Institut für Kernphysik

Westfälische Wilhelms-Universität
Münster

Kernspuremulsionen in Opera: Eine Studie zu Alphazerfällen und zur Kalibration mittels kosmischer Strahlung

Diplomarbeit
vorgelegt von

Timo Kellmann

Dezember 2000

Experimentelle Kernphysik

Institut für Kernphysik

Westfälische Wilhelms-Universität
Münster

Kernspuremulsionen in Opera: Eine Studie zu Alphazerfällen und zur Kalibration mittels kosmischer Strahlung

Diplomarbeit
vorgelegt von

Timo Kellmann

Dezember 2000

Experimentelle Kernphysik

Für meinen verstorbenen Vater
Peter Kellmann

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einführung

Photographische Emulsionen bieten sich in den Bereichen der Hochenergiephysik als Detektormaterial an, bei denen mit einer geringen Anzahl an Ereignissen gerechnet wird, deren Zeitpunkt nicht vorhersagbar ist - zum Beispiel in der Neutrinophysik. Sie bieten die Möglichkeit der dreidimensionalen Teilchenspur- und Wechselwirkungsvertexrekonstruktion bis zu einer Auflösung von 0,6μm, ohne dabei eine Totzeit aufzuweisen. Durch die hohe Ortsauflösung können auch kurzlebige Teilchen mit einer Lebensdauer von 10^{-12} bis 10^{-13}s aufgelöst werden [Hos86].

Das erste Mal wurde Photoemulsion zufällig als Detektor für Kernprozesse verwendet. 1896 entdeckte Bequerel, daß eine Photoplatte, die er neben einem Stück Pechblende liegen ließ, geschwärzt wurde [Ger95]. 1971 wurde der erste Charm-particle-Zerfall[1] mittels Kernspuremulsionen, die in einem Flugzeug kosmischer Strahlung ausgesetzt waren, gefunden. Da das Auslesen und Justieren per Hand und Mikroskop zeitaufwendig und arbeitsintensiv war, konnten sie nicht großflächig eingesetzt werden. Erst durch die Entwicklung von computerunterstützten beziehungsweise -gesteuerten Mikroskopen, die die Positionierung und das Auslesen wesentlich vereinfachten und beschleunigten, in Kombination mit elektronischen Detektoren, die eine ungefähre Positionsvoraussage erlauben, wird der großflächige Einsatz der Emulsionen möglich. So liegt die Geschwindigkeit inklusive Analysierens eines geübten Scanners für einen *View* (150 x 120μm^2) im Minutenbereich, während die modernen Mikroskope (UTS=**U**ltra **T**rack **S**elector) in Nagoya eine Geschwindigkeit von 3 *Views*/s haben.

Leider besitzen die heutigen Kernspuremulsionen auch erhebliche Nachteile. Die photographisch empfindlichen Schichten können nicht in beliebiger Dicke produziert werden. Da die zur Entwicklung benötigten Flüssigkeiten die Emulsion gleichmäßig durchdringen können müssen, ist ihre Dicke nach oben begrenzt. Zudem schrumpft die Emulsion während des Entwicklungsprozesses, wodurch

[1] Damals noch X-particle genannt.

sie sich verzieht. Außerdem muß die Emulsion, um gute Resultate zu erzielen, während der Datennahme per Mikroskop genügend und gleichmäßig ausgeleuchtet werden können. Um Winkelinformationen über die Teilchenspur zu bekommen oder Vertizes innerhalb der Emulsion zu sehen, darf sie auch nicht zu dünn sein. In dem OPERA-Experiment[2] werden $50\mu m$ dicke Emulsionen genutzt, die beidseitig auf eine $200\mu m$ dicke Plastikscheibe (*Base*) gegossen werden.

Mit dem OPERA-Experiment soll die $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ Neutrinooszillation untersucht werden. Es ist ein Long-baseline ν_τ-appearance Experiment: Am CERN in der Schweiz wird ein Myon-Neutrinostrahl erzeugt, 732km weiter, im Gran Sasso (Mittelitalien), steht der Detektor, in dem Tauon-Neutrinos durch eine schwache Wechselwirkung mit Ladungsübertrag detektiert werden sollen. Der Detektor besteht aus vielen einzelnen Schichten Photoemulsion und Blei (siehe Kapitel 4.1). Hinter diesen befinden sich elektronische Detektoren, deren Aufgabe es ist, den Ort der Neutrinowechselwirkung zu lokalisieren und eine Voraussage für das anschließende Scannen der Emulsionen zu liefern. Um die Anzahl an Untergrundereignissen auf ein Minimum zu reduzieren, wird der Impuls des Myons als Zerfallsprodukt des Tauons benötigt. Der elektronische Detektor wird bei der Impulsbestimmung durch die Analyse der Mehrfachstreuung in den Bleiplatten zwischen den Emulsionen unterstützt (siehe Kapitel 2). Bei dem favorisierten Verfahren wird dazu eine genaue Kalibration der Emulsionsplatten untereinander benötigt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Möglichkeit untersucht, kosmische Strahlung, wie im OPERA-Experiment geplant, zu verwenden, um die Emulsionsplatten zu kalibrieren (siehe Kapitel 4). Als Einstieg in die Emulsionstechnologie wurden Alpha-Zerfälle schwerer Elemente, die als Verunreinigung in der Emulsion vorhanden sind, untersucht (siehe Kapitel 3).

In Anhang B findet sich schließlich eine Beschreibung der implementierten und in Anhang C eine kurzer Überblick über die für das Scanning in Münster verbesserten und erweiterten Programme.

[2]**O**scillation **P**roject with **E**mulsion-t**R**acking **A**pparatus

Kapitel 2

Theorie

Die in photographischen Emulsionen festgehaltenen Teilchenspuren werden durch elektromagnetische Wechselwirkung geladener Teilchen mit den Ag^+ / Br^- Ionen in der Emulsion erzeugt. (Der Nachweis neutraler, bei einem Zerfall entstehenden Teilchen kann zum Beispiel über Knickwinkelbestimmung und Impulserhaltung, beziehungsweise deren Zerfallsprodukte geschehen.) In diesem Kapitel werden die physikalischen Prozesse für den Energieverlust eines geladenen Teilchens, seine Streuung und der daraus resultierenden Vielfachstreuung beim Durchgang durch Materie erklärt. Im Folgenden wird kurz die Theorie zu Alpha-Zerfällen und die Energie-Reichweitenbeziehung für Alpha-Teilchen in Kernspuremulsion vorgestellt.

2.1 Energieverlust

Der Großteil des Energieverlustes eines geladenen Teilchens beruht auf Ionisation und elektromagnetischer Anregung der Elektronen im durchquerten Material; der semiklassisch berechnete Energietransfer bei einem Stoß ist [Fer92]:

$$\Delta E = \frac{2 z_1^2 z_2^2 e^4}{b^2 v_1^2 m} \tag{2.1}$$

mit : z_1 Ladung des einfallenden Teilchens
z_2 Ladung des Stoßpartners
b Stoßparameter (Abstand in dem das Teilchen ohne Streuung am Kern vorbeifliegen würde)
v_1 Geschwindigkeit des einfallenden Teilchens und
m Masse des Stoßpartners.

Vergleicht man den Energieverlust durch Stöße mit Elektronen ($m = m_e$, $z_2 = 1$, Anzahl $= Z$) mit dem durch Stöße mit den Kernen ($m \approx 2Zm_p$, $z_2 = Z$, Anzahl = 1), so findet man:

$$\frac{\Delta E_{e^-}}{\Delta E_N} = \frac{Z}{m_e}\left(\frac{Z^2}{2Zm_p}\right)^{-1} \approx 4000. \tag{2.2}$$

Ein Teilchen verliert deshalb den größten Teil seiner Energie durch Wechselwirkung mit den Elektronen.
Aus quantenmechanischer Rechnung ergibt sich für den differentiellen Energieverlust pro Länge die *Bethe-Bloch-Formel*:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_0 z^2 e^4 c^2}{m\beta^2}\frac{Z}{A}\left[\ln\left(\frac{2m\beta^2c^2}{I\left(1-\beta^2\right)}\right) - \beta^2\right]. \tag{2.3}$$

Wobei m die Elektronenmasse, z die Ladung (in Einheiten von e) und $\beta = v/c$ (Geschwindigkeit relativ zur Lichtgeschwindigkeit), N_0 die Loschmidt-Avogadro-Zahl, Z und A die Ordnungszahl und Massenzahl der Atome des Materials und x die Dicke der durchquerten Schicht (in g cm^{-2}) sind. Die Größe I bezeichnet das mittlere Anregungspotential der bremsenden Substanz (gemittelt über alle Elektronen) das ungefähr 10 Z eV beträgt.
Der spezifische Energieverlust (dE/d(ρx)=1/ρ dE/dx, ρ = Dichte des Absorbers) ist proportional zu Z^2/m. Bei einer bestimmten Energie gibt es ein Ionisationsminimum; unterhalb dieser ist der Energieverlust zudem proportional zu 1/v^2 [Fra99].

2.2 Elastische Streuung

Beim Durchgang durch Materie wird ein Teilchen durch die zahlreichen Stöße von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt. Für die quantitative Berechnung ist bei kleinen Abständen die endliche Ausdehnung des Kerns und bei großen Abständen der *screening-Effekt*[1] zu beachten. Eine semiklassische Berechnung für schnelle geladene Teilchen mit einem bis $r = a$ (klassischer Atomradius) reichweitigen Coulombpotential ergibt für den differentiellen Wirkungsquerschnitt [Jac98]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \left(\frac{2zZe^2}{E}\right)^2 \frac{1}{\left(\theta^2+\theta_{min}^2\right)^2}, \tag{2.4}$$

wobei Z Ladungszahl des Stoßpartners im Material, z und E Ladungszahl und Energie des gestreuten Teilchens, θ der Streuwinkel und θ_{min} der durch den screening-Effekt bestimmte minimale Winkel

$$\theta_{min} = \frac{2zZe^2}{Ea} \tag{2.5}$$

[1] Bei großen Abständen (kleinen Streuwinkeln) wird das Coulomb-potential des Kerns durch die Elektronen abgeschirmt.

ist. Wegen der Proportionalität des Term zu θ^{-4} überwiegen kleine Winkel bei der Streuung. Da der Wirkungsquerschnitt ferner proportional zu Z^2 des Stoßpartners ist, ist die Wahrscheinlichkeit für die Streuung am Atomkern (Anzahl=1) proportional zu $1 \cdot Z^2 = Z^2$; dagegen ist die Wahrscheinlichkeit für die Streuung an den Elektronen (Anzahl=Z) proportional zu $Z \cdot 1^2 = Z$. Die Atomkerne sind daher der dominierende Faktor für die Streuung bei kleinen Winkeln.

2.3 Mehrfachstreuung

Die Gesamtablenkung eines Teilchens, welches ein Material endlicher Dicke durchquert, setzt sich aus vielen kleinen Streuwinkeln zusammen. Wegen des θ^{-4}-Faktors werden die stärkeren Ablenkungen unterdrückt, so daß man das erhaltene Spektrum näherungsweise in zwei Bereiche unterteilen kann, in dem größere Ablenkwinkel aus einer einzigen Streuung mit großem Winkel herrühren, und sich kleine Winkel aus vielen Streuungen bei kleinen Winkeln zusammensetzen.

Die Winkel vieler Streuungen sind nahezu gaußförmig um die Vorwärtsrichtung verteilt. Daher ist die statistische Streuung des Streuwinkels ein Maß für den Impuls eines Teilchens.
Im Experiment wird die Projektion des Raumwinkels auf zwei zueinander orthogonale Ebenen mit Schnitt in Strahlrichtung betrachtet (siehe Abbildung 2.1). Dabei ist (für kleine Winkel) [PDB98]:

$$\theta_0 = \theta_{plane}^{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}}\theta_{space}^{RMS} \tag{2.6}$$

mit:

$$\theta_0 = \frac{13,6 \cdot 10^6}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0,038 \cdot ln\left(\frac{x}{X_0}\right)\right), \tag{2.7}$$

aus der *Molière-Theorie* wobei p (in eV/c) den Impuls des einfallenden Teilchens, βc seine Geschwindigkeit, z seine Ladung angibt, und $\frac{x}{X_0}$ die Dicke des durchquerten Mediums in Einheiten der Strahlungslänge ist ($X_0 = 5,6mm$ für Pb)[2]. Es ergibt sich für den projizierten Winkel die Verteilung:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_0} e^{-\left(\frac{\theta_{plane}^2}{2\theta_0^2}\right)} d\theta_{plane} \tag{2.8}$$

und schließlich die Verteilung der Austrittsdifferenzen im Ortsraum:

$$Y_{plane}^{RMS} = \frac{1}{\sqrt{3}} x \theta_{plane}^{RMS}. \tag{2.9}$$

Somit ist die Verteilung der Positionsdifferenzen zwischen aus der letzten Emul-

[2] θ_0 stimmt für alle Z mit einer Genauigkeit von 11% (oder besser) für $10^{-3} < \frac{x}{X_0} < 100$ bei einfach geladenen Teilchen mit β=1 [PDB98].

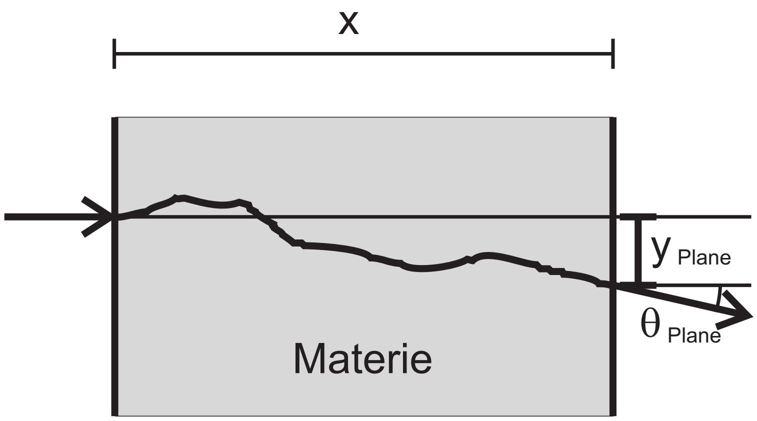

Abbildung 2.1: Definition der Variablen bei der Mehrfachstreuung.

sionsplatte extrapolierter und gemessener Position ein Maß für den Impuls eines Teilchens.

2.4 Alpha-Teilchen

Um mit der Emulsionstechnik vertraut zu werden wurden in dieser Diplomarbeit die Spuren von Alpha-Zerfällen in Kernspuremulsionen untersucht. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den verschiedenen emulsiontechnisch bedingten Effekten, wie Verzerrung (*Distortion*), Schrumpfung (*Shrinkage*), meßtechnisch, physikalisch und emulsionsbedingter Positionsauflösung und der aus diesen Effekten resultierenden Energieauflösung.

2.4.1 Der Zerfall

Eine Theorie der verschiedenen Halbwertszeiten und ihre Abhängigkeit von der Energie für den Alpha-Zerfall wurde 1928 von George Gamov entwickelt. Sie beschreibt den Zerfall durch einen quantenmechanischen Tunneleffekt durch das Coulomb-Potential des Kerns. Die bei dem Zerfall freiwerdende Energie ΔE teilt sich auf in kinetische Energie des Alpha-Teilchens und Rückstoßenergie des Kerns. Da es sich dabei um einen Zweikörperzerfall handelt, und der Tochterkern bei den betrachteten Zerfällen mehr als 20x schwerer ist als das Alpha-Teilchen, geht die Gesamtenergie in guter Näherung auf das Alpha-Teilchen über.

2.4.2 Spuren in der Emulsion

Aus der Bethe-Bloch-Formel ergibt sich für die mittlere Energie-Reichweitenrelation Abbildung 2.2. Die beobachtbaren Abweichungen von dem Graphen rühren von *capture and loss*-Effekten am Ende der Reichweite her

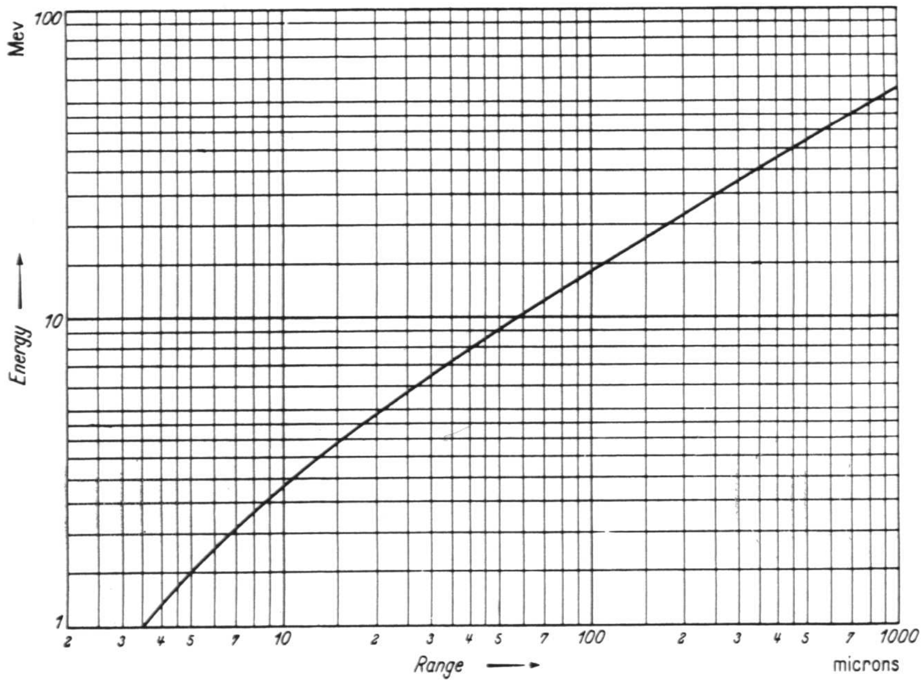

Abbildung 2.2: Energie- Reichweitenbeziehung für Alpha-Teilchen in Kernspuremulsion. Der von den Alpha-Zerfällen betroffene Energiebereich liegt zwischen 4,5MeV und 9MeV. Entnommen aus [Pow59].

[Pow59]. Da sich in dem Energiebereich von 4,5MeV bis 9MeV der Graph in guter Näherung durch eine Grade anfitten läßt, ist die Energie-Reichweitenbeziehung:

$$E = c \cdot l^r \tag{2.10}$$

mit c und r Konstanten. Aus dem Diagramm ergibt sich: $r \approx 0.68$ und $c \approx 1$.

Kapitel 3

Spuren von Alpha-Zerfällen in der Kernspuremulsion

In diesem Kapitel werden Alpha-Zerfallsspuren in Kernspuremulsionen untersucht. Zunächst werden die Zerfallsreihen vorgestellt und aufgrund der beobachteten Geometrie der Zerfallsspuren eine Einschränkung der möglichen Startelemente vorgenommen. Dann werden meßtechnisch und physikalisch bedingte Auswirkungen auf die Messung im Rahmen einer Simulation vorgestellt. Nach einer kurzen Analyse der Reproduzierbarkeit einer Messung wird das Ergebnis der Simulation mit den experimentellen Daten verglichen. Zum Schluß werden die gemessenen Zerfallsspurgruppen durch Vergleich der Spurlängen in Verbindung mit einer genaueren Analyse der Geometrie den Zerfallsreihen zugeordnet. Dabei werden Fehlinterpretationen diskutiert und mit dem Ergebnis der Simulation verglichen.

Die beidseitig mit $330 \mu m$ dicker Emulsion beschichteten Plastikträger (*Emulsion-sheets*), die auf Spuren von Alpha-Zerfällen untersucht wurden, stammen aus dem E531-Experiment am Fermilab. Die Daten wurden mit Mikroskopen, bei denen die Positionierung vom Computer übernommen wird (*semi-automatische Mikroskope*), in Nagoya [Ope00] und Münster [Bru98, Nau00, Rum00, Kuk01] gemessen (*Scanning*).

3.1 Die Zerfallsreihen

Von den insgesamt vier existierenden Zerfallsreihen kann die Zerfallsreihe $(4n+1)$ mit Endprodukt ^{209}Bi in der Natur nicht mehr beobachtet werden, da das langlebigste Element, das ^{237}Np eine Halbwertszeit von nur $2 \cdot 10^6$ Jahren hat und somit seit der Bildung der schweren Elemente vor $4,5 \cdot 10^9$ [Dem98] Jahren zerfallen ist. Mögliche Kandidaten für Startelemente sind zum Beispiel ^{227}Ac, ^{230}Th, ^{226}Ra und ^{228}Ra/Th. Alle in der Emulsion beobachteten Gruppen von Zerfallsspuren bestanden stets aus fünf Einzelspuren (*5-prong-Zerfälle*). Da die Emulsionen ein halbes Jahr nach der Herstellung entwickelt wurden, reduziert sich die Menge der

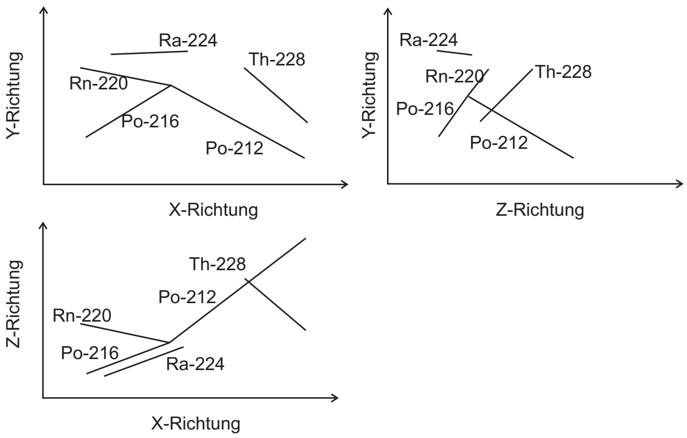

Abbildung 3.1: Skizze der Spuren eines 5-prong-Alpha-Zerfalls in drei verschiedenen Projektionen.

möglichen Elemente, die als Ausgangselement (*Startelement*) in Frage kommen. Es kommen aus den drei in der Natur vorkommenden Zerfallsketten nur diejenigen 5 aufeinanderfolgenden Alpha-Zerfälle in Betracht, bei denen die Lebenszeit des Startelementes wesentlich größer als ein halbes Jahr, die des Endproduktes mindestens ein halbes Jahr, und die Lebenszeit der Zwischenprodukte kleiner als ein halbes Jahr sind (siehe Tabelle 3.1).
Die 4n+2-Reihe (^{230}Th und ^{226}Ra) wurde deshalb nicht beobachtet: Aufgrund der Halbwertszeiten ist die Wahrscheinlichkeit vier gegenüber fünf Alphaspuren nebeneinander zu sehen 99:1. Das Startelement für die 4n-Zerfallsreihe ist ^{228}Ra/^{228}Th und für die 4n+3-Zerfallreihe ^{227}Ac.
Für die exakte Berechnung der Zerfallswahrscheinlichkeiten ist zu beachten, daß durch die sukzessiven Zerfälle der Zeitraum, in dem die Tochterelemente zerfallen müssen, um eine weitere Spur in der Emulsion zu erzeugen, kleiner als ein halbes Jahr ist. Da allerdings die Halbwertszeiten höchstens eines der Elemente in der Größenordnung eines halben Jahres liegt, ist es unnötig, die Wahrscheinlichkeiten exakt zu berechnen.
Die Tabelle 3.1 zeigt daher die Wahrscheinlichkeiten, die Spur (*Track*) des *jeweils nächsten* Alpha-Zerfalls innerhalb eines Jahres zu sehen; die Zerfallswahrscheinlichkeit der Beta-Zerfälle wurde dabei bereits eingerechnet.
Die beiden übriggebliebenen Zerfallsreihen sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Als Besonderheit ist zu erwähnen, daß sich die ^{228}Th Zerfallsreihe bei ^{212}Bi aufspaltet. Dies zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von 33,7% durch einen Alpha-Zerfall in ^{208}Tl und von dort durch einen Beta-Zerfall zum ^{208}Pb. Mit 66,3% Wahrscheinlichkeit zerfällt es zuerst über einen Beta-Zerfall in ^{212}Po und von dort durch einen Alpha-Zerfall zum selben Endelement (^{208}Pb).
Für die Datennahme in Münster wurde in das Manual-Scanning-Programm ein

Start-element	Wahrscheinlichkeit für die *Alpha*-Zerfälle in %					
	1. Zerfall	2. Zerfall	3. Zerfall	4. Zerfall	5. Zerfall	6. Zerfall
^{231}Pa	0.001	1.58	100	100	100	100
^{230}Th	$4.3 \cdot 10^{-4}$	0.02	100	100	100	0.91
^{232}Th	$2.4 \cdot 10^{-9}$	0.97	100	100	100	100

Tabelle 3.1: Tabelle der Wahrscheinlichkeiten den nächsten Alpha-Zerfall innerhalb eines Jahres zu sehen.

Programmteil zum Scannen der Spuren von Alpha-Zerfällen implementiert (siehe Anhang C.1). Nach der Messung wurden die 5-prong-Zerfälle durch Trackgeometrie und Tracklängen den entsprechenden Zerfallsreihen zugeordnet.

3.2 Die Simulation

Zum näheren Verständnis physikalisch und meßtechnisch bedingter Effekte und deren Einfluß auf die gemessenen Trackdaten wurden verschiedene Faktoren simuliert. In diesem Kapitel werden sie diskutiert und ihre Auswirkungen vorgestellt.

3.2.1 Erfaßte Effekte

Physikalisch bedingte Effekte

- *Verschiedene Ausgangselemente*: Die in der Emulsion gemessenen Zerfallsspuren können aus mehreren verschiedenen Zerfallsketten stammen. Daher wurde die Möglichkeit verschiedener Startemelente implementiert. Die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Startelemente können variiert werden, um eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten zu erhalten.

- *Meßunsicherheiten durch die Grain-size*: Da die einzelnen Ag-Körner (*Grains*) bei ihrer Entstehung in alle Richtungen wachsen, läßt sich nicht genau sagen, wo das Teilchen urprünglich durchgegangen ist[1] [2]. Die Größe

[1] Von Gurney u. Mott (1938), Hamilton (1968) u. Mitchell (1978) wurden verschiedene Theorien zur Beschreibung der Bildentstehung in photographischer Emulsion entwickelt. Alle gehen davon aus, daß im $Ag^{+}Br^{-}$ Kristall (infolge von Frenkel-Defekten) Silber-Ionen auf Zwischengitterplätzen vorhanden sind. Teilchen mit ausreichender Energie erzeugen Elektron/Loch-Paare, indem sie das Elektron eines Bromid-Ions vom Valenz- ins Leitungsband heben und ein Defektelektron zurückbleibt. Durch die Vereinigung mehrerer Elektronen mit mehreren Silberionen entsteht ein Silberaggregat (*Latentbildkeim*), bei dessen Bildung sog. Reifekeime aus $Ag2S$ beteiligt sind [RCL95].

[2] Auch bei gleichförmigem Wachstum des Grains in alle Richtungen, bleibt diese Unsicherheit durch Klicken auf den Mittelpunkt eines 3-4 Pixel großen Grains.

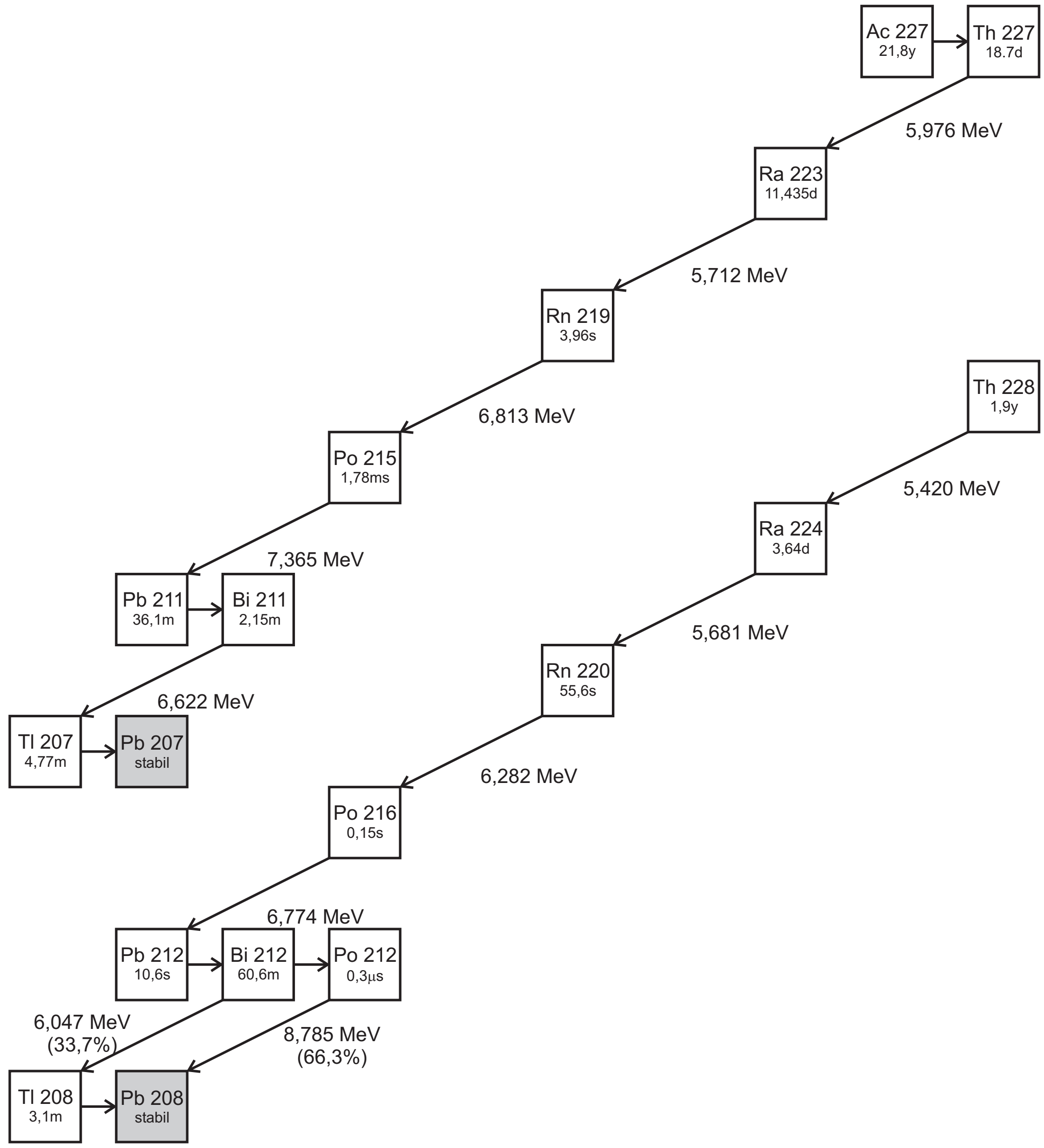

Abbildung 3.2: Die in Frage kommenden Zerfallsreihen unter den 5-prong-Zerfällen.

eines Korns liegt bei der im E531-Experiment verwendeten Emulsion im 0,6μm ($\pm 30\%$) Bereich. Gemessen wurde dies mittels der Ausdehnung des geschwärzten Bereiches (in Pixeln) verschiedener Grains innerhalb eines Views. Ein Alpha-Teilchen ist jedoch stark ionisierend; eine Spur ist daher größer als ein normales Grain: $\approx 1,1 \mu m$ ($\pm 20\%$).

- *ungleichmäßiges Schrumpfen*: Die Dicke der Emulsion betrug vor der Entwicklung 330μm. Da die Emulsion durch den Entwicklungsprozeß schrumpft, wurde der Schrumpfungsfaktor (*Shrinkage*) an verschiedenen

Stellen der Emulsion bestimmt. Sein Mittelwert lag bei 2,4 (± 0,1).

- *Distortion*: Durch das Entwickeln der Photoemulsion wird die Emulsionsschicht nicht nur dünner, sondern es kommt auch zu lokal unterschiedlicher Verzerrung (*Distortion*) innerhalb der Emulsion. Aufgrund der in Nagoya erhaltenen Daten wurde die Streuung der Distortion bei einer räumlichen Differenz in der xy-Ebene von $40\mu m$ auf $< 0,1\mu m$ bestimmt. Der Effekt auf die Meßergebnisse ist damit gering.

- *Verkürzung der Tracklänge*: Liegt der Track nahe an der Oberfläche der Emulsion, könnte das Teilchen die Emulsion verlassen haben. Der Track wäre in dem Fall zu kurz. Deshalb werden 5-prong-Zerfälle aussortiert, bei denen ein Track zu dicht an der Oberfläche liegt.

- *Wanderung des Kerns*[3]: Zwischen den einzelnen Zerfällen kann der Kern durch *Brownsche Bewegung* wandern. Bei den beobachteten Gruppen von Zerfallsspuren hatten stets drei Zerfälle denselben Ursprungsort, während die beiden anderen etwas entfernt lagen ($5\mu m$ und $16\mu m$).

Meßtechnisch bedingte Effekte

- *Meßunsicherheiten durch die z-Auflösung*: Die *Schärfentiefe* des Mikroskops ist zwar klein (laut Linsenspezifikation 3-$5\mu m$), aber endlich. Daher kann die z-Position nicht genau bestimmt werden. Beim Scannen der Spuren wurden die Trackenden jeweils bei 65% (±20%) der Fokaltiefe eingestellt (siehe Abbildung 3.3). Das bedeutet: Die Tracklänge war systematisch zu kurz. Besonders stark wirkt sich dieser Effekt auf steil zur z-Richtung liegende Tracks aus (siehe Abbildung 3.6). (Dieser Effekt ist kein Hystereseeffekt der Mikroskopsteuerung, da die Spuren stets von einer Seite aus angefahren wurden.)

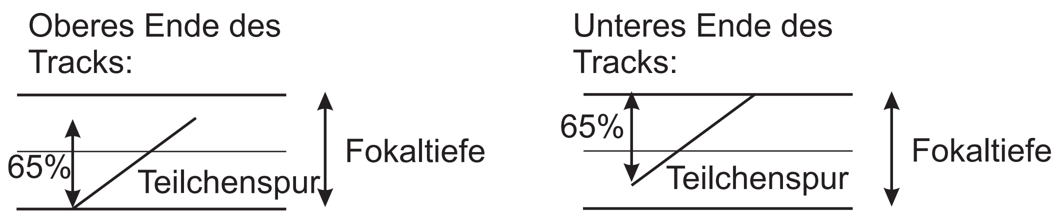

Abbildung 3.3: Bestimmung der Schärfentiefe.

- *Wärmeausdehnung*: Da die Emulsionen im Durchlichtverfahren gescannt werden und eine Halogenlampe als Lichtquelle gewählt wurde [Bru98], dehnt sich die Emulsion, trotz eines Infrarot-Filters vor der Lampe, während

[3]Dies dient hauptsächlich der dreidimensionalen, graphischen Ausgabe.

des Meßvorgangs aus. Die Wärmeausdehnung ($\frac{\Delta L}{L}$) während der Meßzeit betrug $\approx 4\%$.

Auswertungsbedingte Effekte

- *Vertauschung zweier Längen*: Bei der Auswertung wird angenommen, daß die Alpha-Teilchen mit kürzeren Tracks auch weniger Energie hatten. Durch die verschiedenen zuvor diskutierten meßtechnisch und physikalisch bedingten Effekte kann es dabei allerdings zu Fehlidentifikationen kommen. Die Anzahl vertauschter Tracklängen wird hierbei ermittelt.

- *Falsche Zerfallszuordnung*: Aufgrund der variierenden Längen kann ein Zerfall durch eine *Least-squares*-Abweichung der falschen Zerfallsreihe zugeordnet werden. Der Anteil dieser Fehlidentifikationen wird ebenfalls mitprotokolliert.

3.2.2 Der Simulationsverlauf

Die Simulation hält sich in ihrer Vorgehensweise streng an den chronologischen Ablauf: Zuerst wird per Zufall die Zerfallsreihe bestimmt. Danach zerfallen die Kerne in beliebiger Tiefe innerhalb der Emulsion, wobei auch die Kernwanderung einbezogen wird. Hier gehen bereits die verschiedenen *Cuts* für die Position an der Oberfläche mit in die Berechnung ein. Dann wird die Emulsion durch Entwicklung geschrumpft und verzogen. Beim Scannen werden Graingröße, Fokaltiefe und die Erwärmung miteinbezogen und bei der Auswertung die Mißdeutung der Trackenergie beziehungsweise des Zerfalls.

3.2.3 Der Aufruf

Die Simulation benötigt verschiedene Parameter:

```
sim21 Modus #Simulationen [Option]
```

Wobei der Modus folgende Werte annehmen kann:

- *Modus 0:* „Normale“ Simulation.
  Es werden $\approx$ 100 000 Simulationen durchgeführt. Dabei wird ein Histogramm erzeugt für eine beobachtbare Größe, die durch den Options-Parameter spezifiziert wird: Winkel in xy-Ebene, Winkel gegen die z-Achse, Längen (total, in xy-Richtung, in z-Richtung), (zurückgerechnete) Energie. Es wird protokolliert, wieviele Spuren der 5-prong-Alpha-Zerfälle aufgrund der verschiedenen oben genannten Effekte zurückgewiesen, übersehen, gekürzt, mißidentifiziert oder dem falschen Zerfall zugeordnet wurden.

- *Modus 1:* komplette Simulation.
  Es werden etwa zehn Simulationen durchgeführt, wobei alle Daten protokolliert werden (*detaillierter Debugmodus*).

- *Modus 2:* 3D-Display der Zerfälle.
  Es wird ein 5-prong-Zerfall simuliert, der in den verschiedenen Stadien (Zerfall, Entwicklung, Scanning, Analyse) mittels eines weiteren Programms in 3D-Darstellung angesehen werden kann.

- *Modus 3* erzeugt $\approx$ 10 000 5-prong-Zerfälle, die die diversen Filter (siehe Kapitel 3.2.1) passiert haben und somit als „gescannt“ angesehen werden. Die Ausgabe gleicht dem Scanningfile, welches das semiautomatische Scannen erzeugt. *(Dieser Modus dient zur Vorbereitung für Modus 4 und bewirkt, daß nicht bei jedem Neustart die komplette Simulation durchlaufen werden muß).* Er dient auch zur weiteren Auswertung der Simulationsdaten mit den Excel^{TM}-Tools.

- *Modus 4* erzeugt Gauß-gefaltete Meßdichteverteilungen (siehe Formel A.11) aus der mit Modus 3 gespeicherten Datei für die unter Modus 0 genannten Größen.

- mit *Modus 5* lassen sich die Zerfälle in Bezug auf die Vertauschung zweier oder mehrerer Tracklängen genauer analysieren. Die erzeugten Alpha-Zerfallsspuren werden nach dem simulierten Scannen nicht der Länge nach sortiert, sondern in ihrer alten Reihenfolge beibehalten. Auf diesem Weg lassen sich die Einflüsse der obengenannten Effekte auf die Meßdaten gut bestimmen.

3.3 Resultate: Simulation & Experiment

3.3.1 Experimentelle Daten

Reproduzierbarkeit

Zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Daten wurde derselbe 5-prong-Zerfall 25x auf dem Mikroskop in Münster bei bereits erwärmter Emulsion gescannt (siehe Abbildung 3.4). Bei dieser Messung trat bereits eine Fehlidentifikation der Tracklänge auf: In 23 Fällen war der 32,8 $\pm$ 1,5 μm lange Track (im Bild bei 30-40° gegen die z-Achse) länger als der 30,3 $\pm$ 1,3 μm lange (im Bild um 60° gegen die z-Achse). In 2 Fällen war die gemessene Tracklänge des letzteren jedoch länger als die des ersteren. Die Standardabweichung der Tracklänge in z-Richtung ist mit 1,6μm ca. 3x so groß wie die der auf die xy-Ebene projizierten Länge (0,55μm). Die Schwankung der Emulsionsdicke während des Experiments betrug 2,2μm bei einem Mittelwert von 140,6μm. Es war keine systematische Änderung

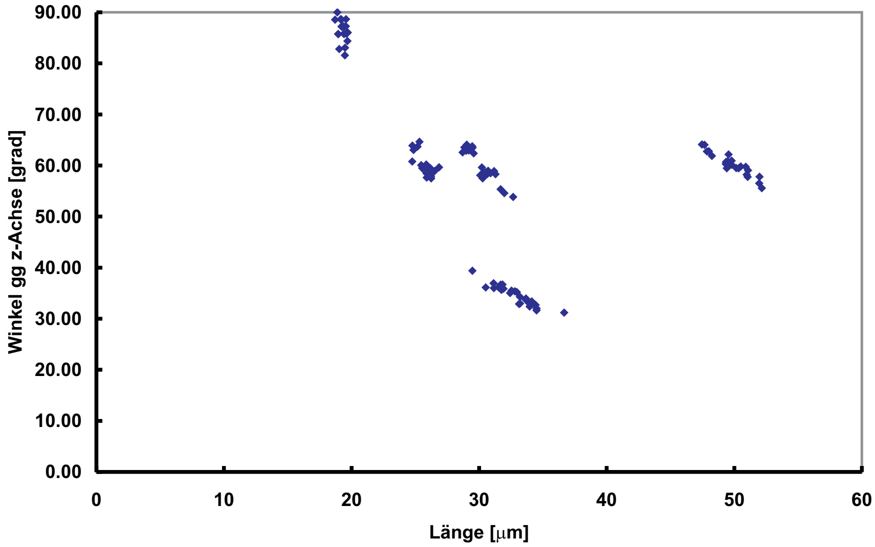

Abbildung 3.4: Reproduzierbarkeit der Tracklänge und des Winkels gegen die z-Achse. Die Spuren eines 5-prong-Alpha-Zerfalls wurden 25x gemessen.

der Dicke während der Messung zu erkennen. Die Korrelation der Tracklängen mit der Emulsionsdicke liegt weit unterhalb der Streuung der Meßwerte.

Winkelverteilungen

Zur Analyse mußten etwa 80% der 5-prong-Zerfälle verworfen werden, da die Tracks zu dicht an der Oberfläche lagen. Zunächst wurde die Häufigkeitsverteilung der Winkel gegen die z-Achse für die Alpha-Tracks untersucht. Flache Tracks wurden häufiger gescannt als steile Tracks (siehe Abbildung 3.5 und 3.6), da steile Tracks die Emulsion bevorzugt verlassen. Desweiteren wurde das Trackende im Mittel bei 65% anstatt genau in der Mitte des scharfen Bereiches eingestellt, wodurch die Länge in z-Richtung zu kurz bestimmt, und damit der Winkel gegen die z-Achse flacher wurde. Eine geringe Abhängigkeit der Länge vom Winkel ist ebenfalls auf die endliche Ausdehnung der Fokaltiefe zurückzuführen.

Umrechnung der Tracklänge in Energie

Um das Längenspektrum auf das Energiespektrum umzurechnen, wird der Flächeninhalt der Differenzkurve von experimentellem Spektrum und theoretischem Spektrum (siehe Energieen in Abbildung 3.2) minimiert, indem die Transformationsparameter c und r (siehe Formel 2.10) für das experimentelle Spektrum variiert werden. Man erhält eine Parameterschar, da eine leichte Variation des einen Parameters durch eine entsprechende Variation des 2. Parameters

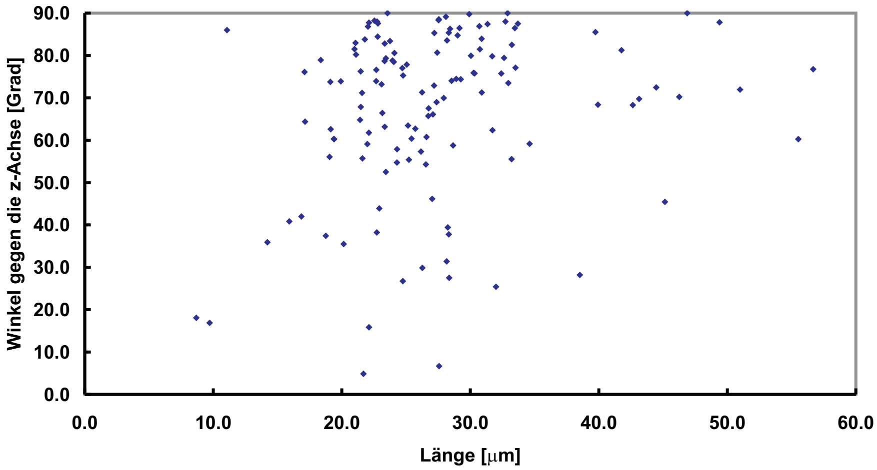

Abbildung 3.5: Winkel zur z-Achse gegen Spurlänge der in Münster vermessenen 5-prong-Zerfälle.

ausgeglichen werden kann, so daß die Differenzkurve näherungsweise denselben Flächeninhalt besitzt. Als günstige Parameter haben sich $c = 0,7$ und $r = 0,65$ herausgestellt, wenn l in μm und E in MeV gemessen wird[4]. (Die aus dem Diagramm 2.2 ermittelten Parameter sind $c \approx 1$ und $r \approx 0.68$).

3.3.2 Die Zerfallsreihenzuordnung durch die Tracklängen

Die einzelnen 5-prong-Zerfälle werden mittels einer *Least-squares*-Abweichung von den theoretischen Tracklängen kategorisiert. Es ergibt sich, daß 53% ± 11% der gemessenen Zerfälle aus der 4n - Zerfallsreihe mit Zerfallsweg über ^{212}Po und 36% ± 8% aus dergleichen Reihe, allerdings mit Zerfallsweg über ^{208}Tl stammen. 11% ± 5% wurden der ^{227}Ac-Reihe zugeordnet. Da die Peaks aufgrund der meßtechnischen Auflösung miteinander verschmelzen, ist eine Fehlidentifikation nicht auszuschließen (siehe auch Tabelle 3.2).

Das ermittelte Energiespektrum

Die mit den Emulsionen erreichbare Energieauflösung für Spuren von Alpha-Teilchen liegt bei 0,15-0,2MeV (siehe Abbildung 3.7).
Die Verschmierung des experimentellen Spektrums beruht zum Teil darauf, daß

[4]Eine gute Beschreibung der Parameterschar im Interval $r \in [0.5, 0.9]$ ist

$$c = 1,79r^4 - 10,0r^3 + 21,1r^2 - 20,3r + 7,9. \tag{3.1}$$

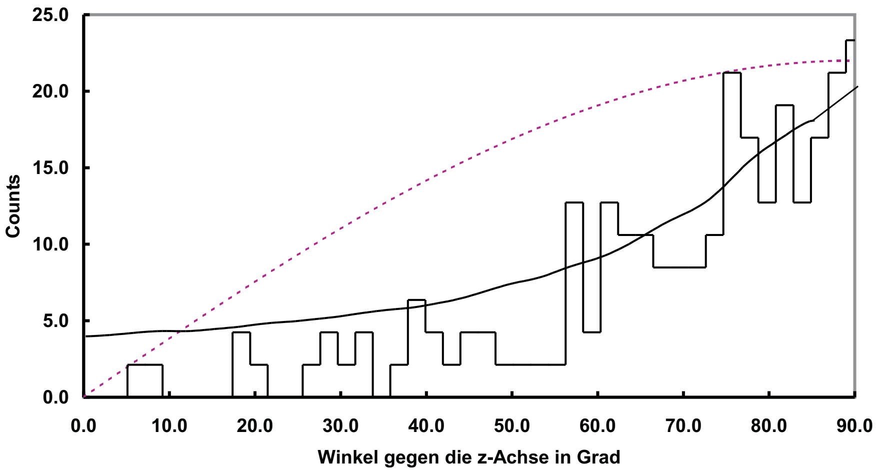

Abbildung 3.6: Häufigkeitsverteilung der Winkel gegen die z-Richtung. *Histogramm:* experimentelle Daten, *durchgezogene Kurve:* Simulation und *gestrichelt:* homogene Verteilung.

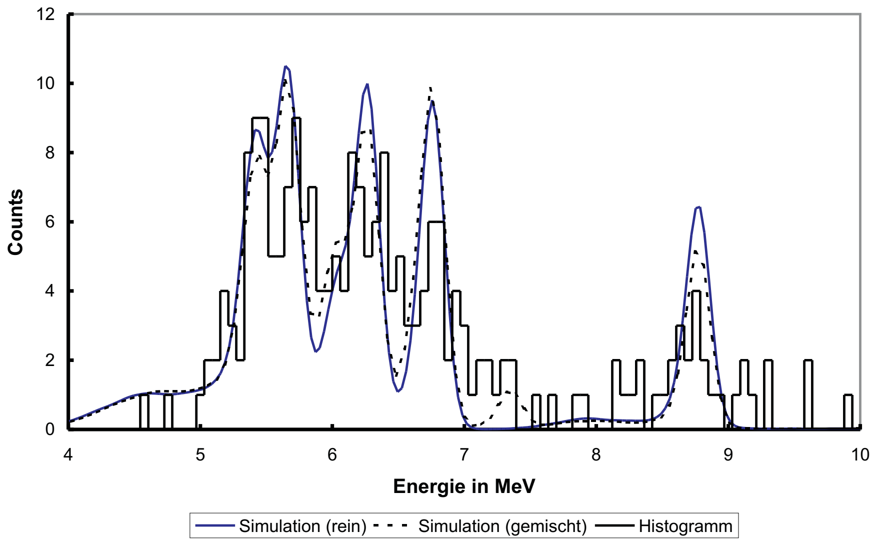

Abbildung 3.7: Vergleich simuliertes und gemessenes Energiespektrum. Die Halbwertsbreite der simulierten Spektren ist 0,2MeV. Das gemischte Spektrum besteht hier zu 11% ^{227}Ac, 36% ^{228}Th über ^{208}Tl und 53% ^{228}Th über ^{212}Po (angepaßt an die Least-squares-Zuordnung), das reine Spektrum zu 66,3% ^{228}Th über ^{212}Po und 33,7% ^{228}Th über ^{208}Tl (angepaßt an die Literaturwerte für den ^{228}Th-Zerfall).

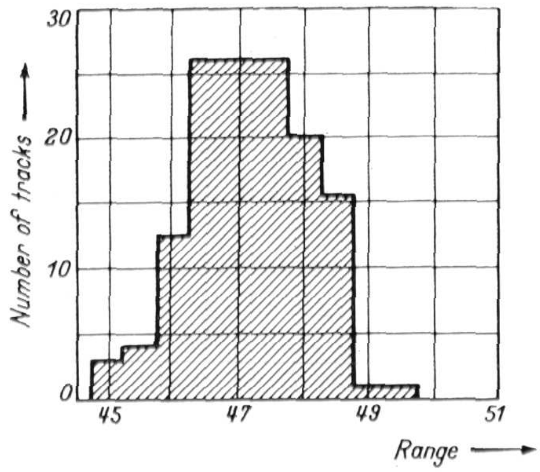

Abbildung 3.8: Verteilung der Reichweiten für fast homogene Gruppen von Alpha-Teilchen mit einer Energie von $\approx$ 8,95MeV in Kernspuremulsion. Entnommen aus [Pow59].

Alpha-Teilchen, die auf ihrem Weg ein Elektron aufnehmen eine größere Reichweite haben (siehe Abbildung 3.8)[5].

Kernwanderung der ^{228}Th - Zerfälle

Die Wanderung des Kerns nach den Zerfällen ist ein *Random-walk*. Daher ist der Abstand der Zerfallspunkte näherungsweise dreidimensional gaußverteilt. Experimentell ergibt sich, daß in den meisten Fällen der kürzeste Track am weitesten von dem Vertex entfernt liegt, von dem drei Teilchenspuren ausgehen: $\approx 17\mu m$ und der zweitkürzeste am zweitweitesten $\approx 5\mu m$. Der Abstand zwischen beiden ist $\approx 16\mu m$. Bei ^{227}Ac ist der erste Zerfall derjenige mit der zweitkleinsten Energie und bei dem zweiten Zerfall wird die kleinste Energie frei, also genau umgekehrt zum ^{228}Th (siehe Abbildung 3.2). Für die Abstandsverteilung ergibt sich Abbildung 3.9. Bei der Analyse der Tracklängen und ihrem Abstand zum Vertex wurden 32 5-prong-Zerfälle der ^{228}Th und 13 der ^{227}Ac - Reihe zugeordnet. Da die Energiedifferenz zwischen den beiden ersten Zerfällen der ^{228}Th-Reihe 0,26MeV beträgt, ist das Ausschließen einer Fehlidentifikation (Vertauschung der beiden Tracklängen) jedoch nicht möglich. Desweiteren ist zu beachten, daß die Bewegungsrichtungen nach dem ersten und dem zweiten Zerfall unkorreliert sind. So kann der erste Zerfall dichter am Zerfallsvertex liegen als der zweite. Außerdem sind Anfangs- und Endpunkt eines Tracks nicht voneinander unterscheidbar. In Kombination mit der Least-squares-Zuordnung liefert diese Analyse insofern nur

[5]Diesem Effekt wurde näherungsweise durch Faltung des simulierten Spektrums mit einer Gaußfunktion Rechnung getragen.

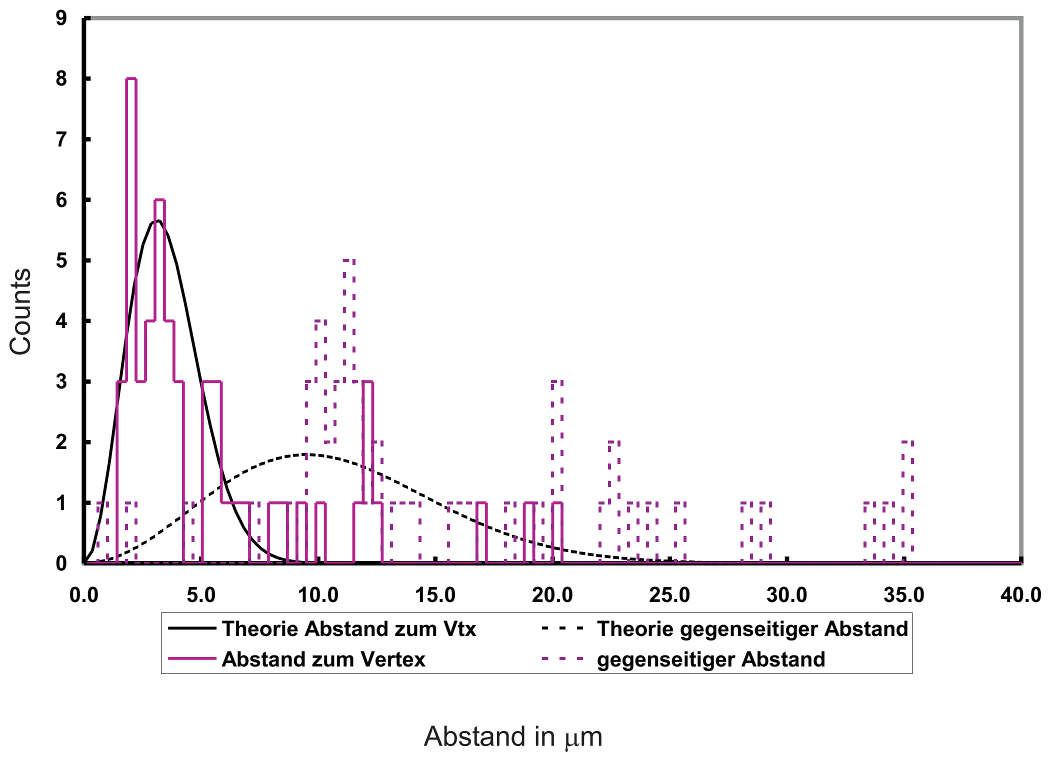

Abbildung 3.9: Kernwanderung zwischen den Zerfällen des ^{228}Th. *Durchgezogen:* Abstandsverteilung des zweitkürzesten Tracks zum Vertex, von dem drei Spuren ausgehen. *Gestrichelt:* Abstandsverteilung des kürzesten Tracks zum zweitkürzesten. Die *Histogramme* repräsentieren die experimentellen Daten, die *Kurven* entsprechen einer dreidimensionalen Gaußverteilung.

einen weiteren Hinweis darauf, daß keine ^{227}Ac - Zerfallsspuren vorhanden sind. In Tabelle 3.2 ist diese Kombination in Form eines Binärdiagramms dargestellt: v_1 beschreibt die Least-squares-Zuordnung zu den Zerfallsreihen und v_3 die geometrische Zuordnung aufgrund der Tracklängen und deren Abstand vom Vertex: ^{227}Ac (=1) oder ^{228}Th (=0). v_2 dient dazu, abschätzen zu können, wie relevant die Aussage von v_3 ist, denn in beiden Zerfallsreihen sollten die beiden kürzesten Tracks am weitesten vom Vertex entfernt liegen. Stimmt dies experimentell, so ist $v_2 = 1$, andernfalls 0.
Aus der Simulation ergibt sich, daß im Mittel bei 30% der 5-prong-Zerfälle eine Vertauschung der Tracklängen vorkommt (im Falle von reinen ^{228}Th Zerfällen wären es experimentell 33% ±9%). Das KV-Diagramm zeigt, daß experimentell in 28% ±8% der Fälle die beiden kürzesten Tracks vertauscht sind - in der Simulation waren es 20%. Für Least-squares-Zuordnung ergibt sich experimentell in 11% ±5%, in der Simulation in 4% der Fälle eine Fehlzuordnung zur ^{227}Ac-Zerfallsreihe, die alle aus dem ^{208}Tl-Weg des ^{228}Th stammen. Da die Gaußfaltung

	v_3	0	0	1	1
v_2	v_1	0	1	1	0
0		**4**	**1**	**0**	**3**
1		**26**	**1**	**3**	**7**

Tabelle 3.2: Karnaugh-Veitch Diagramm der Zuordnung zu den Zerfällen. v_1 bezeichnet den Least-squares-Vergleich der verschiedenen Zerfälle (0=Zuordnung zu ^{228}Th / 1=Zuordnung zu ^{227}Ac), v_2 (senkrecht) dient dazu die Relevanz von v_3 einschätzen zu können: (1=die beiden kürzesten Tracks hatten die beiden größten Abstände) und v_3: (0=der kürzeste Track hatte den kleineren Abstand zum Vertex (als der zweitkürzeste) -dies entspricht ^{228}Th, 1=der zweitkürzeste Track hatte den längeren Abstand - dies entspricht ^{227}Ac).

(simuliert näherungsweise die Tracklängenverteilung aus Abbildung 3.8) nicht in diese Analyse miteinbezogen wurde, sind die Prozentangaben der Simulation jedoch systematisch etwas zu klein.

3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kernspuremulsionen bieten eine Möglichkeit, bei einer Auflösung von 0,15-0,2MeV, Spuren von Alpha-Zerfällen zu messen. Unterstützt durch die geometrische Anordnung ist es damit möglich, eine Gruppe von Zerfallsspuren einer Zerfallsreihe zuzuordnen. So wurden die in der Emulsion durch Verunreinigung entstandenen Zerfallsspuren der ^{228}Th-Reihe zugeordnet. Der Vergleich der experimentellen Daten mit der Simulation zeigt, daß es sich bei den 5-prong-Zerfällen, die der ^{227}Ac-Reihe zugeordnet wurden, um Fehlidentifikationen handeln kann: Die aus der Simulation ermittelte Wahrscheinlichkeit für eine derartige Fehlidentifikation und der prozentuale Anteil der Zuordnung zu ^{227}Ac liegen im Rahmen der Meßgenauigkeit nahe zusammen.
Die Möglichkeit der Zerfallszuordnung läßt sich zum Beispiel verwenden, um einen einfachen und kostengünstigen Detektor zur Bestimmung des Radongehaltes in der Luft zu konstruieren: In einer lichtdichten Box wird die Emulsion einem definierten Luftstrom ausgesetzt. Radon kann, da es ein Edelgas ist, in die Emulsion eindringen und dort zerfallen. Zur Analyse des Radongehaltes vergleicht man diese Emulsion mit einer weiteren, die in Luft mit einer bekannten Radonkonzentration ausgesetzt wurde. Aus dem Vergleich der Dichte der Radonzerfälle läßt sich die unbekannte Radonkonzentration errechnen.

Kapitel 4

Kalibration mittels kosmischer Strahlung

> Every single emulsionsheet is a small experiment.
> *(Kimio Niwa)*

Mit dem OPERA-Experiment soll die $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ Neutrinooszillation durch eine schwache Wechselwirkung mit Ladungsübertrag des ν_τ untersucht werden. Daher wird eine große Targetmasse und eine hohe Ortsauflösung des Detektors benötigt. Realisiert wird dies durch ungefähr 235000 einzelne *Bricks* (siehe Abbildung 4.1), die aus 56 Lagen abwechselnd 1mm dicker Bleiplatten (für die Targetmasse) und

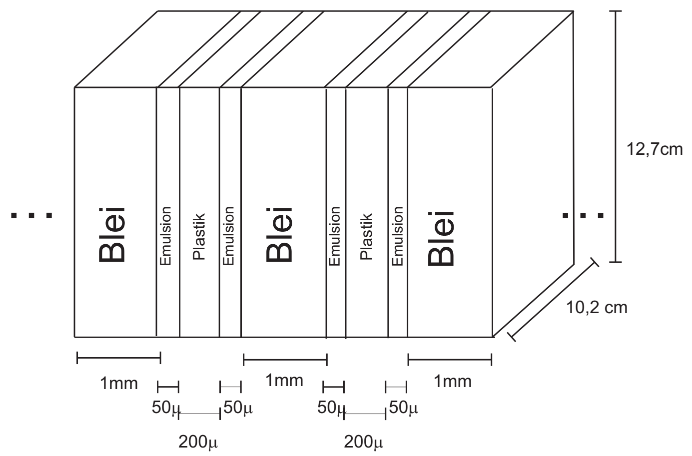

Abbildung 4.1: Der Aufbau des OPERA-Bricks (nicht maßstabsgetreu).

Emulsionsheets (zur hohen Ortsauflösung) aufgebaut sind. Die Emulsionsheets bestehen aus einer $200\mu m$ dicken Scheibe aus Zellulose-Triazetat (*Base*) auf der beidseitig eine je $50\mu m$ Emulsionsschicht aufgetragen ist. Eine $1\mu m$ dicke Schutzschicht auf beiden Seiten der Emulsion verhindert Schwärzungen und chemischen

Reaktionen mit den Bleiplatten. Die Bricks werden unter Vakuum in aluminiumbeschichtetes Papier verpackt (*Origami-package*).
Um die Anzahl an Untergrundereignissen zu minimieren, wird der Impuls der Zerfallsprodukte des enstehenden Tauons benötigt. Ein Maß für den Impuls eines Teilchens ist die Verteilung der Positionsdifferenzen zwischen aus der letzten Emulsionsplatte extrapolierter Spur und der tatsächlich gemessenen Spur (siehe Abbildung 2.1). Notwendige Voraussetzung hierfür ist eine sehr gute Kalibration der Emulsionsheets untereinander. Im OPERA-Experiment soll diese *Intersheet-Kalibration* mittels Spuren aus kosmischer Strahlung durchgeführt werden. Damit abgeschätzt werden kann, wie gut die Kalibration damit möglich ist, wurde ein Testexperiment am CERN durchgeführt. Hierbei bestand der Brick jedoch nur aus 30 Emulsionsplatten.

Zunächst wird der Aufbau des Testexperiments erläutert. Danach werden das Grundgerüst der Auswertungsprozedur und die Alignment-Algorithmen kurz vorgestellt. Im Anschluß wird die Vorgehensweise bei der Analyse und die Modifikationen der Einzelschritte detailliert erklärt. Zum Schluß wird die Kalibrationsgenauigkeit mittels kosmischer Strahlung mit der durch einen hochenergetischen Pionenstrahl erreichbaren verglichen und die Effizienz ausgewertet.

4.1 Experimenteller Aufbau

Der in dem Testexperiment verwendete Brick wurde unter 4 verschiedenen Winkeln mit einem 8GeV und 10GeV Pionenstrahl beschossen, so daß eine Trackdichte je *Beamspot* von ca. 40 Tracks pro $(mm)^2$ erreicht wurde. Der Winkelabstand zwischen je zwei Beamspots auf der Emulsion betrug dabei $\approx$ 50mrad, die Divergenz des Beams $\approx$ 20mrad. Anschließend wurde der Brick einige Tage lang kosmischer Strahlung ausgesetzt; die Dichte der *Cosmics* sollte im Scanningbereich von 3mm x 3mm ca. 10 Tracks pro $(mm)^2$ betragen. Danach wurden Positionsmarkierungen (*fiducial Marks*) mittels Blitzlicht auf die einzelnen Emulsionsheets „gedruckt". Sie dienen zur Kalibration (*Alignment*) der Emulsionsheets im Millimeterbereich. Damit wird gewährleistet, daß sich die Scanningbereiche auf den verschiedenen Emulsionsplatten überlappen. Nach der Entwicklung[1] am CERN

[1] Das verwendete Entwicklungsverfahren:

1. *Presoak* (2min, 20°C): Na_2SO_4 3%,
2. *Develop* (20-25min, 20°C): Na_2SO_3 0,72%, $NaHSO_3$ $7 \cdot 10^{-2}$%, Amidol 0,32%,
3. *Stop* (48min, 20°C): CH_3COOH 0,5%,
4. *Fix* (90-120min, 5−6°C): $Na_2(S_2O_3) \cdot 5H_20$ 300g/l, Na_2SO_3 $12g/l$, CH_3COOH 11,3cc/l, $AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ $5g/l$,
5. *Wash* (~2h).

(Angaben in Gewichtsprozent bezogen auf Wasser).

wurden die Emulsionen zurück nach Nagoya transportiert, um dort analysiert zu werden.

4.2 Auswertungsprozedur

Im Verlauf der Auswertung wurde die Vorgehensweise mehrfach verändert: Die aus früheren Durchläufen gewonnenen Erfahrungen wurden dazu eingesetzt, um die Rekonstruktionseffizienz und die Kalibrationsgenauigkeit weiter zu verbessern. Daher wird zunächst das Grundgerüst erläutert (siehe Abbildung 4.2); die Modifikationen der Einzelschritte und deren Begründung werden weiter unten detailliert erklärt.

4.2.1 Das Grundgerüst

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die verschiedenen Files und Auswertungszustände gegeben. Diese Stationen werden immer durchlaufen, nur der Weg (und damit der Inhalt) auf dem die Files erzeugt werden, wird verändert.

Die Emulsionen

Im Verlaufe der Auswertung wurden die Emulsionen an verschiedenen Positionen gescannt. Das Scanninggebiet schwankte zwischen 2,5mm×2,5mm und 5mm×5mm bei einer Winkelakzeptanz zwischen 150mrad×150mrad und 300mrad×300mrad. Ausgewählt wurden die Gebiete aufgrund der Beamtrackdichte und den Erfahrungen aus früheren Scanvorgängen (siehe weiter unten).
Bei dem *Trackselektor* (in Nagoya entwickeltes, computergesteuertes Mikroskop, welches in der Lage ist, vollautomatisch Teilchenspuren zu erkennen und digitalisieren) werden Winkel und Positionen der Tracks in der Mitte des jeweiligen Emulsions*Layers* in einer Datenbank gespeichert (*Single-segment-Tracks*). Dazu wird in 16 äquidistanten Tiefen nach Grains in der Emulsion gesucht, die dann linear zur Tiefe gegeneinander verschoben werden (siehe Abbildung 4.3).

Die F-Files und die Datenbank

Das Programm *fxxcat* extrahiert die Daten aus der Datenbank und speichert sie als „F-Files“. Als Parameter werden Identifizierungscodes der Emulsionsplatte übergeben. Am Beginn des erzeugten Files stehen die Vorhersage (*Prediction*), nach der gescannt wurde und die Identifizierungsdaten der Platte. Der Hauptteil besteht aus den einzelnen gescannten Tracks (*Pulshöhe* und Winkel- und Positionsinformation der Spur in der Emulsionsmitte; die Pulshöhe ist im wesentlichen die Anzahl an Blobs, die der Trackselektor in den 16 Tiefen als dem Track zugehörig erkannt hat).

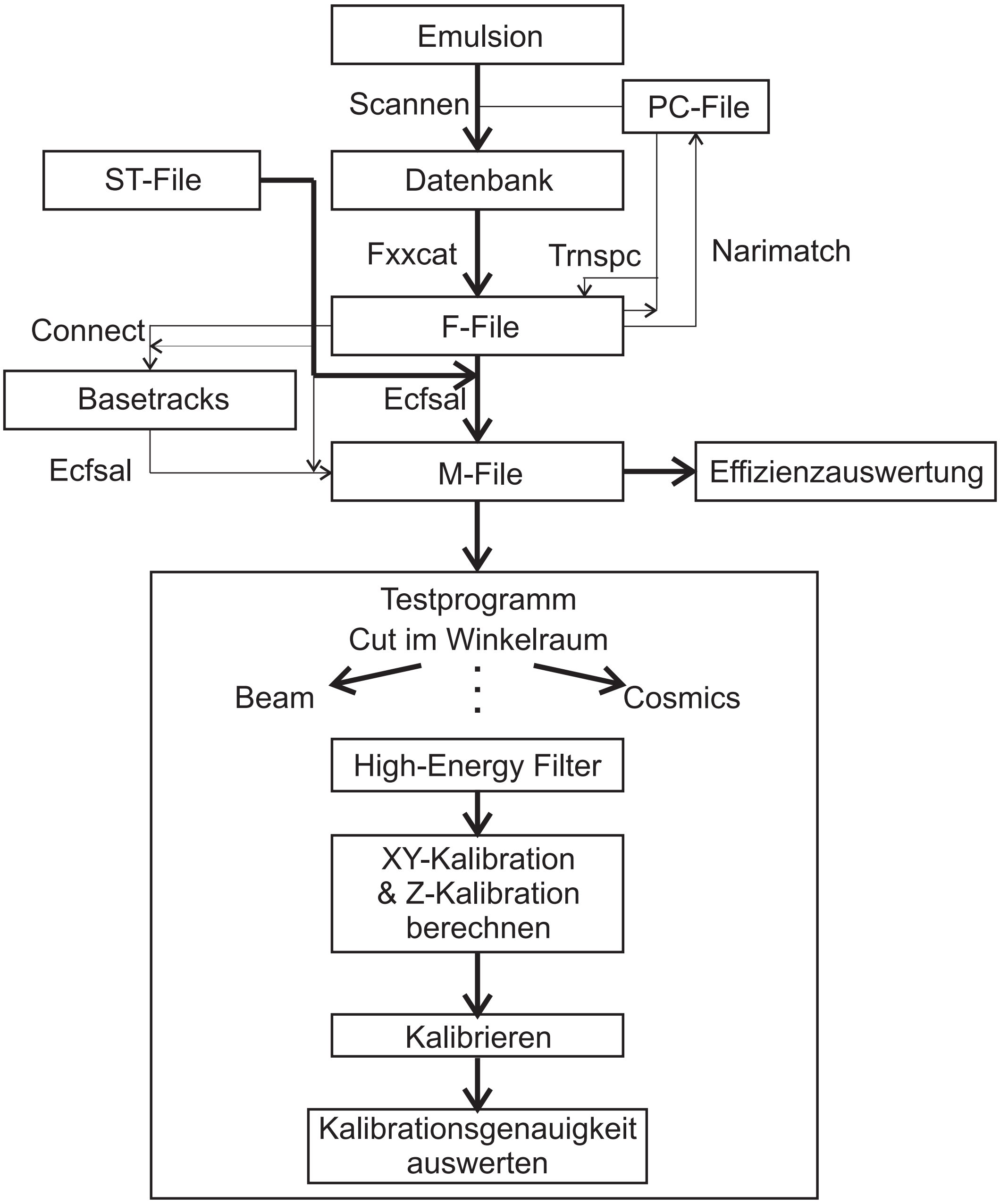

Abbildung 4.2: Der Datenverlaufsplan der Kalibration der Emulsionsheets. Der Grundablauf ist durch dickere Pfeile gekennzeichnet.

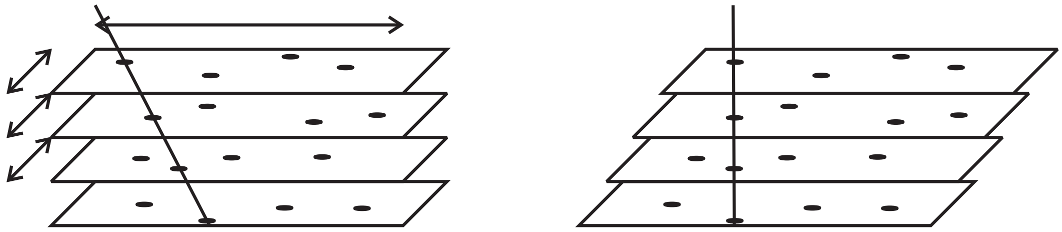

Abbildung 4.3: Scanningroutine des Trackselektors: 16 Layer werden (linear mit dem z-Abstand) gegeneinander verschoben, so daß die aufsummierten Grauwerte einen Peak ergeben.

Das M-File

Im M-File stehen die vollständig rekonstruierten Tracks. Es wird aus den F-Files und dem *ST-File*, in dem die nominalen z-Positionen der Emulsionlayer gespeichert sind, mit Hilfe des Programmes *ecfsal* (siehe Kapitel 4.2.2) erzeugt. Da im weiteren Verlauf der Analyse die von ecfsal vorgegebene Verbindung der Tracksegmente (*connection*) nicht verändert wird, eignet sich dieses File dazu, die Trackrekonstruktionseffizienz zu messen (siehe Kapitel 4.2.4).

Die Feinauswertung

Die Daten des M-Files werden innerhalb eines Programms (test.cpp) weiter ausgewertet, ohne daß die Tracks noch einmal gespeichert werden. Die aus dem M-File eingelesenen Tracks werden mittels der *falign* und *zalign* (siehe Kapitel B.1 - Algorithmen zunächst feinkalibriert und anschließend wird die Kalibrationsgenauigkeit ausgewertet.

4.2.2 Kurzbeschreibung der Alignmentalgorithmen

Dieses Kapitel gibt einen Kurzüberblick über die Idee der verschiedenen Algorithmen, die zur Datenmanipulation und Kalibration verwendet werden. Für eine ausführliche Beschreibung der Programmabläufe und der verwendeten *Cuts* siehe Anhang B.

Narimatch

Das Programm Narimatch kalibriert zwei Emulsionsplatten (*Sheets*) miteinander. Es dient im Falle des CHORUS-Experiments[2] dazu, eine schnelle, grobe Kalibration zu erstellen, falls *ecfsal* (siehe unten) versagt. Dazu werden die z-Positionen der Tracks benötigt. Narimatch extrapoliert die Tracks zu einer gemeinsamen z-Position und führt durch Drehung und Verschiebung der Tracks gegeneinander

[2]Siehe zum Beispiel http://chorus.cern.ch

ein *Pattern-matching* durch: Das heißt, in der Nähe (die genauen Akzeptanzen liegen nicht vor) der vorwärts-extrapolierten Tracks wird gesucht, ob sich dort jeweils ein Track aus der Menge rückwärts-extrapolierten Tracks befindet. Die Dreh- und Verschiebungsparameter, bei denen die größte Anzahl an Treffern erzielt wurde, werden zurückgegeben. Narimatch nimmt dabei keine Korrekturen an den Trackwinkeln oder deren Position innerhalb eines Emulsionslayers vor. Es dient vor allem dazu, die Überlappung der Scanningbereiche bei erneutem Scannen derselben Platte zu optimieren, indem die ermittelten Drehungs- und Verschiebungsparameter in die Datenbankdaten miteingerechnet werden.

Ecfsal

Das im CHORUS-Experiment verwendete Programm, welches die Teilchenspuren verschiedener Platten miteinander verbindet und durchgehende Tracks rekonstruiert, heißt „ecfsal". Um die Tracks miteinander zu verbinden, wird im nächsten und übernächsten Sheet nach einer passenden Verbindung für den extrapolierten Track gesucht (Die genauen Akzeptanzen liegen nicht vor). Wird keine Verbindung gefunden, so wird der Track als geendet angesehen.

falign und zalign

Mit dem F-align-Algorithmus wird die Feinkalibration durchgeführt: Dieser Algorithmus verläßt sich auf die Verbindung, die ecfsal erstellt hatte und ermittelt, ohne Korrektur der z-Position, die affine Transformation, bei der die quadratische Abweichung der extrapolierten Tracks zu den Anfangspunkte in der nächsten Platte eine bei Laufzeit des Programms ermittelte Grenze unterschreitet (siehe Anhang B.1.1). Z-align errechnet die z-Korrektur aus dem Mittelwert der radialen Abweichung vom extrapolierten zum gefundenen Track (radial zur auf die xy-Ebene projizierten Richtung des extrapolierten Tracks). Der zu extrapolierende Track wird in beiden Algorithmen aus den Positionen des Tracks in zwei aufeinanderfolgenden Emulsionsheets gebildet. Dies dient der Genauigkeit, da die Positionen weit auseinanderliegen, und daher der Trackwinkel wenig von der Distortion der Emulsion beeinflußt wird (siehe Abbildung 4.4).

4.2.3 Die Vorgehensweise

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise der Datenanalyse erklärt. Richtlinie dabei ist der chronologische Ablauf; bei Modifikationen früherer Auswertungsschritte wird nur die Änderung dargestellt.

Da die Drehung der Platten gegeneinander für ecfsal zu groß war (im CHORUS-Experiment waren die Emulsionplatten wesentlich größer ($\approx$ 70cm), und daher der Drehwinkel genauer zu bestimmen), und somit die Tracks nicht verbunden werden konnten, mußten beim ersten Scannen die „F-Files" nachträglich

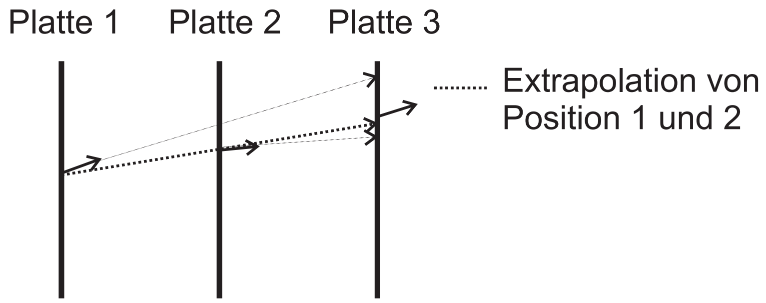

Abbildung 4.4: Verringerung der Meßfehler durch einen Straight-line-Fit durch 2 Platten.

mit den aus dem Programm „narimatch“ ermittelten Parametern mittels des *trnspc*-Programms transformiert werden. Das hat insofern keinen Einfluß auf die Ergebnisse im Vergleich mit dem OPERA-Experiment, da dort die mechanische Kalibration in der Genauigkeit von „narimatch“ liegen wird und somit in der Akzeptanz von ecfsal.

Die in der Datenbank enthaltenen Daten, die Emulsionslayer für Emulsionslayer gespeichert sind, wurden in Beam und Cosmics separiert, mittels ecfsal miteinander verbunden und grob kalibriert. Es stellte sich beim Vergleich der Alignmentparameter von ecfsal heraus, daß die Kalibration für Beam und Cosmics gut übereinstimmte. Somit brauchte in späteren Schritten die Trennung von Beam und Cosmics erst nach dem Verbinden (*Linken*) zum „M-File“ vorgenommen werden.

Durch das Entwicklungsverfahren waren einige Emulsionsplatten stark verzogen (siehe Abbildungen 4.5 und 4.6), was die Trennung von Beam und Cosmics erschwerte und die Verbindungseffizienz herabsenkte. Zur Korrektur wurde die Vorgehensweise abgeändert: anstatt die Files Layer für Layer an ecfsal zu übergeben, wurde erst innerhalb eines Sheets gelinkt und die so erzeugten *Basetracks* an ecfsal übergeben (siehe Kapitel B.2 und Abbildungen 4.7)). Dies hatte eine erhöhte Verbindungseffizienz für die jeweilige Platte zur Folge, da die Basetracks wesentlich weniger durch Distortion beeinflußt sind als die Single-segment-Tracks. Bei einer in z-Richtung linear zunehmenden Verzerrung der Emulsionen bleibt der extrapolierte Eintrittspunkt des Tracks in die Base stets derselbe. Zwar ist die Distortion in z-Richtung in guter Näherung quadratisch und nicht linear [Sha99], jedoch ist der Fehler der so konstruierten Basetracks wesentlich geringer, als nutzte man die Single-segment-Tracks. Den Unterschied zwischen Single-segment-Tracks und Basetracks kann man direkt aus den Abbildungen 4.5 und 4.6 ablesen. Desweiteren wird bei der Konstruktion der Basetracks auch die Emulsionsschrumpfung in z-Richtung korrigiert. Bei den neuen OPERA-Emulsionen ist der Schrumpffaktor nahezu 1, im Gegensatz zu $\approx 2,4$ bei den im E531-Experiment genutzten Emulsionen. Ein weiterer Vorteil der Basetracks ist, daß zufällig gebildete Tracks (zum Beispiel Spuren die durch Comptonelektronen erzeugt wurden oder zufällig

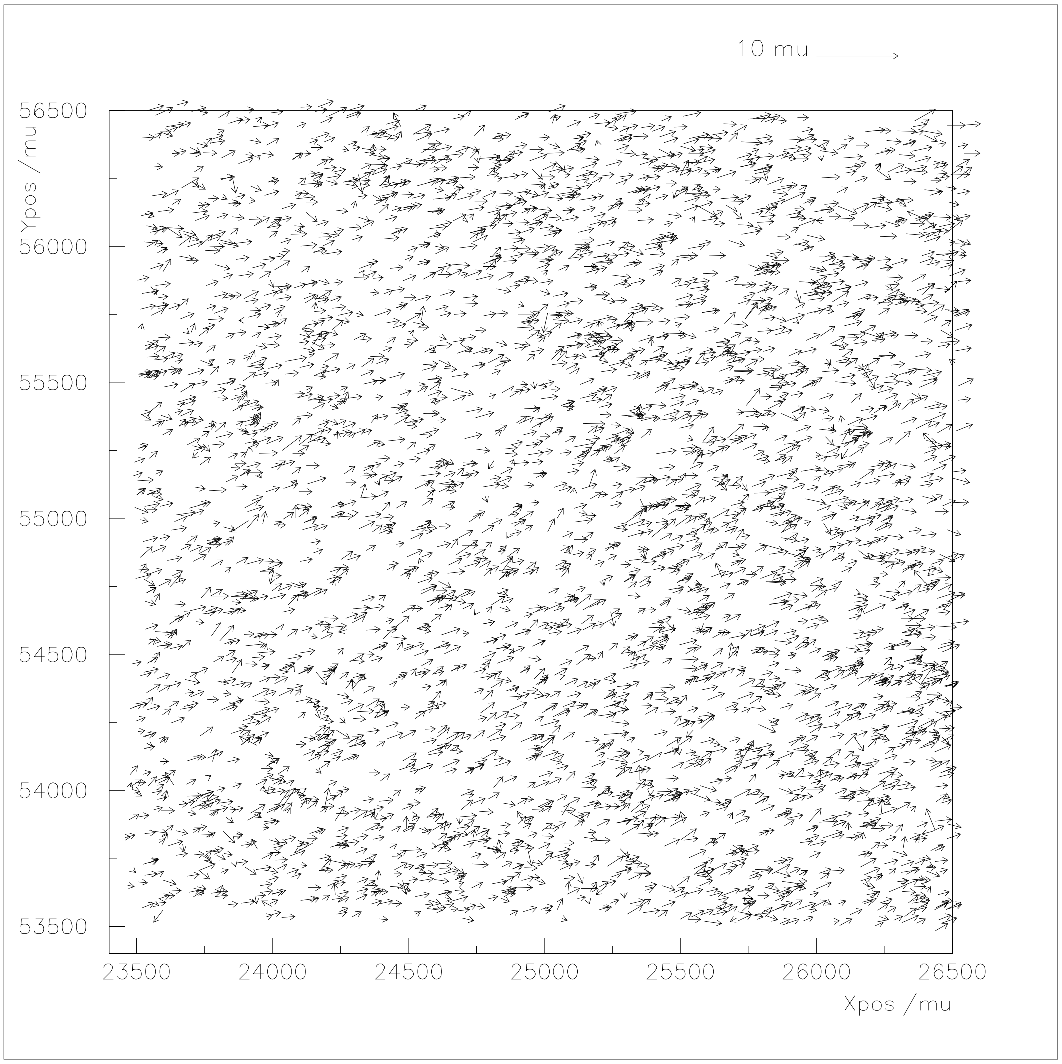

Abbildung 4.5: Beispiel einer Distortion-map für eine OPERA-Emulsionsplatte. Die Vektoren sind um einen Faktor 30 gestreckt. (Berechnet für die Emulsionsoberfläche).

übereinstimmende Grains (*fog*)) keine Verbindung auf der anderen Emulsionsseite haben, und daher die Daten von derartigen Verunreinigungen gesäubert werden. Dies ist deutlich an der „Pulshöhenverteilung“ (siehe Abbildungen 4.8) erkennbar; für reine Beam- oder Cosmic-Tracks ist die Pulshöhenverteilung (von statistischen Schwankungen abgesehen) eine Binomialverteilung. Untergrundtracks bilden eine Zunahme der unteren Pulshöhen.
Nach der Konstruktion der Basetracks kann die Distortion ermittelt und die Trackpositionen und -winkel korrigiert werden, damit „übersehene“ Tracks noch zu Basetracks verbunden werden können. Um nichtverbundene Single-segment-Tracks miteinzubeziehen, müssen sie ebenfalls korrigiert werden. Dazu wird die mittlere Distortion aller in der Nähe liegenden Basetracks errechnet, wobei auf ein

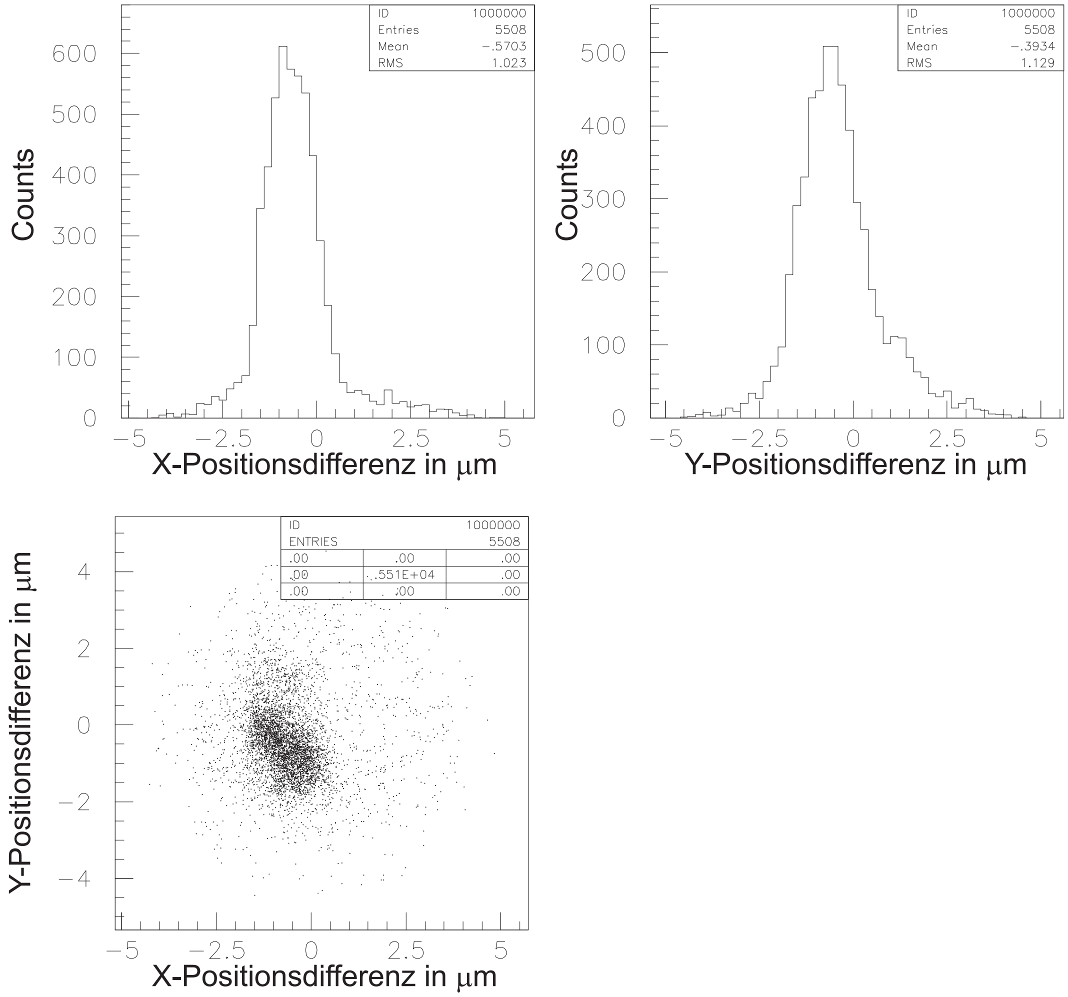

Abbildung 4.6: Beispiel für die X- und Y-Differenzen der Single-segment-Tracks zum Basetrack an der Emulsionsoberfläche. *Links oben:* Projektion auf die x-Richtung. *Rechts oben:* Projektion auf die y-Richtung. *Unten:* x gegen y-Richtung.

nicht zu großes Gebiet ($\pm 30\mu m$) und nicht zu wenig Tracks (> 10) (statistische Relevanz) geachtet wird[3]. Mit dieser wird dann der jeweilige Track korrigiert. Da der *Pulseheight-threshold* beim Scannen so niedrig eingestellt war, daß der Verlust innerhalb einer Platte vernachlässigbar war, und unverbundene Single-segment-Tracks eher Hintergrundereignissen zuzuordnen gewesen wären, wurde auf diese Möglichkeit allerdings verzichtet.
Um eine möglichst hohe Effizienz zu erhalten, werden alle so erzeugten Basetracks abgespeichert (siehe Abbildung 4.9); ecfsal sucht sich später die wahrscheinlichste Verbindung heraus. Einen großen Teil der doppelten Verbindungen bilden die sogenannten *Ghost-tracks*; diese Tracks entstehen durch die Überlappung der

[3]Die Akzeptanz wird bis max. $200\mu m$ erhöht.

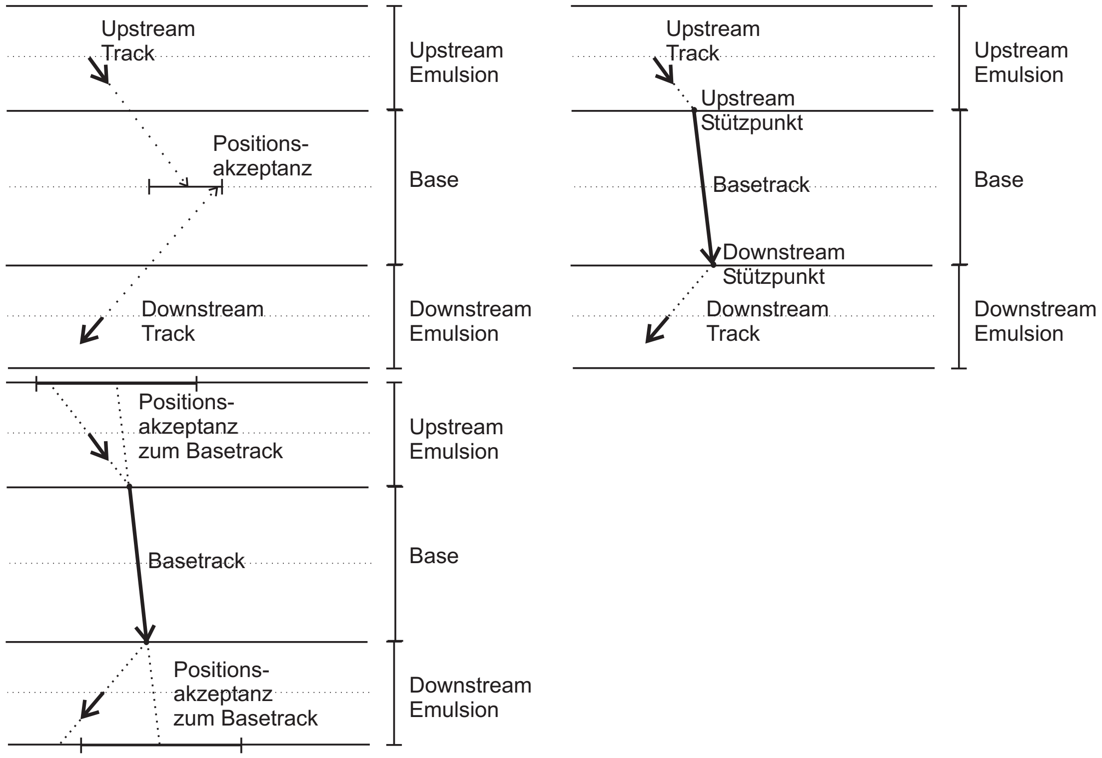

Abbildung 4.7: Erzeugen der Basetracks. *Links oben*: Extrapolation der Single-segment-Tracks zur Mitte der Base, *rechts oben*: Extrapolation der Single-segment-Tracks zur Baseoberfläche und Erzeugung des Basetracks, *unten*: Positionscut an der Emulsionsoberfläche zwischen Basetrack und Single-segment-Track. In diesem Bild würde die Verbindung aufgrund einer zu großen Positionsdifferenz des Downstream-Tracks zum Basetrack an der Emulsionsoberfläche verworfen (Bild links unten).

Scanningbereiche beim Trackselektor. Sie können nicht einfach herausgefiltert werden, obwohl sie sich in Position und Winkel nur minimal unterscheiden, da eine Elektron-Positronpaarbildung ebenfalls fast parallele und eng beieinanderliegende Tracks hinterläßt. Die Position des Trackselektors wird momentan nicht mitgespeichert, so daß die Information nicht vorliegt, ob die Tracks aus einer Überlappung stammen, denn der Trackselektor scannt das Gebiet in Schlangenlinien. Die durch direkt aufeinanderfolgende Views entstehenden Ghost-tracks werden bereits elektronisch gefiltert, die Überlappung der einzelnen Reihen jedoch nicht.

In einigen Platten war die Distortion jedoch lokal stark unterschiedlich (siehe Abbildungen 4.10 und 4.11). Der Versuch, die Distortion in diesen Platten in den einzelnen Bereichen separat voneinander zu korrigieren, lieferte zwar für diese Platten eine höhere Verbindungseffizienz, jedoch nahm die Kalibrationsgenauigkeit und die globale Verbindungseffizienz ab. Bei einem Wechsel an eine unterschiedliche Scanningposition trat die starke Verzerrung in anderen Platten auf.

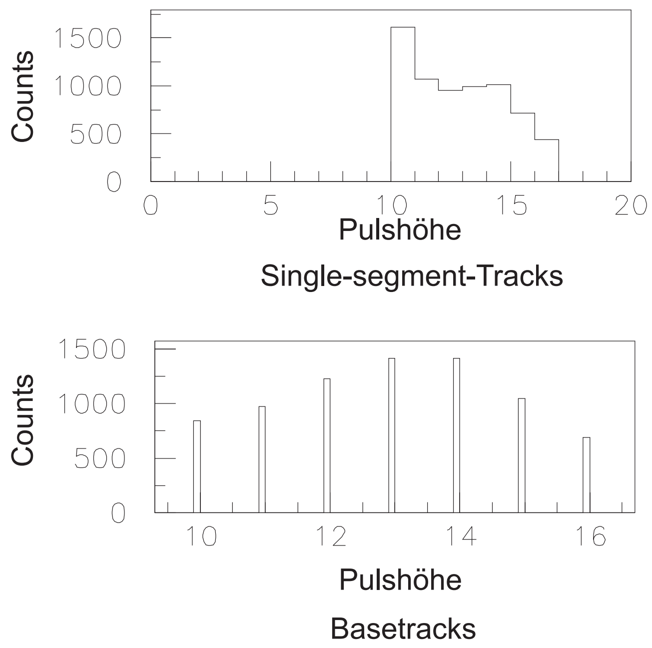

Abbildung 4.8: Beispiel für die Pulshöhenverteilung der Rohdaten und Basetracks. Der Untergrund durch Zufallstracks und Comptontracks ist an der Erhöhung der niedrigen Pulshöhen bei den Rohdaten zu erkennen.

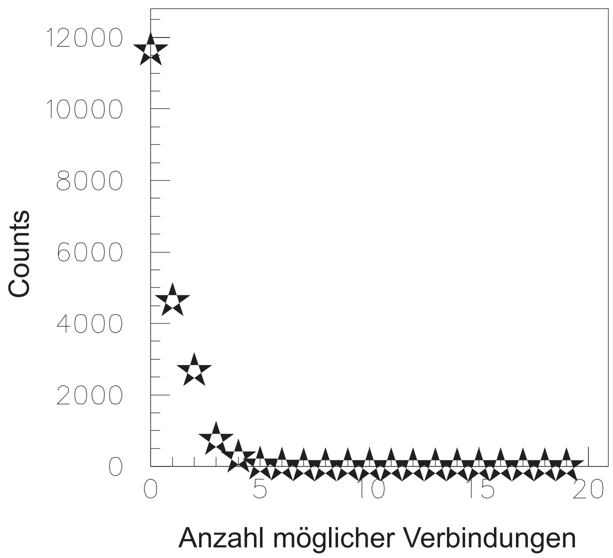

Abbildung 4.9: Beispiel einer Häufigkeitsverteilung für Verbindungsanzahlen bei einer Distortionakzeptanz von 40mrad.

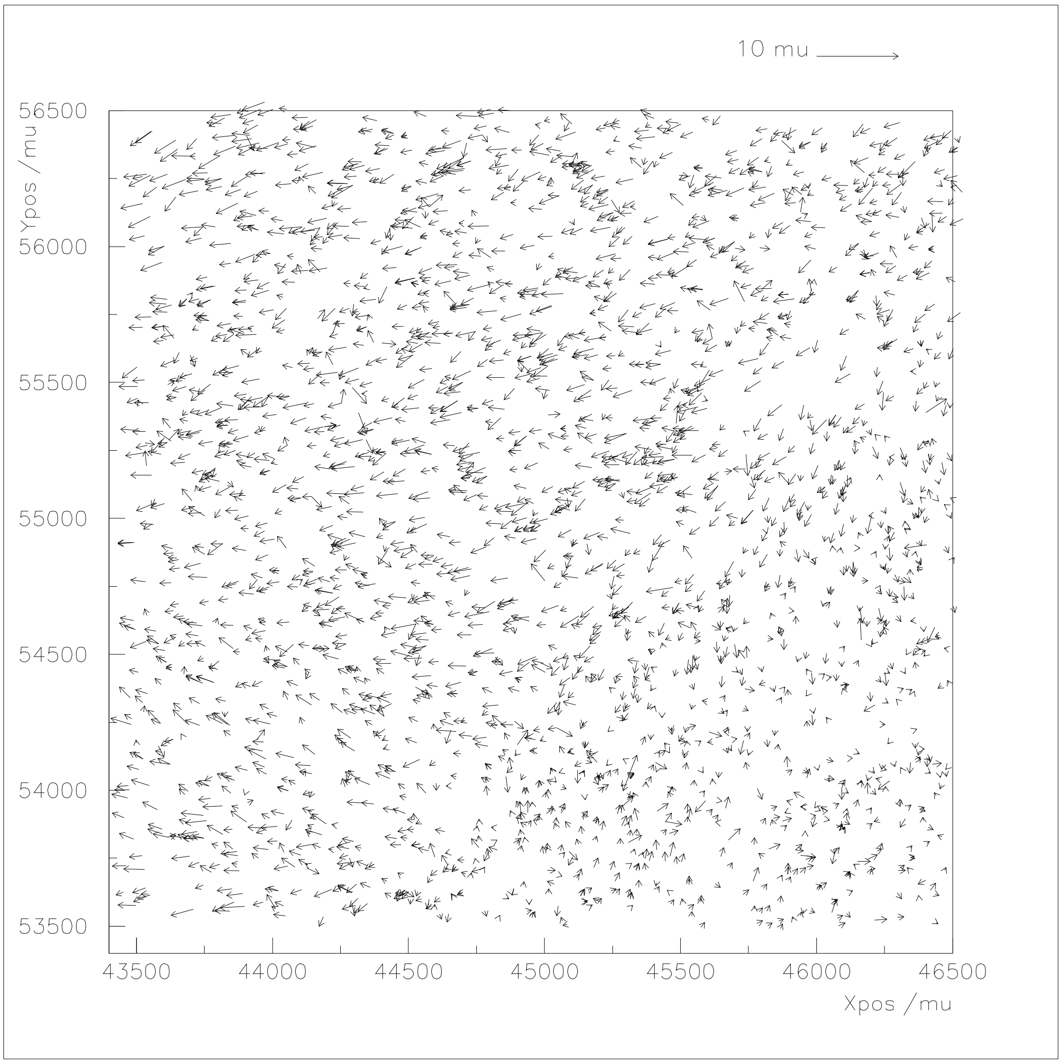

Abbildung 4.10: Beispiel einer lokal stark unterschiedlichen Distortion. Die Richtungsvektoren sind um einen Faktor 30 gestreckt (errechnet für die Emulsionsoberfläche).

Grund hierfür ist, daß die in diesem Testexperiment verwendeten Emulsionen neu sind und das Entwicklungsverfahren, welches nur geringe Verzerrung gewährleisten sollte, nicht die erwarteten Resultate brachte (Die Auswertung wurde mit der „Emulsionsgruppe" in der Nagoya-Arbeitsgruppe besprochen und ging weiter an die Firma Fuji, die die Emulsionen herstellt).

Die M-Files wurden schließlich eingelesen und nach Cosmics und Beam getrennt feinkalibriert. Zur Unterscheidung wurde ein Cut im Winkelraum, der Platte für Platte bestimmt wurde, genutzt. Auch hierbei war der Übergang zu Basetracks von Vorteil: der Cut im Winkelraum ließ sich wesentlich genauer bestimmen (siehe Abbildung 4.12).

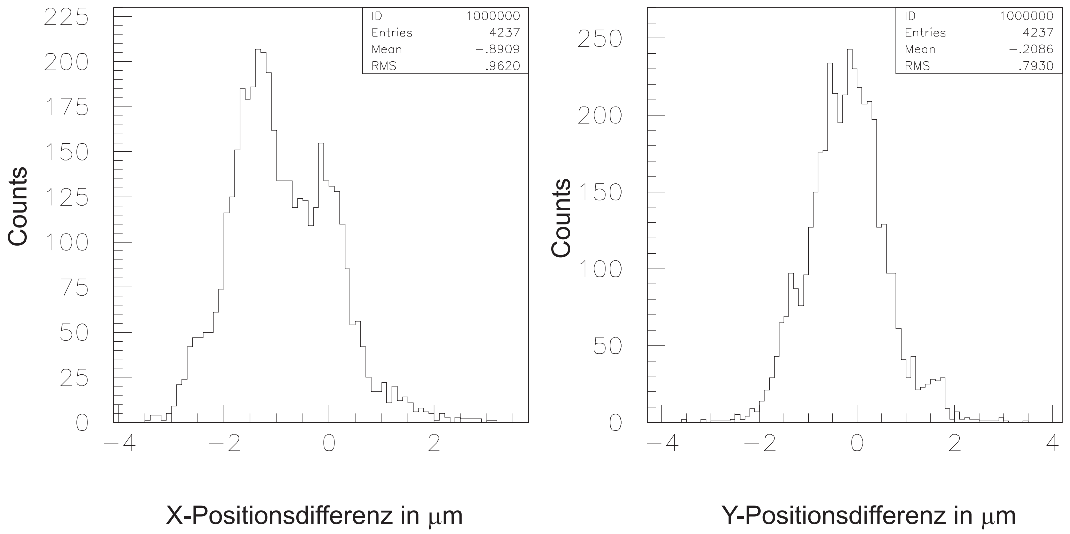

Abbildung 4.11: Beispiel der X- und Y-Differenzen zum Basetrack an der Emulsionsoberfläche. Am Doppelpeak in der X-Projektion ist deutlich die inhomogene Distortion zu erkennen.

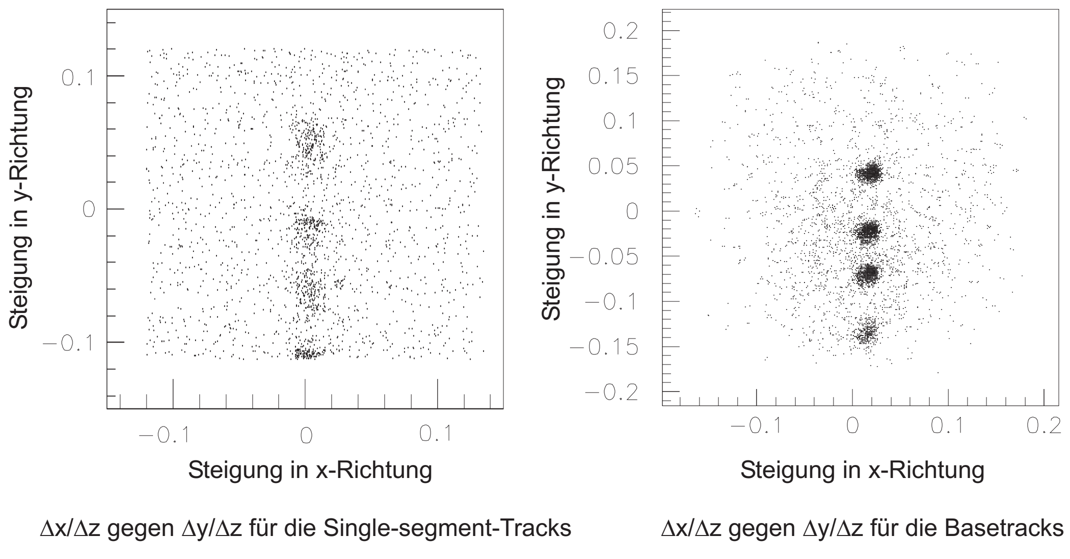

Abbildung 4.12: Beispiel der Steigungsverteilung ($\frac{\Delta x}{\Delta z}$ und $\frac{\Delta y}{\Delta z}$)für die Rohdaten und die Basetracks.

Zur Bestimmung der z-Korrektur wurde wie folgt vorgegangen: Wird die Bewegungsrichtung und Positionsdifferenz zwischen extrapoliertem Track und gemessenem Track auf die xy-Ebene projiziert, so sollte bei idealer Kalibration die laterale und radiale Differenzenverteilung gleich aussehen (siehe Abbildung 4.14) und um null zentriert sein. Ist der Mittelwert der radialen Verteilung nicht null, so ist die z-Kalibration noch nicht genau bestimmt (siehe Abbildung 4.13 und 4.15)). Durch Formel A.17 läßt sich dann die Korrektur bestimmen. Es fiel auf,

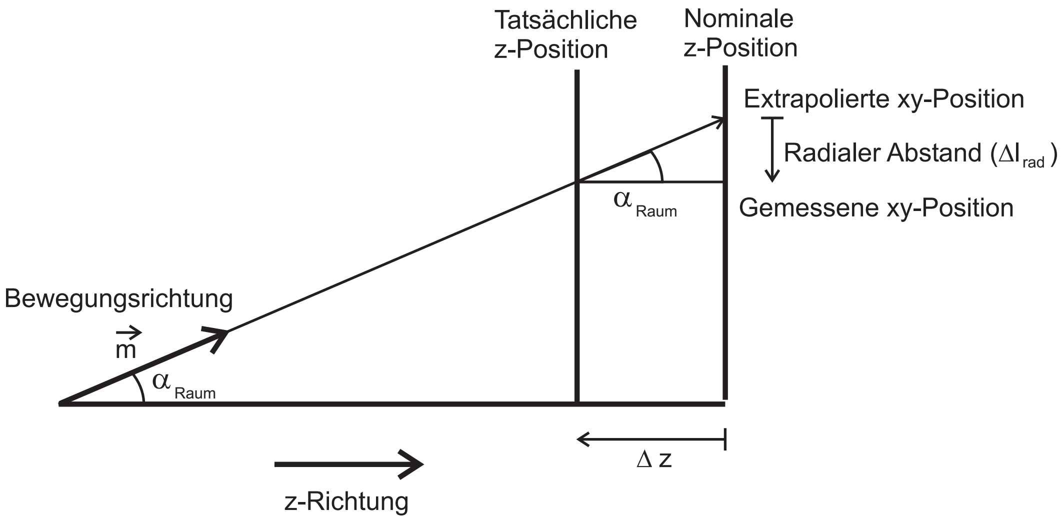

Abbildung 4.13: Berechnung der z-Korrektur.

daß die durch die Cosmics errechnete z-Korrektur stark von der durch den Beam ermittelten abwich ($\gtrsim 10\mu m$), da der Beam im Winkelraum einen zu großen Bereich einnahm, und zu wenig Cosmics zur Kalibration vorhanden waren (≈ 25).

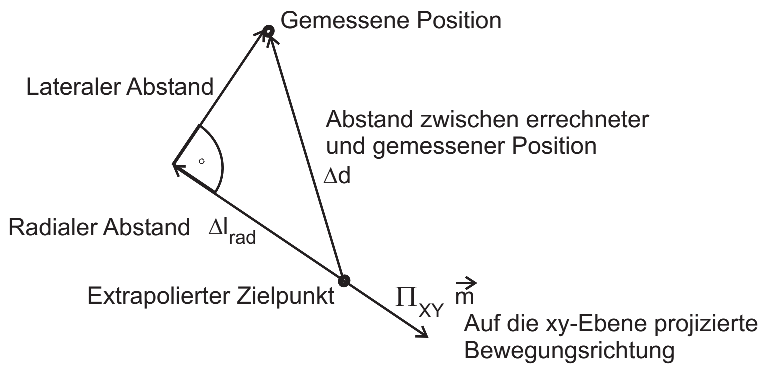

Abbildung 4.14: Berechnung des radialen Abstandes für die z-Korrektur (Radial-, Lateral- und z-Richtungsvektor bilden ein Rechtssystem). In diesem Fall wäre die errechnete z-Korrektur negativ, da der radiale Teil des Abstandes in die entgegengesetzte Bewegungsrichtung ($\Pi_{xy}\vec{m}$) des extrapolierten Tracks zeigt.

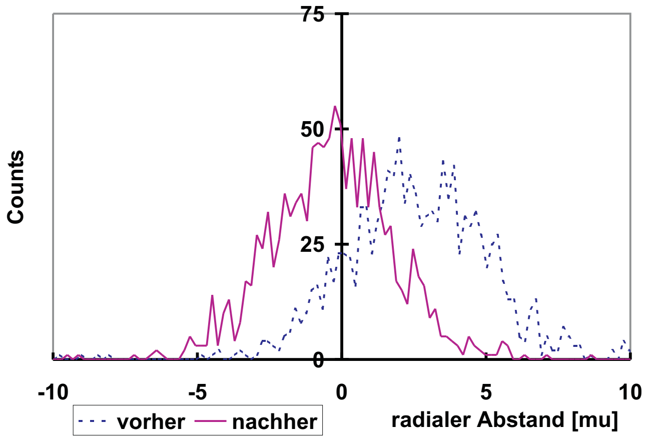

Abbildung 4.15: Beispiel für die Auswirkung der z-Korrektur auf die Daten in einem frühen Stadium des Alignments.

Ein Vergleich der errechneten z-Korrektur mit der aus einer Messung der Dicke der Bleiplatten[4] gewonnenen Verteilung legt nahe, daß die Bleiplatten im Mittel $10\mu m$ zu dick sind und von Platte zu Platte um ca. $30\mu m$ schwanken (gemessene Dicke 1015 $\pm 29\mu m$, errechnete Dicke 1011 $\pm 30\mu m$). Die Dicke der von Fuji hergestellten Emulsionen schwankt maximal um $1{,}2\mu m$ und liegt somit unterhalb der aus den Daten berechenbaren Genauigkeit ($\gtrsim 5\mu m$). Da die Bleiplatten mechanisch gut vermessen werden können, wurden die berechneten z-Korrekturen in das ST-File eingebunden, und die Daten beginnend bei der Konstruktion des M-Files noch einmal ausgewertet.

Zur weiteren Verbesserung der Kalibration mit der kosmischen Strahlung wurden die niederenergetischen Tracks durch einen Cut für den mittleren Streuwinkel (< 20mrad) aussortiert (Abbildung 4.16). Nach der Bestimmung der Kalibrationsparameter wurde die Kalibrationsgenauigkeit ausgewertet: Dazu wurde durch die Positionen des Tracks in drei aufeinanderfolgenden Platten ein *Straight-line-Fit* gelegt (siehe Abbildung 4.17) und die Positionsabweichung des mittleren Tracks von dem Fit errechnet. Da die Winkel der Tracks steil gegen die z-Achse lagen, konnte der Straight-line-Fit getrennt voneinander für x gegen z und y gegen z bestimmt werden. Der Fehler, der sich aufgrund des kleinen Winkels gegen die z-Achse ergibt, ist hierbei vernachlässigbar.

Ausgewertet wurde die Kalibrationsgenauigkeit mit den Beamtracks. Das heißt, daß die Parameter zwar sowohl durch den Beam, als auch durch die kosmische Strahlung berechnet wurden, jedoch nach der Kalibration ausschließlich die Posi-

[4] Leider standen die im Experiment verwendeten Bleiplatten nicht zur Verfügung, da sie noch am CERN waren. Es wurden daher „baugleiche“ Platten vermessen. Im OPERA-Experiment wird darüber nachgedacht, die Bleiplatten zu numerieren.

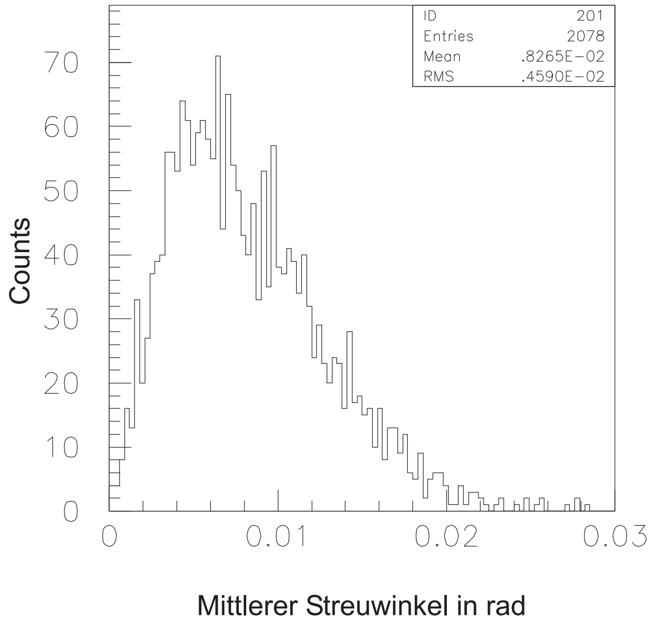

Abbildung 4.16: Mittlerer Streuwinkel für die kosmische Strahlung. Niederenergetische Teilchen werden im Mittel weiter gestreut.

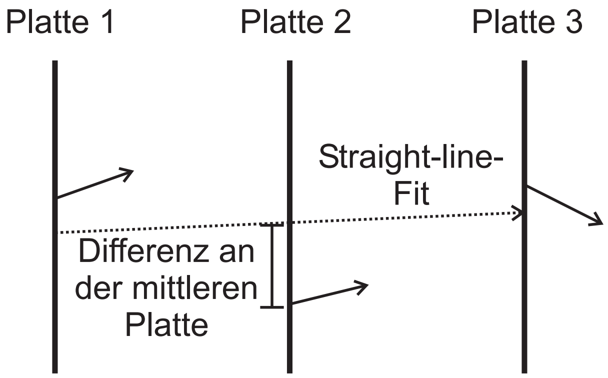

Abbildung 4.17: Berechnung der Kalibrationsgenauigkeit.

tionsdifferenzen für die Beamtracks ausgewertet wurden. Die Auswertung der Kalibrationsgenauigkeit ergab für den Beam eine Standardabweichung von 0,31μm. Die Kalibration mittels kosmischer Strahlung, bei der die z-Position in dem ST-File bereits korrigiert eingetragen wurde, lieferte eine Standardabweichung von 0,37μm (siehe Abbildung 4.18 und Tabelle 4.1). Die Verschlechterung der Genauigkeit in Y-Richtung gegenüber der Genauigkeit in X-Richtung beruht darauf, daß die vier Beamspots in X-Richtung zentriert, in der Y-Richtung jedoch über $\approx$ 170mrad verteilt lagen. Ist die z-Kalibration nicht genau, so wirkt sich der Fehler stärker auf die Y-Richtung aus.

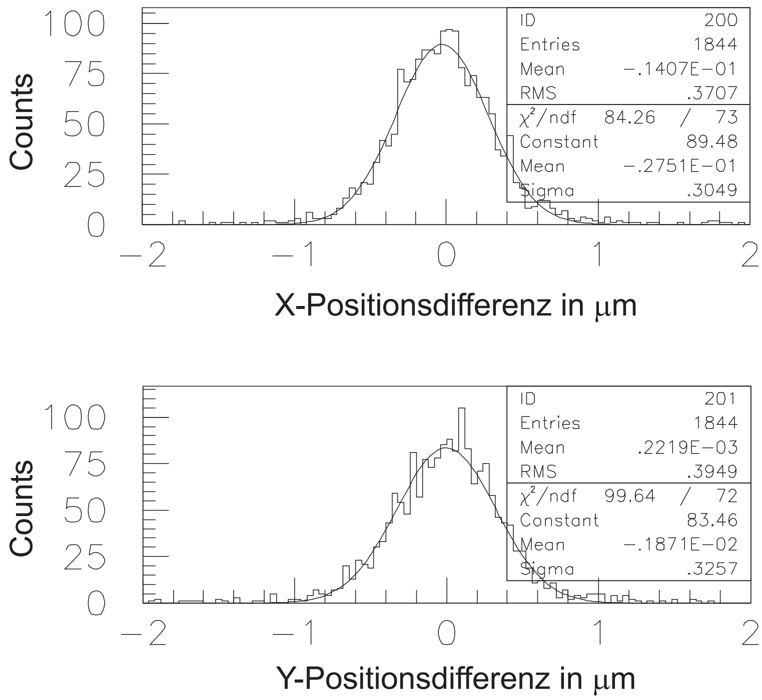

Abbildung 4.18: Beispiel für die Alignmentgenauigkeit. Hier sind die x- und y-Abweichungen der Positionen der Spuren in Platte 2 vom Straigh-line-Fit durch die Platten 1, 2 und 3 dargestellt. Die Platte wurde dazu mit den aus dem Beam errechneten Parametern kalibriert.

4.2.4 Die Effizienzauswertung

Neben der Analyse der Kalibrationsgenauigkeit ist es auch wichtig zu wissen, mit welcher Effizienz die Tracks rekonstruiert werden können.
Da die Emulsionen von Nagoya per Flugzeug ans CERN transportiert wurden, waren sie in erhöhtem Maße kosmischer Strahlung ausgesetzt. Um einen Einfluß dieser Hintergrundstrahlung auf das Experiment zu verhindern, wurde beim Aufbau des Bricks darauf geachtet, daß die einzelnen Emulsionsplatten in umgekehrter Reihenfolge aufeinandergeschichtet wurden. Die durch den Transport entstandenen Cosmics sind daher, von zufälligen Verbindungen abgesehen, nicht in eine weitere Platte zu verfolgen. Daher mußte ein Maß gefunden werden, bei dem diese Tracks nicht berücksichtigt werden: Der relative Anteil gefundener innerer Segmente einer Spur zu den theoretisch vorhandenen inneren Segmenten (siehe Abbildung 4.19). In die Auswertung der mittleren Länge gingen daher nur Tracks ein, die in mindestens zwei verschiedenen Platten gefunden wurden. Es ergab sich für die Basetracks eine mittlere Länge von 7,5 Sheets bei den Beamtracks und 6,4 Sheets bei den Cosmics. Das begründet sich daraus, daß die Beamtracks relativ steil liegen (die Beamspots lagen in der x-Richtung um $\approx$ 0mrad zentriert). Sie verlassen mit geringerer Wahrscheinlichkeit das Scanninggebiet und

Platte	Beam X	Beam Y	Cosmic X	Cosmic Y
2	0,3049	0,3257	0,3640	0,3329
3	0,3048	0,3254	0,3137	0,4433
4	0,2995	0,3237	0,4288	0,3986
5	0,3039	0,3137	0,3621	0,3480
6	0,3072	0,3049	0,3687	0,3393
Mittelwert	0,3041	0,3187	0,3675	0,3724
7	0,3430	0,3269	0,5303	0,3637

Tabelle 4.1: Tabelle der Alignmentgenauigkeit. Die Streuung der x- und y- Positionsdifferenz der Beam-Spuren zum Straight-line-Fit ist dargestellt (siehe Abbildung 4.17). *Links:* Kalibration der Platten mittels der aus dem Beam ermittelten Parameter. *Rechts* xy-Kalibration der Platten mittels kosmischer Strahlung. Die z-Kalibration wurde aus dem Beam errechnet. (An der Abnahme der Kalibrationsgenauigkeit in Platte 7 läßt sich die lokal stark unterschiedliche Verzerrung der Platte 8 deutlich erkennen.)

sind daher im Mittel länger.

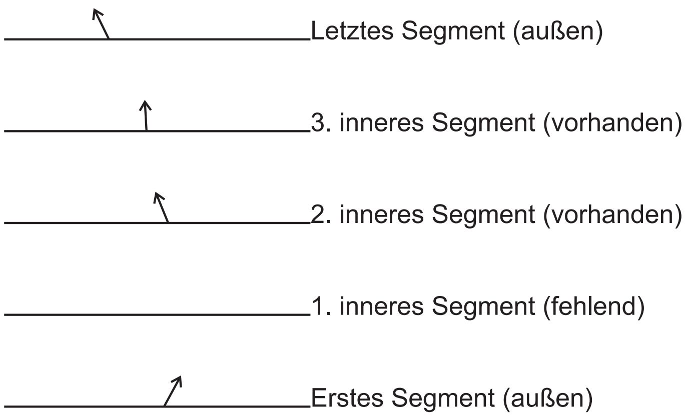

Abbildung 4.19: Berechnung der Effizienz. In diesem Falle wäre die Ineffizienz 33,3%.

Bei der Effizienzauswertung ergab sich für die Beamtracks eine Ineffizienz von 9,8% bei den Single-segment-Tracks. Dieses Ergebnis wurde mit der mittleren Pulshöhenverteilung der einzelnen Tracks verglichen, durch die ein Fit aus einer Binomialverteilung gelegt wurde. Es ließ sich erkennen, daß aufgrund des Pulshöhencuts der gleiche Anteil ($\approx 9\%$) nicht gescannt wurde (siehe Abbildung 4.8 - unten).
Der Verlust bei den Cosmics war dagegen etwas höher (14,9%), da d ie Wahrscheinlichkeit bei flachen Tracks größer ist, daß sie, zum Beispiel durch Streuung oder Emulsionsschrumpfung, aus der Winkelakzeptanz des Scanvorgangs herausfallen. Zudem ist der Trackselektor bei größeren Winkeln ineffizienter, so daß

steilere Tracks mit höherer Wahrscheinlichkeit gemessen werden[5]. Da die Cosmics neben diesen geometriebedingten Effekten auch einen kleineren Impuls im Vergleich zu den Beamtracks haben, und deshalb der Streuwinkel im Mittel größer ist, wird die Verbindungseffizienz auch durch die Winkel- und Positionsakzeptanz bei Erstellen der Verbindung zusätzlich verringert.
Bei der Auswertung der Anzahl innerer, nicht vorhandener Segmente für die Emulsionsplatten läßt sich eine erhöhte Rekonstruktions-Ineffizienz in den Platten mit hoher lokal unterschiedlicher Distortion erkennen (siehe Tabelle 4.3). Bei dem Vergleich mit Tabelle 4.2 ist zu beachten, daß dort die Rekonstruktionseffizienz für *Basetracks* dargestellt ist. Die Gesamtauswertung für den Beam ergibt für die Basetracks eine Ineffizienz von 14,7% ($\times\frac{1}{2}$) und für die Single-segment-Tracks 9,8%.

	Beamtracks	
Platte	Trackanzahl	Fehlend in %
11	1330	0
21	1789	14.2
31	1930	7.8
41	1935	12.1
51	1981	9.5
61	2123	11.2
71	2118	12
81	1967	18.8
91	2008	11.9
101	2132	15.5
111	2200	11.3
121	2204	8.5
131	2226	12.5
141	2301	12.3
151	2255	12.9
161	2279	9.6
171	2262	13.5
181	1889	0

Tabelle 4.2: Tabelle der Rekonstruktionsineffizienzen pro Platte für Basetracks.

[5]Die Rekonstruktionseffizienz für die verschiedenen Beamspots lag für die mittleren beiden Spots ca. 1% höher als für die flacheren.

4.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Analyse zeigt, daß eine Intersheet-Kalibration der Emulsionsheets mittels kosmischer Strahlung möglich ist. Durch die lokal stark unterschiedliche Verzerrung der Emulsionen wurde die Auswertung erschwert; auch der Versuch, die einzelnen Bereiche manuell getrennt voneinander zu korrigieren, brachte in der Gesamtheit keine Verbesserung der Rekonstruktionseffizienz. Die Auswertung der Kalibrationsgenauigkeit beschränkt sich aus diesen Gründen auf diejenigen Platten, die nicht direkte Nachbarn einer Platte mit großer Verzerrung waren (8, 10 und 14). Die Platten 19, 21 und 23 waren nicht zu kalibrieren, da das Pattern-matching fehlschlug. Verschiedene Bemühungen, die Ursache zu finden und zu beheben (alle Drehungen der Platte, die die Brickgeometrie zuläßt und manuelles Ausmessen der Scanningposition) verliefen erfolglos.
Die Arbeitsgruppe in Nagoya plant, ihre Analyse von einem Single-segment basierten System auf ein Basetracksystem umzustellen, da die Verzerrung der Emulsion einen wesentlich geringeren Einfluß darauf hat.
Es wurden verschiedene Möglichkeiten diskutiert, lokal unterschiedliche Distortion zu korrigieren. Die Vielversprechendste ist, das Scanninggebiet in verschiedene Bereiche aufzuteilen, und die Tracks innerhalb dieser durch die Mittelwerte der Distortion zu korrigieren. Dabei darf die Schwankung in den Gebieten nicht zu groß und die Anzahl der Tracks nicht zu klein werden.

	Cosmictracks		Beamtracks	
Platte	Trackanzahl	Fehlend in %	Trackanzahl	Fehlend in %
12	79	0	800	0
11	88	4.7	925	3.5
22	126	3.2	1201	5.9
21	148	8.8	1370	13.5
32	169	7.6	1481	7.2
31	171	4.9	1493	3.9
42	182	11.5	1553	9.2
41	175	10.2	1580	7.7
52	178	7.3	1668	10.1
51	181	3.8	1710	4.3
62	173	5.2	1731	6.5
61	169	6.5	1714	7.2
72	159	11.9	1659	8.9
71	157	8.2	1595	6.5
82	138	2.8	1515	4.2
81	126	22.2	1167	26.7
92	140	3.5	1238	7.7
91	135	7.4	1238	14.4
102	144	7.6	1343	7.2
101	142	15.4	1394	15.7
112	163	6.7	1478	7.0
111	151	6.6	1451	6.3
122	170	8.2	1544	9.7
121	180	3.8	1613	4.7
132	175	9.7	1557	9.8
131	166	3.6	1547	6.7
142	147	6.1	1557	10.9
141	142	7.7	1544	8.0
152	130	6.9	1595	8.1
151	127	6.2	1568	7.3
162	109	9.1	1634	10.5
161	108	6.4	1637	6.9
172	98	12.2	1554	10.6
171	89	4.4	1430	7.6
182	70	4.2	1151	14.4
181	61	0	987	0

Tabelle 4.3: Tabelle der Rekonstruktionsineffizienzen pro Platte. Die letzte Ziffer der Plattennummer gibt an, ob es sich um den Upstream-Layer (1) oder den Downstream-Layer (2) handelt. Die Platten sind dabei gegen die Strahlrichtung numeriert.

Anhang A

Mathematischer Teil

A.1 Gauß

A.1.1 Definition

Die Gaußfunktion ist hier folgendermaßen definiert[1]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma}\right)} \tag{A.3}$$

Somit ist ihr Integral über den Bereich der reellen Zahlen = 1.

A.1.2 Halbwertsbreite

Die Halbwertsbreite der oben definierten Gaußfunktion ist:

$$FWHM = 2\sqrt{2\sigma \ln 2} \tag{A.4}$$

bzw. umgekehrt:

$$\sigma = \left(\frac{l}{2}\right)^2 \frac{1}{2 \ln 2} \tag{A.5}$$

mit l als Halbwertsbreite.

[1] Zu beachten ist, daß oft in der in dieser Diplomarbeit verwendeten Literatur die Gaußfunktion durch:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Lit}} \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_{Lit}^2}\right)} \tag{A.1}$$

definiert wird. Mit anderen Worten:

$$\sigma_{hier} = \sigma_{Lit}^2. \tag{A.2}$$

A.1.3 Varianz und Standardabweichung

Die Varianz der obendefinierten Gaußfunktion läßt sich wie folgt berechnen:
Œ sei $x_0 = 0$:

$$\Delta x^2 = \langle x^2 \rangle - \underbrace{\langle x \rangle^2}_{0} \quad \text{(A.6)}$$

$$= \ldots = \sigma \quad \text{(A.7)}$$

Die Standardabweichung ist damit $\sqrt{\Delta x^2} = \sqrt{\sigma}$.

A.1.4 Faltung zweier Gaußfunktionen

Die Faltung einer Gaußfunktion um x_i mit σ_2 mit einer zweiten Gaußfunktion mit σ_1 ist (bis auf Normierungsfaktoren) folgendermaßen zu berechnen:

$$f(x') = \int_{\mathbf{R}} e^{-\left(\frac{(x'-x)^2}{2\sigma_1}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_2}\right)} dx \quad \text{(A.8)}$$

Über zweimalige quadratische Ergänzung im Exponenten, wobei das erste Mal der quadratische und das zweite Mal der lineare Teil lediglich für die Normierung interessant ist, ergibt sich:

$$-\frac{1}{2\sigma_1} + \frac{\sigma_2}{2\sigma_1(\sigma_1 + \sigma_2)} = \frac{-1}{2(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad \text{(A.9)}$$

Somit gilt also: *Beim Falten zweier Gaußverteilungen addieren sich die Varianzen* σ.

A.1.5 Falten diskreter gaußverteilter Meßwerte

Wegen geringer Statistik ist es teilweise nicht möglich die Daten als Histogramm auszuwerten. Die Wertedichte kann daher durch Falten des diskreten Spektrums mit einer Gaußfunktion ermittelt werden. Falls die Meßdaten gaußförmig schwanken, errechnet sich die ursprüngliche Halbwertsbreite durch die Formeln (siehe Formel A.9) in Verbindung mit (siehe Formel A.4). Sei nun $g(x)$ die gemessene diskrete Verteilung:

$$g(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \delta(x - x_i), \quad \text{(A.10)}$$

so ist die Faltung mit einer (kontinuierlichen Gaußfunktion):

$$F(x') = \frac{1}{n} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \sum_{i=1}^{n} e^{-\frac{(x'-x_i)^2}{2\sigma}} \quad \text{(A.11)}$$

A.2 Berechnung der z-Korrektur

Am Bild 4.13 wird klar:

$$\tan\alpha = \frac{\Delta l_{rad}}{\Delta z} = \frac{\|\Pi_{XY}\overrightarrow{m}\|}{\|\overrightarrow{m}\|} \tag{A.12}$$

mit:

$$\overrightarrow{m} = \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} \tag{A.13}$$

dem Richtungsvektor des Tracks. Œ sei: $m_z = 1$. Somit ist:

$$\Delta z = \frac{\Delta l_{rad}}{\tan\alpha} \tag{A.14}$$

$$\begin{aligned} \Delta l_{rad} &= \left\|\Pi_{rad}\overrightarrow{\Delta d}\right\| \\ &= \frac{d_x \cdot m_x + d_y \cdot m_y}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}} \end{aligned} \tag{A.15}$$

Also ist:

$$\tan\alpha = \frac{\sqrt{m_x^2 + m_y^2}}{1} \tag{A.16}$$

$$\Delta z = \frac{d_x \cdot m_x + d_y \cdot m_y}{d_x^2 + d_y^2} \tag{A.17}$$

(Es ist trivial zu zeigen, daß dies äquivalent ist zu der Konstruktion, die z-Position des Targetsheets dahin zu legen, bei der der 3-dimensionale Abstand zwischen extrapoliertem Track und gefundenem minimal wird. Wie man leicht sieht, ist das Minimum eben gerade der laterale Abstand in der auf die xy-Ebene projizierten Punkte.)

A.3 Berechnung der affinen Transformation

Analog dazu, jedoch mit 2-dimensionalen Matrizen, wird die affine Transformation berechnet, welche die Rotation/Scherung/Streckung beschreibt, die die xy-Koordinaten der extrapolierten Vektoren auf diejenigen der Targetvektoren (x / y) abbildet. Dazu definiere:

$$A = \begin{pmatrix} \left\langle x^2 - \langle x\rangle^2 \right\rangle & \langle x \cdot y - \langle x\rangle \langle y\rangle\rangle \\ \langle y \cdot x - \langle y\rangle \langle x\rangle\rangle & \left\langle y^2 - \langle y\rangle^2 \right\rangle \end{pmatrix} \tag{A.18}$$

A sei also die Varianz / Kovarianzmatrix für die x- bzw. y- Koordinaten des Targetsheets.

$$B = \begin{pmatrix} \langle x \cdot x_e - \langle x\rangle \langle x_e\rangle\rangle & \langle x \cdot y_e - \langle x\rangle \langle y_e\rangle\rangle \\ \langle y \cdot x_e - \langle y\rangle \langle x_e\rangle\rangle & \langle y \cdot y_e - \langle y\rangle \langle y_e\rangle\rangle \end{pmatrix} \tag{A.19}$$

B ist die Kovarianzmatrix zwischen Targetkoordinaten und extrapolierten Koordinaten (x_e / y_e). Die Transformationsmatrix C, die A in B überführt:

$$B = C \cdot A \quad (A.20)$$

$$C = B \cdot A^{-1} \quad (A.21)$$

ist die Transformationsmatrix, die die extrapolierten in die Targetkoordinaten überführt:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \end{pmatrix} \quad (A.22)$$

Der Offset der affinen Transformation wird dadurch bestimmt, daß die Mittelwerte aufeinander abgebildet werden sollen.

Anhang B

Beschreibung der Algorithmen

B.1 Evaluation-Programm

Das Programm *test.cpp* wertet die Tracks aus den M-Files von ecfsal aus, nachdem das Finealignment durchgeführt wurde. Der Ablauf ist dabei folgender:

1. Das komplette M-File wird eingelesen.

2. Tracks mit weniger als 4 Segmenten werden verworfen (2 für Basetracks).

3. Die Tracks werden nach Cosmics und Beams getrennt. Dies geschieht über einen Cut im Winkelraum, der Platte für Platte separat bestimmt wurde.

4. Aus den Cosmics werden die niederenergetischen Tracks herausgefiltert, indem die Tracks mit einem großen mittleren Streuwinkel ebenfalls verworfen werden.

5. Die Rekonstruktionseffizienz für Beam und Cosmics wird nach dem in Abbildung 4.19 demonstrierten Verfahren ausgewertet.

6. Die Alignmentparameter für das xy-Alignment und z-Alignment werden für Beam und Cosmics ermittelt. Da das 2-dimensionale xy-Alignment und das z-Alignment miteinander konkurrieren, wird immer abwechselnd das xy- und dann das z-Alignment errechnet, bis die maximale z-Korrektur über alle Plates klein ($< 5\mu m$) wird.

7. Die ermittelten Alignmentparameter werden zur Kalibration der Cosmics beziehungsweise des Beams angewendet.

8. Die Kalibrationsgenauigkeit wird ausgewertet, indem die Differenzen vom Straight-line-Fit errechnet werden (siehe Kapitel 4.2.3 und Abbildung 4.17).

B.1.1 Falign

Mit der Funktion f-align wird die affine Transformation errechnet, die die xy-Koordinaten der extrapolierten Tracks auf diejenigen der Zieltracks abbildet. Dazu wird durch die letzten beiden Segmentpositionen eine Gerade gelegt und zur nächsten Platte extrapoliert. Mit dem in Anhang A.3 genannten Verfahren werden dann die Alignmentparameter bestimmt. Nachdem für alle Platten die Parameter bestimmt wurden, wird die Korrektur vorgenommen, und ein neuer Durchlauf beginnt. Während dieser Prozedur wird die Menge der Tracks immer weiter eingeschränkt, indem Tracks mit einer zu großen Abweichung herausgefiltert werden. Die Prozedur bricht ab, wenn die Anzahl an Tracks zu klein wird (< 25), oder die mittlere Gesamtabweichung eine während der Laufzeit des Programms aus der Verteilung ermittelte Grenze unterschreitet. Zu Beginn des Programms ist die Grenze $\mathrm{rms}_x^0 + \mathrm{rms}_y^0$ (*rms=root-mean-square=Streuung*). Bei dem n-ten Schleifendurchlauf wird sie dann aus den *nach der vorletzten Korrektur ermittelten* rms_x^{n-2} / rms_y^{n-2} - Werten durch $(\mathrm{rms}_x^{n-2} + \mathrm{rms}_y^{n-2})\cdot\frac{3}{4}$ ersetzt.

B.1.2 Zalign

Diese Funktion ermittelt den relativen z-Abstand zweier Platten (siehe Abbildungen 4.13 und 4.14). Ein Straight-line-Fit durch die letzten 4 (2 für Basetracks) Positionen liefert den zu extrapolierenden Track. Nach einem Cut über den Winkel ($>$ 10mrad) und der Differenzposition ($< 10\mu m$) wird der z-Abstand nach Anhang A.2 errechnet und direkt korrigiert (Bei steilen Tracks wirken sich die anderen Positionsfehler stark aus und würden daher zu einer großen Korrektur führen).

B.1.3 Residuals

Die Funktion Residuals dient der Auswertung der Kalibrationsgenauigkeit. Dazu wird ein Straight-line-Fit durch drei aufeinanderfolgende Platten gelegt und die Positionsabweichung des Tracks in der mittleren Platte zum Fit errechnet (siehe Abbildung 4.17).

B.2 Connect

Mit dem Programm „connect“ wird aus den beiden Single-segment-Files einer Emulsionsplatte ein Basetrackfile erzeugt. Neben der Erzeugung von Basetracks stellt es auch diverse Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung, die meist dazu dienen, die Verzerrung zu analysieren. Das Programm kann in verschiedenen Modi gestartet werden; der Programmablauf ändert sich allerdings nur geringfügig.

B.2.1 Vorbereitung

Zunächst werden alle F-Files des aktuellen Directories und das ST-File eingelesen. Dann können Distortionkorrekturen für die Single-segment-Tracks eingebunden werden, falls diese schon in einem früheren Durchlauf gewonnen wurden. In einer Schleife über die verschiedenen Platten werden zunächst die zu der Platte zugehörigen Single-segment-Tracks selektiert und ihre z-Position ermittelt. Die Upstream-[1] (Kurzform US-Tracks) und Downstreamtracks (Kurzform DS-Tracks) werden nun zur gleichen z-Position (Basemitte) extrapoliert. Für die DS-Tracks werden noch ihre Originalposition in der Emulsionsmitte und die Position an der Baseoberfläche errechnet und gespeichert. Dies verringert den Rechenaufwand in späteren Schleifen wesentlich. Um die Rechenzeit noch weiter zu verringern, werden die Positionen in der Basemitte nach ihren x-Koordinaten sortiert, und der Positionsbereich wird in äquidistante Intervalle unterteilt, wobei der Index der jeweils kleinsten größeren Position in einem Indexmaparray gespeichert wird.

B.2.2 Hauptschleife

In der Hauptschleife wird zunächst der nächste noch unverbundene US-Track (**U**p-**S**tream) gesucht. Dann werden die verschiedenen Positionen (Original, Baseoberfläche und Basemitte) auch für ihn errechnet. Über die Indexmap wird nun der Startindex für die möglichen Downstreamtracks ermittelt, indem die Positionsakzeptanz von der x-Position in der Basemitte des US-Tracks abgezogen wird. Die Positionsakzeptanz wird dabei aus der maximal zulässigen Distortion (40mrad), und der z-Differenz zwischen Emulsions- und Basemitte errechnet. Die Akzeptanz der Distortion wurde nach gründlichen Untersuchungen der in allen vorkommenden Distortion Platten mit 7x der mittleren Streuung festgelegt.

DS-Loop

Bis zu der maximal zulässigen x-Position der Downstreamtracks wird nach möglichen Verbindungen gesucht.

Die Cuts

Es werden Cuts im Positionsraum der Basemitte und ein Winkelcut für die Differenz US-Winkel und DS-Winkel angewendet. Falls der Downstreamtrack innerhalb der Akzeptanz liegt, wird der Basetrack berechnet, indem durch die Positionen an der Baseoberfläche für US- und DS-Track eine Gerade gelegt wird (siehe Abbildung 4.7); ein feinerer Cut für die Positionsdifferenz der Single-segment-Tracks an der Emulsionsoberfläche zur Basetrackposition an der Ober-

[1] Die Upstreamseite (Downstream) ist derjenige Emulsionslayer einer Platte, welcher in Strahlrichtung gesehen weiter vorne (hinten) liegt.

fläche schließt nun weitere Fehlverbindungen aus.
Hiernach unterscheiden sich die verschiedenen Modi des Programms:

Das Verbinden

Falls man alle möglichen Verbindungen haben möchte, also auch Mehrfachverbindungen, wird der neu erstellte Basetrack gespeichert; will man lediglich die bestmögliche Verbindung behalten -zur Auswertung der Distortion, oder um einen Distortionplot / Directionplot zu erstellen-, wird die aktuelle Verbindung mit der besten vorher gefundenen, sowohl für US-Track als auch DS-Track, verglichen. Der Entscheidungsparameter wird dabei wie folgt berechnet:

$$g = \Delta p_x^2 + \Delta p_y^2, \tag{B.1}$$

wobei $\Delta p_x / \Delta p_y$ Positionsdifferenzen zwischen Basetrack und Single-segment-Track an der Emulsionsoberfläche sind. Falls für beide Tracks die neue Verbindung besser ist, wird die alte Verbindung zugunsten der neuen gelöst, und der alte US-Track als *noch nicht bearbeitet* markiert.

Keine Verbindung möglich

Ist nach Durchlauf der DS-Loop eine Verbindung nicht möglich (zum Beispiel da die in Frage kommenden Zieltracks bereits mit einem anderen verbunden sind), so wird dieser Track als *nicht zu verbinden* markiert. Wurde eine Verbindung zugunsten einer besseren gelöst, ist einer der beiden ursprünglichen Verbindungspartner wieder zu haben. In diesem Falle werden alle auf *nicht zu verbinden* gesetzte Tracks auf den Status *noch nicht bearbeitet* zurückgesetzt, damit der nächste freie US-Track ermittelt werden kann.

Ende der Hauptschleife

Die Hauptschleife wird beendet, wenn alle Tracks entweder verbunden oder als *nicht zu verbinden* markiert sind.

B.2.3 Die Auswertung

Nachdem die Tracks verbunden sind, gibt es mehrere Ausgabemöglichkeiten.

- *Der Distortionplot*: Nach der Abbildung 4.7 wird klar, daß mit der Positionsdifferenz zwischen Basetrack und Single-segment-Track an der Emulsionsoberfläche ein Maß für die Distortion gefunden wurde. Indem in der xy-Ebene der Ursprungspunkt des Single-segment-Tracks festgehalten wird, und der der Sichtbarkeit halber verlängerte ($\times 30$) Differenzvektor zum Basetrackpunkt dort angebracht wird, erhält man eine Karte (siehe Abbildungen 4.5, 4.10).

- *Der Directionplot*: Um Probleme bei der Intersheetkalibration manuell zu erkennen, kann man sich zwei Richtungsplots erzeugen (statt des Differenzvektors zum Basetrackpunkt wird die Bewegungsrichtung des Tracks als Richtungsvektor an seinem Ursprungsort angebracht). Der erste wird aus den Basetracks der letzten Platte erzeugt, nachdem alle Tracks zur aktuellen Platte extrapoliert wurden. Der zweite Directionplot wird aus den Basetracks der aktuellen Platte gebildet; dieser Plot wird auf Folie gedruckt und über den ersten gehalten.

- *Die Distortionauswertung*: Sie entspricht der Projektion der Verzerrung auf die x- oder y-Achse. Anhand dieser Auswertung läßt sich (bei homogener Verzerrung) eine globale Korrektur der Single-segment-Track in den F-Files vornehmen, die bei einem Neustart des Programms miteinbezogen werden kann (siehe oben).

- *Mitkorrektur der Single-segment-Tracks*: Es besteht die Möglichkeit, auch die nichtverbundenen Tracks miteinzubeziehen und (lokal) zu korrigieren. Dazu wird die mittlere Distortionkorrektur aller verbundenen Tracks in der Umgebung berechnet und mit dieser der jeweilige Single-segment-Track korrigiert. Er wird dann -wie die Basetracks auch- zur Basemitte extrapoliert und gespeichert.

B.3 Calibrate

Mit diesem Programm läßt sich mit dem Datenformat der F-Files eine Intersheetkalibration durchführen. Die Basetracks, die mit dem connection-Programm erstellt wurden, werden als Eingabefiles genommen. Nachdem optional die Daten von Ghost-tracks bereinigt wurden, extrapoliert das Programm die Tracks zur nächsten Platte.

B.3.1 Find_ofs

Diese Funktion ermittelt durch Pattern-matching den ungefähren Offsetparameter für die affine Transformation. Aus Geschwindigkeitsgründen wird dazu nur eine zufällig gewählte Untermenge der Source- und Targettracks verwendet. Im *Schneckenverfahren* (siehe Abbildung B.1) wird für jede Position die Anzahl an möglicher verbundener Starttracks, durch die Funktion *calcdifffast* ermittelt.

B.3.2 Calcdifffast

Calcfifffast macht das eigentliche Pattern-matching. Die Positionen und Winkel der extrapolierten Starttracks werden mit den Positionen ($\Delta_{pos} < 30\mu m$) und

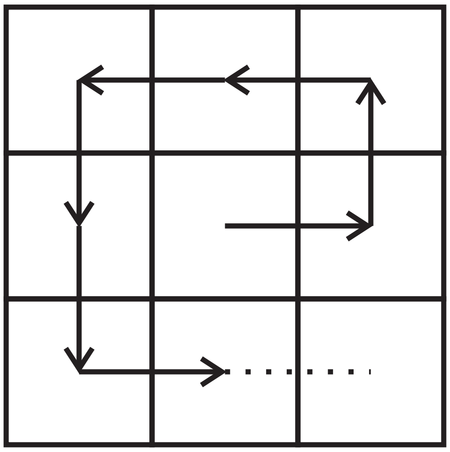

Abbildung B.1: Verfahren um den XY-Offset zu finden. Die Schrittweite beträgt momentan 10 μm, die Akzeptanz 30 μm.

Winkeln ($\Delta_{angle} < 30mrad$) der Zieltracks verglichen. Die erste akzeptierte Verbindung wird genommen, ganz gleich ob es noch weitere, bessere Verbindungen gibt, der Zieltrack als erreicht gekennzeichnet und mit dem nächsten Starttrack fortgefahren. Weitere Verbindungen zu einem Zieltrack sind unzulässig.

Find_ofs: Um zu entscheiden, welches der beste Offsetparameter ist, wird die maximale Anzahl an Verbindungen und die mittlere Anzahl gespeichert. Der richtige Offsetparameter muß sich deutlich aus dem Untergrund hervorheben. Im Programm wurde dazu ein Faktor von mindestens 4 und mindestens 20 weitere Verbindungen als Kriterium implementiert. Zur Berechnung des Mittelwertes sind dabei mindestens 50 Iterationen nötig.

Calibrate: Dann wird die beste Verbindung zwischen den Tracks mittels der Prozeduren resetconnection und findbestconnection ermittelt:

B.3.3 Resetconnections

Um die ständig wiederholte Neuverbindung der Tracks so schnell wie möglich durchzuführen, werden nach den jeweiligen Alignmentschritten nur diejenigen gelöst, deren Positions- oder Winkeldifferenz zu groß geworden ist. Dabei werden auch die als *nicht zu verbinden* gekennzeichneten Tracks wieder auf den *noch nicht bearbeitet* Status gesetzt. Die alten Verbindungen bleiben erhalten. Diese Prozedur wird nur aufgerufen, wenn bereits eine Verbindung existierte (die von calcdifffast verwendeten Verbindungen sind keine „echten“ Verbindungen und somit nicht eingetragen).

B.3.4 Findbestconnection

Dieser Algorithmus ist im wesentlichen derselbe wie der in dem connect-Programm. Es werden nur am Anfang die Verbindungen nicht zurückgesetzt.

Calibrate: Nachdem die ersten Verbindungen erstellt wurden, wird die affine Transformation genauer bestimmt:

B.3.5 ImproveOfsPos

Es werden Offsetposition, Drehwinkel und (einheitlicher) Schrumpffaktor bestimmt. Da diese Operationen zum Teil voneinander abhängig sind, wird die aktuelle affine Transformation nach jedem Einzelschritt auf den neuesten Stand gebracht und die Verbindungen nach jedem Schritt neu berechnet. Die Einzelschritte verlassen sich dabei auf die aktuellen Verbindungen.

Finealignpos

Zunächst wird die Offsetposition und die z-Position weiter verfeinert. Abwechselnd werden der xy-Offset und die z-Position (wie in Kapitel B.1.2 beschrieben) bestimmt. Der xy-Offset ist dabei der Mittelwert der Differenzen zwischen extrapolierten und gemessenen Tracks.

Findshrink

Um den Schrumpffaktor in xy-Richtung zu bestimmen, wird ein Straight-line-Fit durch die Abstände vom Mittelpunkt gegen die radialen Abstände (inklusive Vorzeichen)[2] zwischen Ziel und Starttrack gelegt. Aus seiner Steigung läßt sich der Schrumpffaktor bestimmen (siehe Abbildungen B.2 und B.3). Ein Mindestabstand vom Mittelpunkt von $800\mu m$ wird zur Verringerung der Meßfehler vorausgesetzt.

Alignangle

Zur Bestimmung des Winkels wurden drei verschiedene Methoden implementiert.

1. Trägt man den lateralen Abstand (inklusive Vorzeichen)[3] zwischen Ziel und Starttrack gegen den Mittelpunktsabstand auf, kann man aus der Steigung des Straight-line-Fits den Drehwinkel näherungsweise bestimmen (siehe Abbildung B.2): $\frac{\Delta_{lat}}{Abstand} \approx \alpha$. Ein Mindestabstand vom Mittelpunkt ($> 600\mu m$) wird aufgrund von Meßungenauigkeiten erfordert.

[2] Radial zum Abstand zum Mittelpunkt.
[3] Lateral zum Abstand zum Mittelpunkt des Scanninggebietes.

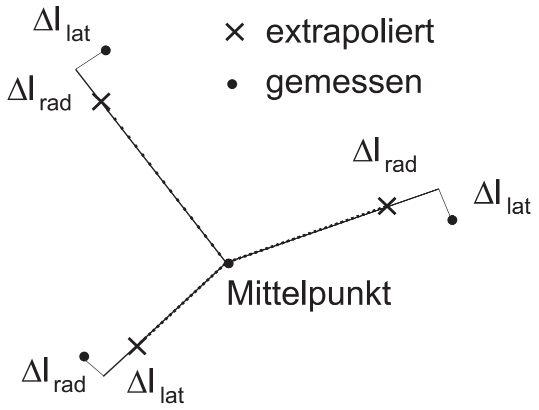

Abbildung B.2: Bestimmung des Drehwinkels und des xy-Schrumpffaktors. $\Delta l_{rad}(r)$ ist ein Maß für die Schrumpfung (oder Ausdehnung) der Emulsion, $\Delta l_{lat}(r)$ dagegen ein Maß für den Drehwinkel.

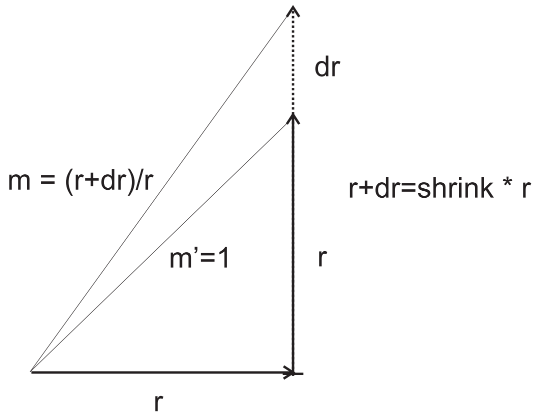

Abbildung B.3: Bestimmung des xy-Schrumpffaktors. Vorausgesetzt wird dabei, daß die Mittelpunkte von extrapolierten Tracks und gemessenen Tracks übereinstimmen. r bezeichnet hier den Abstand des extrapolierten Tracks zum Mittelpunkt, r+dr den dazu parallelen Abstand des gemessenen Tracks.

2. Trägt man den x-Abstand zwischen Start- und Zieltrack gegen die y-Position des Starttracks auf, oder den y-Abstand gegen die x-Position, so kann man aus dem Straight-line-Fit ebenfalls den Drehwinkel bestimmen. Der Drehwinkel ist hier der Winkel, den die Ausgleichsgerade gegen die Positionsachse (x oder y) hat. Der Vorteil bei dieser Methode ist die Unabhängigkeit von dem Mittelpunkt der Drehung. Diese Methode bietet theoretisch sogar die Möglichkeit, die Scherung der Emulsion durch Differenz des x- und des y-Winkels zu bestimmen. Experimentell schwanken die Daten dazu allerdings zu stark.

3. Die einfachste Variante ist, die Winkel zwischen den Tracks zu bestimmen. Diese Methode wird genauer, je flacher der Trackwinkel gegenüber der z-

Achse ist. Dies ist jedoch aufgrund der großen Meßfehler unzweckmäßig.

Das beste Resultat lieferte der mittlere Winkel aus Methode 2.

Calibrate: Den genaueste Kalibration erhält man schließlich durch:

B.3.6 Bestalignaffine

Dies entspricht im Wesentlichen dem f-align-Algorithmus (siehe Kapitel B.1.1).

B.3.7 Zusammenfassung

Momentan sind die Algorithmen von calibrate darauf ausgelegt, die affine Transformation auf die extrapolierten Tracks anzuwenden. Eine Version, die die Umkehrtransformation auf die Zieltracks anwendet, befindet sich in der Entwicklung. In der Auswertung von Kapitel 4 wurde ecfsal verwendet, da die Parameter und die Vorgehensweise des Programms noch optimiert werden müssen. Dieses Programm befindet sich noch in der Aufbauphase.

Anhang C

Das Münster - Mikroskop

C.1 Manual-Scanning-Programm

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden einige Veränderungen in dem Manual-Scanning Programm in Münster vorgenommen[1]. Neben Eichung des Programms (Kameradrehung gegen Stagedrehung (xy- und z-Richtung), Skalierung und Offset zwischen 4x und 50x - Vergrößerung und absolute Vergrößerung und Eichung der Stagebewegung und der Bildschirmkoordinaten), Optimierung der Steuerung (CNC-Ansteuerung, Umstellung von Joystick auf Tastatur), Umstrukturieren des Meßablaufs (zu mehr Übersichtlichkeit und Dokumentation im Quelltext) und automatischer Helligkeitsanpassung wurde ein Programmteil zum semiautomatischen Scannen von Alpha-Teilchenspuren implementiert[2] (siehe Abbildung C.1). Zur Ausführung der Meßprozedur sind einige Voreinstellungen notwendig.

1. Die nominale Emulsionsdicke vor der Entwicklung muß eingestellt werden. Dies ist notwendig, um die z-Koordinaten automatisch zurückrechnen zu können. Die Einstellungen befinden sich in dem Menü *Options* im Menüpunkt *Program*. Dort wird außerdem noch der Startpunkt der fortlaufenden Numerierung der Alpha-Zerfallsspuren festgelegt.

2. Die z-Position der Emulsionsoberflächen wird vermessen Dies geschieht mit

[1] Programmiert in Microsoft^{TM} Visual C++^{TM} Version 5.0! - nicht 6.0 wie der Rest der Programme-.

[2] **Anmerkung für neue Programmierer:** Da das Programm in der Windowsoberfläche läuft, ist der Programmablauf bei Durchsicht des Quellcodes a priori nicht einsichtig. Die Menüpunkte werden in VC++ unter Resources - Menu gefunden. In MainFrm.cpp finden sich die Zuweisungen zu den zugehörigen Prozeduraufrufen. Die Verknüpfung läuft über eine Integervariable, die in den Resources - String Table einen eindeutigen Wert zugewiesen bekommt. Die Shortcut keys werden in Resources - Accelerator definiert. Sämtliche anderen Routinen, die vom Hauptfenster aufgerufen werden (z.B. Mausklicks oder Tastendrücke) finden sich in ManualView.cpp. Ein **goldener Tip**: zum Zurechtfinden in den Windows-basierten Anwendungen sollte man sich die Möglichkeit merken in dem Gesamtcode nach Zeichenketten (wie Variablennamen) zu suchen.

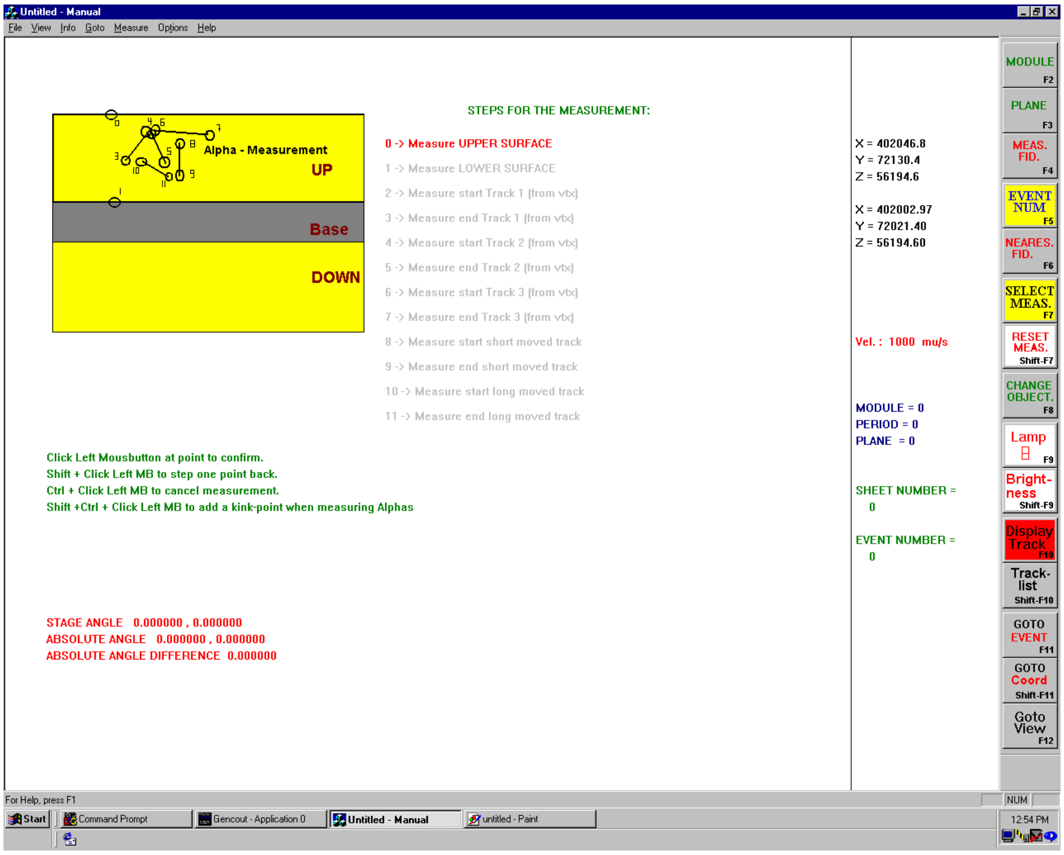

Abbildung C.1: Screenshot des Manual-Scan Programms.

dem Menüpunkt *Measure, Surfaces*.

3. Die xy-Positionen der Eckpunkte des „Rahmens“ werden vermessen, innerhalb dessen man nach den Alpha-Zerfallsspuren sucht.

Mit der Leertaste geht man schrittweise, Bildschirm für Bildschirm, durch den Bereich, in dem man nach den Alpha-Zerfallsspuren suchen möchte. Es wird dabei in Schlangenlinien vorwärtsgegangen. Damit ein doppeltes Scannen eines Zerfalls vermieden wird, überlappen sich die einzelnen Reihen nicht. Nach dem Anfahren der neuen xy-Position fährt das Mikroskop, mit einer Geschwindigkeit, die zum Erkennen der Zerfälle geeignet ist, quer durch die Emulsion zur jeweils gegenüberliegenden Emulsionsoberfläche. Verschieben sich aufgrund von Unebenheiten die z-Positionen der Oberflächen, kann jederzeit die Oberflächenposition, wie unter Punkt 2 beschrieben, neu vermessen werden. Um ohne Änderung die xy-Position noch einmal quer durch die Emulsion zu fahren, drückt man „tab“. Die Meßprozedur wird mit dem Menüpunkt: *Measure - Type* begonnen. Dort gibt es eine graphische Anleitung zur Vorgehensweise beim Scannen. Damit Hystereseeffekte vermieden werden, sollten die einzelnen Meßpunkte stets von einer z-Richtung aus angefahren werden. Auch Spuren mit Knick (maximal je einem pro Spur) können mit dieser Meßprozedur vermessen werden. Die Längen und Winkel des gemessenen Tracks werden in einer Datei gespeichert (Voreinstellung: U:/Alpha/Alpha.ges). Die kompletten Meßdaten werden in das Alpha.dmp File geschrieben. Der Quellcode der Meßprozedur befindet sich im ManualView.cpp - File in den Prozeduren OnLButtonUp und MakeMeasure.

C.2 Automatic Scanning

In dem Programm Escape [Nau00, Rum00] wurde, neben Dokumentation des Quelltext und einigen Restrukturierungen, der Übersichtlichkeit halber nach dem Strickmuster des Scannens der Bulk bzw. der CS-Emulsionen ein Programmteil zum Scannen der E531-Emulsionen und ein „Fake-Scan“ Programmteil zum Analysieren von digitalisierten Photosequenzen implementiert. Damit lassen sich reproduzierbare(!) Daten gewinnen und somit eine quantitative Analyse für die verschiedenen Bildbearbeitungs- und Bildanalyseverfahren durchführen. Anstelle des einfachen Grauwertthresholds, der in Escape implementiert wurde, wurden verschiedene Filter verwendet. Dieser Programmteil ist explizit für das Debuggen und zur Entwicklung programmiert und bietet Möglichkeiten zum Auswerten und Ansehen der jeweiligen Analyseschritte. Beste Ergebnisse wurden durch AND-Kombination eines Gaußfilters mit einem, durch einfachen Threshold binarisiertem Bildes, erhalten. Da die Software-Bildbearbeitung mittels Filter rechenaufwendig, aber effektiv ist, wird an einer Hardwarelösung gearbeitet. Für das automatische Scannen der Alpha-Teilchenspuren bietet die Hardware keine gute Unterstützung. Man könnte lediglich eine Vorauswahl treffen, die dann vom User bestätigt oder verworfen wird.

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Literaturverzeichnis

[Bru98] N. Bruski, Konzept und Aufbau eines Kernspuremulsionsscanningmikroskops. Diplomarbeit, Westfälische-Wilhelms-Universität Münster, 1998

[Dem98] Demtröder, Experimentalphysik 4, Springer, Berlin, 1998

[Fer92] Richard C. Fernow. Introduction to experimental particle physics. Cambridge University Press, Cambridge, 1992

[Fra99] H. Frauenfelder, E. M. Henley, Teilchen und Kerne, 4. Auflage, Oldenbourg, München/Wien, 1999

[Ger95] H. Vogel. Gertsen Physik 18. Aufl. Springer, Berlin, 1995

[Hos86] K. Hoshino, Double-side coated thick nuclear emulsion sheet for the hybrid emulsion experiment, Promotionsarbeit, Universität Nagoya, 1986

[Jac98] John David Jackson. Classical Electrodynamics third edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998

[Kuk97] T. Mayer-Kuckuk, Kernphysik, B. G. Teubner, Stuttgard, 1979

[Kuk01] J. Kückmann, to be published. Diplomarbeit, Westfälische-Wilhelms-Universität Münster, 2001

[Nau00] A. Naumann, Implementierung des Automatischen Scannens von Kernspuremulsionen - Grundlagen und Datenanalyse. Diplomarbeit, Westfälische-Wilhelms-Univeristät Münster, 2000

[Ope00] Das OPERA Experiment - Proposal 2000

[PDB98] The European Physical Journal C. Review of Particle Physics. Springer, 1998

[Per90] Donald H. Perkins, Hochenergiephysik, Addison-Wesley, Bonn, 1990

[Pov96] Povh, Rith, Scholz, Zetsche, Teilchen und Kerne, 4. Auflage, Springer, 1996

[Pow59] Powell, Fowler and Perkins, The Study of Elementary Particles by the Photographic Method, Pergamon Press, New York/London/Paris/Los Angeles, 1959

[RCL95] CD Römpp Chemie Lexikon, Version 1.0, Stuttgard/New York, Georg Thieme Verlag, 1995

[Rum00] J. Rump, Implementierung des Automatischen Scannens von Kernspuremulsionen - Kalibrierung und Datennahme. Diplomarbeit, Westfälische-Wilhelms-Universität Münster, 2000

[Sha99] V. Shamonov, A study of the Track Angular Resolution and a Search for Kinks in Double Sided Emulsion Plates. CHORUS internal note 99003, 1999

[Str00] P. Strolin, Talk at the Gran Sasso Laboratory, 7. Februar 2000

Fremdwortverzeichnis

5-prong-Zerfall	Hier: Eine Reihe von Zerfällen, von denen fünf Alpha-teilchenspuren in der Emulsion erkennbar sind
Accuracy	Genauigkeit
Alignment	Kalibration
Anglespace	Hier: Winkelraum, bestehend aus Winkel der Teilchenspuren gegen die xz-Ebene und yz-Ebene
Base	Plastikträger, auf den beidseitig die Emulsion aufgetragen wurde
Basetracks	Teilchenspur, die durch Verbinden von zwei Einzelsegmenten aus den beiden verschiedenen Emulsionsseiten konstruiert wurde
Beam	Hier: Alle Spuren des Teilchenstrahls, der auf die Emulsion geschossen wurde
Beamspots	Die Gebiete im Winkelraum, den der Beam einnimmt
Blob	Digitalisierte Schwärzung in der Emulsion
Brick	Vakuumverpackter Stapel von Blei und Emulsionsplatten
Connection	Hier: Verbindung zweier oder mehrerer Einzeltracksegmente
Cosmics	Hier: Alle Spuren, die durch kosmische Strahlung entstanden sind
Cut	Zahlenwert, bis zu oder ab dem etwas akzeptiert (weggeschnitten) wird
Distortion	Durch die Entwicklung bedingte Verzerrung der Emulsion
DS (Down-Stream)	Die in Strahlrichtung gesehen hinten liegende Seite der Emulsionsplatte
Efficiency	Effizienz
Emulsionlayer	Emulsionsseite (einseitig)
Emulsionsheet	Emulsionsplatte (beidseitig)

fiducial Marks	Per X-Ray vor Entwicklung der Emulsion aufgebrachte Markierungen, die eine möglichst große Überlappung der Scangebiete gewährleisten soll. (Kalibration im Millimeterbereich)
Ghost-tracks	Doppelte Spuren, die aus einer Überlappung der Views stammen
Grain	Kristallisiertes Silberkorn in der Emulsion
Intersheet	verschiedene Emulsionsplatten betreffend
Intrasheet	beide Emulsionsseiten derselben Platte betreffend
Least-squares-Fit	*Für die Alphazerfälle*: Ermitteln derjenigen Zerfallsreihe, bei der die geringste quadratische Abweichung der errechneten Trackenergieen zu den theoretischen Energieen auftritt. *Für die Kalibration*: Ermitteln derjenigen Geraden, die die geringste quadratische Abweichung von den Meßdaten besitzt. Wegen der vernachlässigbaren Fehler wird die x-z und y-z Steigung getrennt voneinander errechnet.
Linken	Erstellen der Verbindungen zwischen verschiedenen Einzelsegmentspuren
Pattern-matching	Hier: Um die extrapolierten Tracks nach Tracks der nächsten Platte suchen.
Plate	Emulsionsplatte
Prediction	Vorhersage. Hier: Parameter, nach denen Teilchen in der Emulsion gesucht werden. Bestehend sowohl aus Orts- und Winkelkoordinaten als auch der jeweiligen Akzeptanz (symmetrisch um das Zentrum)
Pulseheight	Pulshöhe: Anzahl der gefundenen Schwärzungen innerhalb einer Emulsionshälfte, die zu einer Spur gehören (max. 16)
Residuals	Differenzen
Scan	Einlesen und Digitalisieren der Daten auf der Emulsion per Mikroskop und Kamera

semiautomatisches Scannen	Scannen der Emulsion mittels Mikroskop, bei dem die Positionierung und Positionsanalyse per Computer gesteuert wird, die Spuren allerdings vom Menschen erkannt werden müssen
Shrinkage	Schrumpfen der Emulsionsdicke bei der Entwicklung durch Rauswaschen der Ag-Ionen
Single-segment-Track	Teilchenspur, die nur in einer Emulsionshälfte der Platte gefunden wurde
Stage	Hier: Plattform bestehend aus Mikroskop und Emulsionsträger inklusive Motoren für die Positionierung in den drei Raumrichtungen
Straight-line-Fit	siehe Least-squares-Fit
Track	(Teilchen-)Spur
Trackselektor	In Nagoya entwickeltes Mikroskop zum Scannen von Kernspuremulsionen
Threshold	Schwelle, ab oder bis zu der etwas akzeptiert wird
US (Up-Stream)	Die in Strahlrichtung vorne liegende Seite der Emulsionsplatte
View	Alle 16 verschiedenen z-Positionen einer Emulsionsseite, die zu einer xy-Position gehören

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Im Einzelnen danke ich:

Herrn Prof. Dr. Dieter Frekers für die Stellung dieser interessanten und vielseitigen Aufgabe, für die Möglichkeit an diversen *Collaboration-Meetings* und bei dem Testbeam des OPERA-Experiments am CERN teilzunehmen. Vor allem aber auch für die einzigartige Möglichkeit, zweimal für je drei Monate nach Nagoya zu gehen, um dort einen Großteil meiner Forschungsarbeit zu erledigen.

Herrn Prof. Dr. Kimio Niwa für die zweimalige persönliche Einladung bei ihm in der Arbeitsgruppe zu forschen und die anregenden, nicht ausschließlich fachbezogenen Diskussionen. *Niwa Kimio Kyôjusama, ni do ni wataru kikenkyû guru-pu no goshôtai ni kansha itashimasu. Arigato gosaimasu.*

Herrn Dr. Kaoru Hoshino und Herrn Dr. Matsuhiro Nakamura für die stets hilfsbereiten und ermunternden Erläuterungen und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Den Herren Dr. Kodama, Dr. Komatsu und Nonaka für die effektive, enge und konstruktive Zusammenarbeit in Nagoya.

Herrn Nada und Frau Fukuda für ihre Hilfe und Anleitung, den Umgang mit Emulsionen betreffend.

Herrn Dr. Sato, Dr. Nakano und Dr. Aoki für den technischen Hintergrund im Umgang mit dem Trackselektor und der zugehörigen Software.

Herrn Hirofumi Sekiya „Hiro“ und Emiliano Barbuto für die angenehme Zeit in Japan außerhalb des Labors.

Herrn Christian Vitt, ohne dessen Hilfe ich im LaTeX-Dschungel verloren gewesen wäre.

Frau Nicola Bruski und Herrn James Kückmann für die konstruktive Zusammenarbeit und das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Der Arbeitsgruppe im F-lab in Nagoya und der gesamten, auch ehemaligen, Arbeitsgruppe Frekers für das freundliche Arbeitsklima.

Der Studienstiftung des deutschen Volkes, insbesondere meinen Referenten Herrn Dr. Schamp und Frau Dr. Neumann und meinem Vertrauensdozenten Herrn Prof. Dr. Dr. Schober, für die freundliche und unbürokratische Unterstützung während des Studiums, im besonderen auch für das Japanstipendium.

Meiner Mutter Mariethres Kellmann und meinem verstorbenen Vater Peter Kellmann für die Möglichkeit zu studieren.

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Arbeit ohne fremde Hilfe verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Münster, im Dezember 2000