Untersuchung der Myonerkennung am H1-Detektor bei HERA

Diplomarbeit

vorgelegt von

Carsten Warenycia

II. Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

Hamburg
März 2001

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Die Elementarteilchenphysik beschäftigt sich mit den fundamentalen Bestandteilen der Materie und ihren verschiedenen Wechselwirkungen. Nach heutigem Wissensstand ist die Materie aus zwei Arten strukturloser Fermionen aufgebaut: den Quarks und den Leptonen. Die Quarks tragen drittelzahlige Ladungen und werden mit u, d, s, c, b, t bezeichnet. Die Leptonen sind entweder ungeladen (ν_e, ν_μ, ν_τ) oder tragen die Ladung $\pm|e|$ (e, μ, τ). Die Wechselwirkung zwischen den Fermionen wird durch Austauschbosonen vermittelt. Die elektroschwache Wechselwirkung erfolgt durch den Austausch masseloser Photonen und massiver W^+–, W^-– und Z^0-Bosonen, während die starke Wechselwirkung zwischen Quarks durch den Austausch von masselosen Gluonen beschrieben wird.
Am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY werden Protonen und Elektronen in der Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA beschleunigt und bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} \approx 300\,\mathrm{GeV}$ bis einschließlich 1997 bzw. $\sqrt{s} \approx 318\,\mathrm{GeV}$ seitdem zur Kollision gebracht. An einem der vier Wechselwirkungspunkte ist der H1-Detektor aufgestellt.
Ein wichtiges Forschungsgebiet bei HERA ist die Untersuchung der Produktionsmechanismen schwerer Quarks (c, b). Der Nachweis von Mesonen mit schweren Quarks erfolgt durch ihre Zerfallsleptonen. Das J/ψ-Meson beispielweise, ein gebundener $c\bar{c}$-Zustand, zerfällt zu 88% in Hadronen und zu jeweils etwa 6% in ein Elektron und ein Positron bzw. in zwei Myonen. Leptonen können besonders gut experimentell identifiziert werden und werden daher in den meisten physikalischen Analysen verwendet.
Zur Identifikation der Leptonen stehen neben den einzelnen Detektorkomponenten auch verschiedene Softwarewerkzeuge zur Verfügung. An die Leptonerkennung wird die Anforderung gestellt, die Teilchen möglichst effizient zu erkennen, d.h. die gesuchten Teilchen von denen zu trennen, die eine ähnliche Signatur im Detektor hinterlassen.
Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Myonerkennung, wie sie für das erste Halbjahr 1997 maßgebend war und versucht mit Hilfe eines Spurextrapolationsprogramms zusätzliche Unterscheidungskriterien für die Qualitätseinstufung von Myonen in der vorderen Endkappe und dem Zentralbereich des instrumentierten Eisens bereitzustellen.
Zu Beginn dieser Arbeit wird im **ersten Kapitel** ein Überblick über HERA und den H1-Detektor gegeben. Bei der Detektorbeschreibung wird nur auf die für diese Arbeit wichtigen Komponenten eingegangen.
Im **zweiten Kapitel** werden kurz die physikalischen Prozesse vorgestellt, in denen bei HERA Myonen entstehen und im H1-Detektor nachgewiesen werden können.
Im **Kapitel drei** werden die Verfahren zur Myonerkennung bei H1 beschrieben und das verwendete Spurextrapolationsprogramm anhand eines Datensatzes von elastischen J/ψ-

Ereignissen eingeführt.

Im ersten Teil des **vierten Kapitels** wird die Auswirkung der Änderung eines Myonselektionsschnittes studiert. Der zweite Teil befaßt sich mit der Untersuchung der Myonerkennung, wobei Selektionskriterien aus dem LAr-Kalorimeter, den Spurkammern und der vorderen Endkappe des instrumentierten Eisens benutzt werden. Der dritte Teil behandelt dieselbe Fragestellung für den Zentralbereich. Im zweiten und dritten Teil werden Daten mit auf D^*s vorselektierten Ereignissen betrachtet.

Abschließend wird im **fünften Kapitel** eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und ein kurzer Ausblick gegeben.

Kapitel 1

HERA und der H1-Detektor

Am Deutschen Elektronen-Synchroton (DESY) in Hamburg befindet sich der Speicherring **HERA**[1], der 1992 in Betrieb genommen wurde. Hier werden Positronen mit Protonen zur Kollision gebracht. Zu Beginn dieses Kapitels wird der Speicherring HERA kurz beschrieben, danach folgt ein Überblick über den **H1**-Detektor mit seinen für diese Analyse relevanten Komponenten.

1.1 Der Speicherring HERA

Am Speicherring HERA, der einen Umfang von 6.3 km besitzt, werden in zwei separaten Strahlrohren Protonen und Elektronen bzw. Positronen in Teilchenbündeln beschleunigt und zur Wechselwirkung gebracht.

Nachdem die Teilchen mit Hilfe eines Systems von Vorbeschleunigern (Abbildung 1.1 links) auf Energien von 12 GeV (e) bzw. 40 GeV (p) beschleunigt wurden, werden sie in den HERA-Ring injiziert und dort weiter beschleunigt (Abbildung 1.1 rechts). Mit den Endenergien von 27.5 GeV (Positronen) und 920 GeV (Protonen) ergibt sich eine Schwerpunktenergie des ep-Systems von $\sqrt{s} \approx 320\,\mathrm{GeV}$. Die Teilchenpakete werden mit einem zeitlichen Abstand von 96 ns zur Kollision gebracht, so daß man eine maximale Ereignisrate (*bunch crossing*) von 10.4 MHz erhält.

An zwei Wechselwirkungspunkten sind die Detektoren H1 (Experimentierhalle Nord) und ZEUS (Experimentierhalle Süd) aufgestellt. Die beiden anderen Experimente HERMES (Experimentierhalle Ost) und HERA-B (Experimentierhalle West) verwenden jeweils nur einen Teilchenstrahl.

HERMES bringt den polarisierten Positronstrahl mit polarisierten Gasatomen zur Kollision, um die Spinstruktur von Neutronen und Protonen zu untersuchen, während bei HERA-B die CP-Verletzung beim schwachen Zerfall von B-Mesonen gemessen werden soll.

---

[1] **H**adron-**E**lektron-**R**ing-**A**nlage

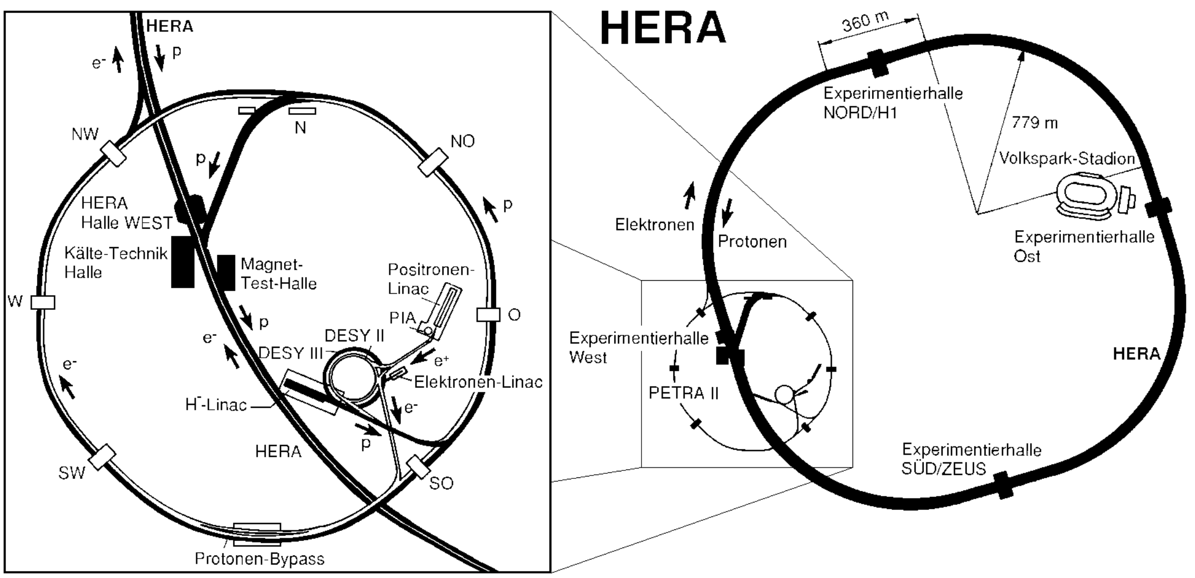


Abbildung 1.1: *Darstellung des Speicherrings HERA (rechts) und seiner Vorbeschleuniger (links).*

1.2 Der H1-Detektor

Der H1-Detektor ist ein aus mehreren verschiedenen Subdetektoren aufgebauter Multifunktionsdetektor. Auf Grund der Kinematik der zu registrierenden Ereignisse ist der Detektor asymmetrisch aufgebaut und in Richtung des Protonstrahls aufwendiger instrumentiert. Abbildung 1.2 zeigt eine perspektivische Darstellung des H1-Detektors. Das Strahlrohr $\boxed{1}$ ist umgeben von einem Spurkammersystem, welches aus zentralen Kammern $\boxed{2}$ und den Vorwärtsspurkammern $\boxed{3}$ besteht. Die Spurkammern sind von einem Flüssig-Argon-Kalorimeter umschlossen, das sich wiederum in einem Kryostaten $\boxed{15}$ befindet. Das Kalorimeter gliedert sich in einen elektromagnetischen $\boxed{4}$ und einen hadronischen $\boxed{5}$ Teil. Eine supraleitende Spule $\boxed{6}$ umgibt Kalorimeter und Spurkammern. Sie erzeugt ein parallel zur z-Achse verlaufendes Magnetfeld von 1.15 T. Das Eisenjoch $\boxed{10}$ ist mit Streamerrohrkammern instrumentiert und dient sowohl der Rückführung des magnetischen Flusses als auch gemeinsam mit den Myonkammern $\boxed{9}$ dem Nachweis von Myonen. Zur Messung von hochenergetischen Myonen stehen in Vorwärtsrichtung ein Toroidmagnet $\boxed{11}$ und Driftkammern $\boxed{9}$ zur Verfügung. Zum Nachweis des gestreuten Positrons dient ein rückwärtiges Kalorimeter $\boxed{12}$, das sogenannte SpaCal (Spaghetti Calorimeter), vor dem die rückwärtige Driftkammer (BDC-Backward Drift Chamber) liegt.

Das rechtshändige Koordinatensystem von H1 ist so gewählt, daß die positive z-Achse in Richtung des Protonenstrahles und die x-Achse zum Mittelpunkt von HERA zeigt (Abbildung 1.3 rechts). Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im nominellen Wechselwirkungspunkt (Vertex). Der Polarwinkel Θ wird in der durch die z-Achse und $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ aufgespannten Ebene relativ zum Protonstrahl und der Azimutalwinkel Φ in der durch die x- und y-Achse aufgespannten Ebene gemessen. Der Bereich kleiner Polarwinkel wird als *Vorwärts-* und der Bereich großer Polarwinkel als *Rückwärtsrichtung* bezeichnet. Der untersuchte Bereich umfaßt in dieser Arbeit den Bereich $5° \leq \Theta \leq 140°$. Die Akzeptanz-

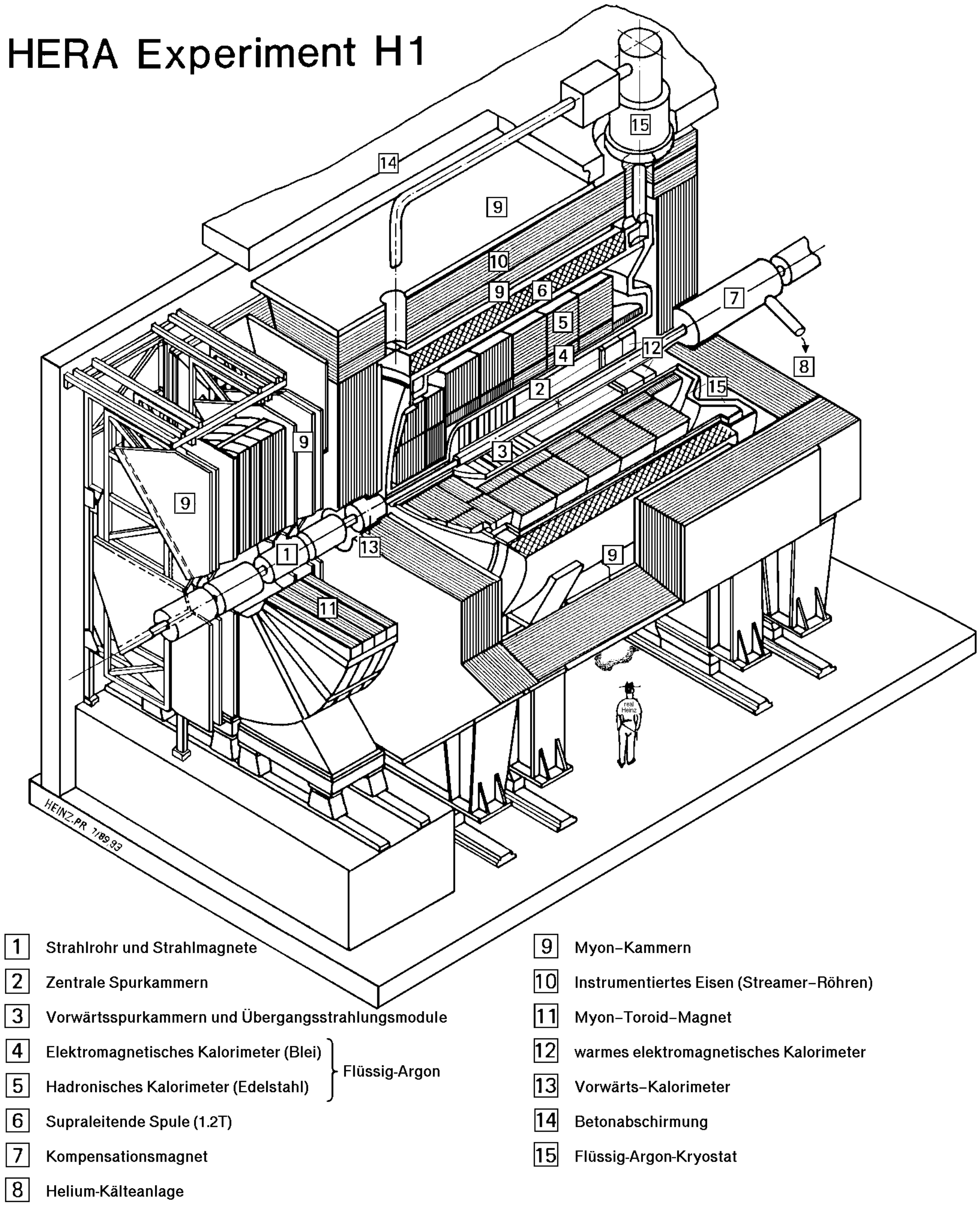


Abbildung 1.2: Der H1-Detektor. Wird im Text auf diese Abbildung verwiesen, so ist die Nummer der jeweiligen Komponente durch ein Rechteck gekennzeichnet.

bereiche der verschiedenen Detektorkomponenten sind in Abbildung 1.3 auf der linken Seite aufgeführt.

Im folgenden werden einige Komponenten des H1-Detektors vorgestellt, wobei nur auf die für diese Arbeit wichtigen Subdetektoren näher eingegangen wird. Eine detaillierte Beschreibung des H1-Detektors befindet sich in [H197a] und [H197b]. Aus diesen Quellen stammen auch die angegebenen Daten.

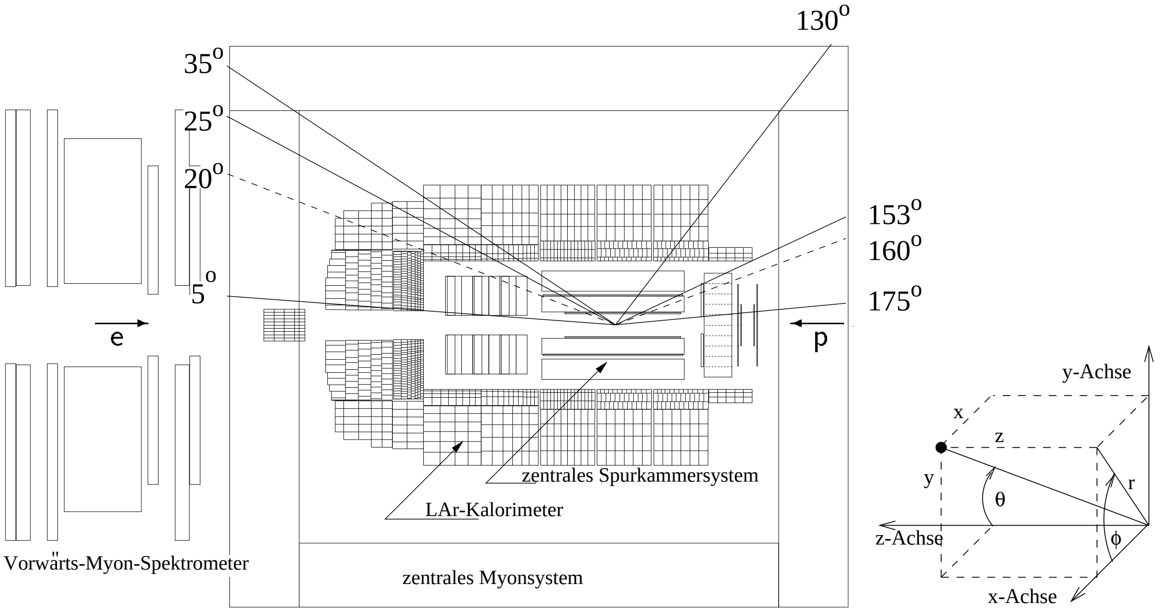


Abbildung 1.3: *Polarwinkelbereiche des H1-Detektors. Eingezeichnet sind die Akzeptanzbereiche des LAr-Kalorimeters, der Spurkammern und des Myonsystems. Auf der rechten Seite ist das H1-Koordinatensystem dargestellt.*

1.2.1 Die Spurkammern

Die Spurkammern gliedern sich, wie bereits erwähnt, in zentrale und vordere Spurkammer und rückwärtige Driftkammer und dienen der Messung des Impulses und des Energieverlustes von geladenen Teilchen. Desweiteren liefern sie Triggersignale zur Ereignisauswahl. Die Aufteilung in einen vorderen und einen zentralen Teil, die voneinander vollkommen unabhängig sind, ist darauf zurückzuführen, daß die unterschiedlichen Energien von Protonen und Positronen viele Teilchen unter sehr kleinen Polarwinkeln Θ entstehen lassen. Im folgenden werden nur die in dieser Arbeit wichtigen zentralen und vorderen Spurkammern beschrieben.

Zentrale Spurkammern

Die zentralen Spurkammern $\boxed{2}$ decken den Polarwinkelbereich von ungefähr $15^\circ \lesssim \Theta \lesssim 165^\circ$ ab. Für die Rekonstruktion von geladenen Teilchen im Zentralbereich werden die Driftkammern CJC1 und CJC2 (**C**entral **J**et **C**hamber) und die dünnen Driftkammern CIZ und COZ (**C**entral **I**nner/**O**uter **Z**-chamber) verwendet.

Die Driftkammer CJC1 ist in der $r\Phi$-Ebene in 30 Zellen mit je 24 Signaldrähten und die CJC2 in 60 Zellen mit je 32 Drähten eingeteilt. Durch eine Driftzeitmessung wird eine räumliche Auflösung in der $r\Phi$-Ebene von $\sigma_{r\Phi} = 170\,\mu$m erreicht. Die z-Koordinate läßt sich durch Ladungsteilung mit einer Auflösung von $\sigma_z = 22\,$mm bestimmen.
Die genauere Bestimmung der z-Koordinate erfolgt durch die dünnen Driftkammern CIZ und COZ mit einer Auflösung von $\sigma_z = 0.26\,$mm für die CIZ bzw.$\sigma_z = 0.20\,$mm für die COZ. Die CIZ-Kammer liegt vom Strahlrohr aus gesehen vor der CJC1 und besteht aus 15 Zellen mit je 4 Signaldrähten, während die COZ-Kammer zwischen CJC1 und CJC2 liegt und 24 Zellen mit je 4 Drähten beinhaltet.
Für den z-Vertex-Trigger werden die Proportionalkammern CIP und COP verwendet. Die Kammer CIP befindet sich zwischen dem Strahlrohr und der Kammer CIZ, während die Kammer COP an der Innenseite der CJC2 liegt. Beide Proportionalkammern bestehen aus zwei Lagen, die im Azimutalwinkel und in z-Richtung segmentiert sind (16×60 für CIP und 16×18 für COP).

Vordere Spurkammern

Die vorderen Spurkammern $\boxed{3}$ decken einen Polarwinkelbereich von ungefähr $5° \lesssim \Theta \lesssim 25°$ ab und bestehen aus drei identischen Supermodulen. Diese enthalten ein planares Modul mit 3 Driftkammern, eine Vieldrahtproportionalkammer, ein Übergangsstrahlungsmodul und ein radiales Modul. Die erste Vieldrahtproportionalkammer dient Triggerzwecken (z-Vertex-Trigger).

1.2.2 Die Kalorimeter

Die Kalorimeter des H1-Detektors haben vielfältige Aufgaben. Sie sollen neutrale und hochenergetische Teilchen sowie Teilchenbündel (Jets) nachweisen und Elektronen und Myonen identifizieren. Daher gibt es mehrere unterschiedliche Kalorimeter, die speziell ihrem Zweck angepaßt sind. Der rückwärtige Bereich wird durch das SpaCal abgedeckt, in extremer Vorwärtsrichtung befindet sich das Plug $\boxed{13}$, die zentralen und vorderen Spurkammern sind vom Flüssig-Argon-Kalorimeter umgeben (Abbildung 1.4). Auch das instrumentierte Eisen fungiert als Kalorimeter, als sogenannter "Tail Catcher" zum Nachweis von außerhalb der innenliegenden Kalorimeter deponierter Energie. Das Plug ist ein Kalorimeter für den Vorwärtsbereich und schließt die Akzeptanzlücke zwischen der Strahlachse und dem LAr-Kalorimeter. Es deckt den Polarwinkelbereich von $0.6° \lesssim \Theta \lesssim 3.5°$ ab.

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter

Das Flüssig-Argon-Kalorimeter liegt vollständig innerhalb der supraleitenden Spule und überdeckt den Polarwinkelbereich von $4° \lesssim \Theta \lesssim 153°$. Es besteht aus einem inneren elektromagnetischen und einem äußeren hadronischen Teil und unterteilt sich längs der Strahlachse in acht zylindrische Module.

Im elektromagnetischen Teil werden Absorberplatten aus Blei von 2.4 mm Stärke verwendet. In den 2.35 mm breiten Spalten zwischen den Bleiplatten befindet sich das flüssige Argon. Etwa 31000 Kanäle werden zur Datennahme ausgelesen, so daß eine feine Segmentierung für einen genauen Elektronnachweis erreicht wird. Die Dicke des elektromagnetischen Teils beträgt 20 bis 30 Strahlungslängen X_0. Die Energieauflösung beträgt: $\sigma_E/E = 0.11/\sqrt{E} \oplus 0.01$.
Im hadronischen Teil dienen 1.9 cm dicke Platten aus Edelstahl als Absorbermaterial, zwischen denen sich das flüssige Argon befindet. Eine feine Segmentierung ist durch ca. 13000 Datenauslesekanäle gegeben. Die Energieauflösung ist geringer als im elektromagnetischen Teil, im hadronischen LAr beträgt sie: $\sigma_E/E = 0.50/\sqrt{E} \oplus 0.02$. Die Zahl der hadronischen Wechselwirkungslängen liegt zwischen vier im Zentralbereich und acht in Vorwärtsrichtung.

Abbildung 1.4: *Das LAr-Kalorimeter in der rz-Projektion. Eingezeichnet ist eine Isolinie 20 X_0 für das elektromagnetische Kalorimeter und mehrere Linien von hadronischen Wechselwirkungslängen λ. Die Werte von X_0 und λ variieren über den Polarwinkelbereich auf Grund der verschiedenen Eintrittswinkel Θ von Teilchen, die vom nominellen Wechselwirkungspunkt (IP) kommen.*

1.2.3 Das zentrale Myonsystem

Das instrumentierte Eisen umschließt die supraleitende Spule und hat drei Funktionen: die Rückführung des magnetischen Flusses, die Kalometrie (Tail Catcher) und den Nachweis von Myonen.
Die Abbildung 1.5 zeigt Aufbau und Instrumentierung des zentralen Myonsystems. Zehn 7.5 cm dicke Eisenplatten sind so angeordnet, daß in den neun Zwischenräumen Streamerrohrkammern Platz finden. Acht dieser Zwischenräume sind mit einer Lage Kammern versehen, dagegen ist der von innen aus gezählte vierte Zwischenraum doppelt so breit und mit zwei Lagen instrumentiert. Zusätzlich sind außen und innen über weite Teile des Detektors jeweils drei weitere Lagen Streamerrohrkammern installiert, die sogenannten

Myonboxen, so daß für den Nachweis von Myonen insgesamt 16 Lagen Streamerrohrkammern zur Verfügung stehen.
Eine Lage besteht aus mehreren rechteckigen Kammerelementen, die aus zwei Profilen zusammengesetzt sind. Ein Profil beinhaltet acht Röhren mit einem quadratischen Querschnitt von 9 mm x 9 mm. Innen sind die Wände der Röhren mit Graphit beschichtet und dienen als Kathode. In der Mitte ist ein 100 μm dicker Kupfer-Beryllium-Draht gespannt. Zur Ortsbestimmung in Richtung der Drähte sind auf jeweils zwei Lagen der Myonboxen und in der Doppellage streifenförmige Influenzelektroden aufgeklebt. So ist eine Ortsauflösung von ca. 4 mm senkrecht zur Richtung der Drähte und ca. 1.2 cm in Drahtrichtung erreichbar.
Die weitere Aufteilung des Myonsystems läßt sich in den Abbildungen 1.5 und 1.6 erkennen. Es unterteilt sich in 64 einzelne Module, wovon 32 in Form eines Achtecks um den zentralen Bereich angeordnet sind und als “Barrel” bezeichnet werden und jeweils 16 Module die vordere und hintere Endkappe bilden. In der Abbildung 1.6 sind deutlich die Bereiche des Detektors zu erkennen, die nicht instrumentiert sind [Wol99].

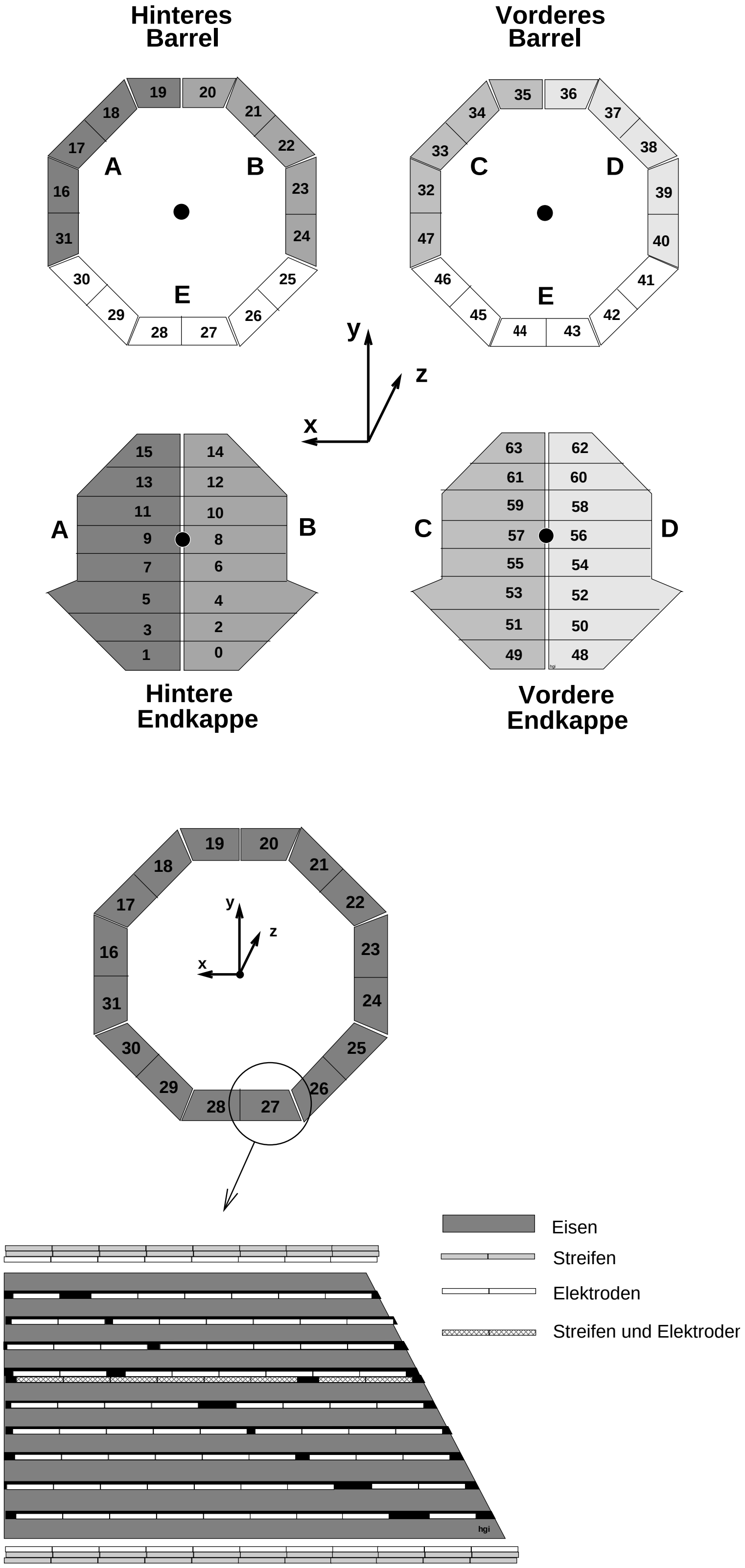


Abbildung 1.5: *Einteilung des instrumentierten Eisens in 4 Bereiche und 64 Module (oben) und der Querschnitt durch ein Modul (unten).*

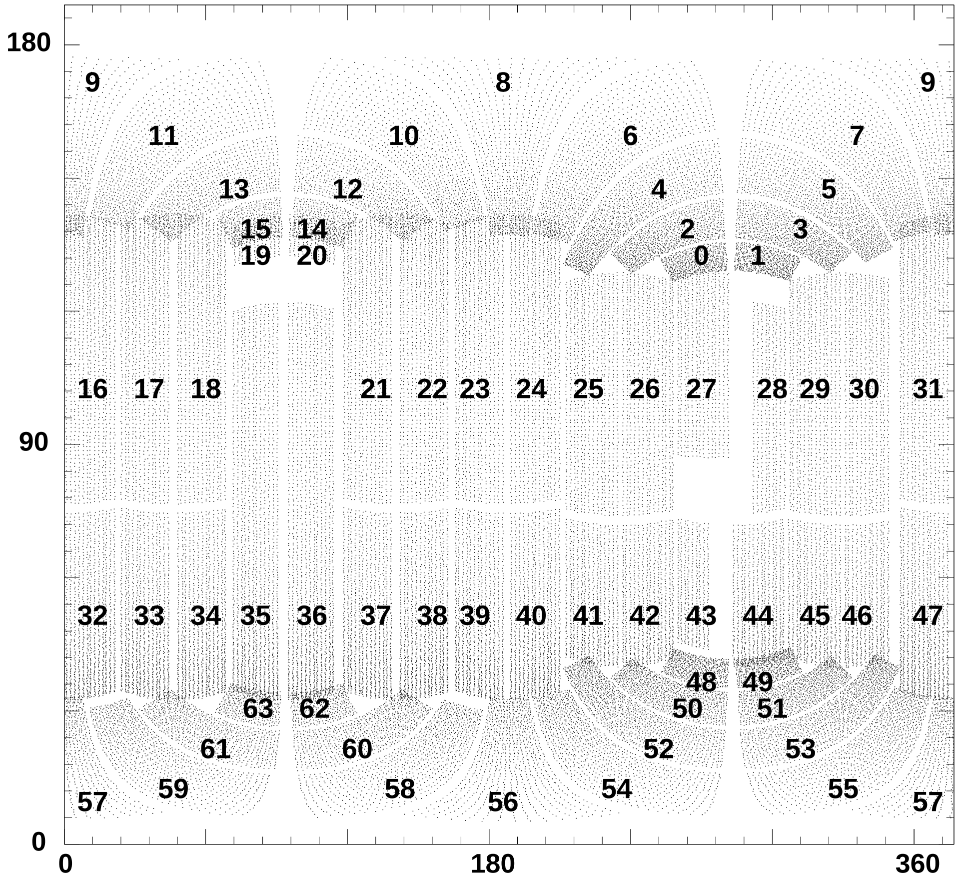


Abbildung 1.6: *Projektion des instrumentierten Eisens in die* Θ - ϕ *Ebene mit zugehöriger Modulnummer.*

Kapitel 2

Ereignisse mit Myonen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten physikalischen Prozesse vorgestellt, bei denen Myonen entstehen und im H1-Detektor nachgewiesen werden können. Neben den Myonen aus schweren Quarks, die in ep-Wechselwirkungen wie Boson-Gluon-Fusion entstehen, treten auch Myonen aus Untergrundereignissen wie kosmischer Höhenstrahlung auf.

2.1 Myonen aus der Erzeugung schwerer Quarks

In diesem Abschnitt werden die Prozesse behandelt, in denen bei HERA schwere Quarks entstehen können. Als schwere Quarks werden hier c und b bezeichnet, dementsprechend u, d und s als leichte. Der wesentliche Vorgang zur Erzeugung schwerer Quark-Antiquarkpaare ist die Boson-Gluon-Fusion [Jon78], bei der ein vom Elektron abgestrahltes Photon und ein vom Proton abgestrahltes Gluon wechselwirken und ein farbgeladenes $(q\bar{q})$-System bilden. Abbildung 2.1 links zeigt den Feynman-Graphen für die Reaktion $\gamma g \to c\bar{c}$. Dieser Prozeß kann im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) störungstheoretisch behandelt werden. Durch Abstrahlung eines weiteren Gluons kann dieses farbgeladene $(q\bar{q})$-System in einen farbneutralen Zustand übergehen, dessen Feynman-Graph in Abbildung 2.1 rechts zu sehen ist. Diese beiden Prozesse bezeichnet man als direkt, da das Photon als punktförmiges Teilchen auftritt.

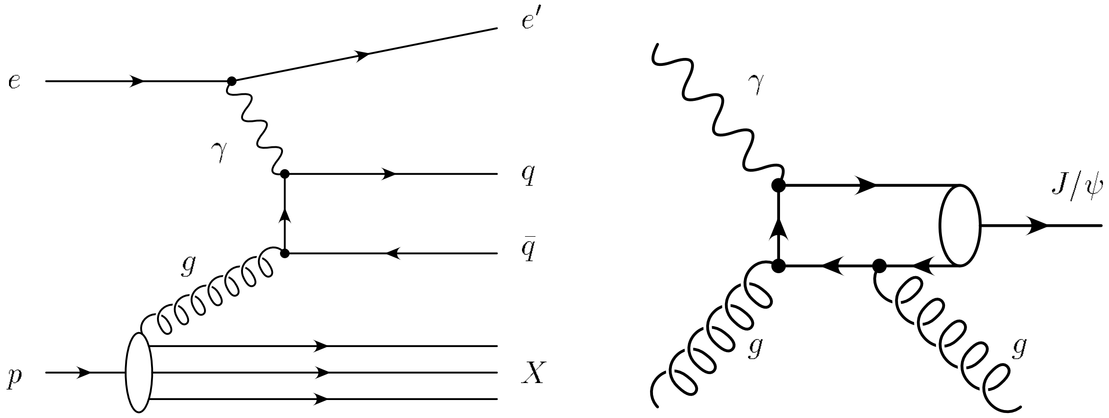


Abbildung 2.1: *Feynman-Graph zur Boson-Gluon-Fusion in führender Ordnung (links) und für J/ψPhotoproduktion (rechts).*

Die Symbole haben folgende Bedeutung:

- e: einlaufendes Elektron
- e': auslaufendes Elektron
- p: einlaufendes Proton
- γ: virtuelles Photon
- g: virtuelles Gluon
- X: hadronischer Endzustand
- $q\bar{q}$: farbgeladener $q\bar{q}$-Endzustand
- J/ψ: farbneutraler J/ψ-Endzustand

Beim aufgelösten Prozeß fluktuiert das Photon vor der Wechselwirkung in einen hadronischen Zustand, die schweren Quarks werden entweder über die Gluon-Gluon-Fusion oder über Quark-Antiquark-Annihilation erzeugt, wobei letzterer Anteil vernachlässigbar klein ist. Die zugehörigen Feynman-Graphen zur Gluon-Gluon-Fusion befinden sich in Abbildung 2.2.

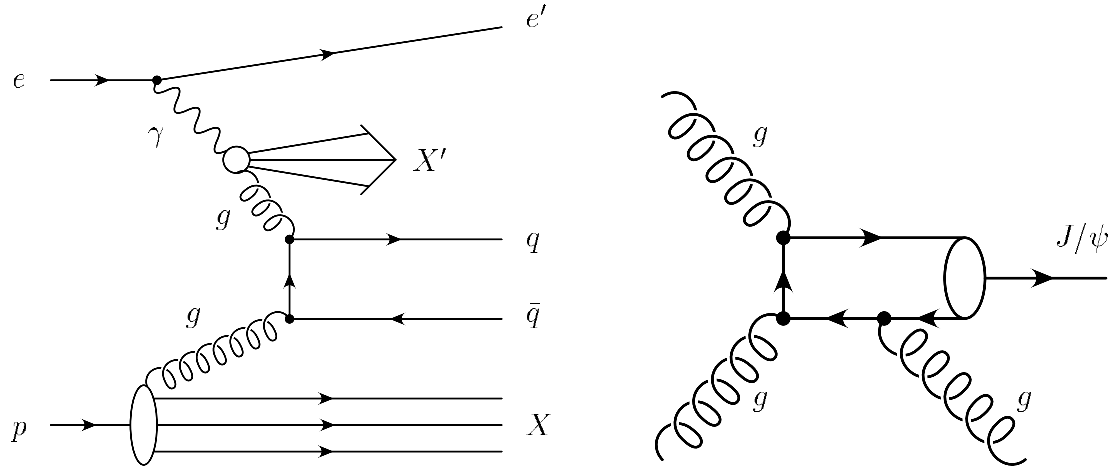


Abbildung 2.2: *Feynman-Graph zur Gluon-Gluon-Fusion mit farbgeladenem (links) und farbneutralem (rechts) Endzustand.*

Das Verzweigungsverhältnis für den Zerfall des J/ψ über die elektroschwache Wechselwirkung in zwei Myonen beträgt: BR $(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (5.88 \pm 0.10)\%$
Ein weiterer Produktionsmechanismus bei HERA zur Erzeugung von J/ψ-Mesonen sind diffraktive Prozesse, bei denen ein vom Elektron abgestrahltes Photon gemäß des Vektordominanzmodells in ein Vektormeson übergeht, welches die gleichen Quantenzahlen ($J^{PC} = 1^{--}$) wie das Photon besitzt. Dieses wechselwirkt mit dem Proton über eine Austauschtrajektorie, die man häufig als Pomeron bezeichnet. Der Impulsübertrag ist in der Regel klein, so daß dieser Prozeß im Rahmen der QCD nicht störungstheoretisch behandelt werden kann.

2.2 Myonen aus Untergrundprozessen

Bei der Selektion von Myonen aus schweren Quarks muß auf den Untergrund geachtet werden, der sich hauptsächlich aus Myonen aus der kosmischen Strahlung und Myonen aus den Zerfällen von leichten Quarks zusammensetzt. Kosmische Myonen, die bei Luftschauerprozessen entstehen, haben eine über den gesamten Raumwinkel verteilte Intensität von etwa 60 Myonen pro Quadratmeter und Sekunde [Bug98], so daß es mitunter zu einer Überlagerung zwischen einem ep-Ereignis und einem kosmischen Myon kommt. Zu Kalibrationszwecken werden für das instrumentierte Eisen kosmische Myonen verwendet, bei denen keine ep-Kollisionen stattfinden. In dieser Analyse werden jedoch die meisten Ereignisse mit kosmischen Myonen ausgeschlossen (siehe Kapitel 3).

In Ereignissen mit hadronischen Schauern entstehen Myonen hauptsächlich aus dem Zerfall von Mesonen wie Pionen und Kaonen. Geladene Pionen zerfallen zu fast 100 % in ein Myon und ein Neutrino, bei Kaonen beträgt das Verzweigungsverhältnis für denselben Zerfallskanal 63.5 % [PDG00]. Ein Prozeß mit großem Wirkungsquerschnitt ist die Quark-Antiquark-Erzeugung von leichten Quarks (u, d, s), die jeweils einen hadronischen Schauer auslösen können.
Bei der Lepton-Paar-Produktion gemäß $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ entstehen ebenfalls Myonen, die als nicht-resonanter Untergrund auftauchen.

Kapitel 3

Verfahren zur Myonerkennung

3.1 Myonerkennung im H1-Detektor

In diesem Kapitel werden die Verfahren vorgestellt, die zur Identifizierung der Myonen in dieser Arbeit eingesetzt werden - beginnend mit der Spurrekonstruktion im Eisen, darauf folgend das Programmpaket [West97] zur Spur- und Myonerkennung und danach die Schnittparameter im LAr-Kalorimeter. Die verwendete Extrapolationsroutine schließt dieses Kapitel ab. In diesem Kapitel werden Ereignisse aus der ersten Jahreshälfte 1997 behandelt, die folgendermaßen vorselektiert wurden und im folgenden als "J/ψ-Datensatz" bezeichnet werden

- zwei gute Spuren in $15^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$
- höchstens eine Spur mit $\theta \leq 15^\circ$
- höchstens eine Spur mit $\theta \geq 165^\circ$
- eine als Myon erkannte Spur mit guter oder sehr guter Kalorimeterqualität
- nicht mehr als vier gute Spuren
- $\mathrm{p} \geq 0.8\,\mathrm{GeV}$

Ereignisse, deren Spuren sich, wie für kosmische Myonen typisch, in θ und in ϕ gegenüberliegen (siehe Abbildung 3.1) werden mit einem sogenannten "Ellipsenschnitt" nach folgendem Schema reduziert: $((180^\circ - \Delta\phi)/4)^2 + ((180^\circ - \Delta\theta)/8)^2 \leq 1$. Dabei bedeutet $\Delta\phi$ die Differenz der beiden ϕ-Komponenten von Spur A und B, $\Delta\theta$ die Differenz der beiden Polarwinkelkomponenten.

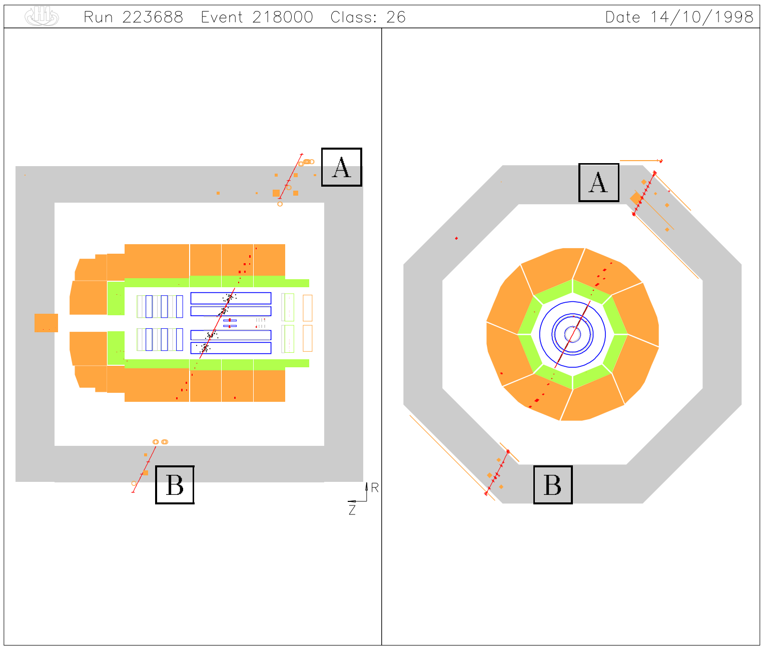


Abbildung 3.1: *Ereignis mit kosmischem Myon.*

Um sicherzustellen, daß es sich bei den untersuchten Teilchen wirklich um Myonen handelt, wurden die Schnitte dahingehend erweitert, daß nur Zwei-Spur-Ereignisse Verwendung finden, deren invariante Masse innerhalb eines Fensters von ±0.2 GeV um die J/ψ-Masse liegt, siehe Abbildung 3.2. Ein Profil des J/ψ-Datensatzes mit den Verteilungen in

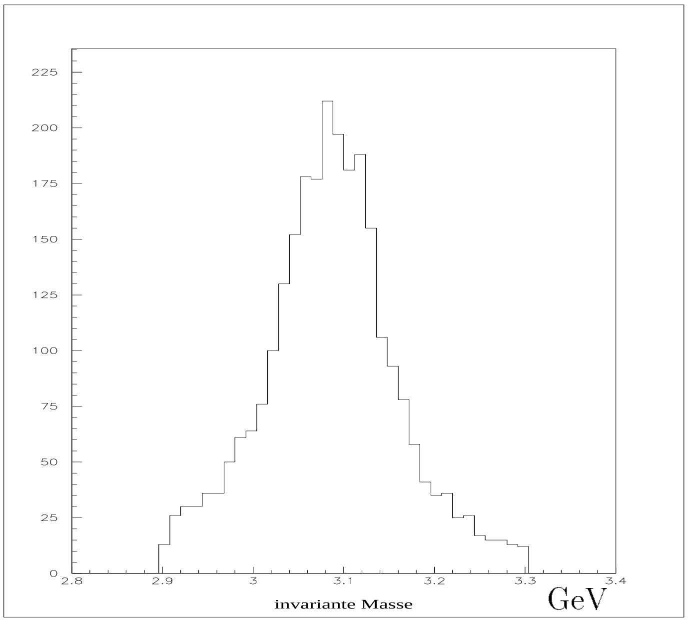


Abbildung 3.2: *Verteilung der invarianten Masse des J/ψ-Datensatzes nach allen Schnitten.*

θ, ϕ, p und p_t für die beiden Bereiche vordere Endkappe und Zentralbereich der Myonen mit Qualität $Q_\mu \geq 2$ ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

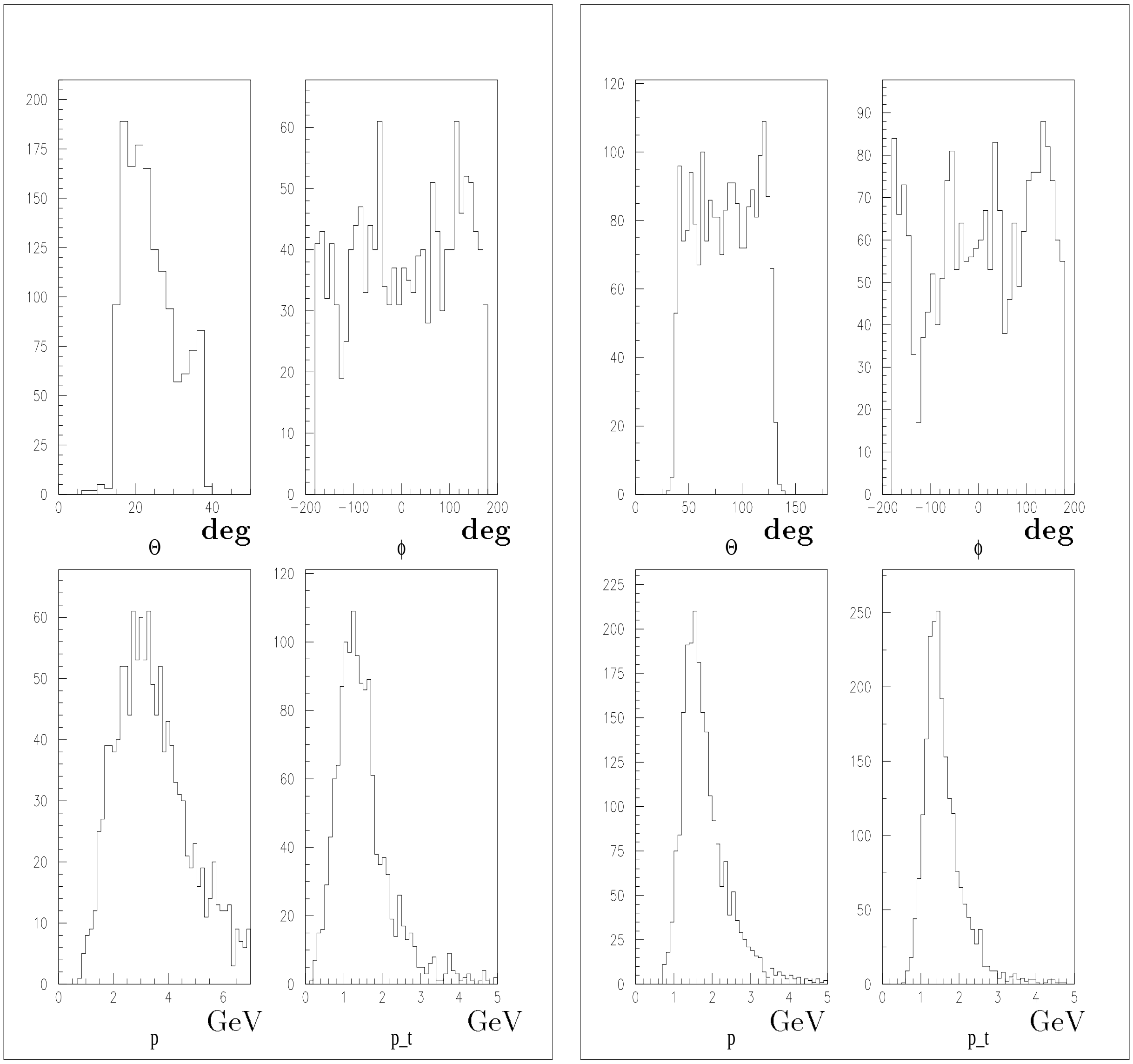


Abbildung 3.3: *Verteilungen in θ, ϕ, p und p_t für Myonen der Qualität $Q_\mu \geq 2$ in der* **vorderen Endkappe** *(links) und im* **Zentralbereich** *(rechts).*

3.1.1 Myonerkennung im Myondetektor

Abbildung 3.4 zeigt ein Ereignis mit zwei zentralen Myonen, die deutliche Spuren in den Spurkammern $\boxed{1}$, dem Kalorimeter $\boxed{2}$ und dem instrumentierten Eisen $\boxed{3}$ hinterlassen. Mit einem Extrapolationsverfahren werden Spuren aus dem Spurkammersystem bis zum instrumentierten Eisen fortgeschrieben, die den Bedingungen genügen, daß der

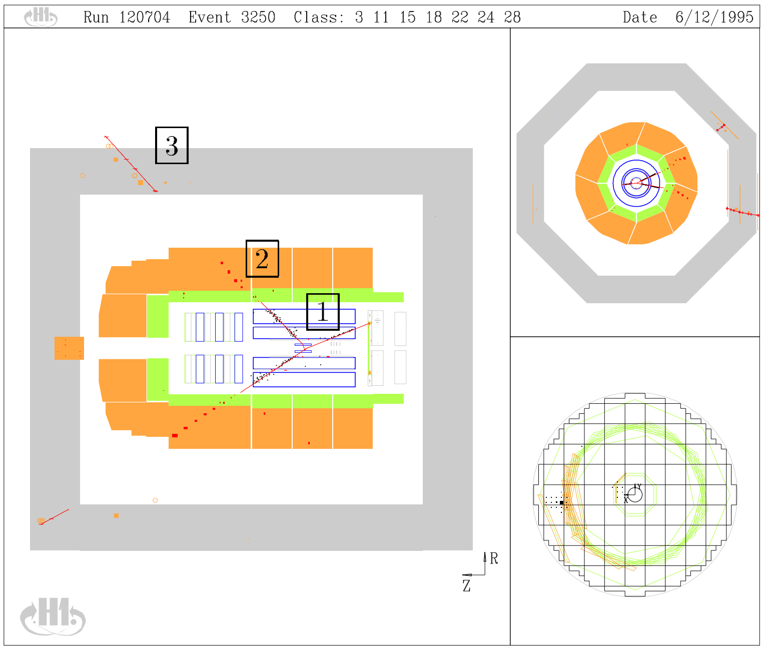


Abbildung 3.4: *Ereignis mit zwei zentralen Myonen.*

Impuls des Teilchens groß genug und Polarwinkel- sowie Azimutwinkeldifferenz zwischen Richtung der Spur in den Spurkammern und im Myonsystem klein genug ist.
Im Myonsystem werden die Richtung des Teilchens, die Ortskoordinaten des ersten Punktes im Eisen und die Ladung pro Impuls am Spuranfang rekonstruiert und in die Bank ITKR (Iron-Track-Reconstruction) geschrieben. Die Rekonstruktion der Spuren im instrumentierten Eisen [Klei92] ist für die einzelnen Bereiche Zentralbereich (Barrel), vordere und hintere Endkappe jeweils unabhängig, d.h. Myonen, die zum einen Teil das Barrel und zum anderen eine Endkappe durchqueren, werden mit zwei Spuren rekonstruiert, sofern beide lang genug sind. Wenn die einzelnen Spurstücke jedoch die geforderten Schnitte nicht erfüllen, wird die gesamte Spur verworfen.
Die Informationen aus dem instrumentierten Eisen (auch die von verworfenen Spuren) werden je nachdem, ob sie von den Drähten oder den Streifen stammen, in den Banken IWCR (Iron-Wire-Coordinates-Reconstruction) und ISCR (Iron-Strip-Coordinates-Reconstruction) gespeichert, die parallel zu den Rohdatenbänken IRWE (Iron-Response-Wire-Event) und IRSE (Iron-Response-Strips-Event) existieren. Da die Drähte im Barrel parallel zur z-Achse verlaufen, messen sie dort die Φ- und die Streifen die z-Komponente, in den Endkappen, wo die Drähte parallel zur x-Achse verlaufen, messen sie jedoch die y- und die Streifen die x-Koordinaten. Gerade den Daten der verworfenen Spuren wird im weiteren Verlauf dieser Analyse Aufmerksamkeit zuteil.
Die wichtigsten Schnitte zur Myonselektion mit Hilfe des Programmpakets [West97] im instrumentierten Eisen sind in der Tabelle 3.1 zusammengefaßt, wobei die hintere

Endkappe hier nicht aufgeführt wird, da sie in dieser Analyse keine Anwendung findet:

Vordere Endkappe			**Zentralbereich**		
ρ_x	$<$	100 cm	ρ	$<$	100 cm
ρ_y	$<$	100 cm	z_0	$<$	100 cm
N_{Lagen}	$\geq$	6	N_{Lagen}	$\geq$	2
$i_{erste\,Lage}$	$\leq$	5	$i_{erste\,Lage}$	$\leq$	5
$i_{letzte\,Lage}$	$\geq$	6	$i_{letzte\,Lage}$	$\geq$	2

Tabelle 3.1: *Schnitte der Myonselektion*

Die Abkürzungen haben folgende Bedeutung:

- ρ, ρ_x, ρ_y: Radialer Abstand der zurückextrapolierten Eisenspur vom Ereignisvertex sowie dessen x- und y-Komponente
- z_0: z-Koordinate am Anfangspunkt der Eisenspur
- $i_{erste\,Lage}, i_{letzte\,Lage}$: Nummer der ersten bzw. letzten getroffenen Lage der Streamerrohrkammern im instrumentierten Eisen (Lagen 3-12, vergl. Abbildung 1.5)

Auch die Auswahl der “guten” Spuren erfolgt mit Hilfe des o.a. Programmpakets, das Spurmehrdeutigkeiten auflöst und schlecht gemessene Spuren verwirft. Die Schnitte für die Wahl von guten Spuren im vorderen und zentralen Spurkammerbereich zeigt Tabelle 3.2.

Das Spurverbindungsprogramm (KMTREC) [Ros91] berechnet eine χ^2-Wahrscheinlichkeit dafür, daß zwischen den zentralen und den Myonspuren eine Verbindung besteht und akzeptiert diese für einen Wert von $P(\chi^2) \geq 0.0001$.

Zentralspur			**Vorwärtsspur**		
p_T	$>$	0.15 GeV	p_T	$>$	0.15 GeV
$20°$	$< \theta <$	$160°$	$6°$	$< \theta <$	$25°$
$\|dca'\|$	$<$	2.0 cm	dp/p	$<$	1.0
R_{Start}	$<$	50 cm	$R0$	$<$	10 cm
R_{Spur1}	$>$	10 cm	N_{12}	$>$	1.0
R_{Spur2}	$>$	5 cm	N_{pr}	$>$	2.0

Tabelle 3.2: *Schnitte der Spurselektion*

Die Abkürzungen haben folgende Bedeutung:

- p_T: Transversalimpuls der Spur
- θ: Polarwinkel der Spur
- dca': Minimaler Abstand der Spur vom Primärvertex
- dp / p: relativer Fehler im Impuls der Spur
- R_{Start}: Radialer Abstand des 1. Treffers in der CJC vom Ursprung
- $R0$: Radialer Abstand des 1. Treffers in der CIP vom Ursprung
- R_{Spur1}: Radiale Spurlänge für $\theta \leq 150°$
- R_{Spur2}: Radiale Spurlänge für $\theta > 150°$
- N_{12}: Anzahl der angesprochenen Segmente im 1. und 2. Planarmodul
- N_{12}: Anzahl der angesprochenen Planar- und Radialmodulsegmente

3.1.2 Myonerkennung im LAr-Kalorimeter

Das LAr-Kalorimeter durchqueren die Myonen als minimalionisierende Teilchen, für die folgende Größen als Schnittparameter verwendet werden [Scg97]:
- die summierte Energie im elektromagnetischen Teil des Kalorimeters innerhalb eines Radius von 15 cm um die extrapolierte Helix
- die gesamte Kalorimeterenergie innerhalb eines Helixradius von 30 cm

- das Maximum der Spurlängen $l_j h_j$ vom Eintrittspunkt der Helix bis zur j-ten angesprochenen Zelle
- die summierte hadronische Spurlänge

Die Schnitte auf die vier Größen sind abhängig von Impuls und Polarwinkel und dienen als Grundlage für die Einteilung in vier Qualitätsklassen Q_μ^{Kalo}: Qualität 0 (kein Myon), 1 (schwach), 2 (gut) und 3 (sehr gut). Analog dazu werden für Myonen, die zusätzlich im Eisen erkannt werden, zu den o.a. Qualitäten die Zahl 10 addiert. Es gilt also: $Q_\mu^{Eisen} = Q_\mu^{Kalo} + 10$

3.2 Die Spurextrapolation

Das benutzte Progamm extrapoliert einzelne Spuren aus dem Spurkammersystem bis zu einer vorgegebenen Oberfläche, in diesem Falle bis zu einem Abstand von 6 m vom nominellen Wechselwirkungspunkt auf der positiven z-Achse und 4 m in negativer z-Richtung sowie 5 m in radialer Richtung. Um einen Eindruck von der Güte der Routine zu bekommen, werden Myonspuren in die vordere Endkappe und in den Zentralbereich extrapoliert und Treffer im Eisen entlang ihrer Bahn aufgesammelt. Die dazu gehörigen geometrischen Parameter werden für verschiedene Myonqualitäten, nämlich für im Eisen erkannte und für gute bzw. sehr gute Kalorimetermyonen, ermittelt und miteinander verglichen. Dabei wird versucht, Kriterien zu finden, die es erlauben, Myonen der Qualität 2 und 3, die nur aufgrund weniger Schnitte als nicht im Eisen erkannt verworfen wurden, aufzuwerten.

3.2.1 Extrapolation in der vorderen Endkappe

Zunächst werden Myonen mit Eisenspur untersucht, indem ihre zentralen Spuren aus der Spurkammer in die vordere Endkappe extrapoliert werden. Die vordere Endkappe gilt als erreicht, wenn die z-Komponente eines extrapolierten Spurstückes größer als 4.75 m ist. Nun wird der Abstand in x und y zwischen diesem Spurstück und jedem Treffer im Eisen bestimmt, der in den zugehörigen Modulen der vorderen Endkappe (48 bis 63 siehe Abbildung 1.5) liegt. Dabei wird zur Sicherheit noch der Betrag der Differenz im Azimutalwinkel Φ auf $25°$ beschränkt.

Abbildung 3.5 links zeigt den Abstand in x und y für Myonen mit $Q_\mu \geq 10$, Abbildung 3.5 rechts die Differenz in ϕ. Wie in Abschnitt 3.1.1 ausgeführt, ist der relevante Parameter in den Endkappen y, da die Drähte parallel zur x-Achse verlaufen. Danach werden alle Eisentreffer, die in einem Abstand von 50 cm in Δy liegen als zur Spur gehörig gewertet. Die Anzahl der Lagen, in denen sich ein oder mehrere Treffer befinden, werden pro Spur aufsummiert und, wie in Abbildung 3.6 links zu sehen ist, gegen den Impuls des Teilchens aufgetragen. Der Myonselektionsschnitt nach [West97] für die Anzahl der Lagen in der vorderen Endkappe beträgt mindestens 6 und ist hier gut wiedergegeben, man sieht sogar, daß das Maximum der Anzahl bei 9 liegt. Zum Vergleich sehen wir in der Abbildung 3.6 rechts dieselbe Vorgehensweise angewendet auf Myonen der Qualitäten 2 und 3, die also nicht im Eisen erkannt wurden. Diese Teilchen haben Treffer in einer bis zu fünf Lagen, zunehmend mit steigendem Impuls, jedoch kommen auch 6 oder mehr Lagen vor, wenn andere Bedingungen der Selektion als im Eisen erkannt nicht erfüllt wurden (siehe 3.1).

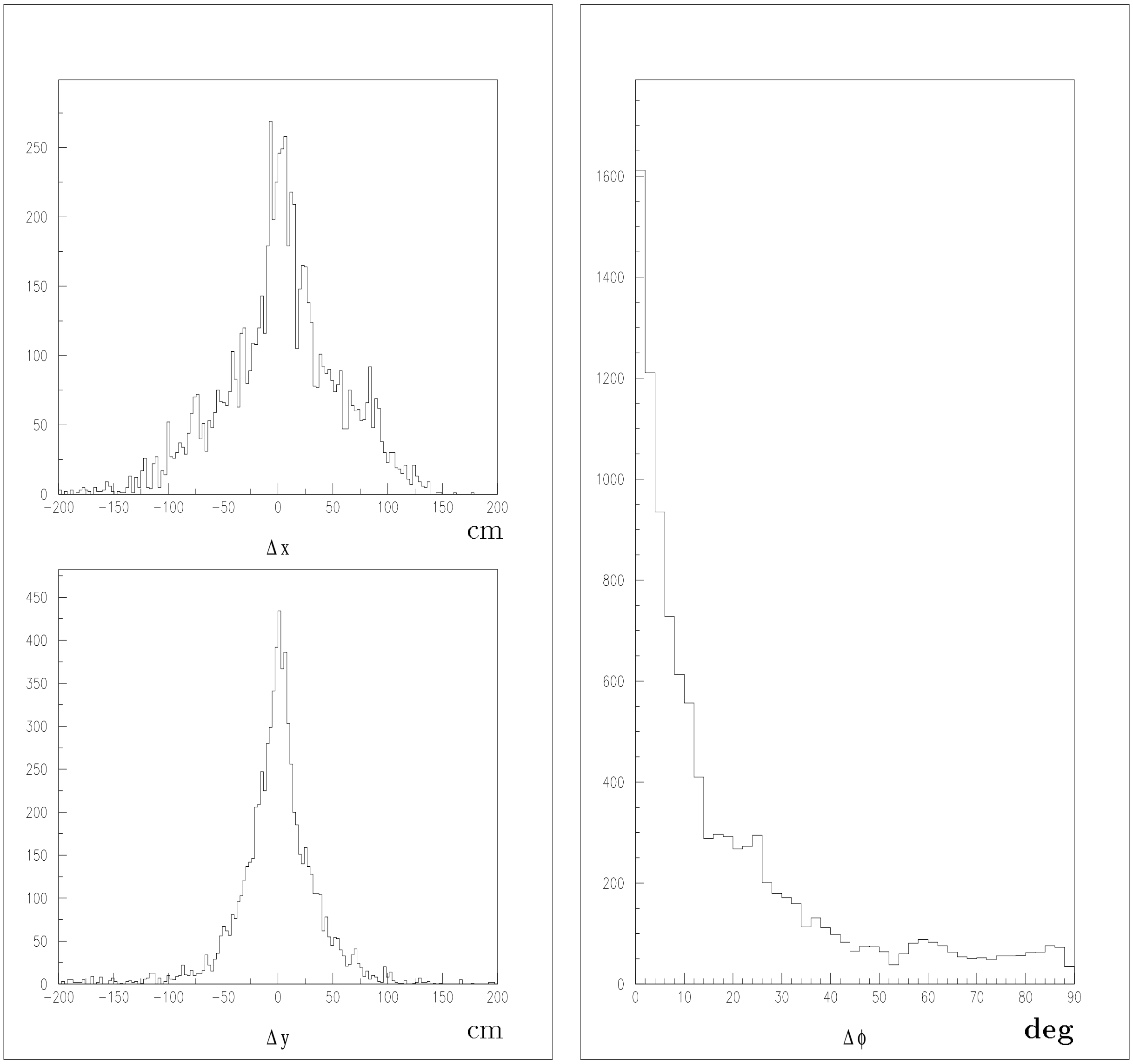
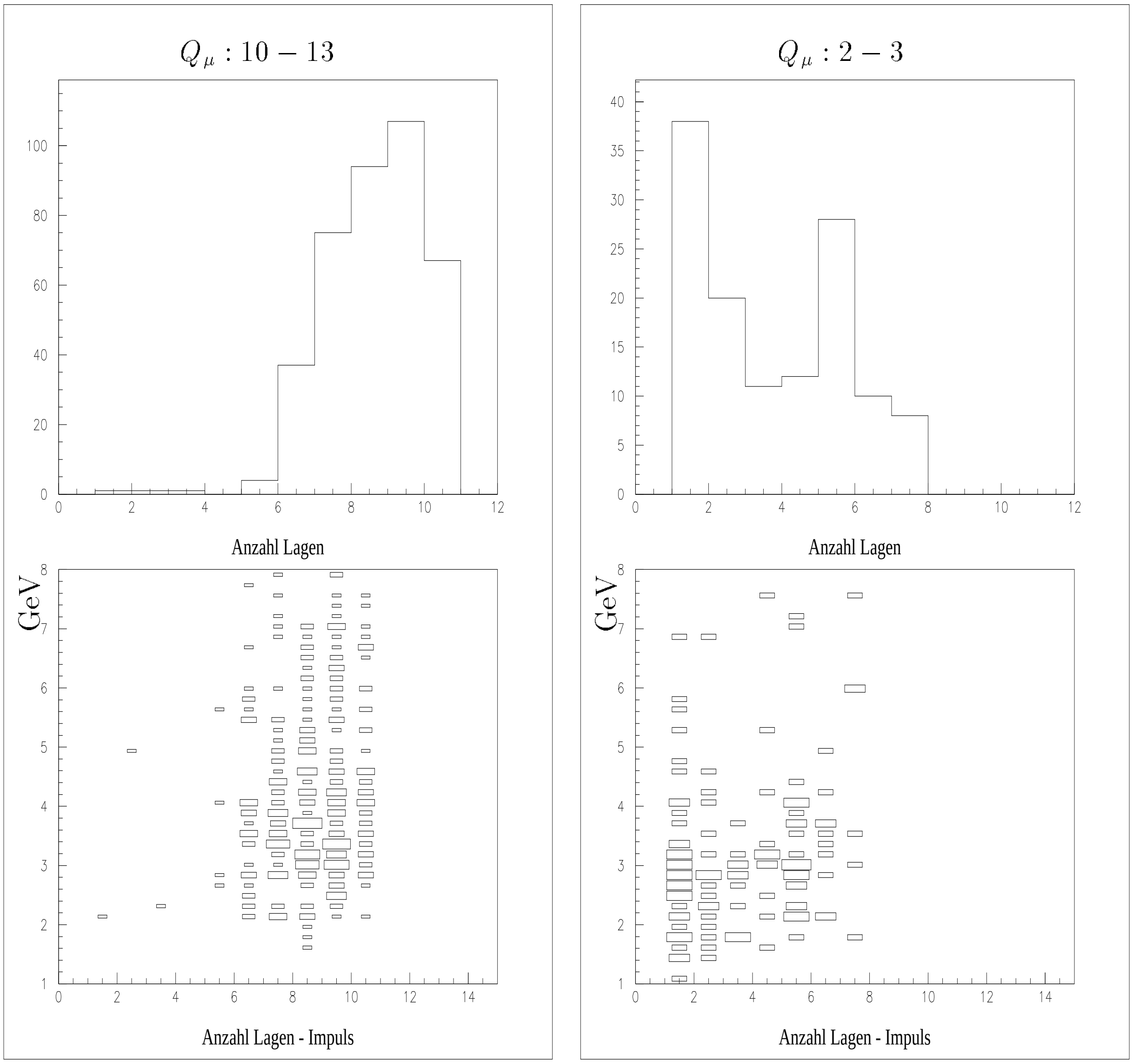


Abbildung 3.5: *Abstand in x und y (links) und ϕ (rechts) zwischen Eisentreffern und Extrapolationsdaten in der* **vorderen Endkappe** *für Myonen der Qualitäten 10 bis 13.*


$Q_\mu : 10 - 13$

$Q_\mu : 2 - 3$

Abbildung 3.6: *Anzahl getroffener Lagen sowie diese Anzahl gegen den Impuls des Teilchens in der* **vorderen Endkappe** *für Myonqualitäten 10 bis 13 (links) und 2 bis 3 (rechts).*

3.2.2 Extrapolation im Zentralbereich

Auch hier werden zunächst Myonen der Qualitäten 10 bis 13 untersucht, indem ihre Spuren aus der Spurkammer in den Zentralbereich des instrumentierten Eisens extrapoliert werden. Um sicher zu gehen, daß man sich im Zentralbereich befindet, muß die radiale Komponente des extrapolierten Spurstückes größer oder gleich 3.20 m sein. Nun wird ebenfalls der Abstand in x und y zwischen diesem Spurstück und jedem Treffer im Eisen bestimmt (in Abbildung 3.7 links), der in den zugehörigen Modulen des Barrels (16 bis 47 siehe Abbildung 1.5) liegt. Die Differenz im Azimutalwinkel Φ darf ebenfalls maximal $25°$ betragen, um den richtigen Oktanten zu treffen, desweiteren wird wegen der parallel zur z-Achse verlaufenden Drähte im Zentralbereich (siehe Abschnitt 3.1.1) $\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ bestimmt und in Abbildung 3.7 rechts gezeigt. Der Schnitt, der im Zentralbereich die Treffer zur Spur festlegt, beträgt 50 cm in Δr. Innerhalb dieses Abstands werden wiederum die Lagen der Eisentreffer aufsummiert und gegen den Impuls des Teilchens aufgetragen (siehe Abbildung 3.8). Auf der linken Seite ist der Selektionsschnitt von mindestens zwei Lagen für im Eisen erkannte Myonen erkennbar, das Maximum der Myonen hat Treffer in 3 oder 4 Lagen. Rechts sieht man in Analogie, daß gute oder sehr gute Kalorimetermyonen im überwiegenden Fall nur in einer Lage einen Treffer auslösen. Auch hier kommen Myonen vor, die bis zu 5 Lagen ansprechen lassen, aber andere Schnitte verfehlen.

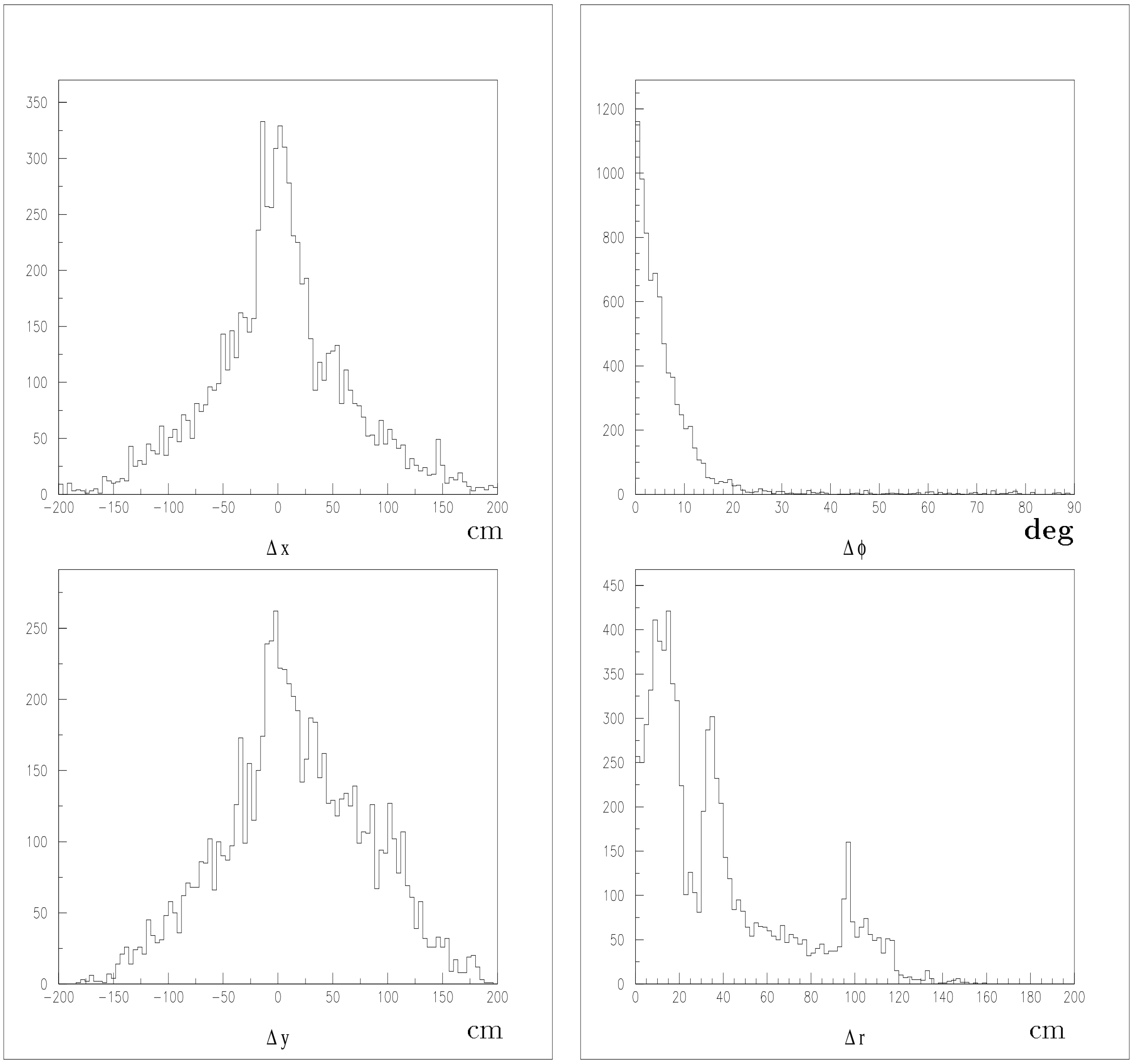


Abbildung 3.7: *Abstand in x und y (links) bzw. ϕ und r (rechts) zwischen Eisentreffern und Extrapolationsdaten im* **Zentralbereich** *für Myonen der Qualitäten 10 bis 13.*

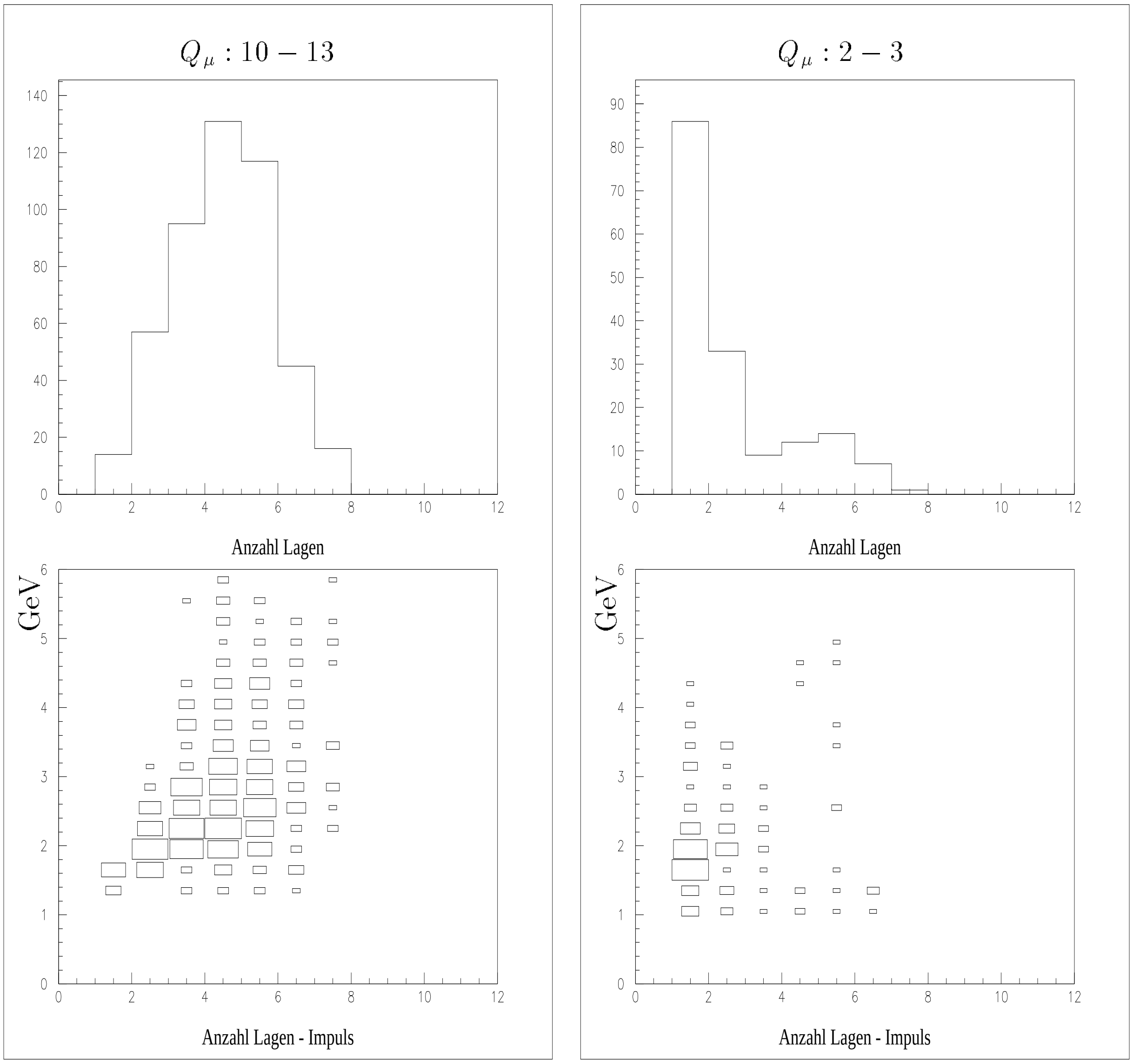


Abbildung 3.8: *Anzahl getroffener Lagen sowie diese Anzahl gegen den Impuls des Teilchens im* **Zentralbereich** *für Myonqualitäten 10 bis 13 (links) und 2 bis 3 (rechts).*

Kapitel 4

Untersuchung der Myonerkennung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Myonerkennung vorgestellt. Zunächst wird die Auswirkung der Veränderung eines Selektionschnittes im Programmpaket [West97] ermittelt, danach wird die Myonerkennung getrennt nach vorderer Endkappe und Zentralbereich dahingehend studiert, daß ein Kriterium gesucht wird, welches eine Myonqualität definiert, die zwischen den bisher existierenden Einstufungen als “im Kalorimeter erkannt” und “im Eisen erkannt” liegt.

4.1 Untersuchung der Myonerkennung durch Variation des ρ-Schnittes

Für diese Untersuchung wurde ein kleiner Datensatz von etwa 100 Ereignissen herangezogen, der im folgenden “inelastischer J/ψ-Datensatz” genannt wird und folgende Merkmale aufweist:

- Elastizität z größer als 0.3
- zwei im Kalorimeter als gut oder sehr gut identifizierte Myonen
- angesprochenem Trigger Mu-Bar bzw. Mu-2-Bar, der anzeigt, daß 2 der inneren 4 Triggerlagen im Zentralbereich des instrumentierten Eisens einen Treffer erhalten haben und somit von einem bzw. zwei Myonen im Barrel ausgeht
- trotzdem vom Programmpaket [West97] als nicht im Eisen erkannt eingestuft

Das Ergebnis war, daß einige der nur im Kalorimeter erkannten Myonen eine Spur in der DMUO-Bank besitzen, die über die DTIO-Bank (Inner-outer track link candidates) mit der zentralen Spur verbunden ist, jedoch allein aufgrund des ρ-Schnittes (siehe Tabelle 3.1) verworfen werden.
ρ bezeichnet den geringsten Abstand der aus dem Eisen zurückextrapolierten Spur zum

Ereignisvertex in der $R - \phi$-Ebene und ist auf 100 cm festgesetzt, d.h. das Programmpaket verwirft alle Spuren, deren Rückextrapolation mehr als 1 m am nominellen Vertex vorbeiführt. Für Myonen mit kleinem Impuls, die so gerade eben das Barrel erreichen, kann diese rückextrapolierte Spur z.T. weit neben dem Vertex liegen, da sich ihre Spuren in dem im Eisen vorhandenen Magnetfeld stark verwinden.
Eine Illustration dieser Verdrillung zeigt Abbildung 4.1, die ein Ereignis mit einem zunächst als nicht im Eisen erkanntes Myon darstellt. Es ist deutlich die starke Krümmung der Eisenspur zu sehen, die deshalb bei der Rückextrapolation den nominellen Vertex um in diesem speziellen Falle etwa 1.20 m verfehlt.

Die Abbildung 4.2 verdeutlicht dies noch mehr, in der ρ gegen den Impuls der Teilchen aufgetragen ist, deren Eisenspur verworfen wurde: die 1.5 GeV, die das Myon benötigt, um überhaupt die ersten Lagen des instrumentierten Eisens zu erreichen, werden nicht wesentlich überschritten.

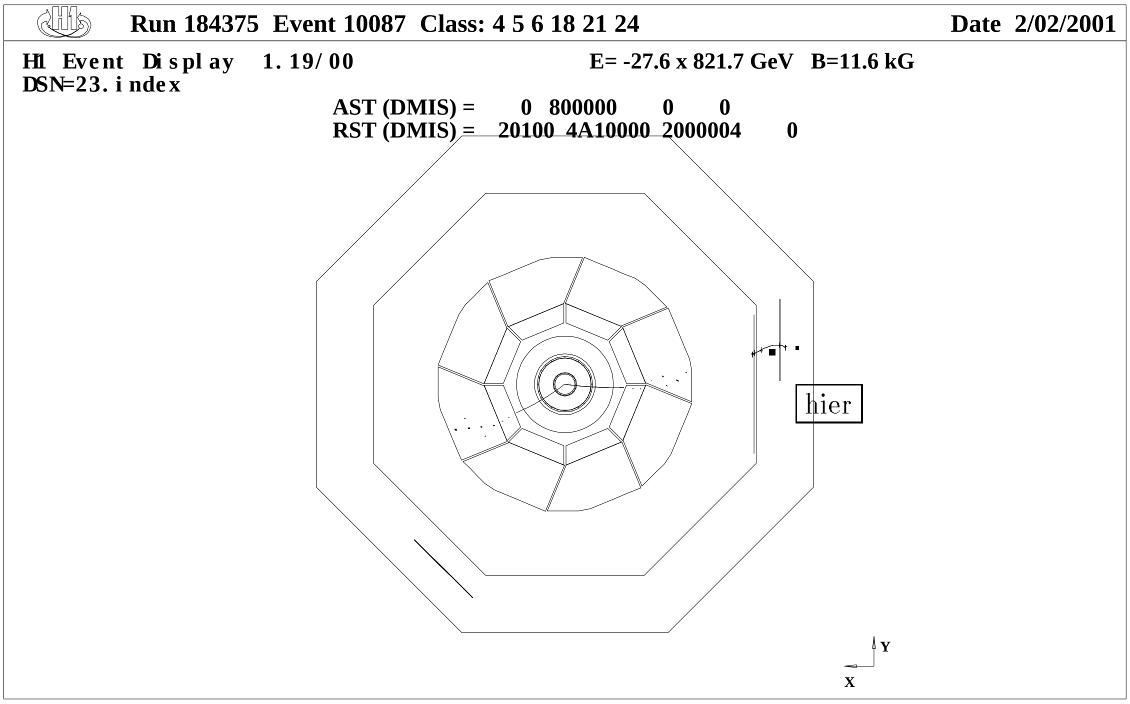


Abbildung 4.1: *Ereignis mit zentralem Myon der Qualität 23.*

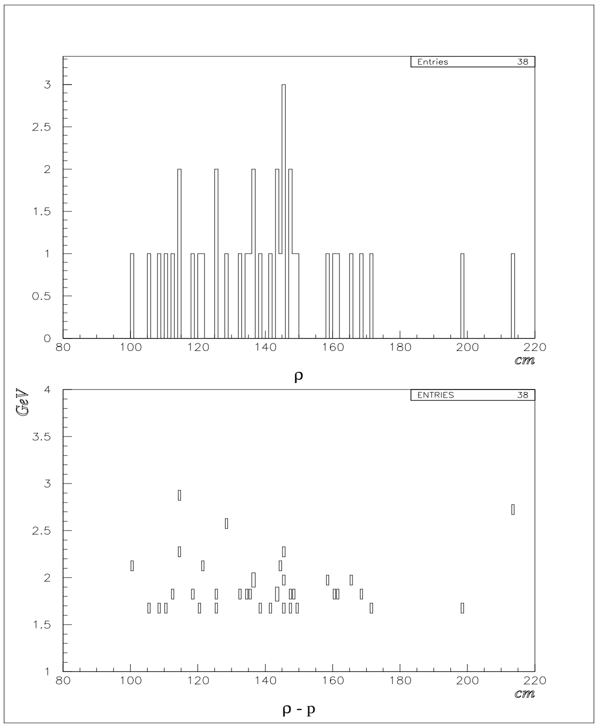


Abbildung 4.2: *Verteilung in ρ und im Impuls für Myonen der neuen Qualitäten 22 und 23.*

Um diese Eigenschaften weiter zu studieren, wurde der Programmcode [West97] dahingehend modifiziert, daß Kalorimetermyonen, die zwar eine gelinkte Spur im Eisen haben und auch sonst alle Kriterien erfüllen, jedoch wegen des ρ-Schnittes verworfen wurden, die Myonqualität $Q_\mu^{neu} = Q_\mu^{Kalo} + 20$ erhalten.
Abbildung 4.3 zeigt die Verteilung auf die Myonqualitäten vor und nach der Lockerung des Schnittes. Es ist zu erkennen, daß 37 von 130 Myonen aus der Kategorie 3 in die neue Kategorie 23 übergehen und 1 von 12 aus Kategorie 2 in 22. Dies entspricht 27 % der guten oder sehr guten Kalorimetermyonen, die aufgrund der Lockerung des ρ-Schnittes aufgewertet werden.

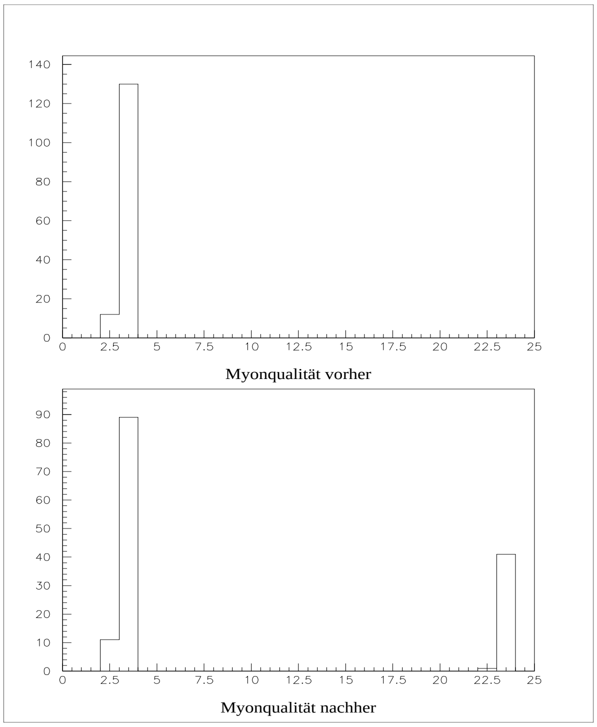
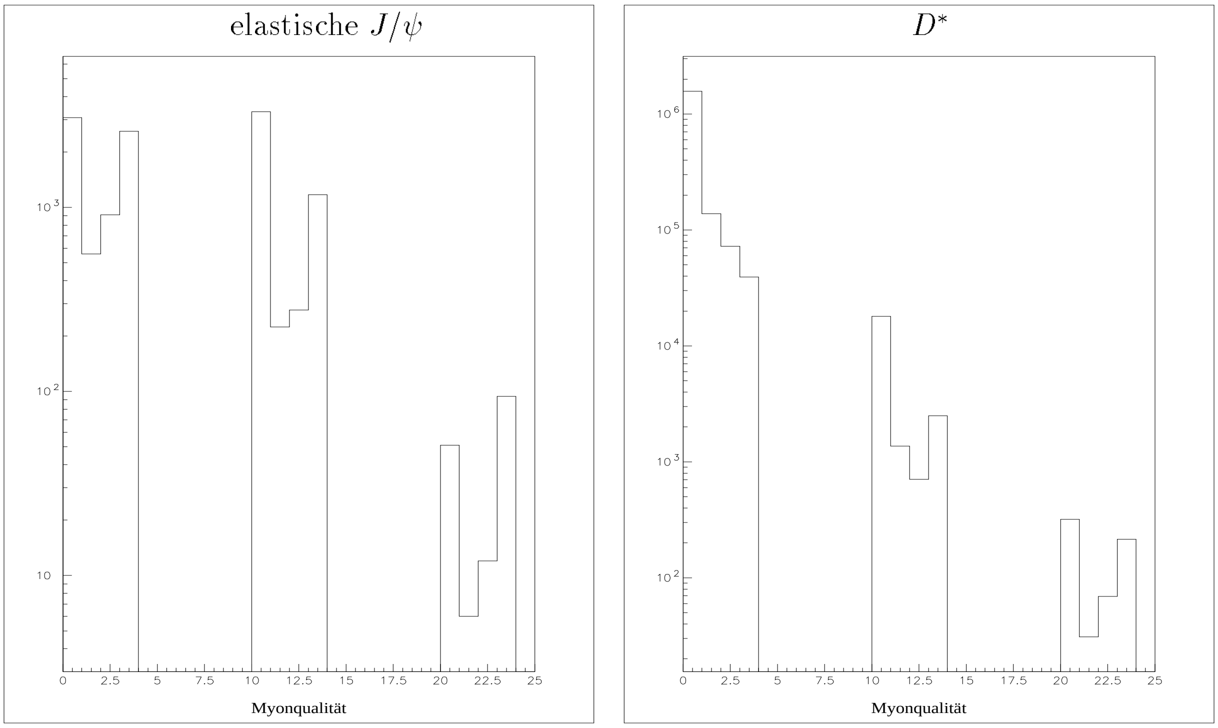


Abbildung 4.3: *Myonqualitäten vor und nach der Lockerung des ρ-Schnittes im Datensatz inelastische J/ψ.*

Diese Methode wurde dann auch auf andere Datensätze mit etwas mehr bzw. sehr viel mehr Detektoraktivität ausgeweitet und brachte folgendes Ergebnis: die neue Myonqualitätsverteilung für den im 3. Kapitel vorgestellten Datensatz (hier als "elastische J/ψ" bezeichnet) ist in Abbildung 4.4 links zu sehen, rechts die Verteilung eines weiteren Datensatzes mit ca. 120.000 auf D^* vorselektierten Ereignissen, die eine Spurmultiplizität von im Mittel 25-30 haben. Bei den in Kapitel 3 vorgestellten Daten ließen sich für 2.2 % der Myonen eine Verbesserung erzielen, bei den D^*-Daten lediglich für 0.03 %.

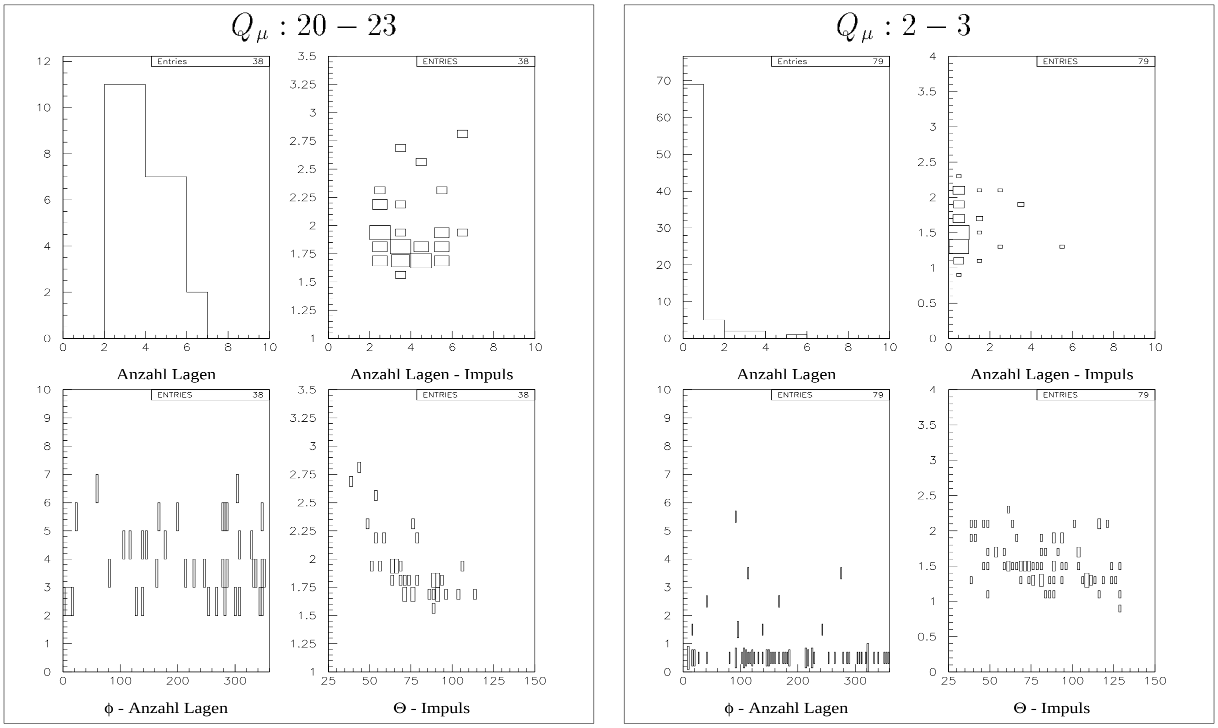
Die Abbildung 4.5 zeigt die Ergebnisse des auf die inelastischen J/ψ-Daten angewandten Extrapolationsprogramms. Links sind die Verteilungen in der Anzahl der Lagen, der Anzahl gegen ϕ und gegen den Impuls und der Impuls gegen θ für Myonen mit der neuen Qualität 20 - 23 zu sehen, rechts für Myonen der Qualität 2 und 3. An den Verteilungen ist zu erkennen, daß die Myonen der Qualitäten 20 - 23 die vom Programmpaket [West97] geforderten 2 oder mehr Lagen gut erfüllen und relativ gleichverteilt in ϕ sind. Weiterhin sieht man, daß ein geringerer Impuls mit steigendem Polarwinkel θ genügt, um eine Spur im Zentralbereich zu hinterlassen, da auch die zurückgelegte Strecke innerhalb des Detektors bei zunehmendem Polarwinkel bis 90° abnimmt und danach wieder leicht zunimmt. Bei den Myonen, die die Qualitäten 2 und 3 behalten haben, entspricht es der Erwartung, daß die überwiegende Anzahl keine Lage angesprochen hat. Für die Hälfte der Myonen ist dies erklärbar, da es sich hierbei um das jeweils andere im Kalorimeter erkannte Myon desselben Ereignisses handelt, das den Trigger eben nicht ausgelöst hat. Bei den anderen etwa 30 Myonen ist nach Betrachten der entsprechenden Eventdisplays nicht auszumachen, was den Trigger ausgelöst haben könnte.



elastische J/ψ

D^*

Abbildung 4.4: *Myonqualitäten in logarithmischer Darstellung der Datensätze "elastische J/ψ" (links) und "D^*" (rechts).*



$Q_\mu : 20-23$

$Q_\mu : 2-3$

Abbildung 4.5: *Verteilungen in Anzahl der Lagen, Impuls, θ und ϕ der inelastischen J/ψ-Daten für Myonen der Qualitäten 20-23 (links) und 2-3 (rechts).*

4.2 Untersuchung der Myonerkennung in der vorderen Endkappe

4.2.1 Darstellung des untersuchten Datensatzes in der vorderen Endkappe

Der Datensatz, der nun zur Untersuchung herangezogen wird, ist bereits im Abschnitt 4.1 kurz erwähnt worden. Es handelt sich um insgesamt 120.000 auf D^* vorselektierte Ereignisse aus der ersten Jahreshälfte 1997, kurz D^*-Datensatz genannt.
Um den Datensatz vorzustellen werden Verteilungen für Myonen der Qualitäten 10 - 13 und 2 - 3 vorgestellt. Abbildung 4.6 zeigt in Analogie zur Abbildung 1.6 den Azimuthal- gegen den Polarwinkel des ersten Treffers im Eisen; im oberen Teil stammen die Daten aus der DMUO-Bank, im unteren werden die Koordinaten des Punktes in der ersten relevanten Lage (der 3.) im Eisen der extrapolierten Spur verwandt.
An die nur im Kalorimeter erkannten Myonen sind die zusätzlichen Anforderungen gestellt, daß ihr Impuls mindestens 1.5 GeV und ihr Abstand zur nächsten Spur $R = \sqrt{(\Delta\theta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ mindestens 0.2 rad betragen muß, wobei $\Delta\theta$ die Differenz im Polarwinkel zwischen betrachteter und nächstgelegener "guter" Spur in der Spurkammer bedeutet, $\Delta\phi$ die Differenz im Azimutalwinkel. Diese Einschränkung zollt der Tatsache Tribut, daß Myonspuren aufgrund ihrer minimalionisierenden Eigenschaften einen gewissen Mindestabstand zur nächsten Spur aufweisen.

Abbildung 4.7 zeigt die beiden Gruppen von Myonen in ihren Verteilungen in θ. Zusätzlich ist noch die θ-Verteilung einer Untergruppe der nur im Kalorimeter erkannten Myonen zu sehen, die hier als "2-3 neu" bezeichnet wird und diejenigen Myonen darstellt, die ähnliche Kriterien aufweisen wie die im instrumentierten Eisen erkannten. Wie genau diese Kriterien aussehen, wird im Verlaufe dieses Abschnitts erläutert.
Die beiden vorgenannten Abbildungen machen deutlich, daß bei den im Eisen erkannten Myonen die Struktur des instrumentierten Eisens in θ und ϕ klar zu erkennen ist, insbesondere die Regionen im Eisen, die nicht durch Instrumentierung zugänglich sind. Die nur im Kalorimeter erkannten Myonen weisen eine Gleichverteilung in ϕ auf und sind in θ leicht zu größeren Winkeln als die im Eisen erkannten verschoben.

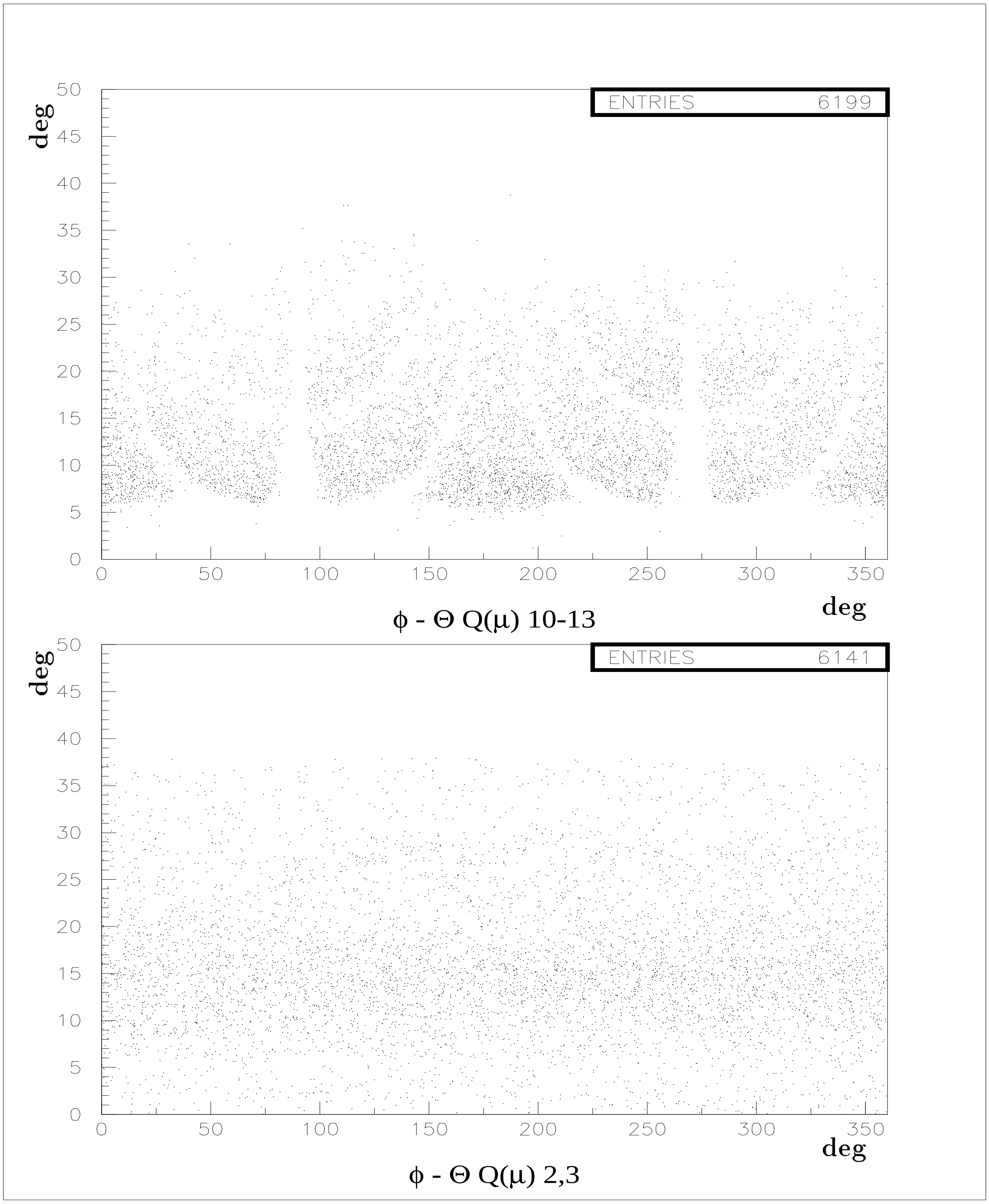


Abbildung 4.6: *Verteilungen in θ gegen ϕ des D^*-Datensatzes für Myonen der Qualität 10-13 (oben) und 2-3 (unten) in der* **vorderen Endkappe***.*

Die Wahl der zusätzlichen Anforderungen für die Myonen der Qualitäten 2 und 3 wird durch die Abbildung 4.8 erläutert, die die entsprechenden Werte für im Eisen erkannte Myonen aufweist.

Man erkennt, daß sie den kleinsten Impuls bei den kleinsten Winkeln θ haben und etwa 1.5 GeV benötigen, um in der vorderen Endkappe eine akzeptierte Spur zu hinterlassen. Ebenfalls wird deutlich, daß die Wahl des Abstands R zur nächsten guten Spur von mindestens 0.2 rad durch die Daten für Myonen der Qualitäten 10-13 unterstützt wird.

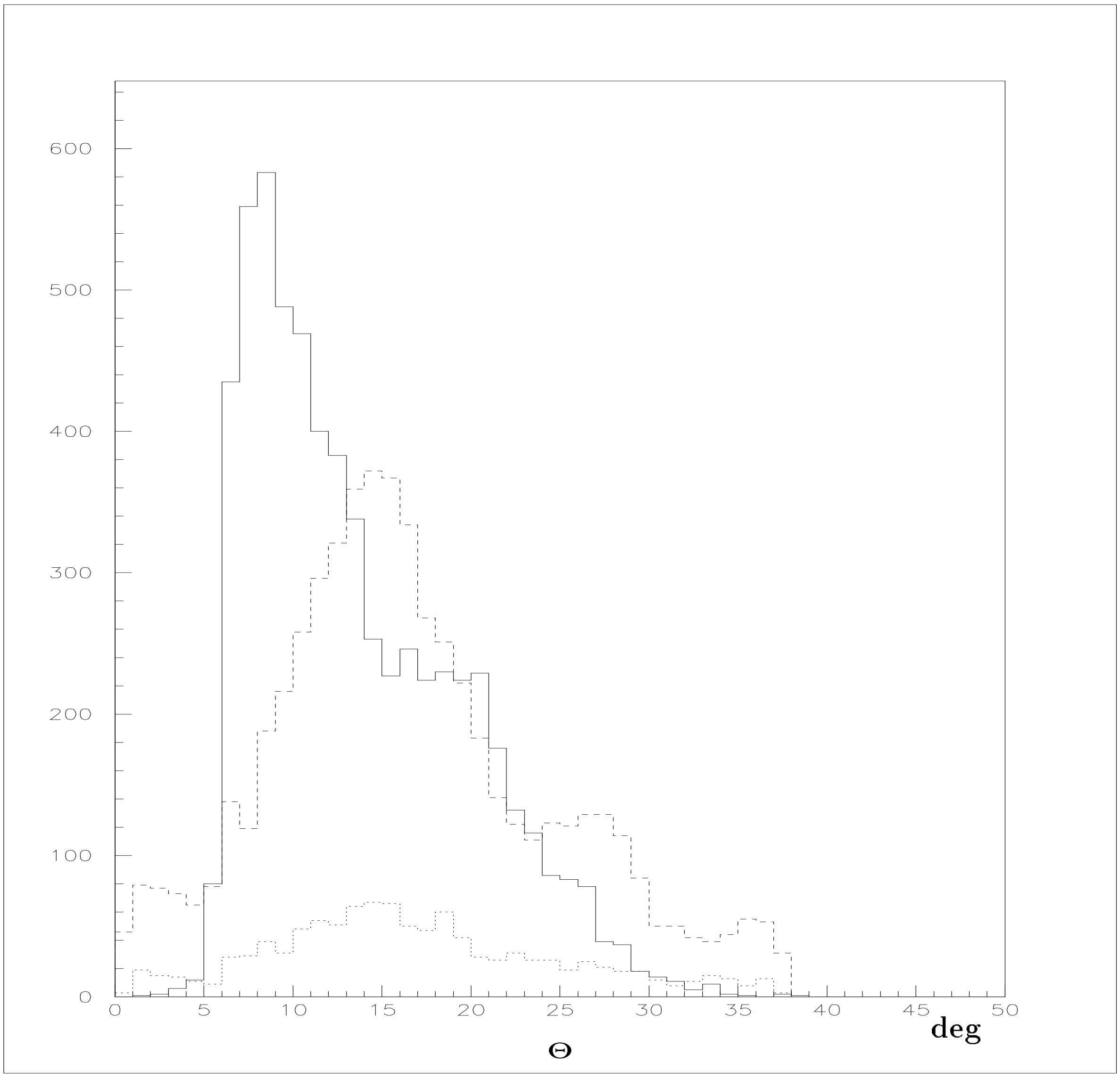


Abbildung 4.7: *θ-Verteilungen des D^*-Datensatzes für Myonen der Qualität 10-13 (durchgezogene Linie), 2-3 (gestrichelt) und 2-3 neu (gepunktet) in der* **vorderen Endkappe**.

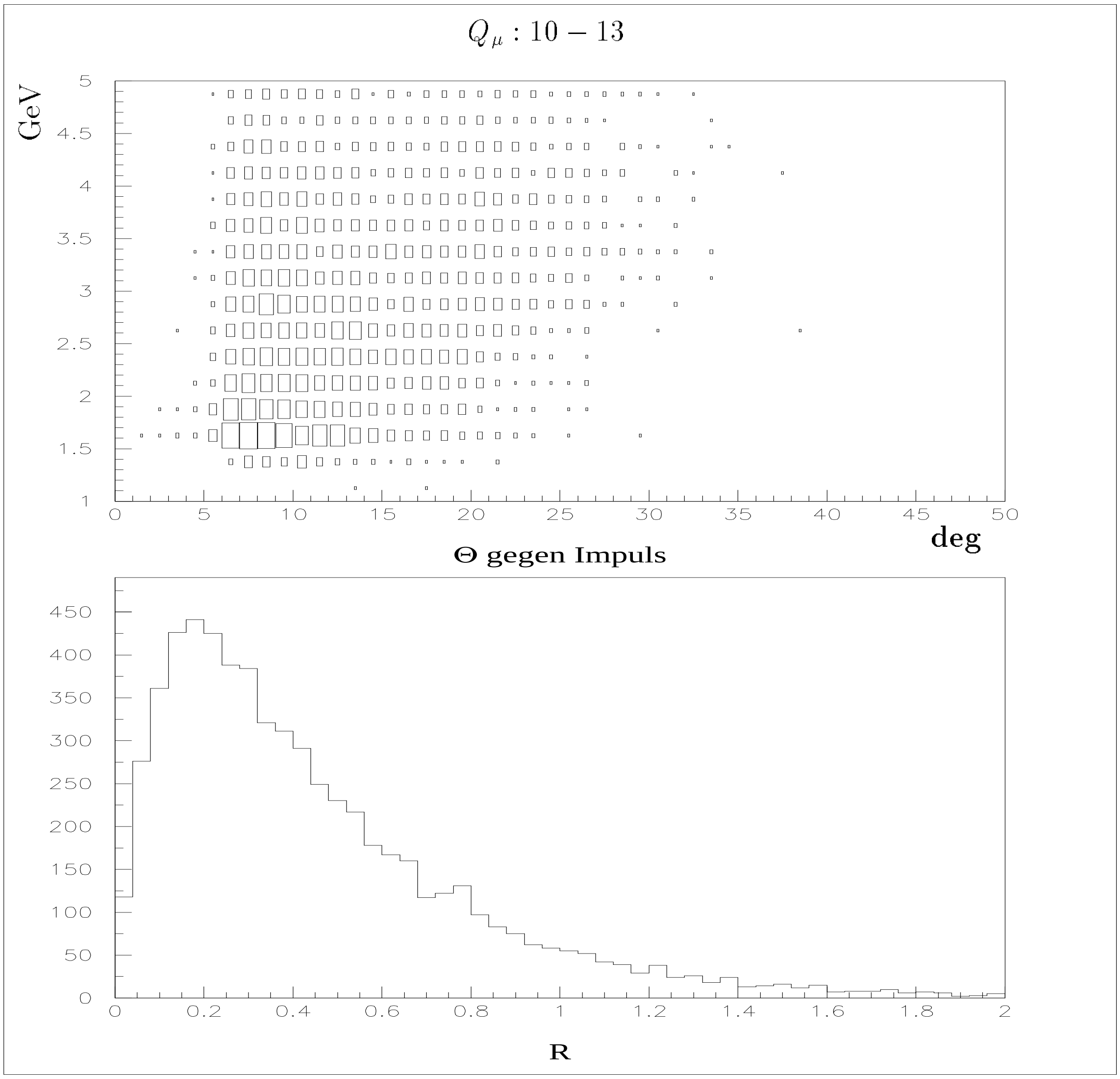


Abbildung 4.8: *Verteilungen des D^*-Datensatzes in θ gegen p und R für Myonen der Qualität* $Q_\mu \geq 10$ *in der* **vorderen Endkappe**.

4.2.2 Auswahl der zusätzlichen Kriterien für die vordere Endkappe

Um Merkmale zu finden, die es erlauben, eine zusätzliche Qualität der im Kalorimeter erkannten Myonen einzuführen, werden zunächst die Spuren der im Eisen erkannten Myonen ins instrumentierte Eisen extrapoliert und entlang dieser, wie im Kapitel 3 beschrieben, Treffer eingesammelt und die dazugehörigen Lagen gezählt. Abbildung 4.9 zeigt Verteilungen im Abstand y zwischen extrapoliertem Spurstück und Treffer im Eisen, der Anzahl der Lagen, die einen oder mehrere Treffer erhalten haben und dieser Anzahl gegen den entsprechenden Impuls.

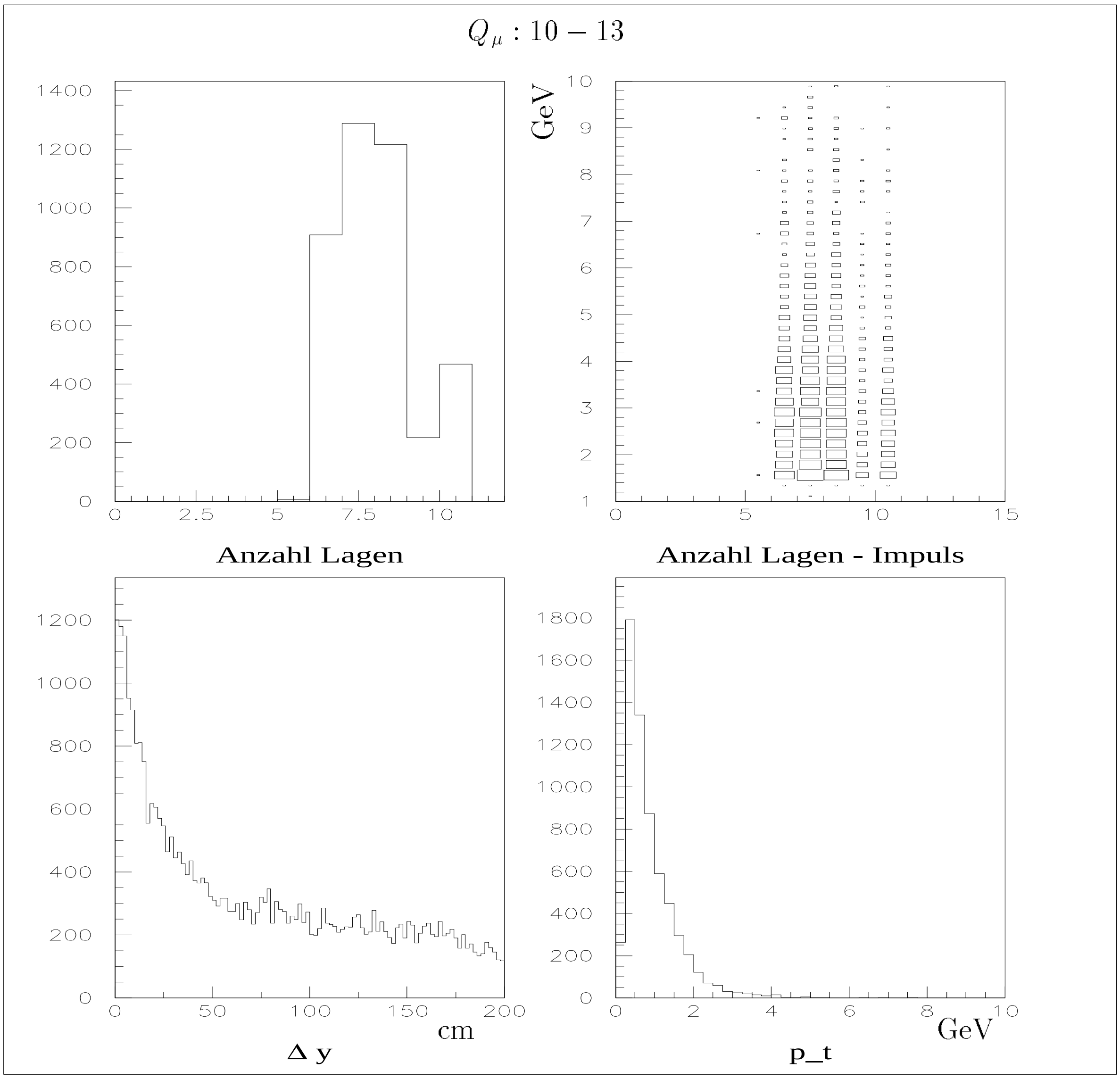


Abbildung 4.9: *Anzahl getroffener Lagen und jeweiliger Impuls sowie Abstand in* y *und* p_t *in der* **vorderen Endkappe** *für Myonen mit* $Q_\mu \geq 10$ *des* D^**-Datensatzes.*

Die Bedingung, daß für eine Eisenerkennung des Myons mindestens in 6 Lagen Treffer liegen müssen, ist gut dargestellt. Man erkennt in der Impulsverteilung zwar eine gewisse Tendenz zu weniger Lagen bei kleineren Impulsen, diese ist jedoch nicht so ausgeprägt wie erwartet.

Nun werden die nur im Kalorimeter identifizierten Myonen auf eventuelle zusätzliche Kriterien untersucht, die denen der im Eisen erkannten ähneln. Die Parameter, die zuerst variiert wurden, um zu sehen, wie sich die Anzahl der Lagen mit erkannten Treffern für diese Myonen ändert, sind der Impuls p und der Abstand zur nächsten guten Spur R. Der Impuls der nur im Kalorimeter erkannten Myonen wird dabei so variiert, daß er mindestens 1.5 GeV, 2 GeV und 2.5 GeV betragen muß, der Abstand R wurde auf größer als 0.2 rad bzw. größer als 0.33 rad festgesetzt. Zur Kontrolle werden mit den gleichen Variationen Teilchen studiert, die keine Myonqualität haben, also $Q_\mu = 0$.

Die dazugehörigen Abbildungen sind im Anhang A zu finden, da sie keine wesentlichen Differenzen untereinander zeigen. Abbildung A.1 stellt die Verteilungen in y, Anzahl der Lagen und diese Anzahl gegen den jeweiligen Impuls für Kalorimetermyonen mit einem Abstand R von mindestens 0.2 rad für von oben nach unten zunehmendem Mindestimpuls p von 1.5 bis 2.5 GeV dar. Abbildung A.2 weist die gleiche Struktur bei einem Abstand R von mehr als 0.33 rad auf. Die Darstellung für die jeweiligen Kontrollgruppen von Teilchen mit $Q_\mu = 0$, auf die aber ansonsten die gleichen Prozeduren angewandt werden, folgt in den Abbildungen A.3 und A.4.

Wegen des geringen Unterschiedes, den die Veränderung von Spurabstand oder Mindestimpuls auslösen, werden im folgenden die näher untersucht, die einen Mindestabstand R von 0.2 rad und einen Mindestimpuls von 1.5 GeV haben.

Diese 6021 Myonen werden aufgeteilt in Teilchen, die eine über die DTIO-Bank mit der zentralen Spur verbundene DMUO-Spur im instrumentierten Eisen aufweisen (718), vom Programmpaket [West97] jedoch verworfen wurden, und in Teilchen, die keine gelinkte DMUO-Spur haben (5423).

Die Verteilung mit der Anzahl der Lagen, dieser Anzahl gegen den Impuls und den Betrag des Abstands y für die Myonen mit DTIO-Spur ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Das Maximum bei Treffern in 3 Lagen ist auf die Triggerbedingung für Eisenspuren von eben genau diesen 3 Lagen für die vordere Endkappe zurückzuführen.

Abbildung 4.11 zeigt dieselbe Verteilung für die im Kalorimeter erkannten Myonen, denen eine Verbindung zu einer Spur im instrumentierten Eisen fehlt. Der Übersichtlichkeit halber werden nur die Verteilungen von den Myonen gezeigt, die mindestens einen Treffer zugeordnet bekommen (3313).

Aufgrund der Verteilungen in den vorangegangenen Abbildungen werden die Teilchen näher untersucht, die in der vorderen Endkappe mindestens in 6 Lagen einen Treffer aufweisen; dabei handelt es sich um die schon als “2,3 neu” bezeichneten insgesamt 1108 Myonen, deren Lagen-, Impuls- und Abstandsverteilung in Abbildung 4.12 zu sehen ist.

Ein Anziehen der Schnitte in Mindestimpuls und Polarwinkel auf 2 GeV bzw. mindestens 20°, wie sie in den meisten Analysen als zusätzliche Myonselektionsschnitte verlangt werden, brachte die folgenden Ergebnisse:

- zusätzlicher Impulsschnitt: von insgesamt 3868 im Kalorimeter erkannten Myonen haben 485 eine Spur im instrumentierten Eisen, 795 fallen in die Kategorie “neu”.
- zusätzlicher Polarwinkelschnitt: von insgesamt 1659 im Kalorimeter erkannten Myonen haben 163 eine Spur im instrumentierten Eisen, 321 fallen in die Kategorie “neu”.

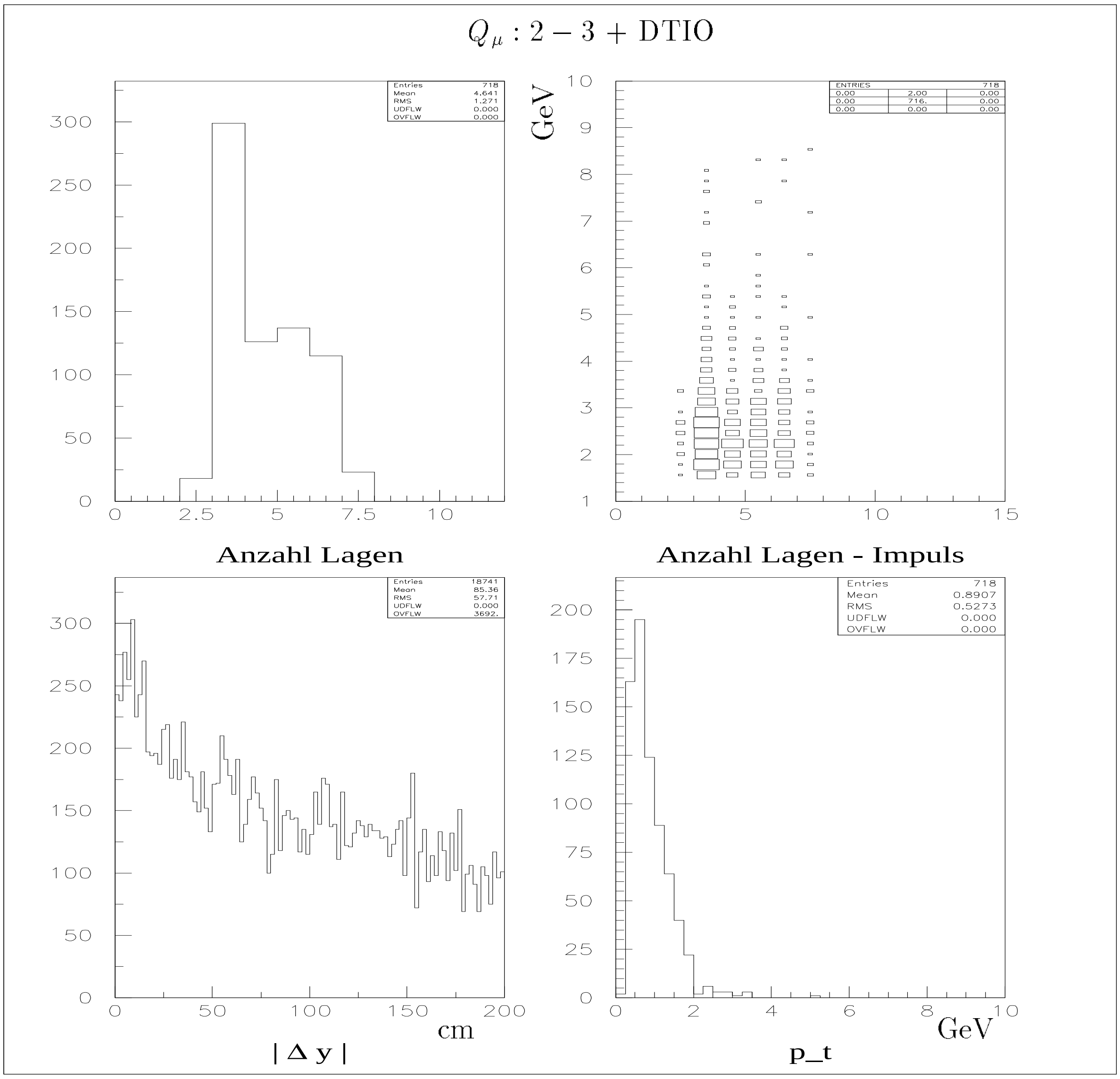


Abbildung 4.10: *Anzahl getroffener Lagen und jeweiliger Impuls sowie Abstand in y und* p_t *in der* **vorderen Endkappe** *für Myonen mit* Q_μ 2, 3 *und verbundener DTIO-Spur des* D^**-Datensatzes.*

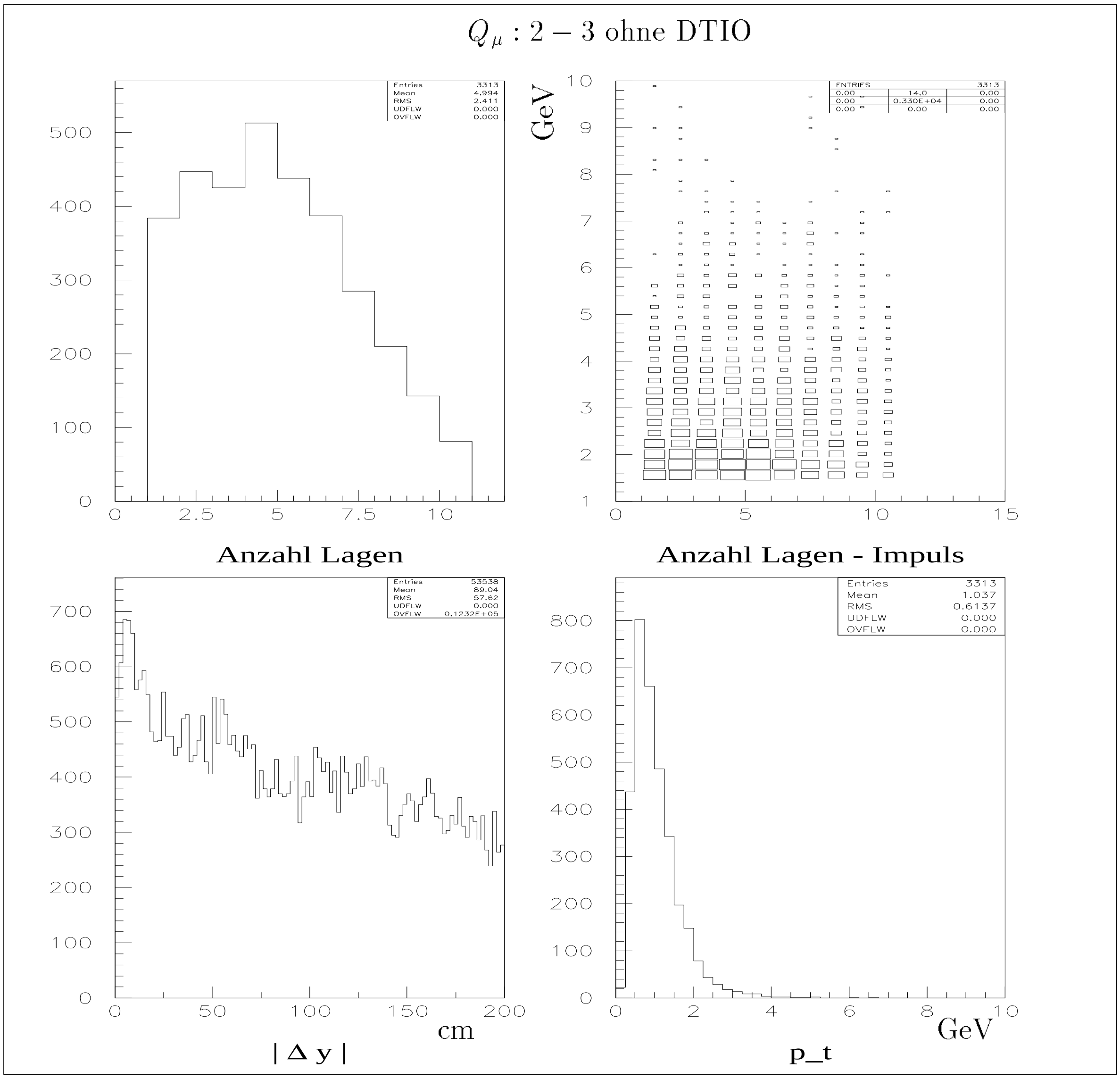


Abbildung 4.11: *Anzahl getroffener Lagen und jeweiliger Impuls sowie Abstand in* y *und* p_t *in der* **vorderen Endkappe** *für Myonen mit* Q_μ 2,3 *ohne DTIO-Spur des* D^**-Datensatzes.*

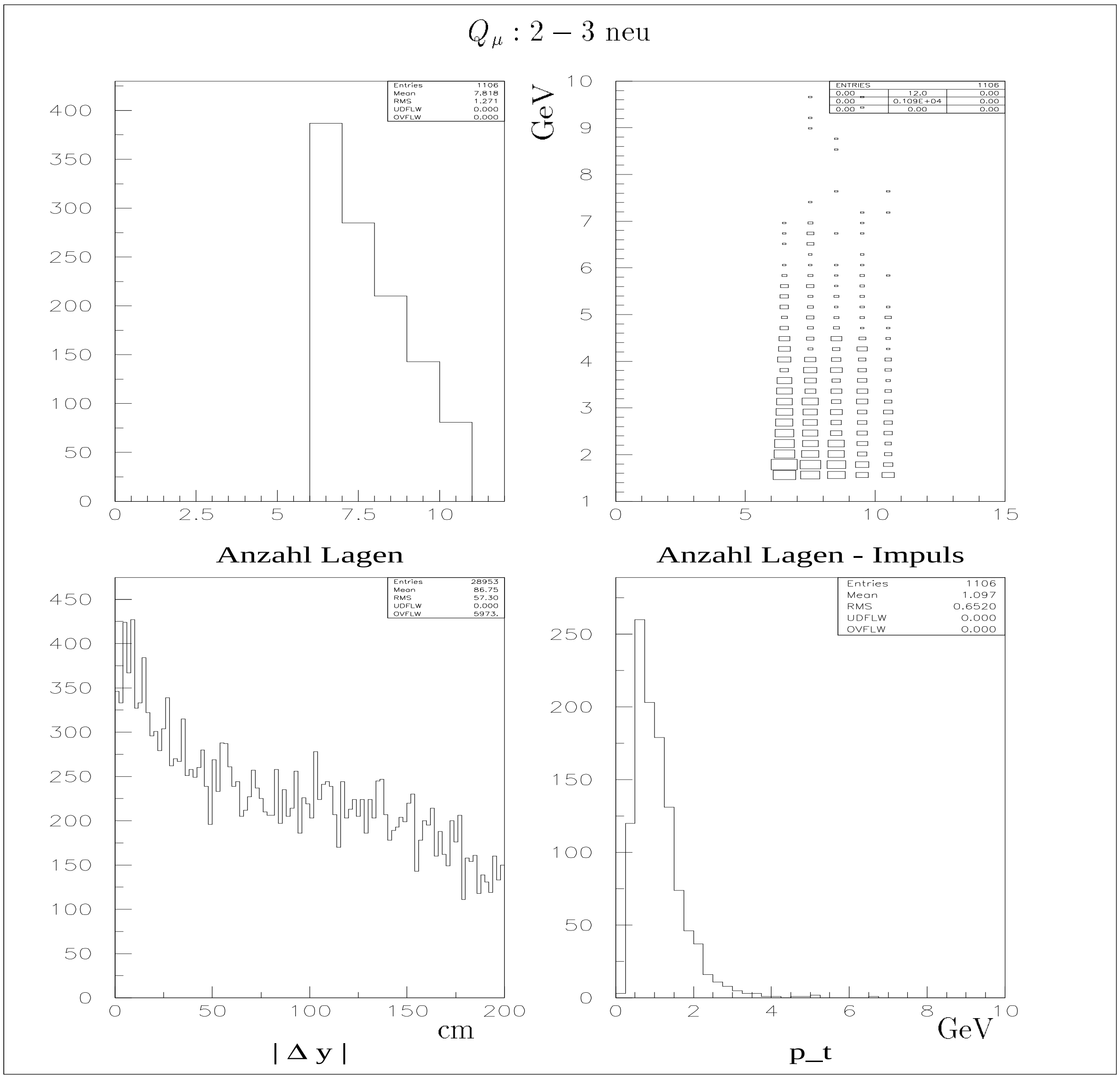


Abbildung 4.12: *Anzahl getroffener Lagen und jeweiliger Impuls sowie Abstand in y und* p_t *in der* **vorderen Endkappe** *für Myonen der Kategorie "neu" des* D^**-Datensatzes.*

4.2.3 Test der neuen Kriterien für die vordere Endkappe

Die als “neu” ermittelten Kriterien werden nun im “elastischen J/ψ-Datensatz” darauf getestet, ob es sich hierbei wirklich um Myonen handelt, oder ob auch Nicht-Myonen die zusätzlichen Schnitte erfüllen und ihre Signatur imitieren.
Dafür werden zu jedem Teilchen, das im LAr-Kalorimeter als gut bzw. sehr gut eingestuft wurde, das einen Mindestimpuls von 1.5 GeV und einen Mindestabstand zur nächsten guten Spur von 0.2 rad besitzt und das entlang seiner in die vordere Endkappe extrapolierten Spur in mindestens 6 Lagen einen Treffer aufweist, im selben Ereignis ein Myon gesucht, das mindestens die Qualität $Q_\mu = 2$ innehat und von diesen beiden die invariante Masse gebildet. Als Zeichen dafür, daß es sich bei den als neu eingestuften Teilchen tatsächlich um Myonen handelt, sollte die charakteristische J/ψ-Massenverteilung auftreten. Die Zahl der Ereignisse, in denen beide Teilchen auftreten, ist jedoch erwartungsgemäß eher klein. Zur Kontrolle wird dasselbe Verfahren mit Teilchen angewandt, die die gleichen Kriterien erfüllen, jedoch die Kalorimeterqualität 0 besitzen. Die Aufteilung auf die jeweiligen Myonqualitäten nach allen angewandten Schnitten ist in Abbildung 4.13 zu sehen, das Ergebnis der Bildung der invarianten Masse in der Abbildung 4.14: ein mögliches J/ψ-Signal bei den als neu klassifizierten Myonen, kein Signal bei den Nichtmyonen.

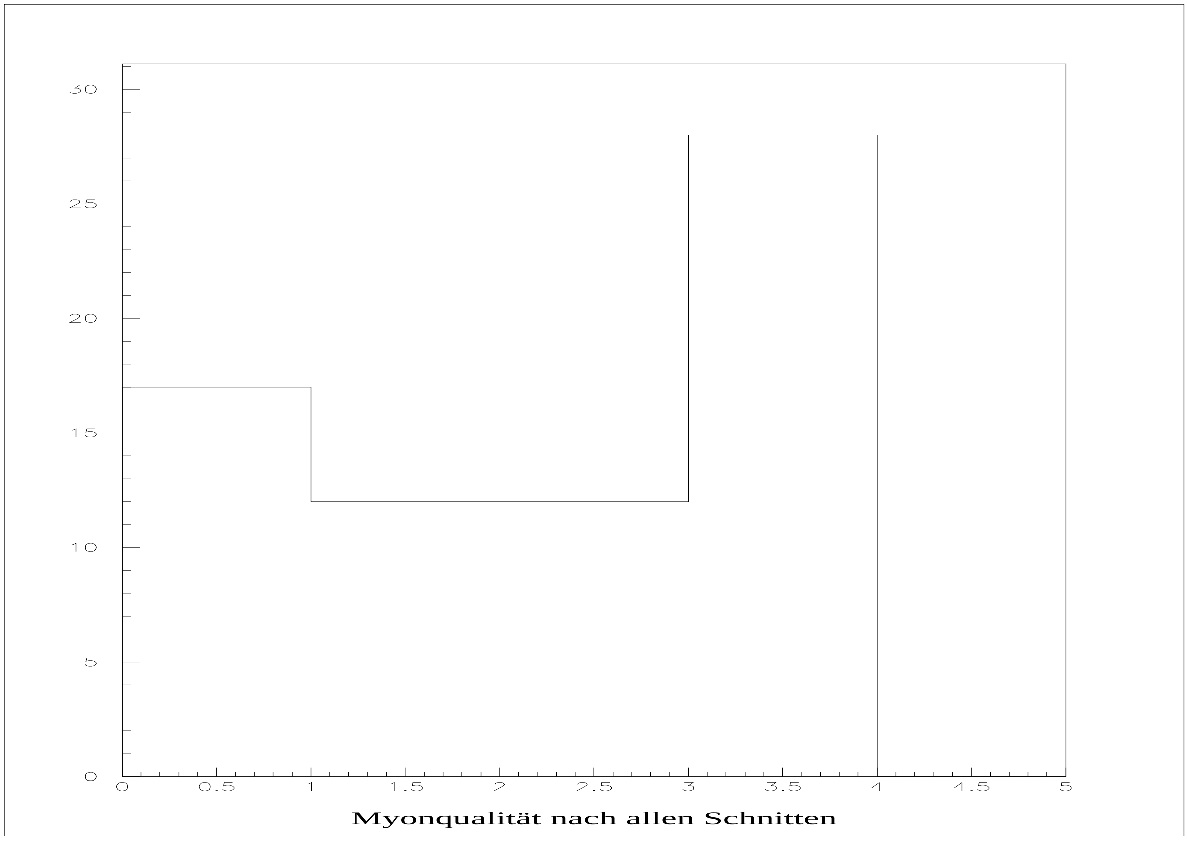


Abbildung 4.13: *Verteilung der Myonqualität im elastischen J/ψ-Datensatz nach allen neuen Schnitten in der* **vorderen Endkappe**.

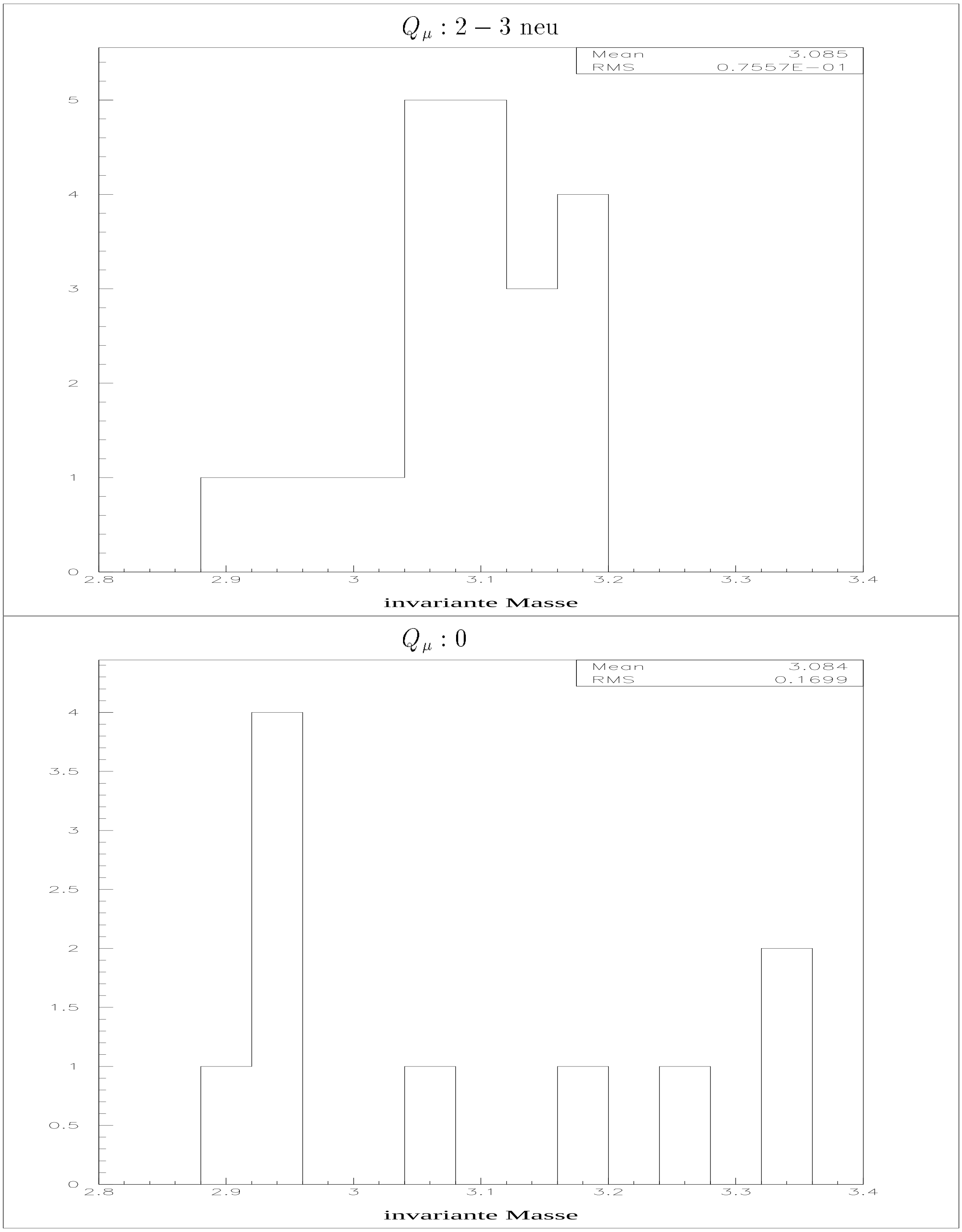


Abbildung 4.14: *Invariante Masse der neu selektierten Myonen (oben) und Kontrollteilchen (unten) mit Myonen der Qualität $Q_\mu \geq 2$ des J/ψ-Datensatzes in der* **vorderen Endkappe**.

4.3 Untersuchung der Myonerkennung im Barrel

4.3.1 Darstellung des untersuchten Datensatzes im Barrel

Analog zur Vorgehensweise in der vorderen Endkappe wird auch hier zunächst das Profil des D^*-Datensatzes für den Zentralbereich des instrumentierten Eisens in den Abbildungen 4.15 und 4.16 für im Eisen erkannte und für nur im Kalorimeter erkannte Myonen dargestellt. In der θ-Verteilung ist eine Untermenge der nur im Kalorimeter erkannten Myonen dargestellt, die hier als "2,3 neu" bezeichnet werden und die im Laufe dieses Abschnitts noch definiert werden.

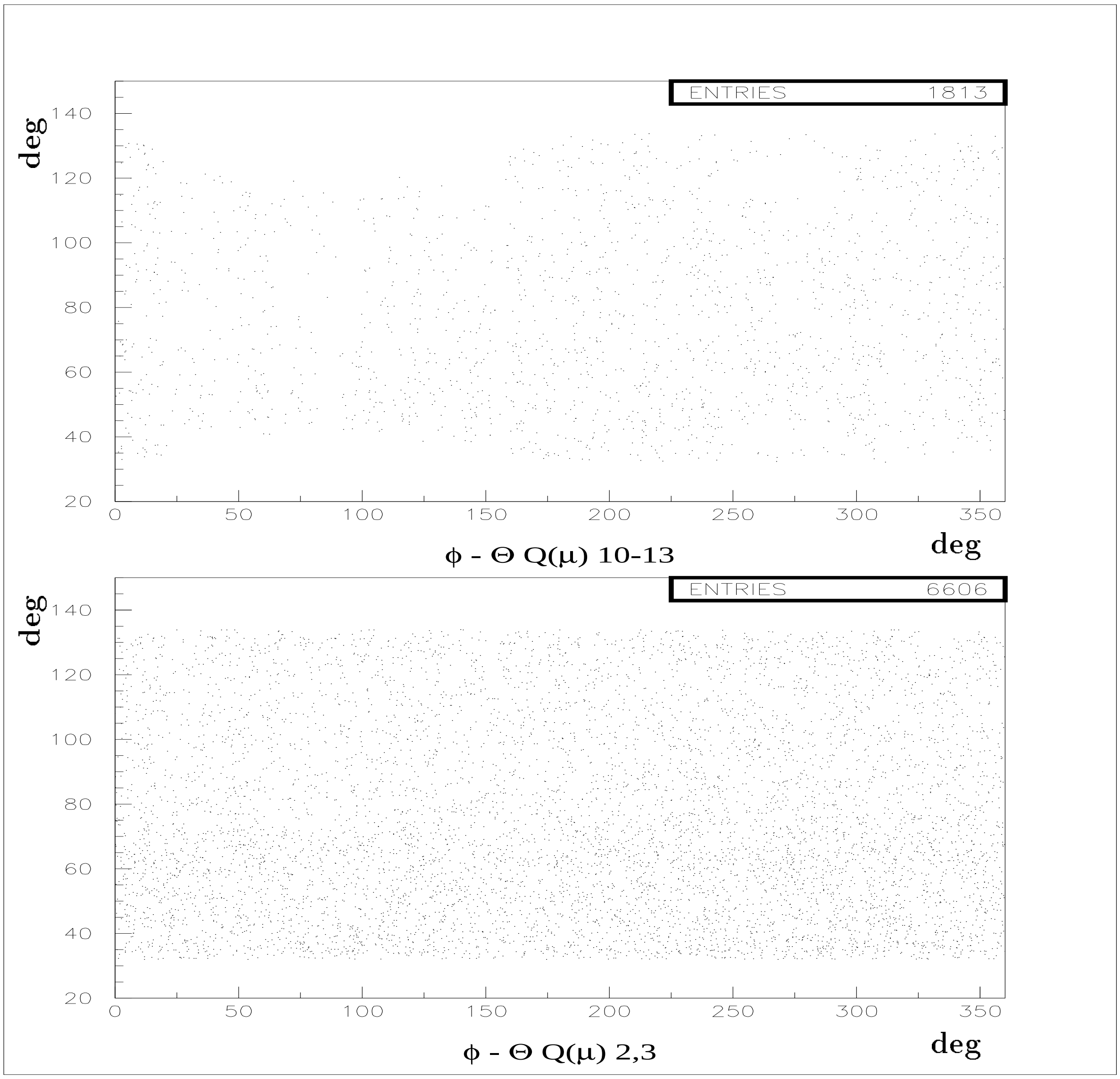


Abbildung 4.15: *Verteilungen in θ gegen ϕ des D^*-Datensatzes für Myonen der Qualität 10-13 (oben), 2-3 (in der Mitte) und 2-3 neu (unten) im* **Zentralbereich**.

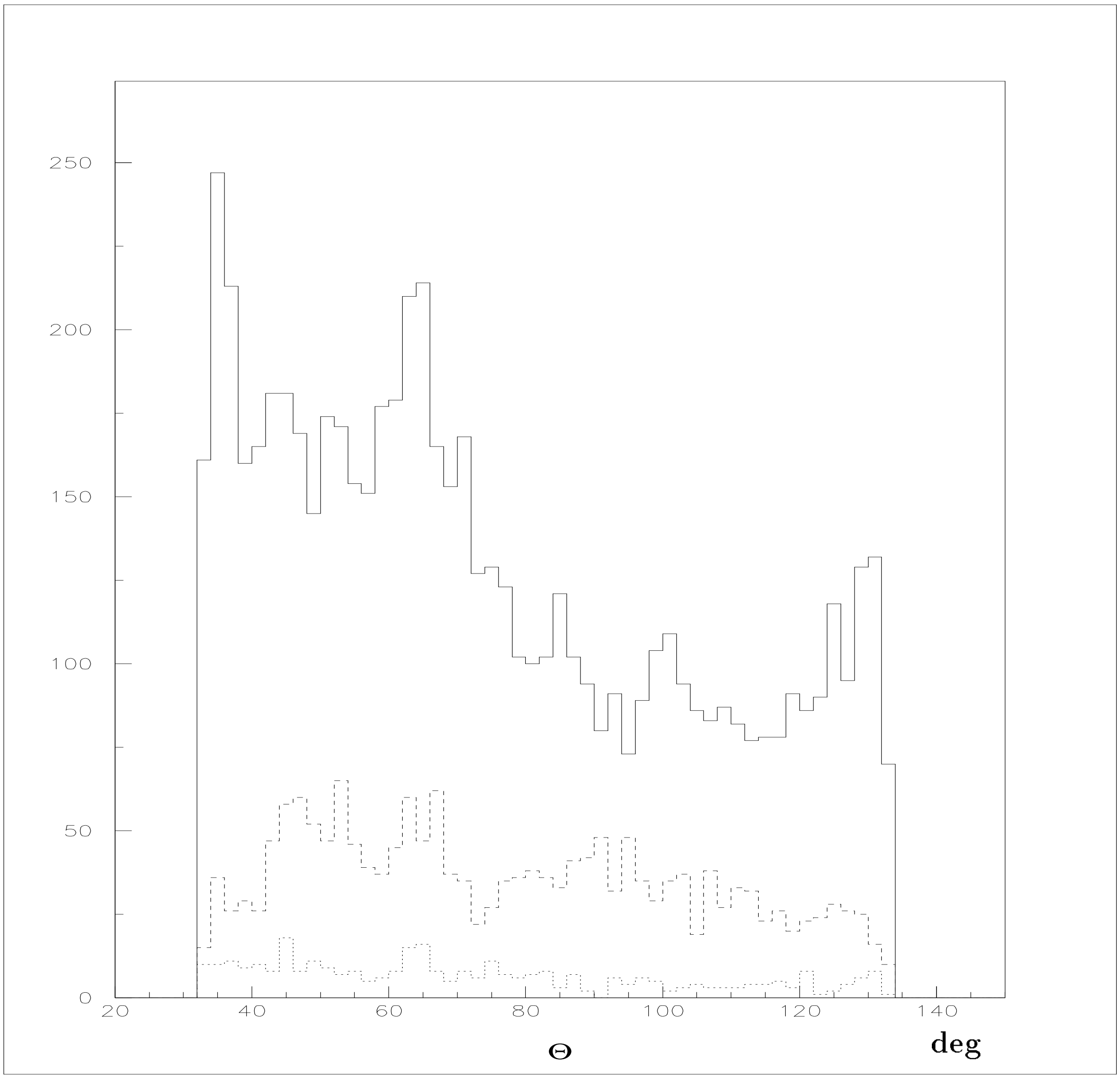


Abbildung 4.16: *θ-Verteilungen des D^*-Datensatzes für Myonen der Qualität 2-3 (durchgezogene Linie), 10-13 (gestrichelt) und 2-3 neu (gepunktet) im* **Zentralbereich***.*

Leider ist die Anzahl der im Eisen erkannten Myonen zu gering, um die Struktur des Eisens und seine nichtinstrumentierten Gebiete deutlich zu erkennen, aber die Lücke bei etwa 90° in ϕ, die durch Versorgungsleitungen ins Innere des Detektors verursacht wird, ist auszumachen. Die Gleichverteilung in ϕ der Myonen der Qualitäten 2 und 3 ist wiederum auffällig, ansonsten ist in der θ-Verteilung für alle 3 Gruppen von Myonen zu betrachten, daß die Anzahl der Einträge mit zunehmendem Polarwinkel abnimmt und sich alle 3 Verteilungen nicht wesentlich voneinander unterscheiden.
Auch im Zentralbereich sind an die nur im Kalorimeter erkannten Myonen die Zusatzbedingungen gestellt, daß der Abstand zur nächsten guten Spur R mindestens 0.2 rad und der Impuls mindestens 1.5 GeV betragen muß, da sie mit den im Eisen erkannten Myonen verglichen werden.

Die Wahl der Werte für die o.g. Parameter werden durch die Abbildung 4.17 bestätigt, die die entsprechenden Verteilungen für Myonen der Qualität 10-13 aufzeigt.

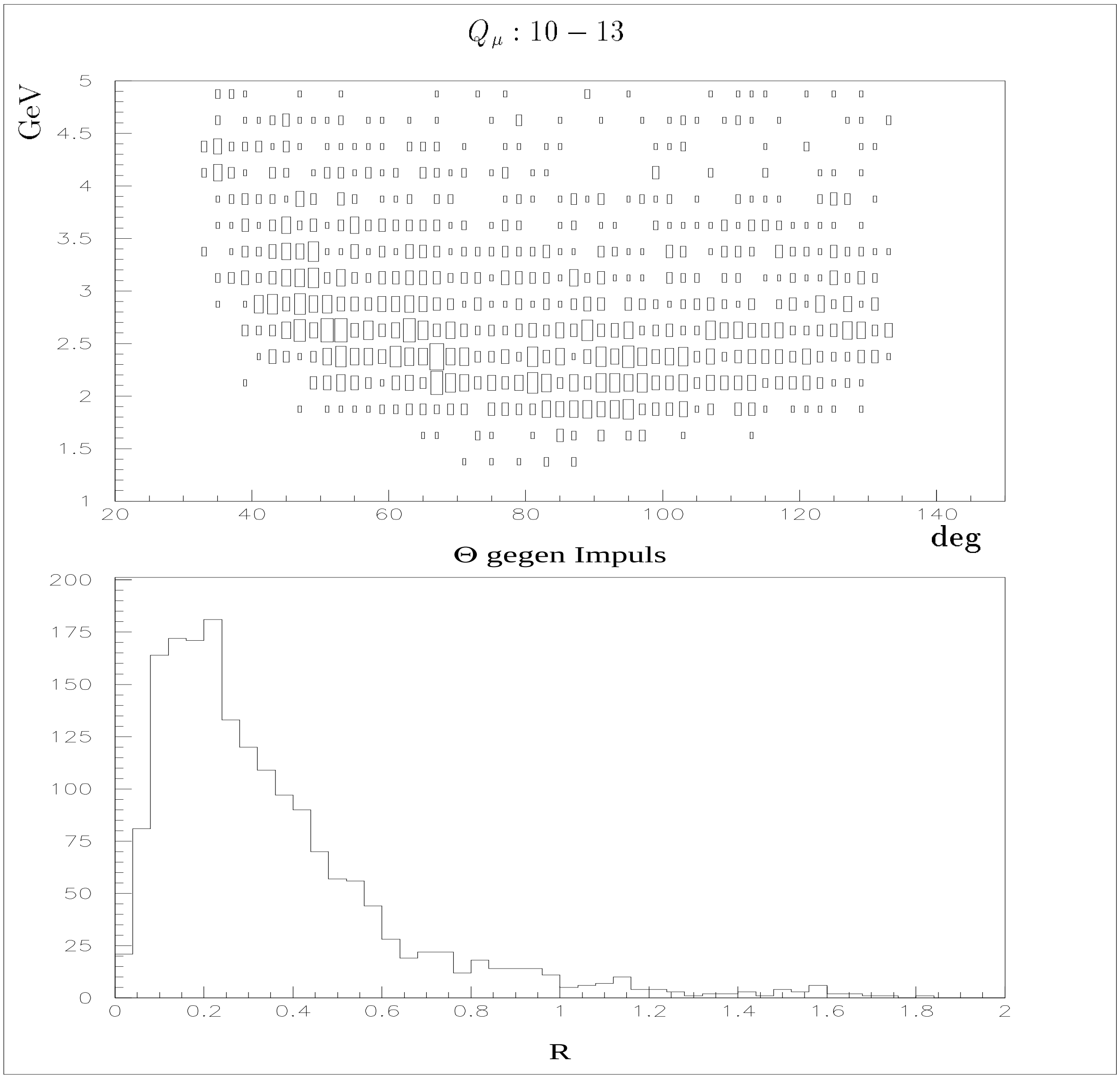


Abbildung 4.17: *Verteilungen in θ gegen p und R des D^*-Datensatzes für Myonen der Qualität* $Q_\mu \geq 10$ *im* **Zentralbereich**.

Es ist zu erkennen, daß die im Eisen erkannten Myonen etwa 1.5 GeV benötigen, um die Mitte des Zentralbereichs bei einem Polarwinkel von 80° − 90° zu erreichen und etwa 1.8 GeV für die Seiten des Barrels bis zu den Übergängen zu den beiden Endkappen.

4.3.2 Auswahl der zusätzlichen Kriterien für das Barrel

Als nächstes werden die Verteilungen in der Anzahl der Lagen, dem jeweiligen Impuls und dem Abstand in r der im Eisen erkannten Myonen betrachtet, um beurteilen zu können, welche Eigenschaften diese Teilchen aus dem Abgleich der Daten aus der DMUO-Bank mit den über die Extrapolation ermittelten erhalten.

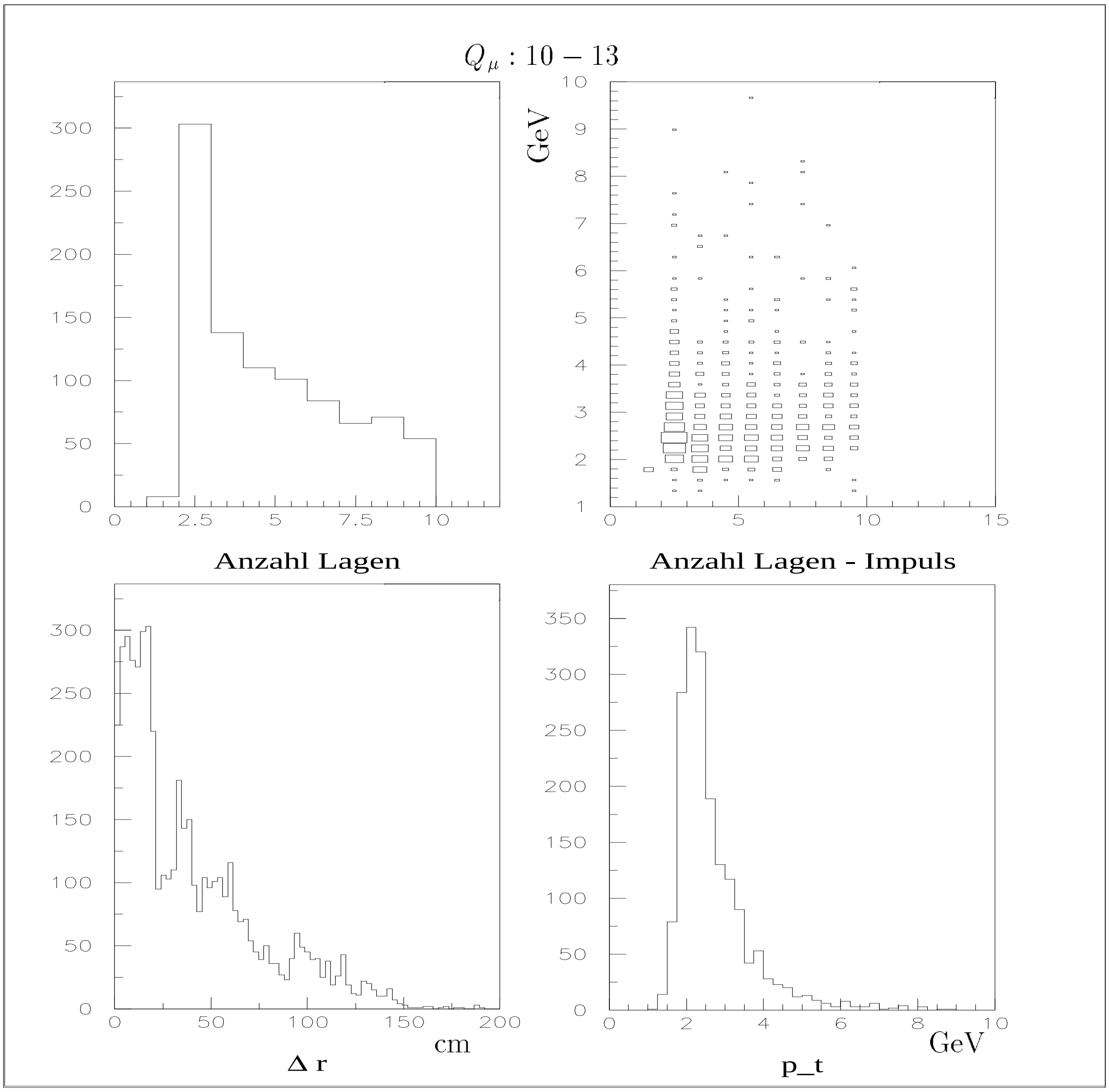


Abbildung 4.18: *Anzahl getroffener Lagen und jeweiliger Impuls sowie Abstand in r und p_t im* **Zentralbereich** *für Myonen mit $Q_\mu \geq 10$ des D^*-Datensatzes.*

Der vom Programmpaket [West97] geforderte Selektionsschnitt von Treffern in mindestens 2 Lagen ist gut wiedergegeben. Die Tendenz zu kleineren Impulsen bei weniger angesprochenen Lagen ist etwas besser zu beobachten als bei der gleichen Verteilung in

der vorderen Endkappe.
Es folgen die Verteilungen in denselben Parametern für die Myonen mit Kalorimeterqualitäten $Q_\mu = 2 - 3$ in Abbildung 4.19. Auf eine Extrabetrachtung der Teilchen mit einer über die Bank DTIO verbundenen Spur im instrumentierten Eisen, wie sie in der vorderen Endkappe vorgenommen wurde, wurde verzichtet, da von den 6606 nur im Kalorimeter erkannten Myonen lediglich 50 eine Spurverbindung ins Eisen aufweisen. Diese geringe Zahl verwundert nicht weiter, da bereits Treffer in 2 der inneren 10 Lagen im Zentralbereich für eine Einstufung als Eisenspur ausreichend sind und sie somit in dem Qualitätsintervall 10 - 13 zu finden sein sollten.
Auch im Barrel wurden der Abstand zur nächsten Spur R und Impuls für Myonen der Qualitäten Q_μ 2-3 auf der einen und 0 auf der anderen Seite variiert. Die Abbildungen sind ebenfalls im Anhang A zu finden, da auch sie keine wesentlichen Differenzen untereinander offenbaren.
Die als "neu" bezeichneten 326 Myonen sind diejenigen, die Treffer in 2 oder mehr Lagen erhalten haben, deren Verteilungen in den bekannten Größen in Abbildung 4.20 zu sehen sind.
Von 6606 Myonen mit guter oder sehr guter Myonqualität, besitzen also 52 eine gelinkte DMUO-Spur, von den verbleibenden 6554 fallen 326 in die neue Kategorie. Setzt man den Mindestimpuls auf 2 GeV herauf, so erhalten 174 von 2746 die neue Qualität.

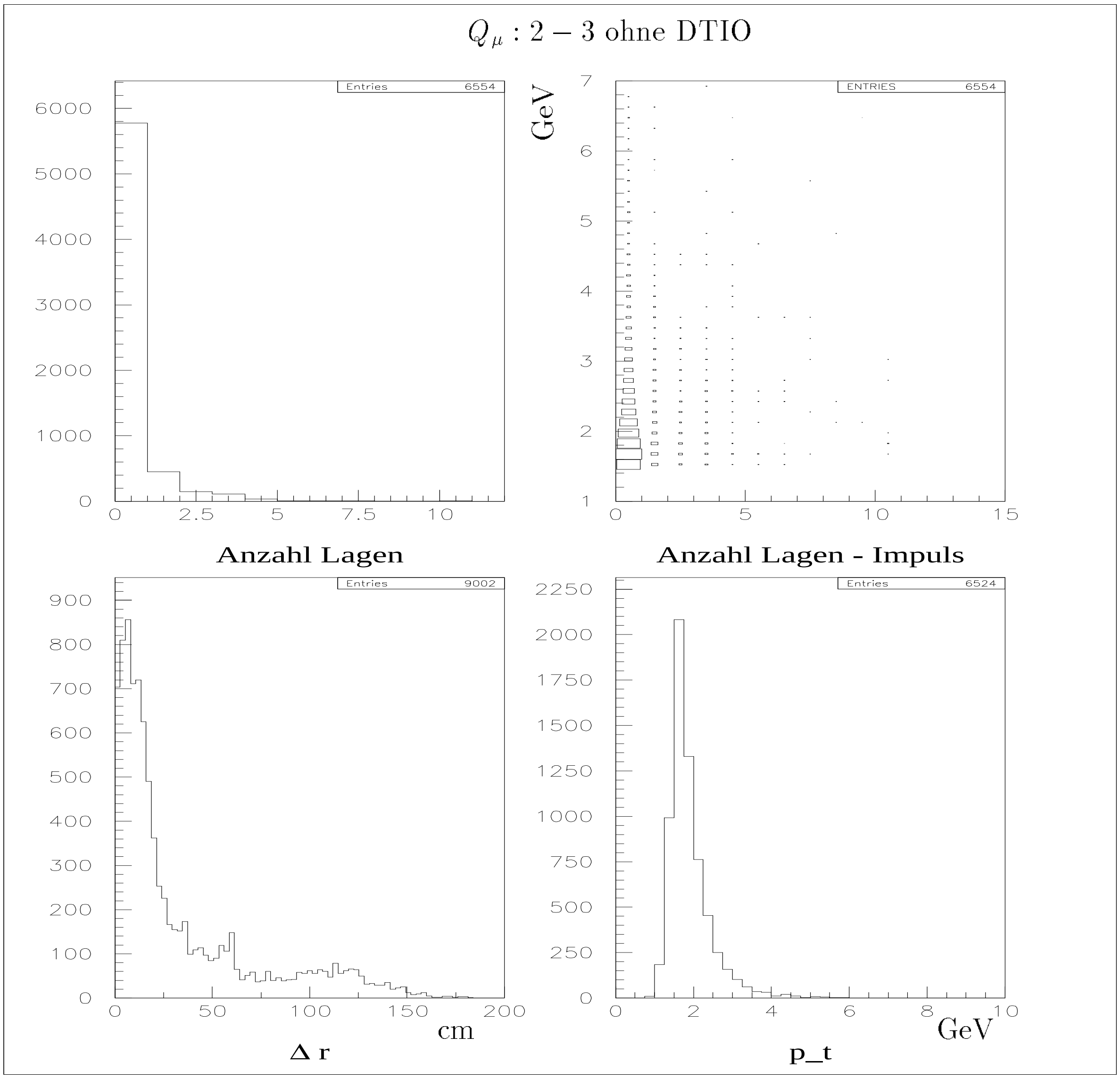


Abbildung 4.19: *Anzahl getroffener Lagen und jeweiliger Impuls sowie Abstand in r und* p_t *im* **Barrel** *für Myonen mit* Q_μ 2, 3 *ohne DTIO-Spur des* D^**-Datensatzes.*

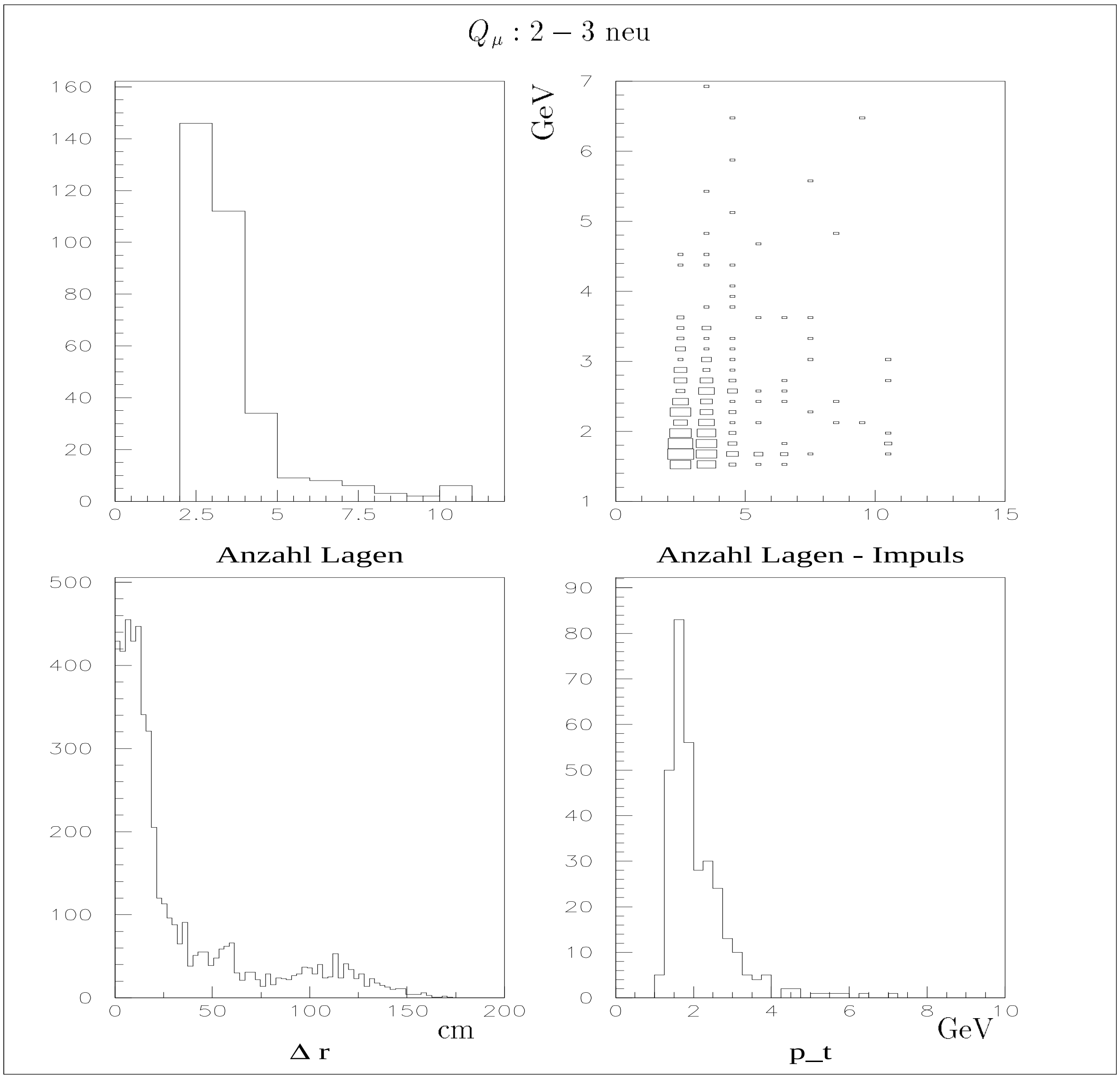


Abbildung 4.20: *Anzahl getroffener Lagen und jeweiliger Impuls sowie Abstand in r und p_t im* **Barrel** *für Myonen der Kategorie "neu" des D^*-Datensatzes.*

4.3.3 Test der neuen Kriterien für das Barrel

Der Test der erweiterten Schnitte wird nun auch hier im elastischen J/ψ-Datensatz durchgeführt. Zu jedem Teilchen mit Myonqualität 2 oder 3, einem Mindestimpuls von 1.5 GeV, einem Mindestabstand zur nächsten guten Spur von 0.2 rad und mindestens Treffer in 2 Lagen entlang seiner ins Barrel extrapolierten Spur wird im selben Ereignis ein Myon der Qualität 2 oder größer gesucht und die invariante Masse aus beiden gebildet. Dasselbe wird mit den gleichen Extrabedingungen an Teilchen vorgenommen, die die Kalorimeterqualität 0 aufweisen und als Kontrollgruppe dienen. Die Häufigkeit der einzelnen Myonqualitäten nach allen Schnitten ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Die Verteilung der invarianten Massen ist in Abbildung 4.22 zu sehen, wobei man einen Unterschied in den Signalen erkennen kann.

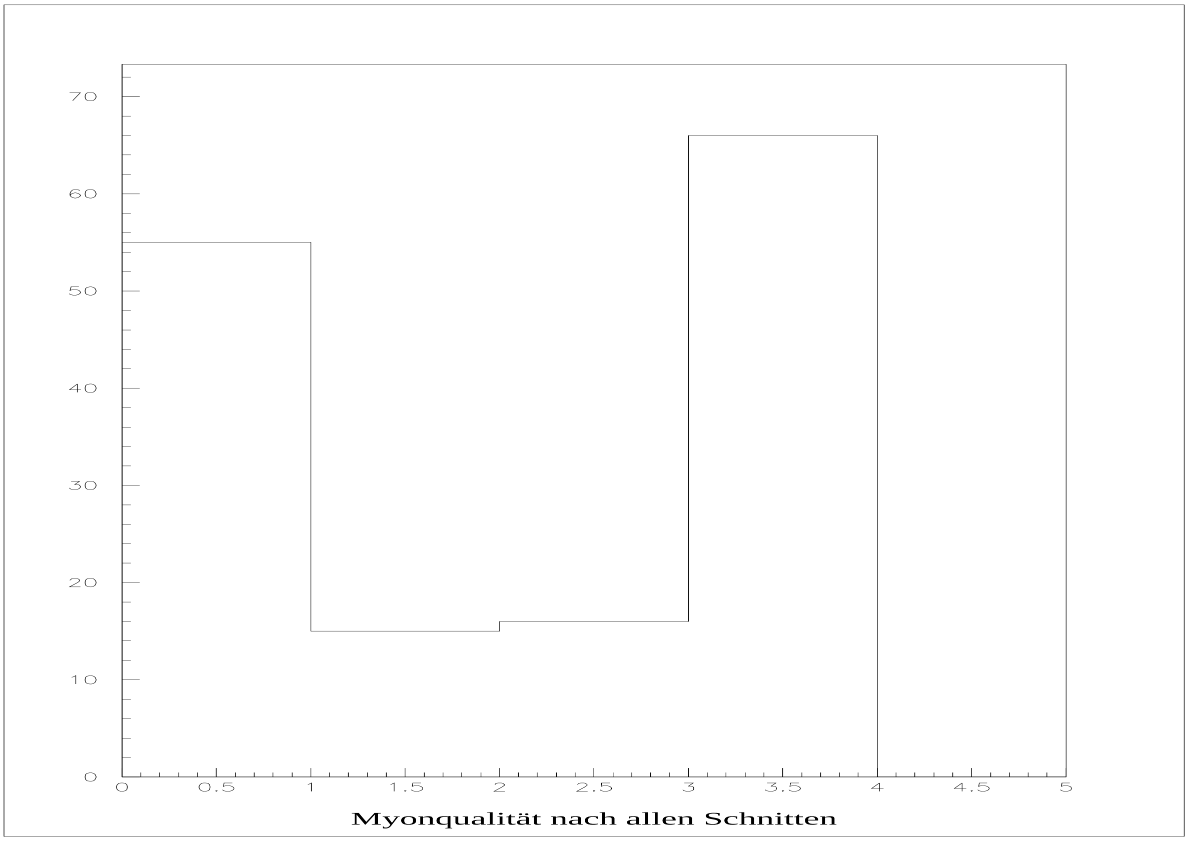


Abbildung 4.21: *Verteilung der Myonqualität im elastischen J/ψ-Datensatz nach allen neuen Schnitten im* **Barrel**.

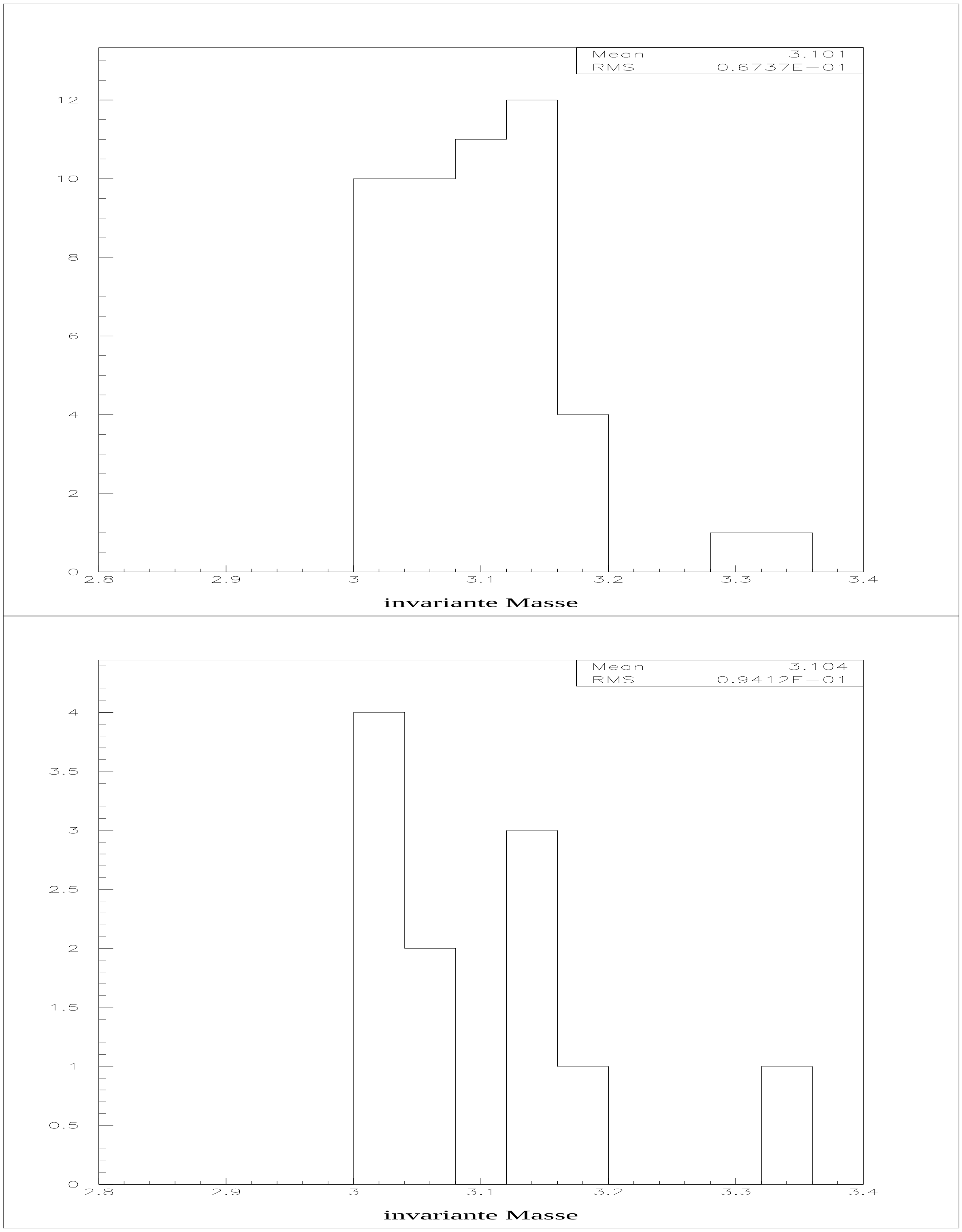


Abbildung 4.22: *Invariante Masse der neu selektierten Myonen (oben) und Kontrollteilchen (unten) mit Myonen der Qualität* $Q_\mu \geq 2$ *des* J/ψ*-Datensatzes im* **Zentralbereich**.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit hat sich mit der Untersuchung der Myonerkennung bei H1 für Ereignisse aus dem ersten Halbjahr 1997 befaßt.
Eine verbesserte Myonerkennung im H1-Detektor durch zusätzliche Einbeziehung von Kalorimeter- und Spurkammerinformationen wurde für die vordere Endkappe des instrumentierten Eisens erreicht. Es wurden Kriterien definiert, nach denen Myonen, die im Kalorimeter als gut bzw. sehr gut, jedoch nicht als im Eisen erkannt eingestuft wurden, eine höhere Qualität erhalten:

- der Abstand zur nächsten "guten" Spur R (definiert als $R = \sqrt{(\Delta\theta)^2 + (\Delta\phi)^2)}$ muß größer als 0.2 rad sein
- der Impuls muß mindestens 1.5 GeV betragen
- die aus der Spurkammer ins Eisen extrapolierte Spur muß entlang ihrer Bahn 6 oder mehr Lagen aufweisen, die mindestens einen Treffer erhalten haben

Von 6141 aus einem D^*-Datensatz vorselektierten Myonen der Qualität 2 und 3 wurden 1108 unter den o.g. Prämissen eine neue Qualität zugeordnet. Wählt man statt der Treffer in 6 Lagen nur 4 erhöht sich die Zahl auf 1979.
Von 6606 untersuchten Myonen mit guter oder sehr guter Kalorimeterqualität, deren Spurextrapolation im Zentralbereich des instrumentierten Eisens landet, erhielten 326 eine neue Einstufung unter den gleichen o.g. Voraussetzungen mit dem Unterschied von einem Treffer lediglich in 2 Lagen.
Für beide untersuchten Bereiche wurden in den jeweiligen Gruppen von Teilchen mit gleicher Myonqualität der Einfluß der Variation der Parameter Mindestabstand zur nächsten guten Spur und Mindestimpuls untersucht. Für beide Bereiche spielten diese Faktoren innerhalb der jeweiligen Gruppe keine nennenswerte Rolle.
Es wurde im Zentralbereich die Veränderung eines Selektionsschnittes den Abstand der Rückextrapolation zum nominellen Vertex betreffend untersucht und festgestellt, daß sich für einige Teilchen mit gelinkter Eisenspur, aber verworfener Eisenqualität, eine Verbesserung der Einstufung erzielen lässt.

Ein interessanter Aspekt, der als Ausblick in Betracht gezogen werden könnte, wäre die Untersuchung des Übergangsbereichs zwischen vorderer bzw/ hinterer Endkappe und dem Zentralbereich des instrumentierten Eisens im Hinblick auf eine Aufteilung derselben Spur in für die einzelne Erkennung zu kurze Spurstücke in den jeweils angrenzenden Bereichen, die dann zusammengeführt werden könnten.

Anhang A

Variation von Mindestabstand und Mindestimpuls

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variationen von Mindestabstand zur nächsten guten Spur R und Mindestimpuls. A.1 bis A.4 behandeln die in die vordere Endkappe extrapolierten Spuren, A.5 bis A.8 die in den Zentralbereich des instrumentierten Eisens. Die Abbildungen stellen die Verteilungen in der Anzahl der Lagen, dem zugehörigen Impuls und dem Abstand des Treffers zum extrapolierten Spurstück in y für den Bereich der vorderen Endkappe und in r für den Zentralbereich dar. Es wurden jeweils Spuren der Kalorimeterqualitäten 2 und 3 auf der einen und 0 auf der anderen Seite als Ausgangslage der Extrapolation gewählt. Wie zu erkennen ist macht die Veränderung von Mindestabstand und Mindestimpuls innerhalb der jeweiligen Teilchen mit gleicher Kalorimeterqualität nicht viel aus. Die Unterschiede zwischen den Teilchen mit unterschiedlicher Kalorimeterqualität ist jedoch erheblich.

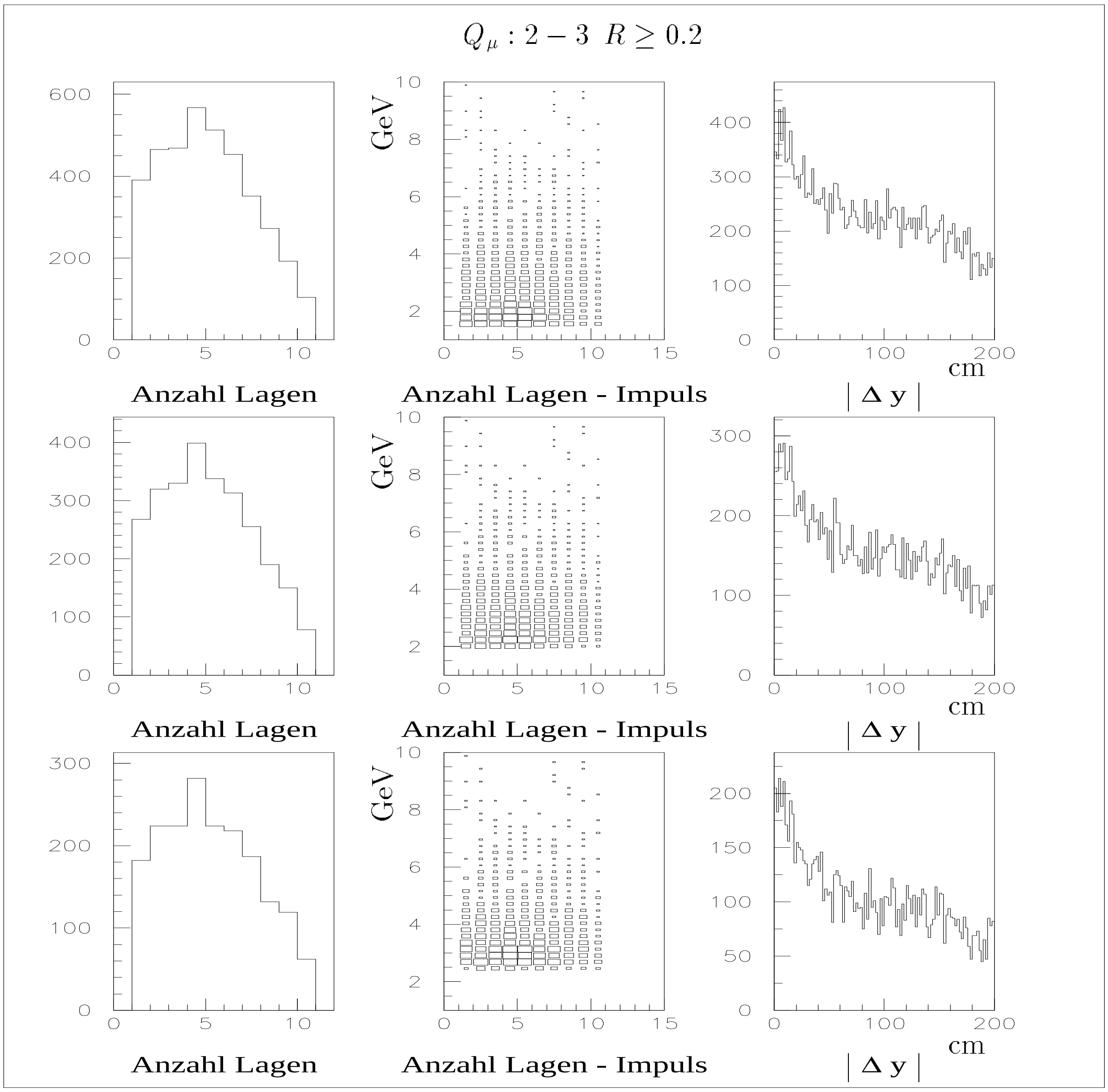


Abbildung A.1: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in y für Myonen mit* Q_μ=2 − 3 *und* $R \geq 0.2$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben),* 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) in der* **vorderen Endkappe**.

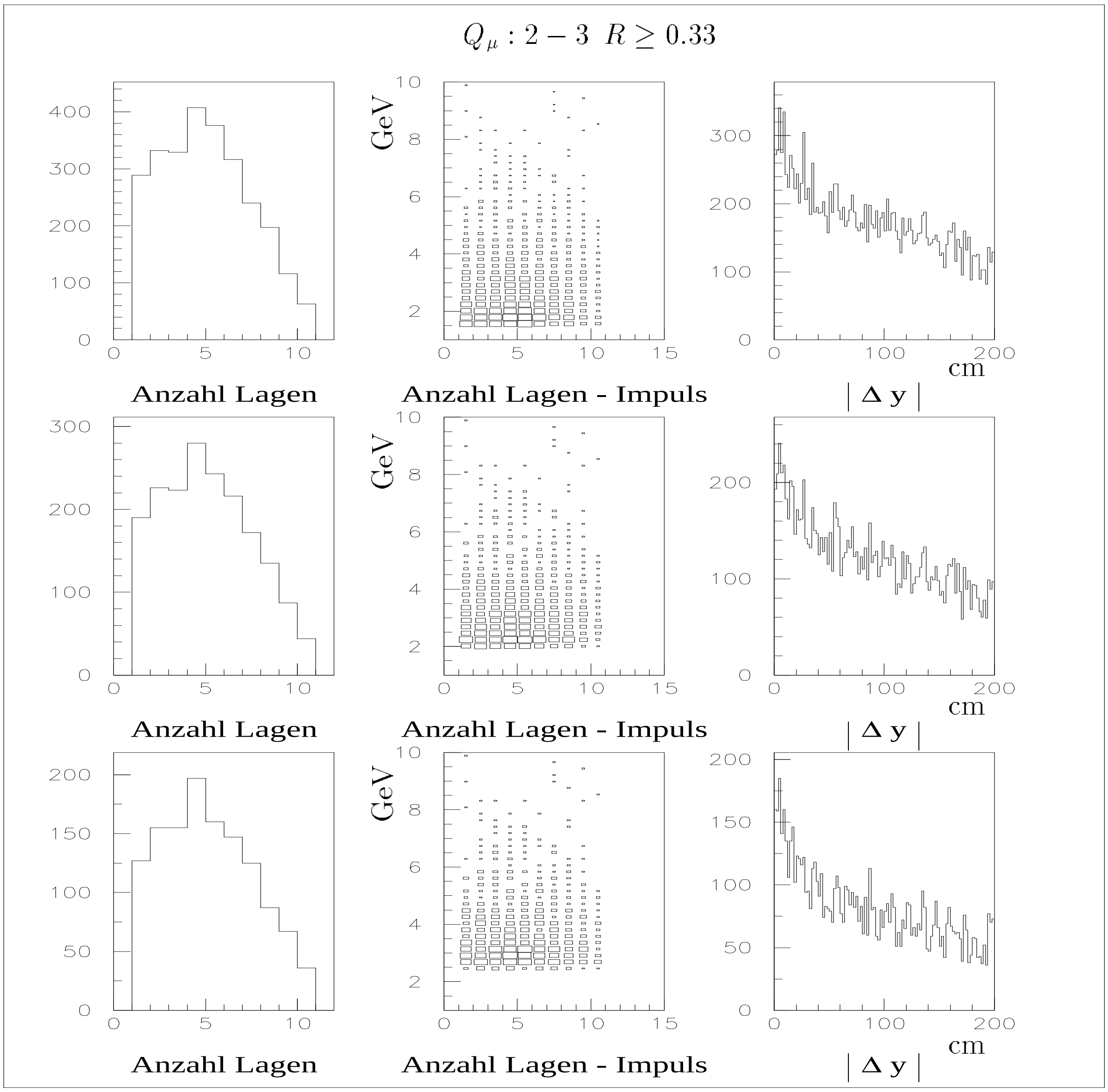


Abbildung A.2: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in y für Myonen mit* Q_μ=2−3 *und* $R \geq 0.33$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben),* 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) in der* **vorderen Endkappe**.

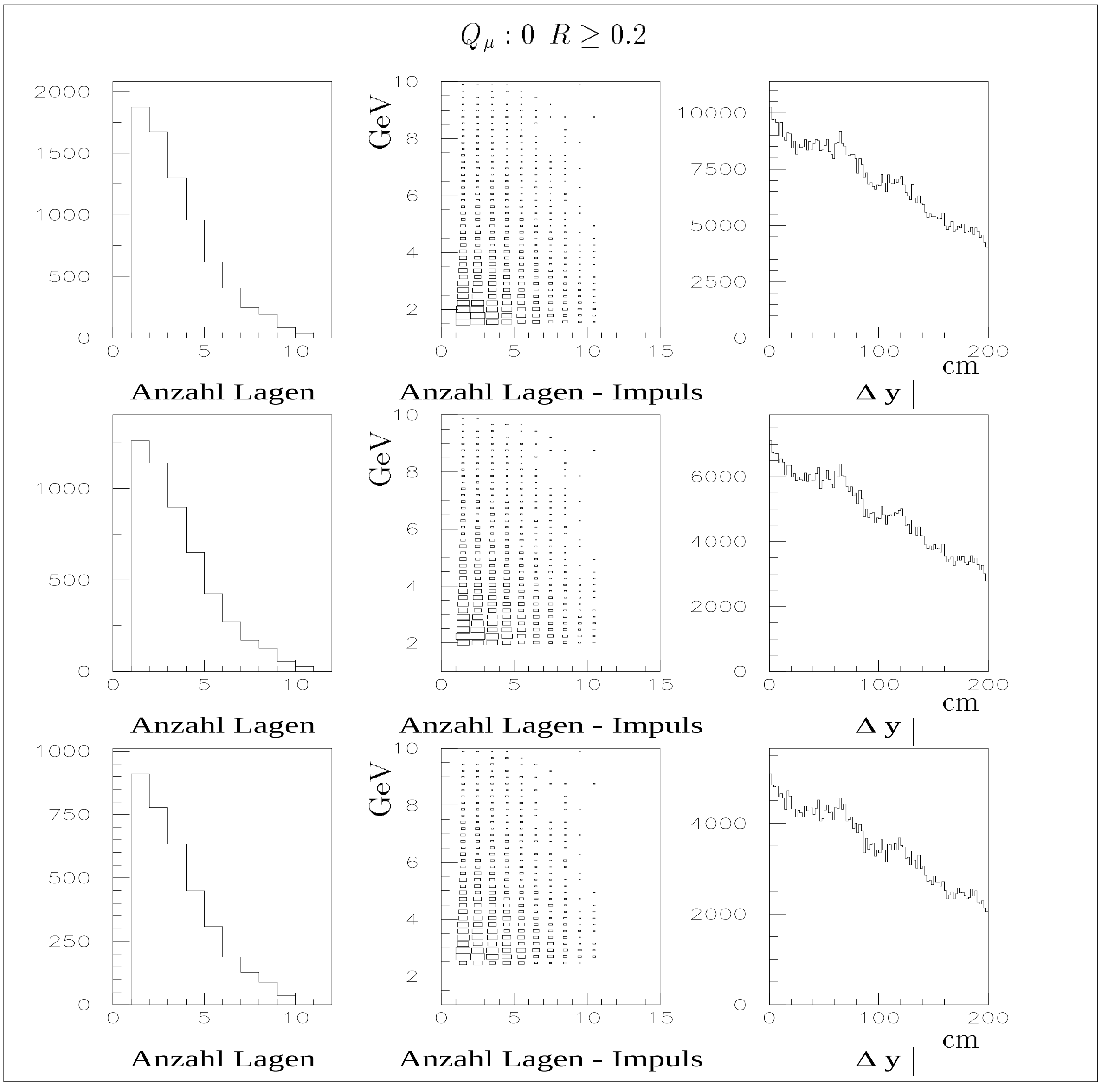


Abbildung A.3: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in y für Myonen mit* Q_μ=0 *und* $R \geq 0.2$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben),* 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) in der* **vorderen Endkappe**.

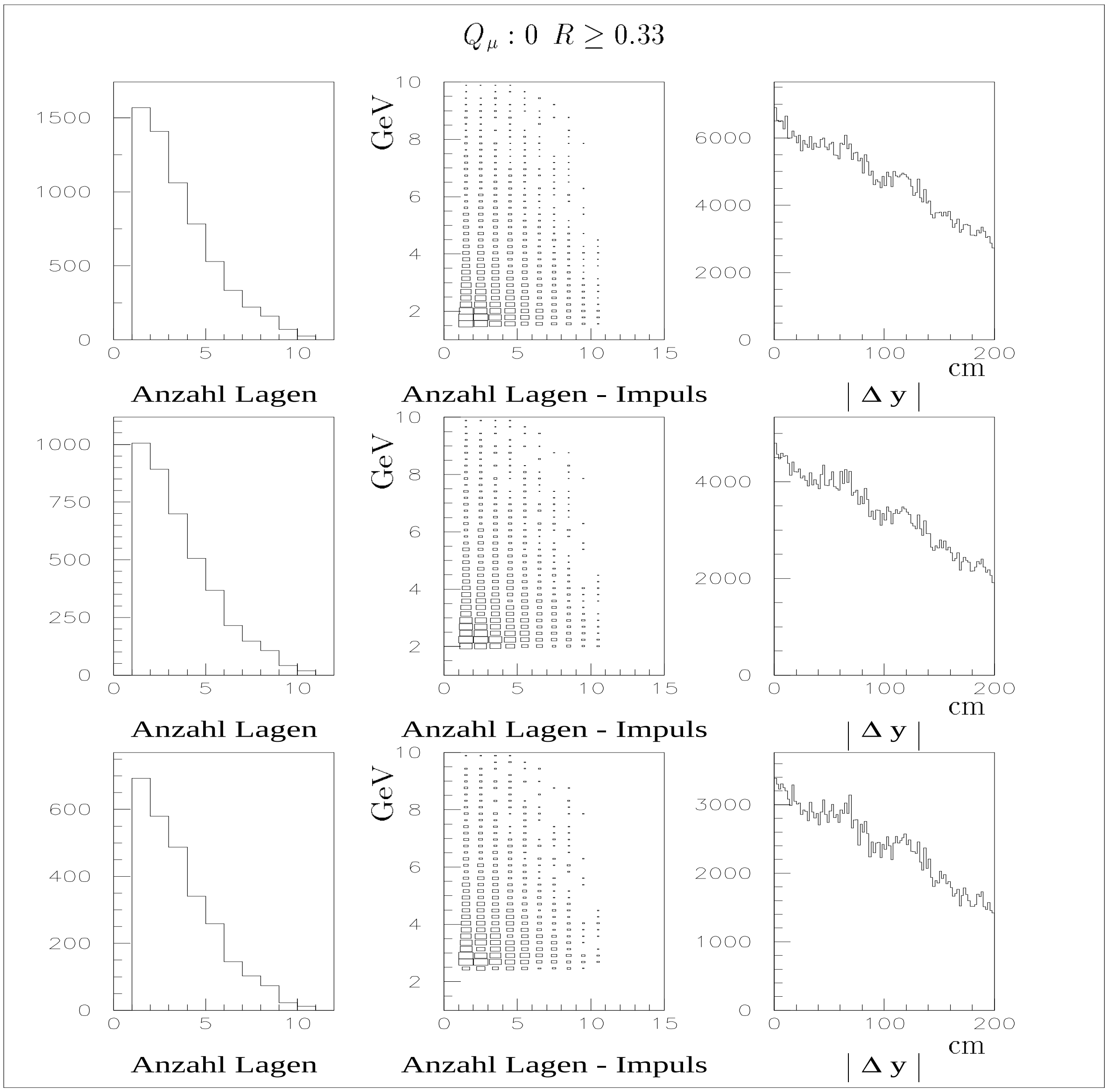


Abbildung A.4: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in y für Myonen mit* Q_μ=0 *und* $R \geq 0.33$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben),* 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) in der* **vorderen Endkappe**.

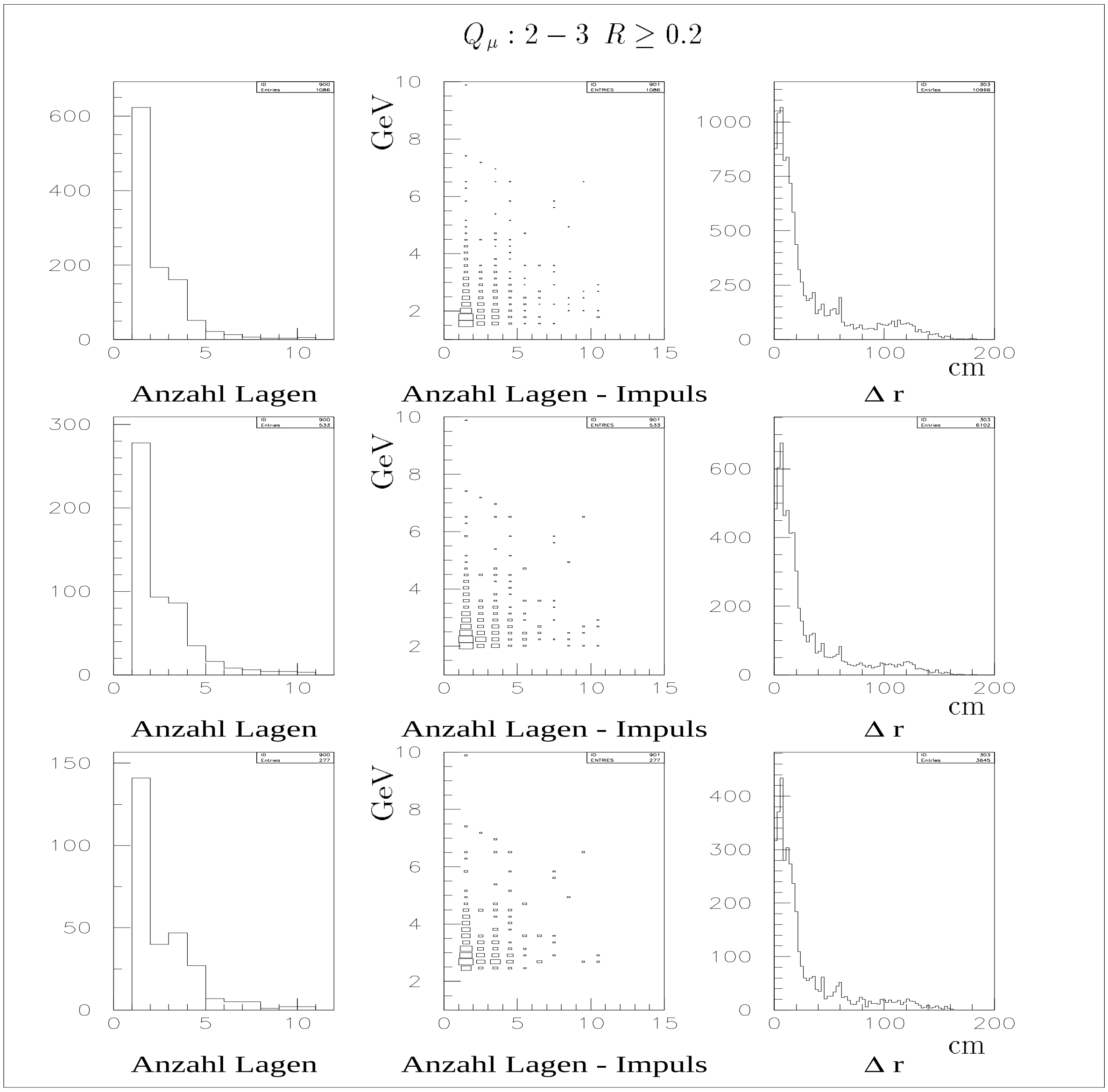


Abbildung A.5: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in r für Myonen mit* Q_μ=2 − 3 *und* $R \geq 0.2$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben),* 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) im* **Zentralbereich**.

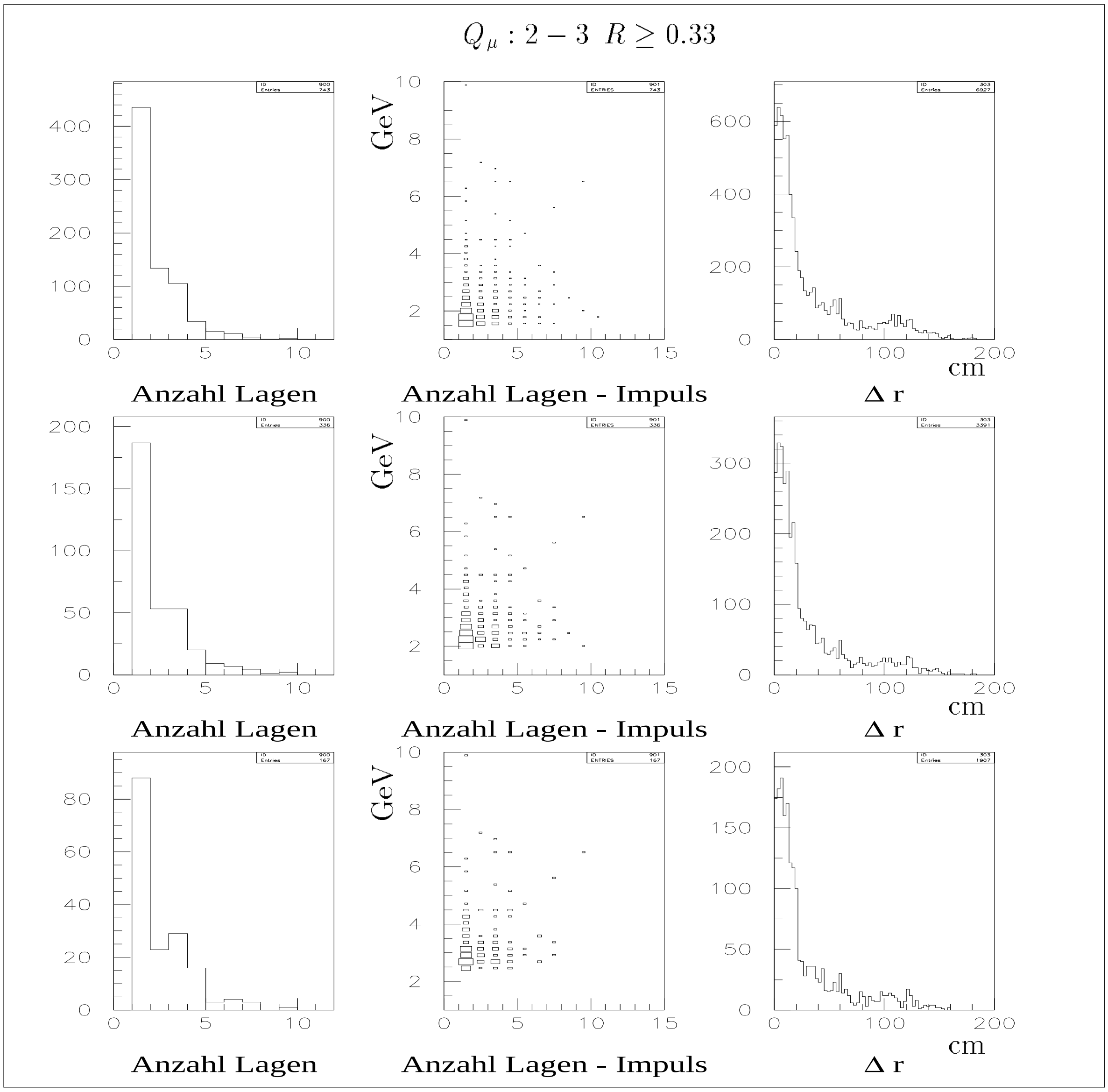


Abbildung A.6: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in r für Myonen mit* Q_μ=2 − 3 *und* $R \geq 0.33$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben)*, 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) im* **Zentralbereich**.

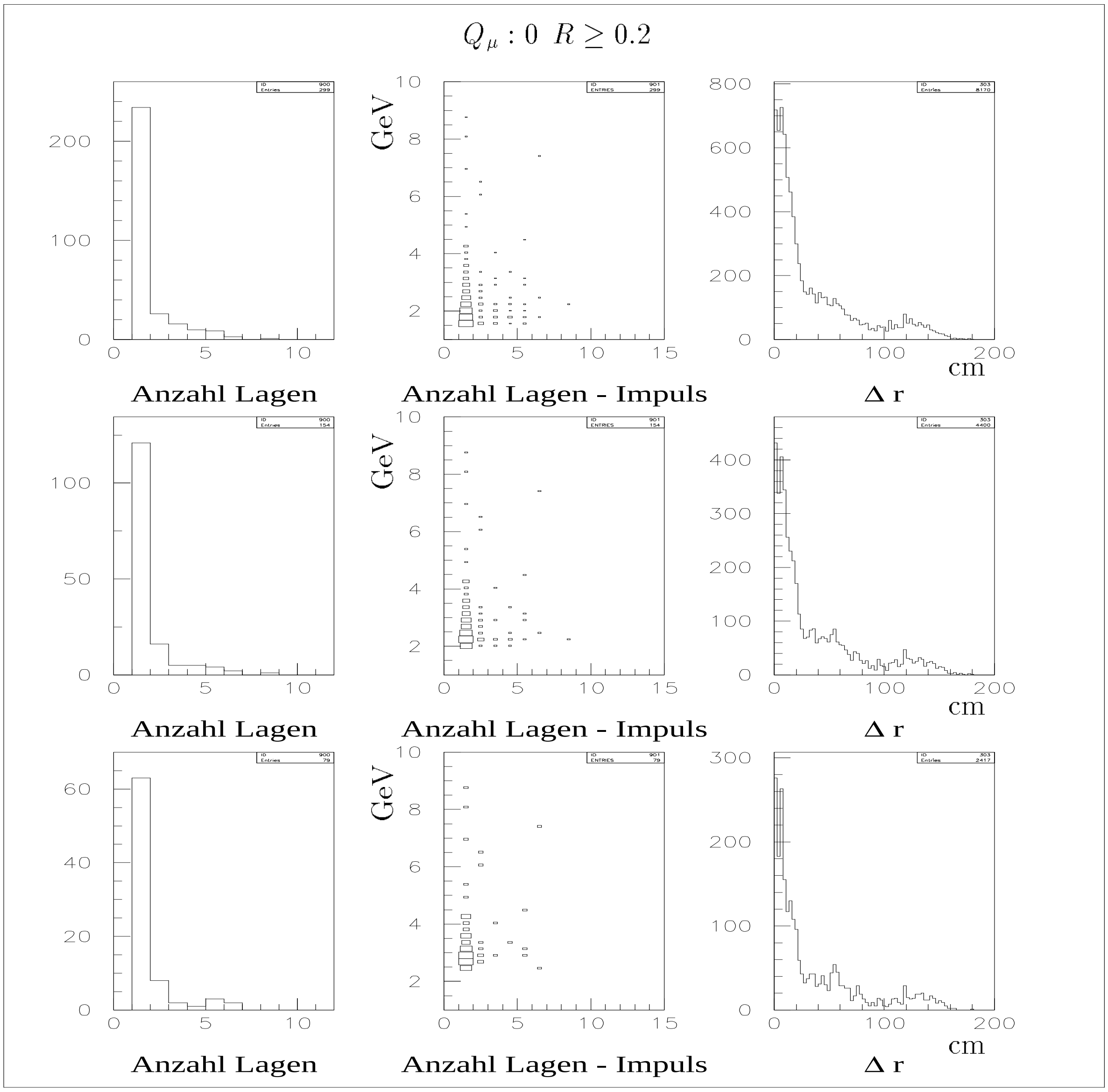


Abbildung A.7: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in r für Myonen mit* Q_μ=0 *und* $R \geq 0.2$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben),* 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) im* **Zentralbereich**.

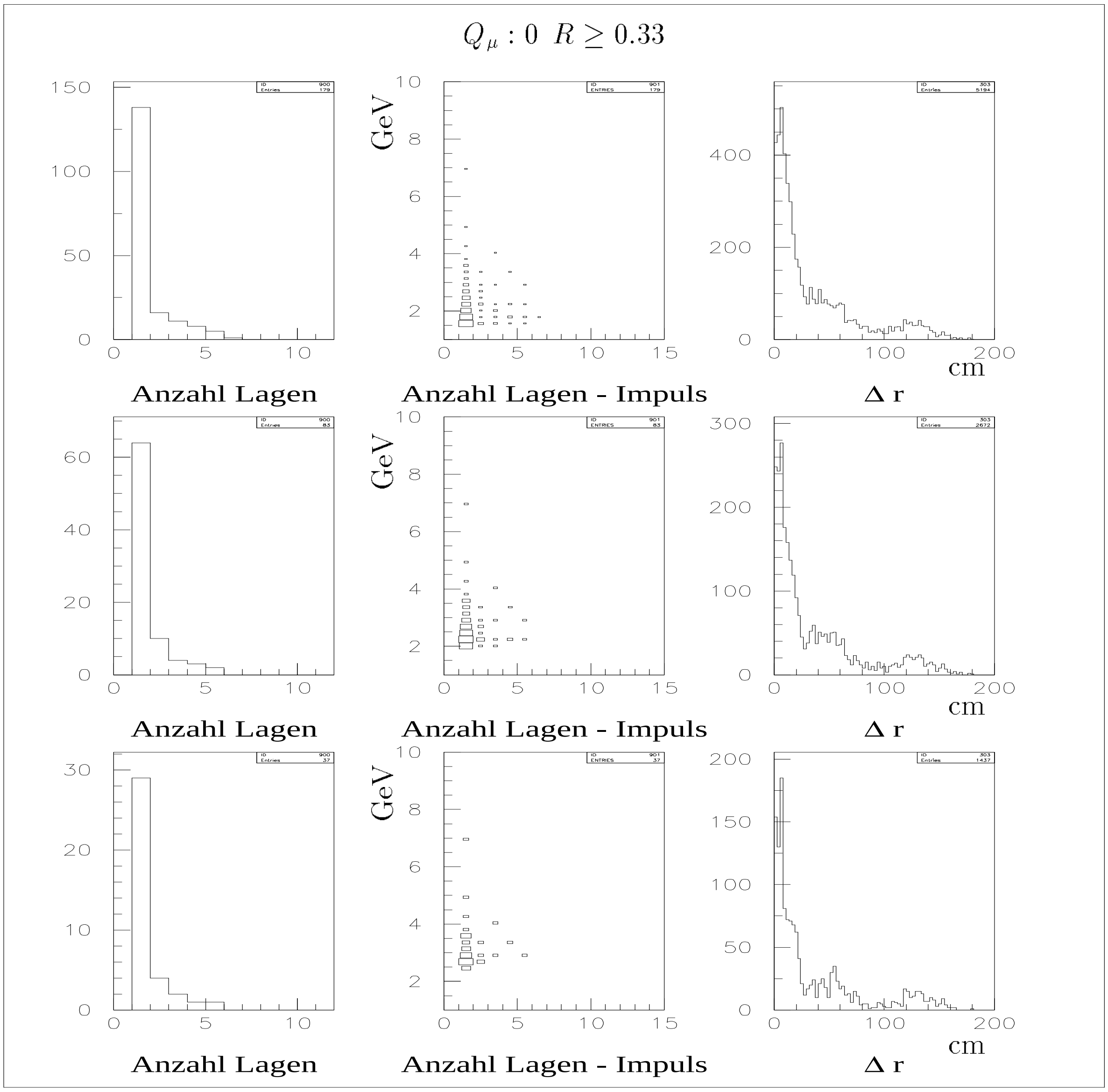


Abbildung A.8: *Anzahl getroffener Lagen, Impuls und Abstand in r für Myonen mit* Q_μ=0 *und* $R \geq 0.33$ *rad bei Impulsen von mindestens* 1.5 *(oben),* 2.0 *(mitte) und* 2.5 *GeV (unten) im* **Zentralbereich**.

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

[All84] O.C. Allkhofer et al.,
Cosmic rays on Earth, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik; Karlsruhe (1997)

[Bug98] E.V. Bugaev et al.,
Atmospheric Muon Flux at Sea level, underground and underwater, Phys. Rev. D 58 (1998) 54001

[H197a] H1 Collaboration,
The H1 Detector at HERA, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 386 (1997) 310-347

[H197b] H1 Collaboration,
The tracking, calorimeter and muon detectors of the H1 experiment at HERA, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 386 (1997) 348-396

[Jon78] L.M. Jones, H.M. Wyld,
Charmed particle production in photon gluon fusion, Phys. Rev. D17 No. 3 (1978)

[Klei92] C. Kleinwort, U.P. Krüger,
Track Reconstruction in the IRON, H1-Software Note 35 (1992)

[PDG00] Particle Data Group,
Review of Particle Physics, Phys. Rev. C15 (2000)

[Ros91] A. Rostovtsev,
H1-KMTREC , H1-Software (1991)

[Scg97] G. Schmidt,
Untersuchung der diffraktiven Photoproduktion von J/Psi-Mesonen im H1-Detektor bei HERA, Dissertation, Hamburg (1997)

[West97] L. West,
How to use the Heavy Flavour Working Group Track, Muon and Electron Selection Code, Version 3.00/00

[Wol99] H. Wollatz,
Untersuchung von schweren Quarks durch Analyse von Ereignissen mit zwei Myonen am Speicherring HERA, Dissertation, Hamburg (1999)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben, bedanken:

Zunächst bei Frau Prof. Dr. Naroska für die gute Betreuung während der Diplomarbeit.

Herrn Prof. Dr. Büßer für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Bei Katja, Susanne, Andreas, Dirk, Duncan, Johannes, Olli, Stephan und Tim für die Beantwortung aller Fragen und für das angenehme Arbeitsklima.

Bei Andreas und Dirk zusätzlich für das Korrekturlesen.

Bei meiner Mutter, meiner Tante und Ingrid dafür, daß es ohne sie nie soweit gekommen wäre.

Ich versichere, diese Arbeit unter Angabe aller wesentlichen Hilfsmittel und Quellen selbständig angefertigt zu haben.

Hamburg, den