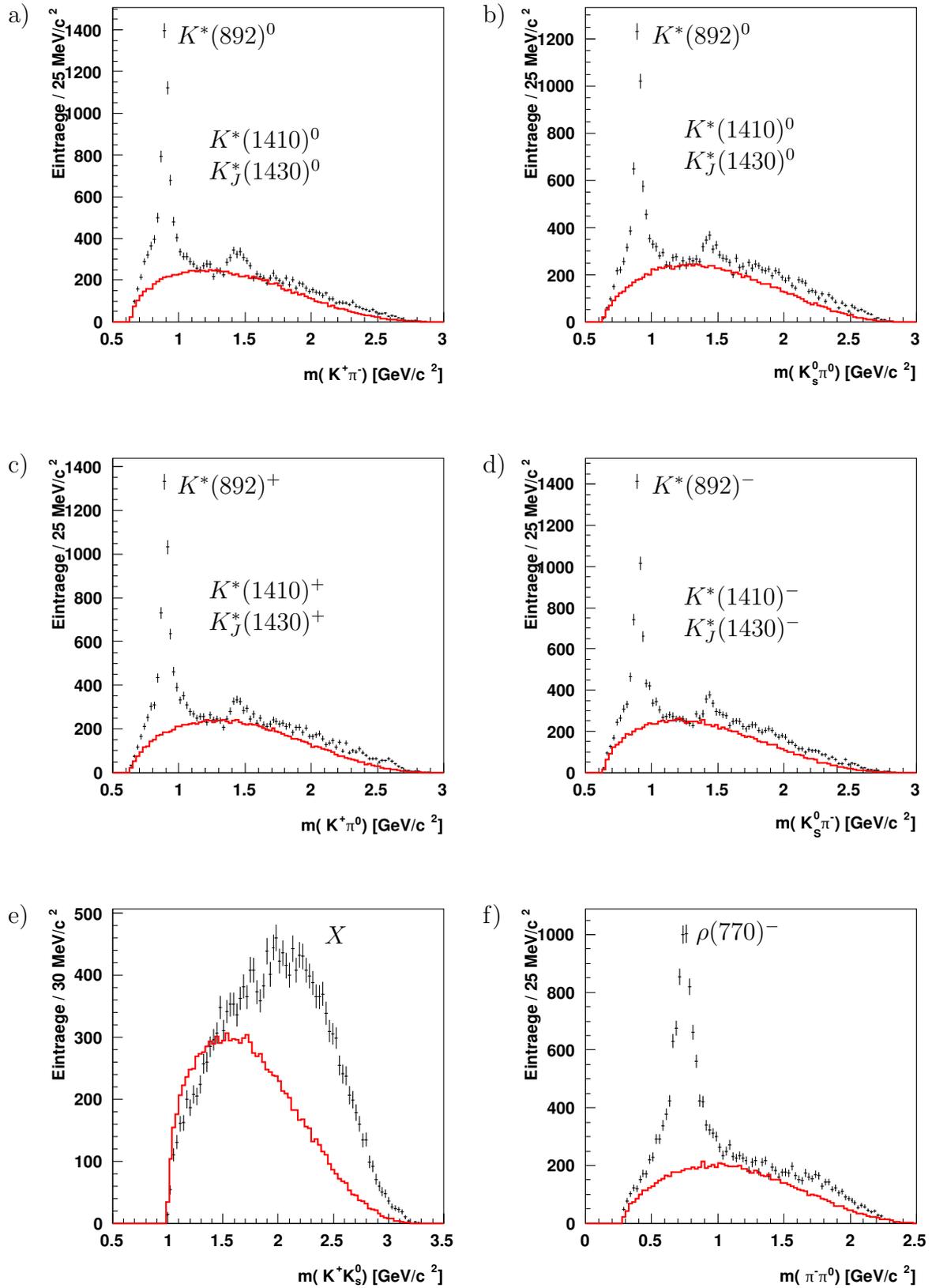


Abbildung A.6: Invariante Massen der Zweiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c2}$ . Der nicht-resonante Phasenraumbeitrag der jeweiligen Kombination ist in Rot dargestellt

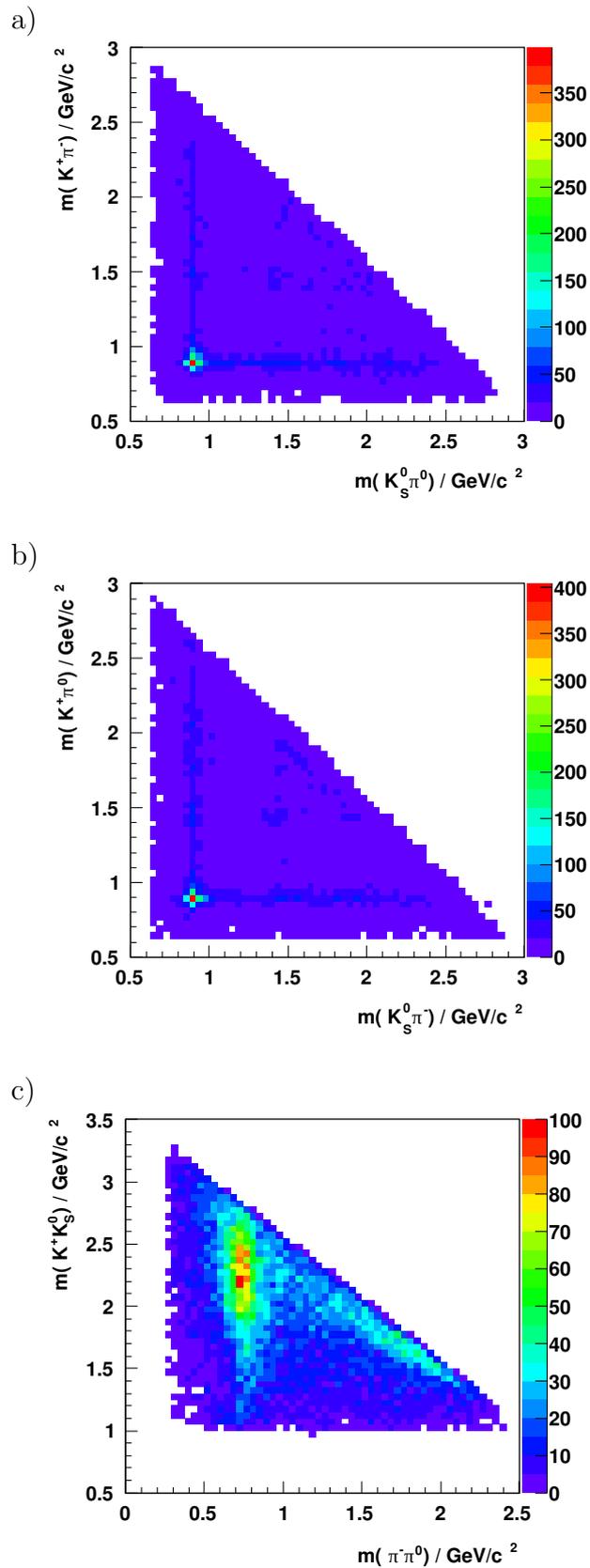


Abbildung A.7: Zweidimensionale invariante Massenspektren der Zweiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c2}$

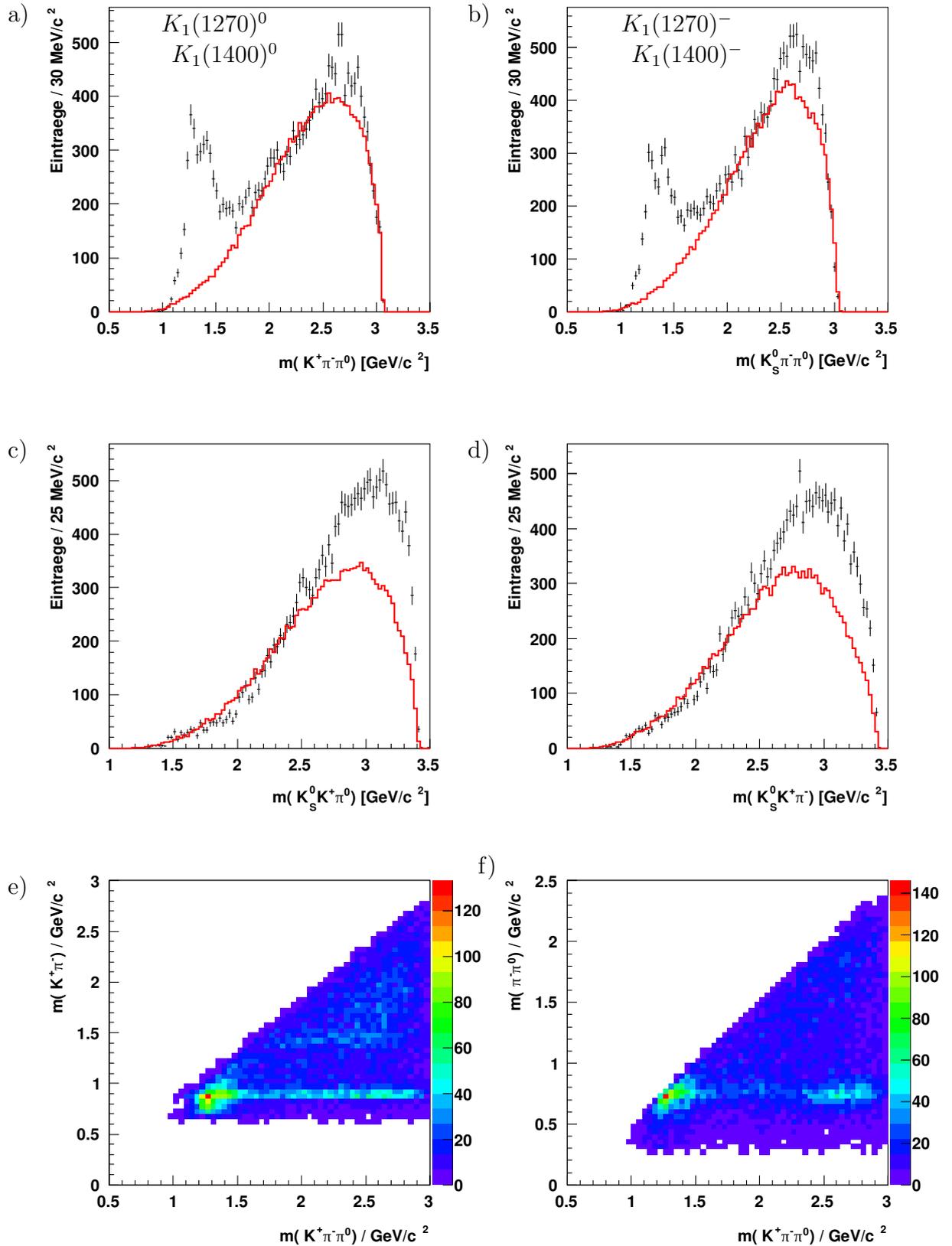


Abbildung A.8: Invariante Massen der Dreiteilchenkombinationen für das  $\chi_{c2}$ . Der nicht-resonante Phasenraumbeitrag der jeweiligen Kombination ist in Rot dargestellt

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorhergesagte und beobachtete Charmonium-Zustände . . . . .	6
2.1	$e^+e^-$ -Wechselwirkungen . . . . .	11
2.2	Darstellung der untersuchten Zerfallsmode . . . . .	12
3.1	Schematische Ansicht des BES-III Detektors . . . . .	16
3.2	Driftkammer des BES-III Detektors . . . . .	17
3.3	Flugzeitsystem des BES-III Detektors . . . . .	18
3.4	Elektromagnetisches Kalorimeter des BES-III Detektors . . . . .	19
3.5	Myonkammer des BES-III Detektors . . . . .	20
6.1	Schwerpunktsenergie des radiativen Photons und invariante Masse des $K^+K_s^0\pi^-\pi^0$ -Systems . . . . .	29
6.2	Definition des Zerfallswinkels . . . . .	30
6.3	Invariante Masse des $K^+K_s^0\pi^-\pi^0$ -Systems im Bereich des $\chi_{c0}$ . . . . .	31
6.4	Zerfallswinkel des radiativen Photons aus dem Zerfall $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c0}$ . . . . .	31
6.5	Invariante Massen der Zweiteilchenkombinationen für das $\chi_{c0}$ . . . . .	32
6.6	Zweidimensionale invariante Massenspektren der Zweiteilchenkombinationen für das $\chi_{c0}$ . . . . .	33
6.7	Invariante Massen der Dreiteilchenkombinationen für das $\chi_{c0}$ . . . . .	34
6.8	Invariante $\pi^-\pi^0$ -Masse . . . . .	35
6.9	Dalitzplot des $K^+K_s^0\rho(770)^-$ -Systems . . . . .	36
6.10	Zerfallswinkelverteilung des $X$ . . . . .	37
9.1	Übersicht über die FAIR Beschleuniger-Anlage . . . . .	46
9.2	Übersicht über den PANDA Detektor . . . . .	48
9.3	Das PANDA Targetspektrometer . . . . .	48
9.4	Das PANDA Vorwärtssepektrometer . . . . .	52
10.1	EPICS Architektur . . . . .	54
10.2	Eclipse IDE und Control System Studio Architektur . . . . .	59
10.3	Beispiel für den Object-Contribution-Mechanismus . . . . .	60
10.4	Architektur des Data Access Layer . . . . .	60
10.5	Beispiele der BOY Widgets . . . . .	62
10.6	Übersicht über das Archivierungssystem BEAUTY . . . . .	63
10.7	Übersicht über den Alarmhandler BEAST . . . . .	66
11.1	Explosionsansicht einer Alveole . . . . .	67

11.2	Der Prototyp der EMC Vorwärtsendkappe 'Proto192' . . . . .	69
11.3	Schematischer Aufbau des Kontrollsystems des Proto192 . . . . .	70
11.4	HADES Control general purpose board, HadCon . . . . .	71
11.5	Hochspannungsversorgung von ISEG . . . . .	73
11.6	Vereinfachtes Klassendiagramm der Kühlungsregelungssoftware . . . . .	81
12.1	Vereinfachtes Klassendiagramm der Environmental Database Bibliothek . . . . .	83
A.1	Zerfallswinkel des radiativen Photons aus den Zerfällen $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c1}$ und $\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c2}$ . . . . .	91
A.2	Invariante $\pi^-\pi^0$ -Masse für $\chi_{c1}$ und $\chi_{c2}$ . . . . .	92
A.3	Invariante Massen der Zweiteilchenkombinationen für das $\chi_{c1}$ . . . . .	93
A.4	Zweidimensionale invariante Massenspektren der Zweiteilchenkombinationen für das $\chi_{c1}$ . . . . .	94
A.5	Invariante Massen der Dreiteilchenkombinationen für das $\chi_{c1}$ . . . . .	95
A.6	Invariante Massen der Zweiteilchenkombinationen für das $\chi_{c2}$ . . . . .	96
A.7	Zweidimensionale invariante Massenspektren der Zweiteilchenkombinationen für das $\chi_{c2}$ . . . . .	97
A.8	Invariante Massen der Dreiteilchenkombinationen für das $\chi_{c2}$ . . . . .	98

# Tabellenverzeichnis

1.1	Eigenschaften der Quarks ( $q$ ) und Leptonen ( $l$ ) . . . . .	3
1.2	Eigenschaften und Austauscheteilchen der drei fundamentalen Wechselwirkungen . . . . .	4
3.1	Parameter des BEPC-II Speicherrings . . . . .	15
4.1	Anzahl der rekonstruierten $\psi'$ Zerfälle verschiedener Experimente . . . . .	23
6.1	Anzahl rekonstruierter $\chi_{cJ}$ 's und Rekonstruktionseffizienzen . . . . .	30
6.2	$\chi^2/ndf$ -Werte der Anpassungen an die Zerfallswinkelverteilungen des $X$ . . . . .	37
10.1	Primitive Channel Access Datentypen . . . . .	55
10.2	Channel Access Datenstrukturen und ihre Attribute . . . . .	55
11.1	Aufbau der CAN Frames . . . . .	72
A.1	Anzahl und Anteil der $\rho(770)^-$ -Kandidaten für $\chi_{c1}$ und $\chi_{c2}$ . . . . .	92



# Listings

10.1	Beispiel eines Sequencerprogramms . . . . .	57
10.2	Erzeugtes Javascript einer Regel in CSS-Boy . . . . .	63
11.1	Subroutine zur Zerlegung eines floats in vier bytes . . . . .	74
11.2	Subroutine zur Berechnung der Temperatur . . . . .	80
11.3	Deklaration der abstrakten Basisklasse CtrlSysAccessInterface . . . . .	82



# Literaturverzeichnis

- [Abl10a] M. Ablikim et al. (BES-III Collaboration), *Design and Construction of the BES-III Detector*, Nucl. Instrum. Meth. **A614**, 345–399 (2010), arXiv:0911.4960.
- [Abl10b] M. Ablikim et al. (BES-III Collaboration), *Measurements of  $h_c(^1P_1)$  in  $\psi'$  Decays*, Phys.Rev.Lett. **104**, 132002 (2010), arXiv:hep-ex/1002.0501.
- [Abl11] M. Ablikim et al. (BESIII Collaboration), *First Observation of the Decays  $\chi_{cJ} \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$* , Phys.Rev. **D83**, 012006 (2011), 1011.6556.
- [Alb12] M. Albrecht, F. Feldbauer, M. Steinke, *Environmental Database C++ Library*, Release 1.2.0, 2012.
- [Asn09] D. M. Asner et al. (BES-III Collaboration), *Physics at BES-III*, Int. J. Mod. Phys. **A24**, S1–794 (2009), arXiv:0809.1869.
- [Bec12] J. Becker, *Analyse des Zerfalls  $\chi_{cJ} \rightarrow K^+K^-\eta$  bei BESIII und Entwicklung des Kühlsystems des Prototypen für das EMC des PANDA-Experiments*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik I, 2012.
- [Bet08] A. Bettini, *Introduction to Elementary Particle Physics*, Cambridge University Press, 2008.
- [Che98] Y.-Q. Chen, E. Braaten, *An Explanation for the  $\rho - \pi$  puzzle of  $J/\psi$  and  $\psi'$  decays*, Phys.Rev.Lett. **80**, 5060–5063 (1998), arXiv:hep-ph/9801226.
- [Cla08] M. Clausen, L. Dalesio (EPICS Collaboration), *EPICS - Experimental Physics and Industrial Control System*, Beam Dynamics Newsletter **47**, 56–66 (2008).
- [Dal93] L. Dalesio, M. Kraimer, A. Kozubal, *EPICS Architecture*, (1993).
- [Ern08] W. Erni et al. (PANDA Collaboration), *Technical Design Report for PANDA Electromagnetic Calorimeter (EMC)*, (2008), arXiv:0810.1216.
- [Ern09a] W. Erni et al. (PANDA Collaboration), *Physics Performance Report for PANDA: Strong Interaction Studies with Antiprotons*, (2009), arXiv:0903.3905.
- [Ern09b] W. Erni et al. (The PANDA Collaboration), *Technical Design Report for the PANDA Solenoid and Dipole Spectrometer Magnets*, (2009), arXiv:0907.0169.
- [Fel09] F. Feldbauer, *Studien zur Strahlenhärte von Bleiwolframat-Kristallen*, Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik I, 2009.

- [Fri09] P. Friedel, *Studien zum Prototypaufbau für das Elektromagnetische Kalorimeter des  $\overline{\text{PANDA}}$  Detektors*, Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik I, 2009.
- [Fri12] P. Friedel, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik I, 2012, noch nicht veröffentlicht.
- [Hat07] J. Hatje, M. Clausen, C. Gerke, M. Moeller, H. Rickens, *Control System Studio (CSS)*, Proceedings of ICALEPCS07 , 37–39 (Okt. 2007).
- [He06] K. He, X. Zhang, B. Liu, *Kinematic Fitting and Vertex Fitting*, (2006).
- [Hil12] J. O. Hill, R. Lange, EPICS R3.14 Channel Access Reference Manual, <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>, April 2012.
- [Kas01] E. Kasel, B. Keil, D. Schirmer, D. Zimoch, *The evolution of the delta control system*, eConf **C011127**, WEAP003 (2001), arXiv:physics/0111024.
- [Kas07] K. Kasemir, *Control System Studio Applications*, Proceedings of ICALEPCS07 , 692–694 (Okt. 2007).
- [Kas11] K. Kasemir, G. Carcassi, *Control System Studio Guide: For installers and maintainers of CSS*, 2011.
- [Kno94] M. Knott, D. Gurd, S. Lewis, M. Thuot, *EPICS: A Control system software codevelopment success story*, Nucl.Instrum.Meth. **A352**, 486–491 (1994).
- [Kop11] B. Kopf (PANDA Collaboration), *Exotics at PANDA*, Hyperfine Interact. (2011).
- [Kut96] R. Kutschke, *An Angular Distribution Cookbook*, CLEO internal note (1996).
- [Li12] H. Li, persönliche Mitteilung, 2012.
- [Lup12] W. Lupton, B. Franksen, *State Notation Language and Sequencer Users' Guide*, Release 2.1.0, 2012.
- [ME12] ME-Meßsysteme GmbH, CAN Bus Grundlagen, <http://www.me-systeme.de/canbus.html>, April 2012.
- [Mot12] C. Motzko, *Analyse des Zerfalls  $\psi(2S) \rightarrow \chi_{c0}\gamma \rightarrow K_s K_s \pi^0 \pi^0 \gamma$  und Entwicklung eines Lichtpulsersystems für das PANDA-EMC*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik I, 2012.
- [Mus88] G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger, *Kern- und Elementarteilchenphysik*, VCH Verlagsgesellschaft, 1988.
- [PDG10] K. Nakamura et al. (Particle Data Group), *Review of particle physics*, J. Phys. **G37**, 075021 (2010), and 2011 partial update for the 2012 edition.

- [Pov09] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, *Teilchen und Kerne*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 8. Auflage, 2009.
- [Pro11] D. Protopopescu, H. Brand, F. Feldbauer, C. Motzko, P. Mullen, P. Zumbruch, *The Slow Controls System of PANDA*, GSI Scientific Report **2010**, 116 (2011).
- [Ryd05] A. Ryd, D. Lange, N. Kuznetsova, S. Versille, M. Rotondo et al., *EvtGen: A Monte Carlo Generator for B-Physics*, (2005).
- [Sch08] T. Schröder, *Untersuchung der Zustände  $D_{s1}(2536)^+$  und  $Z(3930)$* , Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik I, 2008.
- [Sch12] J. Schulze, *Analyse des Zerfalls  $\chi_{c0} \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$  bei BESIII und Entwicklung von mechanischen Komponenten für einen Prototypen des PANDA-EMC*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik I, 2012.
- [Son12] W. Song, *A summary of  $\psi'$  data taking status*, (Mar. 2012), BES-III internal note.
- [Sta12] P. Stanley, J. Anderson, M. Kraimer, EPICS 3-14 Record Reference Manual, [https://wiki-ext.aps.anl.gov/epics/index.php/RRM\\_3-14](https://wiki-ext.aps.anl.gov/epics/index.php/RRM_3-14), April 2012.
- [Wie09] U. Wiedner (PANDA Collaboration), *Hadron physics with PANDA*, *Hyperfine Interact.* **194**, 219–223 (2009).
- [Zim12] D. Zimoch, EPICS StreamDevice, <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/doc>, April 2012.
- [Zum12] P. Zumbruch, *Multi-purpose control implementation on HadCon*, <http://wiki.gsi.de/Epics/HadConMultipurposeControls>, April 2012.



# Lebenslauf

**Name:** Florian Feldbauer  
**Geburtstag:** 22. März 1985  
**Geburtsort:** Bochum  
**Eltern:** Gisbert Feldbauer  
Ute Feldbauer, geb. Beinecke

**Schulbildung:** 1991-1995  
Amtmann-Kreyenfeld Grundschule, Bochum

1995-2004  
Lessing-Gymnasium, Bochum  
Abschluss: Abitur

**Studium:** 2004  
Beginn des Studiums der Physik an der Ruhr-Universität Bochum

2007  
Abschluss des Grundstudiums mit der Bachelorarbeit zum Thema  
“Studien für Auslesedetektoren für PWO-Kristalle“  
am Lehrstuhl für experimentelle Hadronenphysik  
der Ruhr-Universität Bochum

2007-2008  
Anstellung als studentische Hilfskraft in der Fakultät für  
Physik und Astronomie der Ruhr-Universität Bochum

2009  
Abschluss des Hauptstudiums mit der Masterarbeit zum Thema  
“Studien zur Strahlenhärte von Bleiwolframat-Kristallen“  
am Lehrstuhl für experimentelle Hadronenphysik  
der Ruhr-Universität Bochum

seit Mai 2009  
Doktorandenstipendium der GSI und Promotion am Lehrstuhl für  
experimentelle Hadronenphysik der Ruhr-Universität Bochum



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuallererst möchte ich Prof. Dr. Ulrich Wiedner dafür danken, dass ich meine Masterarbeit im Rahmen des PANDA- und des BESIII-Experiments anfertigen und diese interessanten Themen bearbeiten konnte.

Ein besonderer Dank gebührt den Mitarbeitern PD. Dr. Fritz-Herbert Heinsius, Dr. Thomas Held, Dr. Matthias Steinke, Dr. Bertram Kopf und Dr. Torsten Schröder, die stets geduldige Ansprechpartner für Fragen und Probleme aller Art waren und nicht nur beim Korrekturlesen dieser Arbeit hilfreich zur Seite standen.

Auch bei den anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls möchte ich mich für das hervorragende, freundschaftliche Arbeitsklima und für zahlreiche angenehme Unterhaltungen auch jenseits der Physik bedanken.

Nicht zuletzt und besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, ohne deren Unterstützung während des Studiums diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.