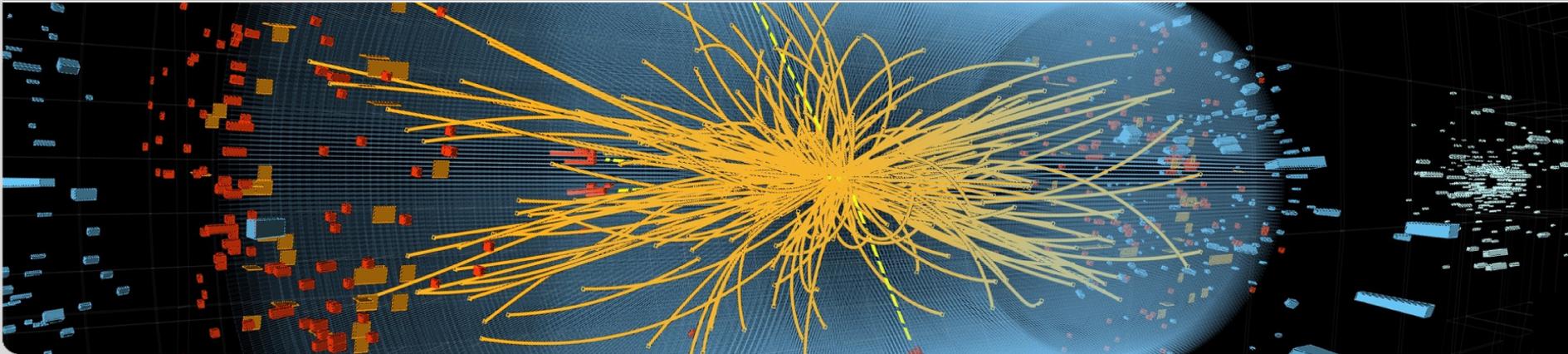


Entwicklung und Evaluierung eines digitalen Algorithmus für den Spurerkennungs-Processor am CMS-Experiment

Andreas Beljakov

INSTITUTE FOR DATA PROCESSING AND ELECTRONICS (IPE)



Gliederung

- Motivation
- Konzept
- Ergebnisse



Motivation

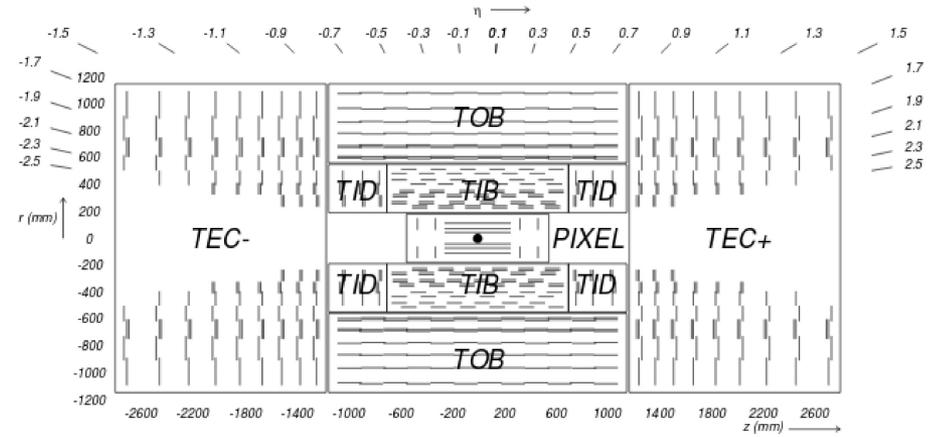
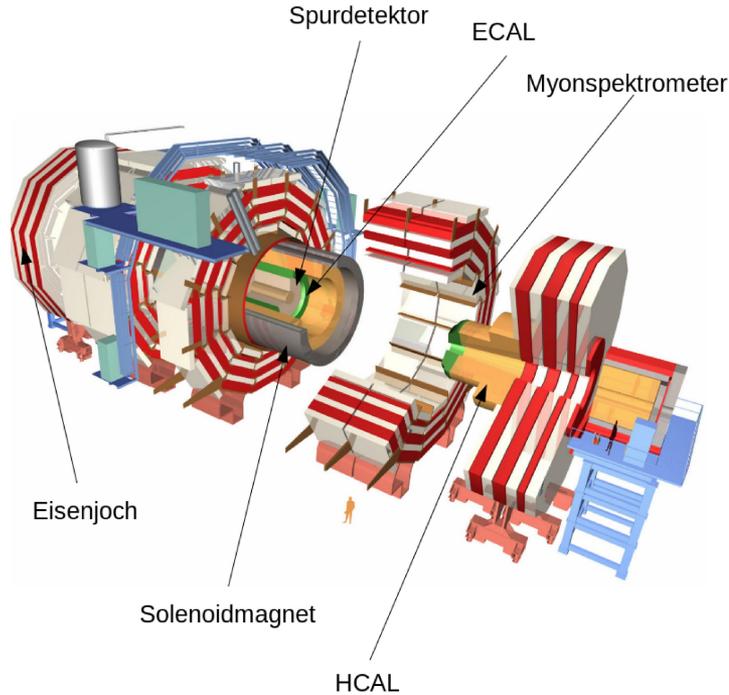


- Die Luminosität am LHC erhöht sich auf 3000 fb^{-1}
- L1-Trigger verarbeitet eine Datenrate von 50 TB/s
- L1-Trigger erhält Spurinformation
- Rekonstruktion von Spuren von über $3 \text{ GeV}/c$



Erfordert Überarbeitung der Elektronik
und Algorithmen

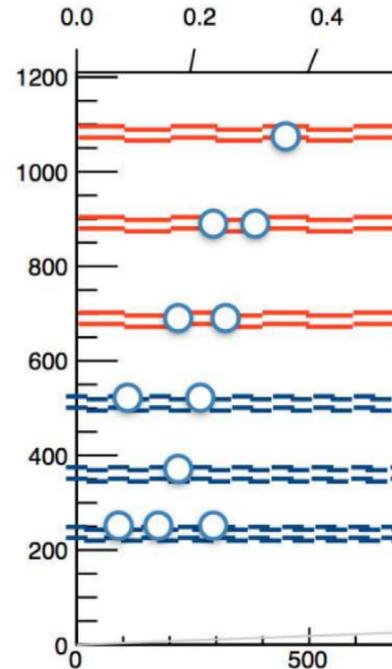
Motivation



Motivation



- Detektormodule liefern beim Durchgang eines Teilchens Stubdaten
- Zuordnung der Stubs zu ihren Spuren stellt eine Herausforderung dar

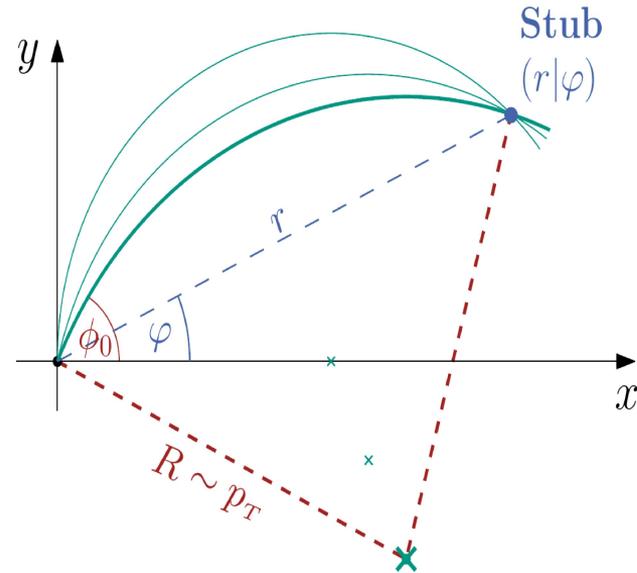


Querschnitt durch die rz-Ebene des Detektors mit den jeweiligen Stubs.

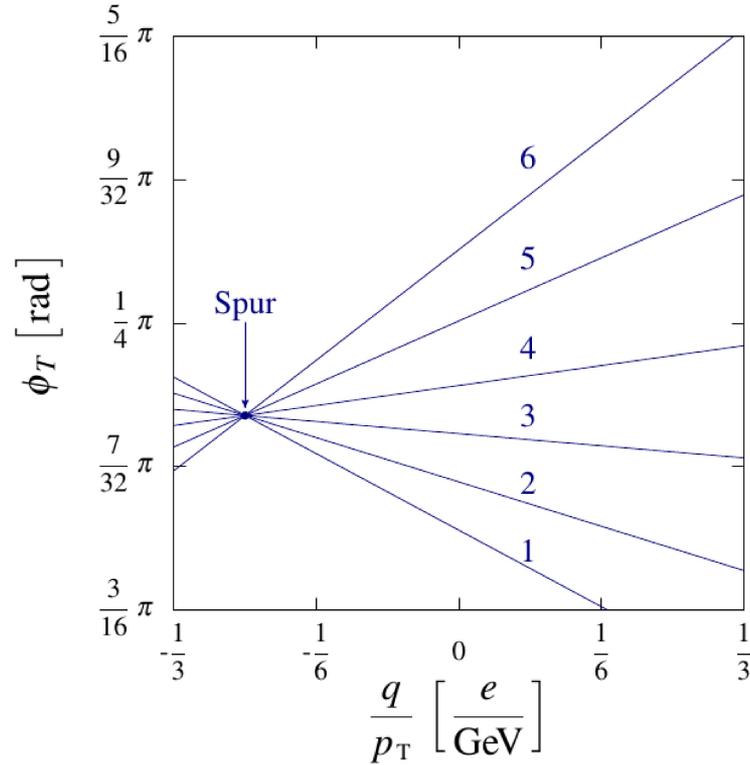
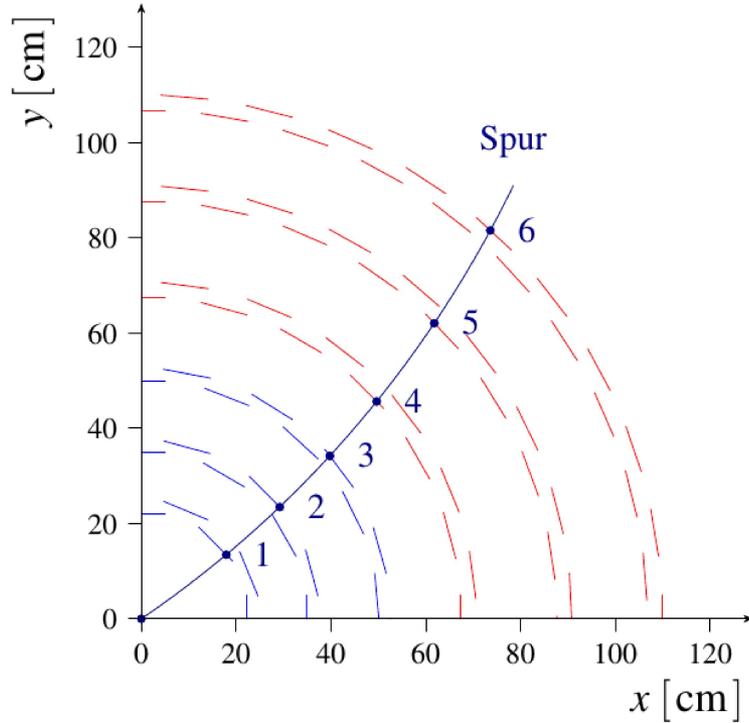
Spurerkennung



- Hough-Transformation im jeweiligen Detektorbereich liefert Spurkandidaten und grobe Spurparameter.
- Es werden den Spurkandidaten zu viele Stubs zugeordnet.



Spurerkennung



Spurparametersuche mit einem Kalmanfilter



- Es werden alle möglichen Kombinationen von einem Stub pro Lage berechnet
- Rechenaufwand steigt linear mit Anzahl der Stubs

Ansatz durch eine lineare Regression



- Trajektorien der Teilchen können als Geraden genähert werden
- Störstubs aus Spurkandidaten entfernen
- Liefert Korrekturwerte zu den Spurparameter aus der HT



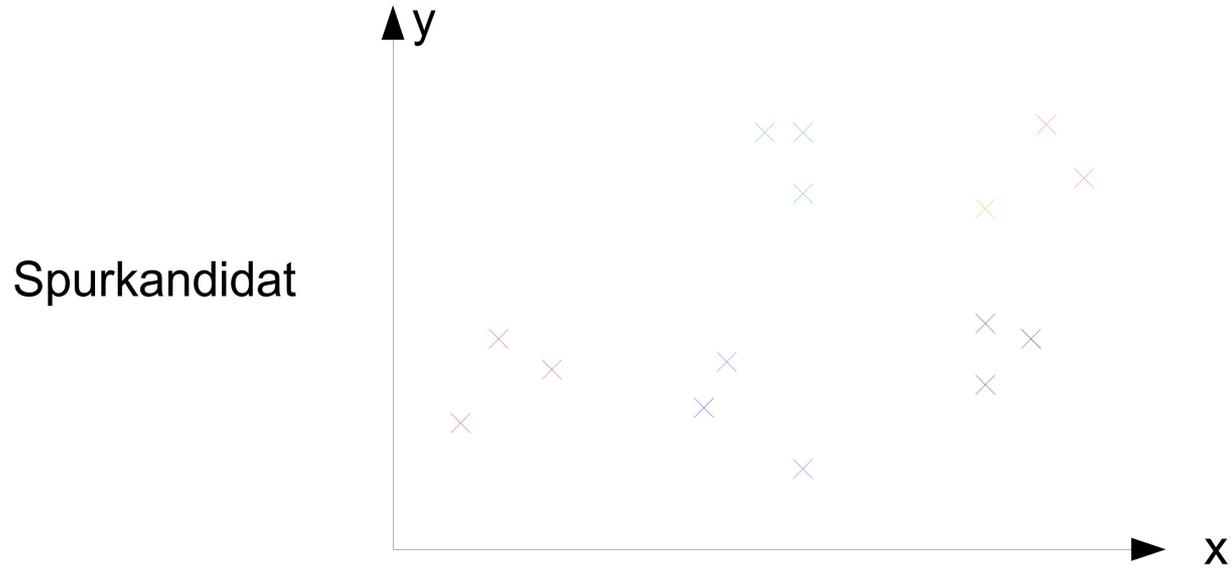
Neuer ressourcenschonender Ansatz durch lineare Regression erscheint sinnvoll.

Funktionsweise des Algorithmus



- Der Stub mit dem größten Gesamtresiduum zur Geraden wird nach jeder Iteration gelöscht
 - 1) Falls nach dem Löschen immer noch mindestens zwei Detektorlagen mit PS-Stubs besetzt sind
 - 2) Nach dem Löschen müssen vier Detektorlagen besetzt sein
- Falls das Gesamtresiduum eines der letzten Stubs einen Grenzwert überschreitet, gilt die Rekonstruktion als misslungen
- Die endgültige Spur enthält vier Stubs

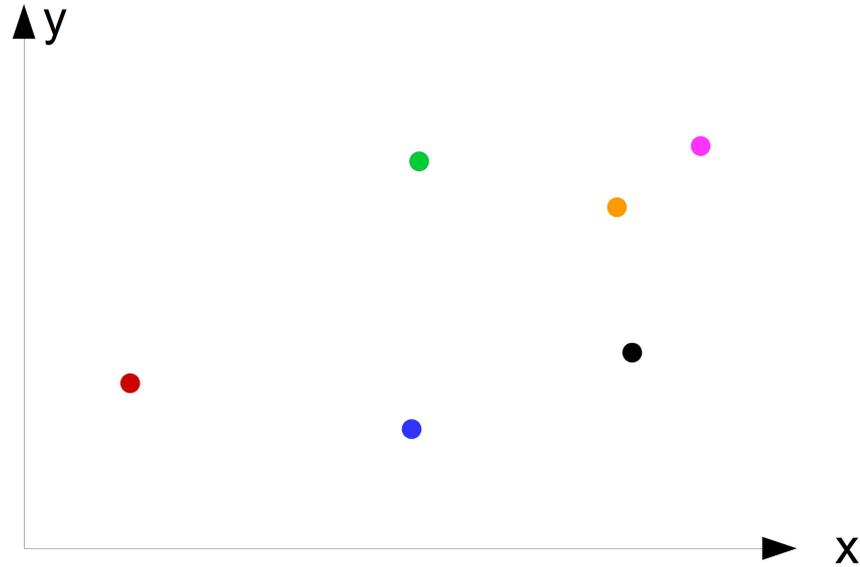
Funktionsweise des Algorithmus



Funktionsweise des Algorithmus



Virtuelle Stubs bilden



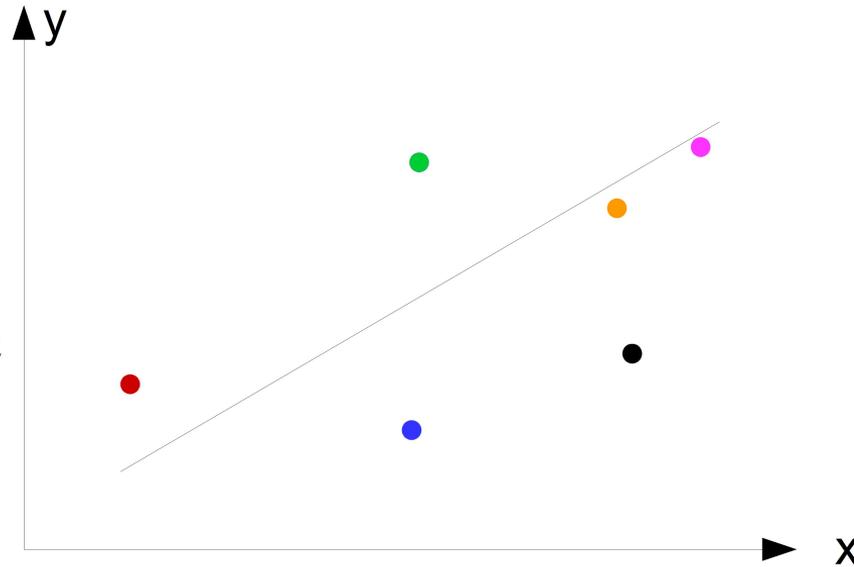
Funktionsweise des Algorithmus



Lineare Regression:

Minimierung der
Fehlerquadrate

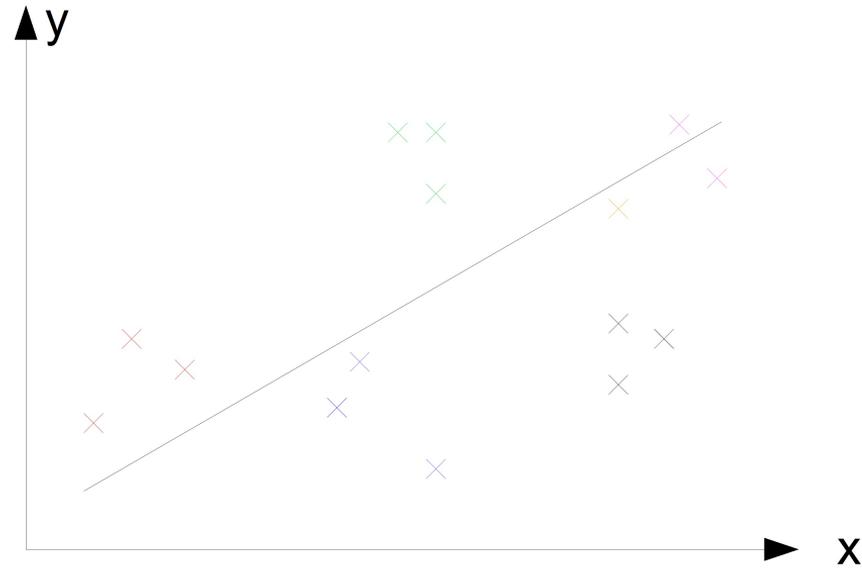
$$\sum_{n=1}^N r_i^2 = \sum_{n=1}^N (m \cdot r_i + c_i - y_i)^2$$



Funktionsweise des Algorithmus



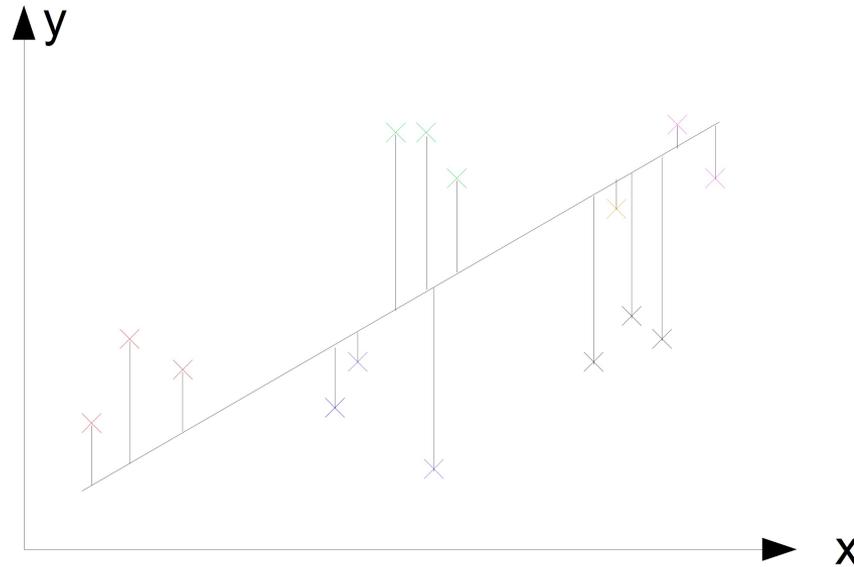
Berechnen der Residuen



Funktionsweise des Algorithmus



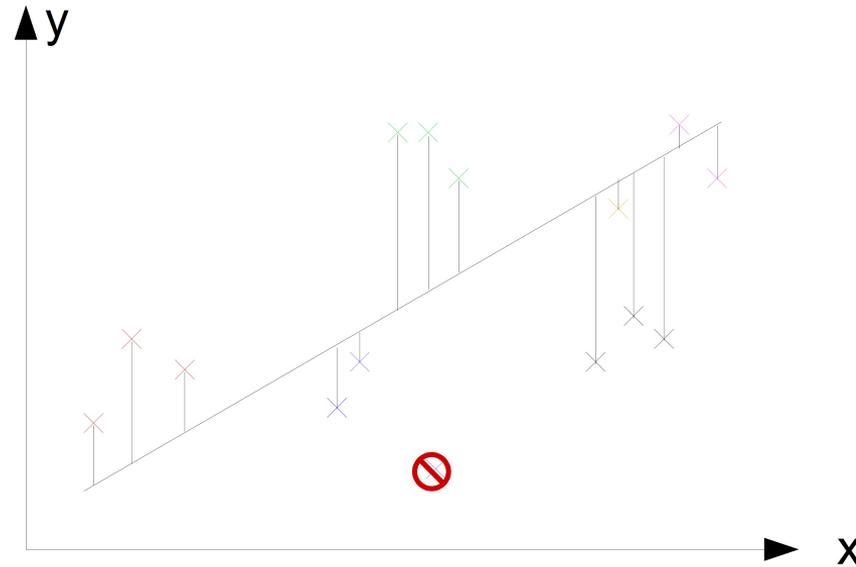
Berechnen der Residuen



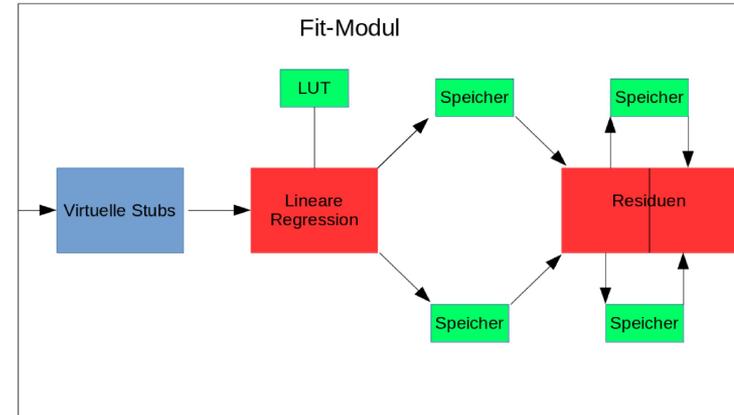
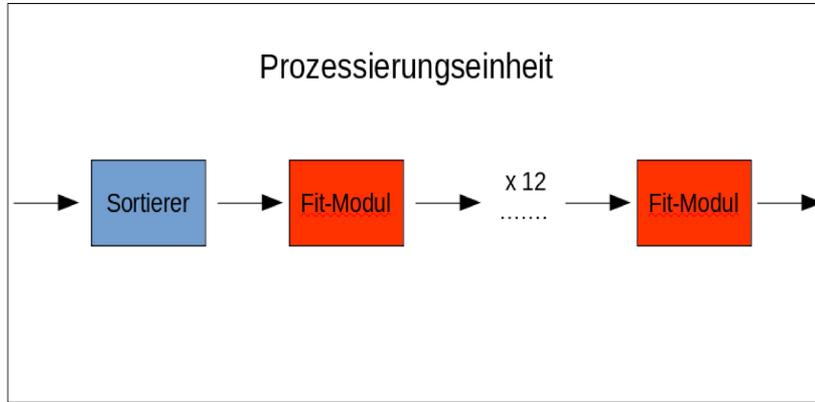
Funktionsweise des Algorithmus



Entfernen eines Stubs
aus dem Spurkandidaten



Implementierung des Algorithmus



- Jedes Fit-Modul repräsentiert eine Iteration

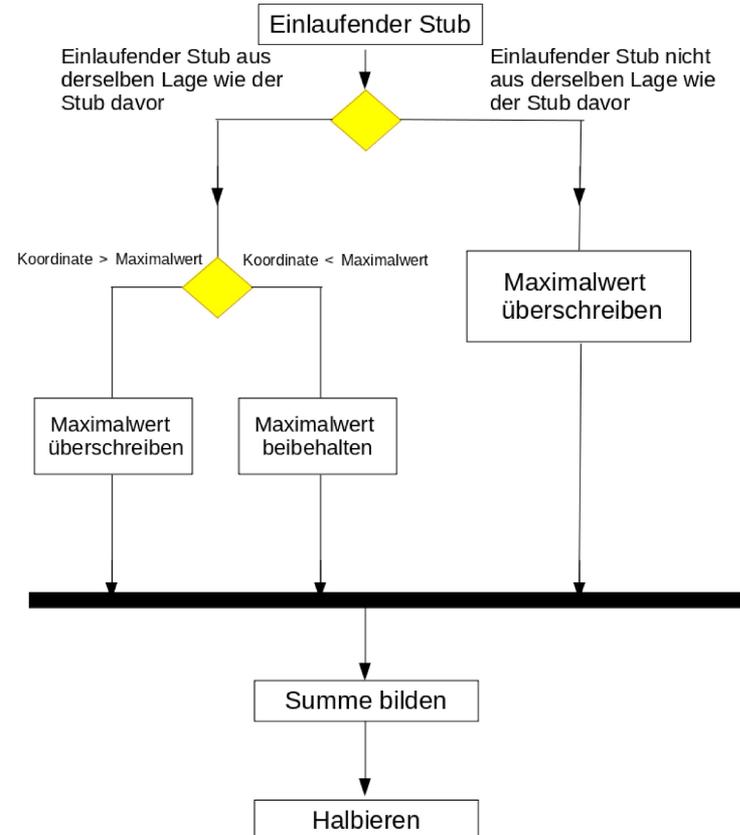
Sortierer



- Jedem der 7 Detektorlagen wird ein DRAM zugeordnet
- DRAM besitzt zweifachen Adressraum
- Schreiben und Lesen geschieht parallel
- Jeweils ein Adressraum ist für einen Spurkandidaten reserviert

- Erhöht Robustheit des Algorithmus
- Wird gebildet aus dem Durchschnitt der Maximal- und Minimalwerte der Stubs in einer Detektorlage
- Jeder besetzten Detektorlage wird ein virtueller Stub zugeordnet

Virtueller-Stub-Bilder



Lineare Regression



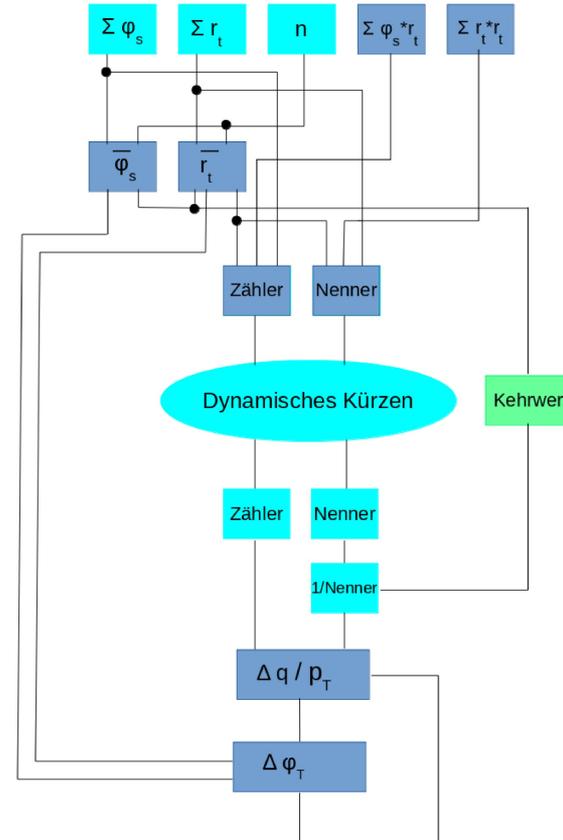
- Liefert Korrekturen zu den Spurparameter aus der Hough-Transformation
- Lineare Regression findet parallel in der $r\varphi$ -Ebene und rz -Ebene statt
- Benötigt 8 DSPs pro lineare Regression
- Benötigt 13 Takte

Lineare Regression



$$m = \frac{-\bar{x} \cdot \sum_{n=1}^N y_i + \sum_{n=1}^N x_i \cdot y_i}{-\bar{x} \cdot \sum_{n=1}^N x_i + \sum_{n=1}^N x_i \cdot x_i},$$

$$c = \bar{y} - \bar{x} \cdot m$$



Ressourcenart: DSP CLB BRAM

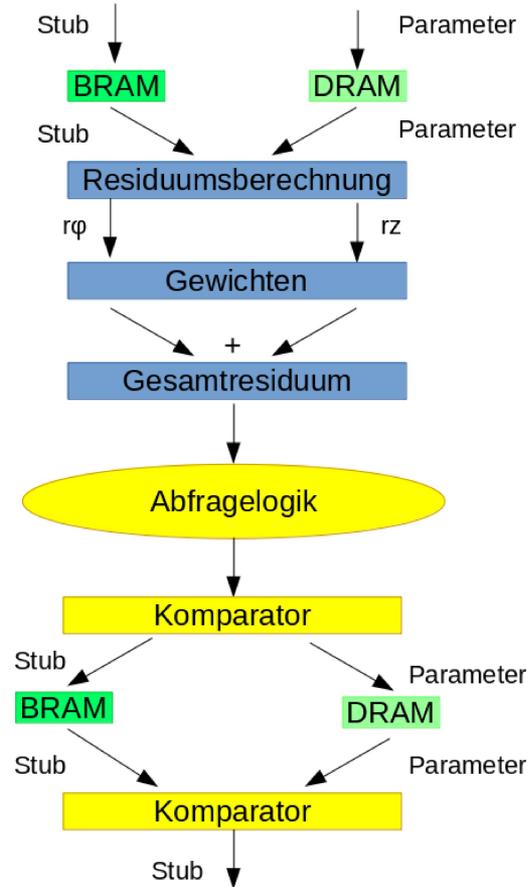
Residuen in der $r\phi$ -Ebene und der rz -Ebene werden gewichtet und zu einem Gesamtresiduum addiert:

$$R_{r\phi}^w = \frac{R_{r\phi}}{w_{r\phi}} \text{ mit } w_{r\phi} = 1 \text{ mrad}$$

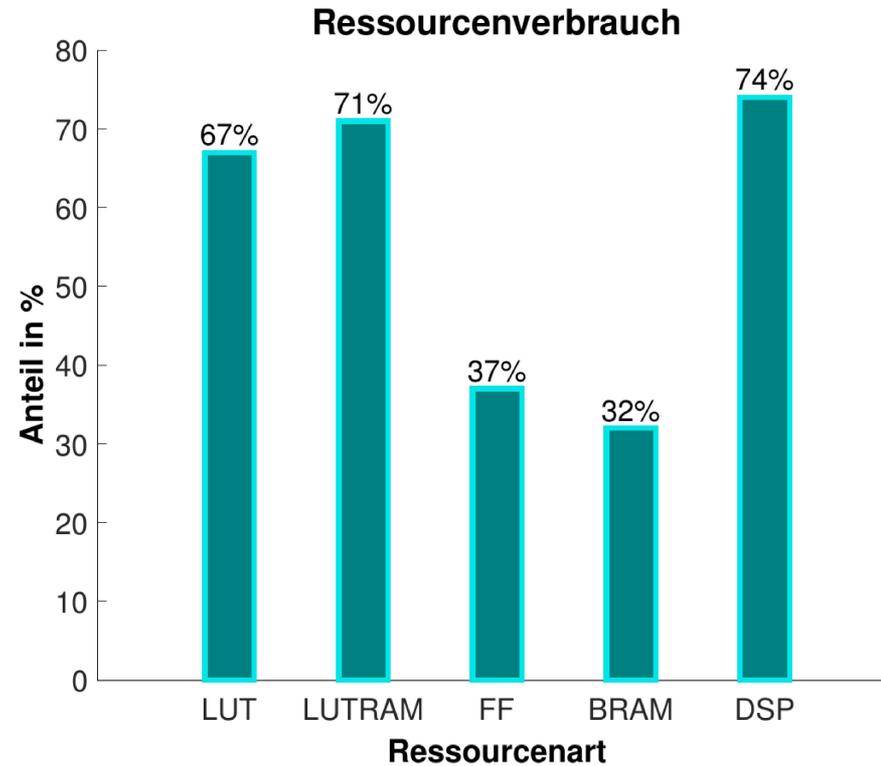
$$R_{rz}^w = \frac{R_{rz}}{w_{rz}} \text{ mit } w_{rz} = 0,07 \text{ cm für PS – Module und } 2,5 \text{ cm für 2S – Module}$$

- Rekonstruktion ist abgeschlossen, wenn 4 Stubs übrig bleiben
- Rekonstruktion gilt als misslungen, wenn einer der letzten vier Stubs ein Gesamtresiduum von größer 2 aufweist

Residuums-Berechner



- Es wurden 18 Prozessierungseinheiten mit jeweils 12 Fit-Modulen implementiert
- 90 % der verbrauchten Ressourcen entfallen auf den eigentlichen Algorithmus der Rest auf die Infrastruktur
- Algorithmus ausgelegt für den xcku 115-flva 1517-2-i



- Simulation der Firmware liefert eine Spurparameterverteilung
- Simulationssoftware liefert Vergleichswerte
- Übereinstimmung der Verteilungen dient als Maß für die Rekonstruktionsgenauigkeit der Firmware

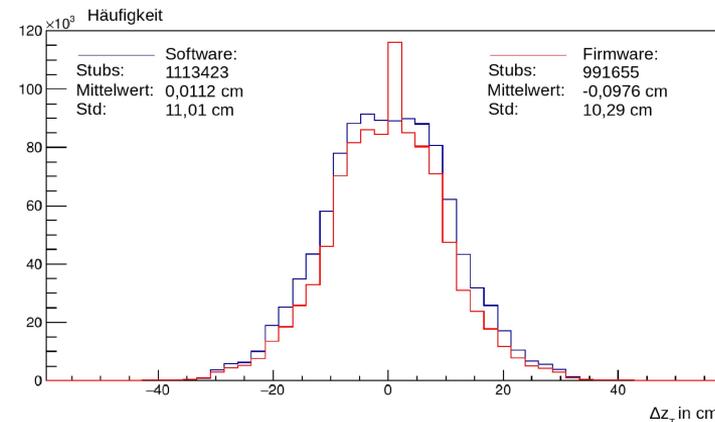
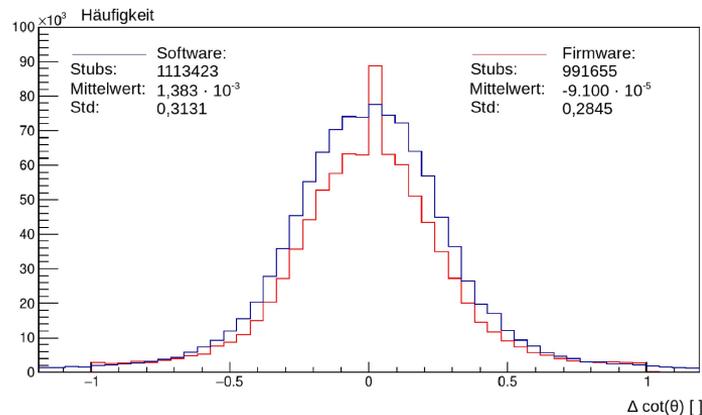
Rekonstruktion in der rz -Ebene



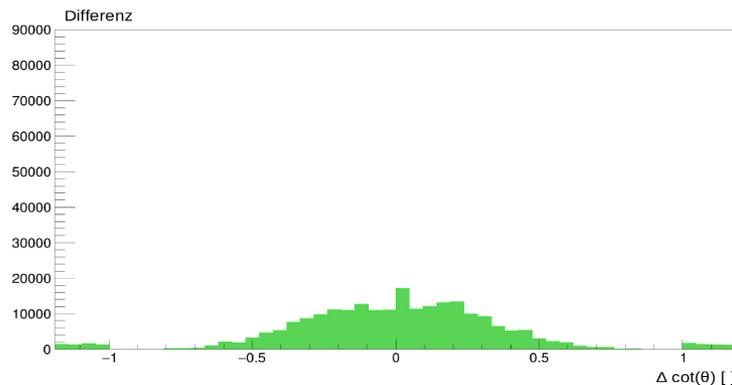
Korrekturen zum z_r -Wert

ie

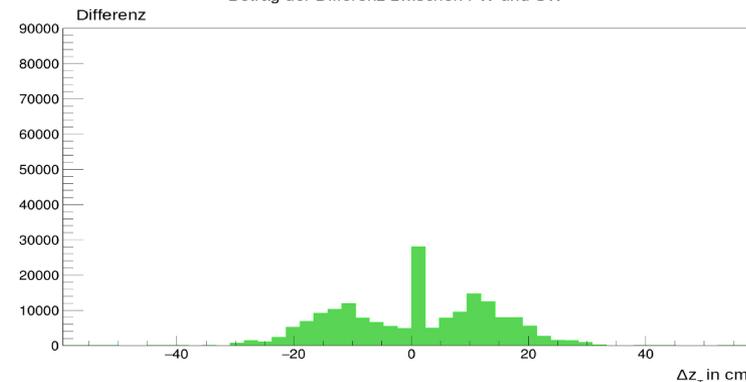
Korrekturen zum η -Sektor



Betrag der Differenz zwischen FW und SW



Betrag der Differenz zwischen FW und SW



Rekonstruktion in der rz -Ebene



- 10 % zu viele Stubs gelöscht (991655 von 1113423 erhalten geblieben)
- Zu viele Stubs aus der Firmware befinden sich Bereich des Mittelwertes
- Histogramme stimmen gut überein

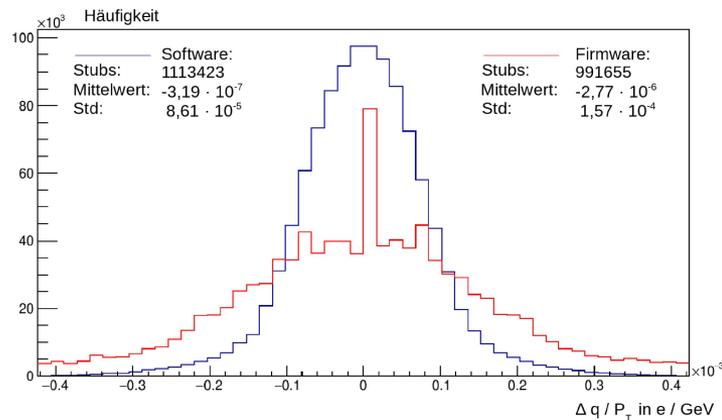


Rekonstruktion in der rz -Ebene gelingt.

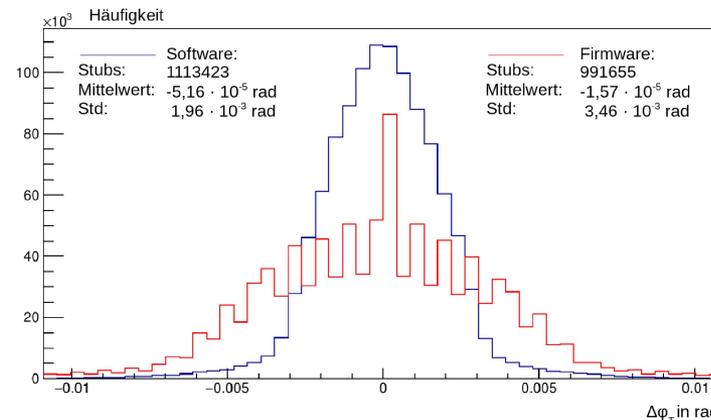
Rekonstruktion in der $r\phi$ -Ebene



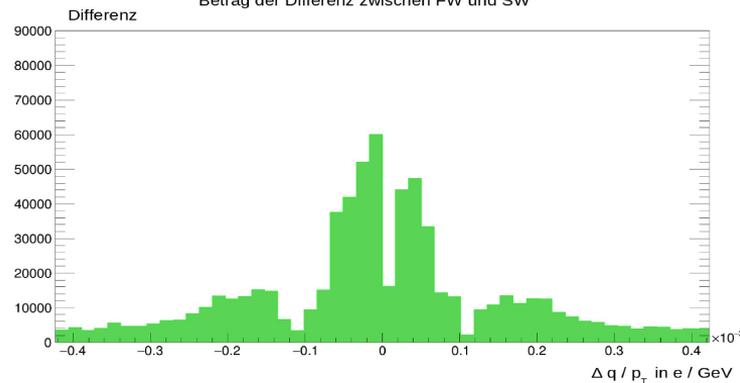
Korrekturen zum Impuls



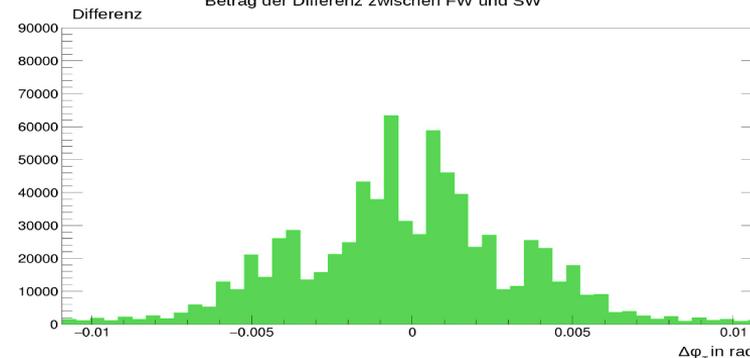
Korrekturen zum ϕ_T -Wert



Betrag der Differenz zwischen FW und SW



Betrag der Differenz zwischen FW und SW



Zusammenfassung und Ausblick



- Trajektorien können als Geraden genähert werden
- Kalmanfilter wird durch lineare Regression ersetzt
- Spurparameter aus der linearen Regression dienen als Korrekturen zu den Spurparameter aus der HT

Zusammenfassung und Ausblick



- Störstubs sollen entfernt werden
- Algorithmus benötigt 743 Takte und weist eine Latenz von 2,4 μs bei einer Taktfrequenz von 320 MHz auf
- Rekonstruktionsrate beträgt 90 %

Zusammenfassung und Ausblick



- Test von verschiedenen Varianten: ohne Virtuellen-Stub-Bilder und ohne Sortierer
- Optimierung der Gewichte für die Gesamtresiduumsberechnung

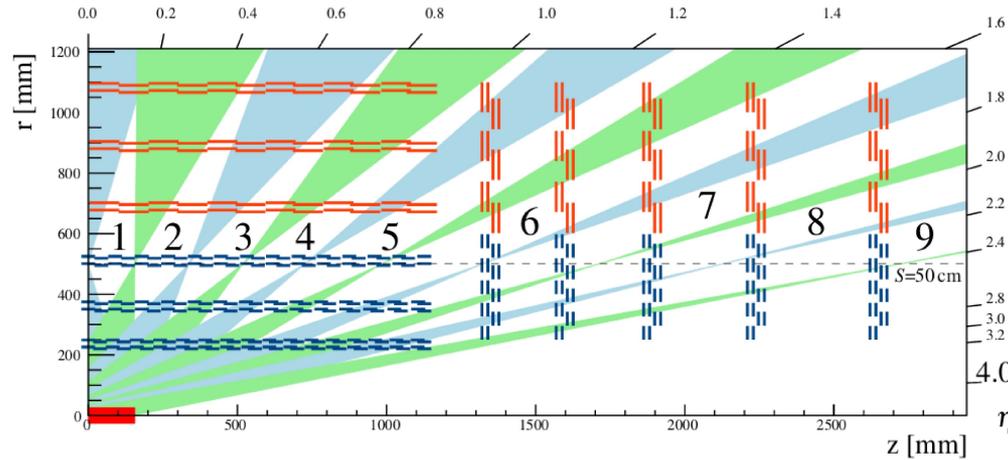
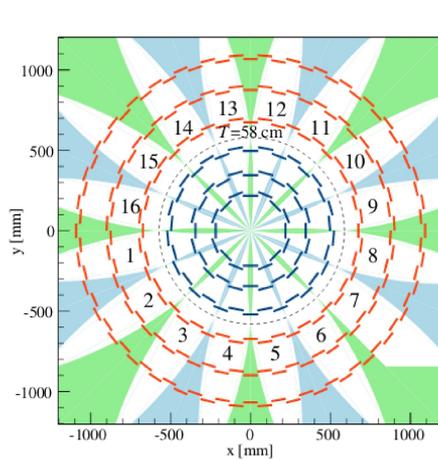


Mögliche Fehlerquellen

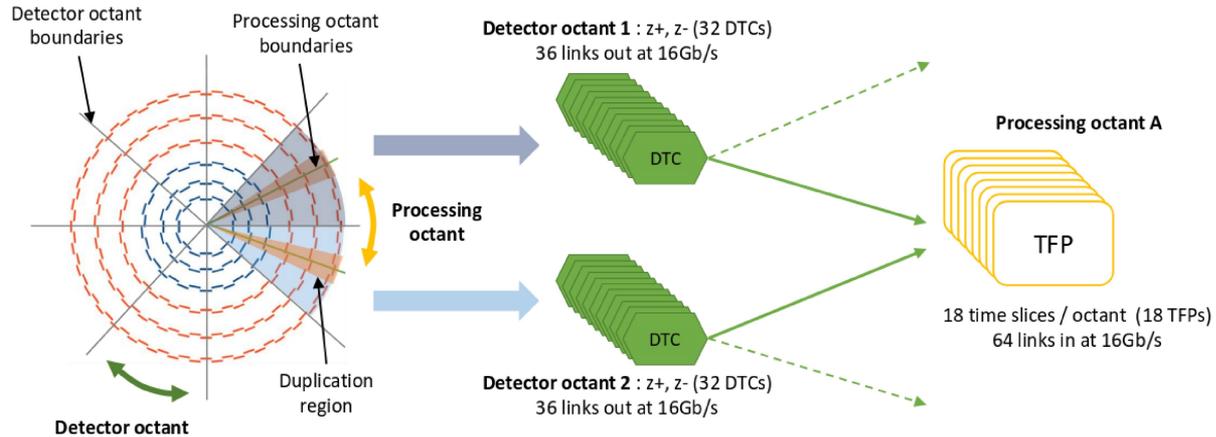


- Überlaufbit
- Ungenauigkeit aufgrund der Diskretisierung
- Fehler in der Durchschnittsbildung

Aufteilung des Detektors



Aufteilung des Detektors



Erläuterungen zu den Spurparameter



Linearisierung der Trajektorien liefert folgende Bewegungsgleichungen:

$$\phi(r) = \frac{1}{2R} \cdot r + \phi_0$$

$$\frac{1}{2R} = -0,57 \cdot \frac{q}{p_T}$$

$$z(r) = \cot(\Theta) \cdot r + z_0$$

$$\cot(\Theta) = \sinh(\eta)$$

Erläuterungen zu den Spurparameter



- ϕ_0 bezeichnet den Azimutalwinkel der Trajektorie im Ursprung
- R bezeichnet den Krümmungsradius und ist ein direktes Maß für den Impuls
- Θ ist der Polarwinkel bei der Entstehung des Teilchens
- z_0 ist der Schnittpunkt mit der z-Achse

Stub

