

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Bachelorarbeit

Im Studiengang Physik

vorgelegt von

Matthieu Kecke

geboren in Magdeburg

2012

Messung der mittleren Lebensdauer

des B^+ -Mesons im Zerfall

$$B^+ \rightarrow J/\Psi K^+$$

am LHCb Experiment

Die Bachelorarbeit wurde von Matthieu Kecke

ausgeführt am

Physikalischen Institut , LHCb Gruppe

unter der Betreuung von

Herrn Prof. Dr. Ulrich Uwer

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die mittlere Lebensdauer des B^+ -Mesons mit Daten des LHCb Experiments bestimmt. Zentrale Punkte der Analyse sind die genaue Bestimmung der Detektorakzeptanz, der Zeitauflösung des Detektors und die Trennung von Signal und Untergrund. Die Analyse zielt darauf ab, alle nötigen Parameter zu bestimmen und die mittlere Lebensdauer durch die Anpassung einer Exponentialfunktion an das Lebensdauerspektrum der B^+ -Mesonen zu extrahieren.

Die Detektorakzeptanz wird durch den Verlust der Nachweiseffizienz mit steigender Lebensdauer dominiert und durch ein lineares Polynom beschrieben. Mithilfe von Untergrund bestehend aus echten J/Ψ -Mesonen, kann die Zeitauflösung des Detektors aus den Daten bestimmt werden. Um die Lebensdauerbestimmung durchzuführen werden zwei unterschiedliche Methoden implementiert, wobei eine auf der gleichzeitigen Beschreibung des Massen- und Lebensdauerspektrums des B^+ beruht und eine Parametrisierung des Untergrunds voraussetzt (2-dimensionaler Fit), die andere auf der Trennung von Signal und Untergrund durch Neugewichtung des Lebensdauerspektrums (sWeight-Technik). Zuletzt werden noch Studien zu den systematischen Unsicherheiten der Messung durchgeführt. Die extrahierte mittlere Lebensdauer ist :

$$\tau = 1.646 \pm 0.010_{stat} \pm 0.019_{syst} ps \text{ (2-dimensionaler Fit)}$$

$$\tau = 1.647 \pm 0.011_{stat} \pm 0.018_{syst} ps \text{ (sWeight-Technik)}$$

Abstract

In this work, the mean lifetime of the B^+ -meson is measured using data obtained by the LHCb-experiment. Key points of the analysis are the measurement of the detector acceptance, the time resolution and the separation of signal and background. The goal is to determine all necessary parameters to perform an exponential fit to the B^+ lifetime spectrum and extract the mean lifetime.

The detector acceptance is dominated by an efficiency drop that increases with larger lifetimes and is described by a linear polynomial. Using prompt J/Ψ background the time resolution of the detector can be measured in real data. For the lifetime fit two separate methods are implemented, one describes the mass and lifetime spectrum of the B^+ simultaneously and parameterizes the background (2-dimensional fit), the other separates signal and background via reweighting the lifetime spectrum and fitting an exponential afterwards (sWeight-technique). In the end the systematics of the measurement are studied. The extracted lifetimes are:

$$\tau = 1.646 \pm 0.010_{stat} \pm 0.019_{syst} ps \text{ (2-dimensional fit)}$$

$$\tau = 1.647 \pm 0.011_{stat} \pm 0.018_{syst} ps \text{ (sWeight-technique)}$$

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Das LHCb Experiment	4
2.1	Der LHCb Detektor	4
3	Die Vorgehensweise zur Lebensdauerbestimmung	7
3.1	Untersuchter Zerfall des B^+	7
3.2	Das Lebensdauer-Modell	8
3.3	Zur Verfügung stehende Daten	9
4	Vergleich der MC-Simulation und Daten	11
4.1	Vergleich der Observablen	11
4.2	Neugewichtung	13
4.3	B^+ Kandidaten pro Ereignis	14
5	Bestimmung der Akzeptanz des Lebensdauerspektrums	15
5.1	Zeitauflösung in der MC-Simulation	16
5.2	Akzeptanzkorrektur β	17
6	Messung der mittleren B^+ Lebensdauer	20
6.1	Zeitauflösung für Daten	20
6.2	Methode 1: Der 2-dimensionale Fit	23
6.3	Methode 2 : Bestimmung des Signalanteils mittels sWeights	26
6.4	Fittervalidierung anhand von MC Toy Studien	28
7	Abschätzung der systematischen Fehler	30
7.1	Modell der Massenverteilung	30
7.2	Akzeptanzfunktion (β -Faktor)	32
7.3	Zerfallslänge	32
7.4	Impulsskala	32
7.5	Zusammenstellung der systematischen Fehler	33
8	Zusammenfassung der Ergebnisse	34

1 Einleitung

Der Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf ist ein langer ringförmiger Teilchenbeschleuniger mit einem Umfang von 26,6 km, der zum einen fundamentale Aussagen des Standardmodells der Teilchenphysik überprüfen soll, zum anderen aber auch für die mögliche Entdeckung von physikalischen Phänomenen konzipiert ist, die über die Vorhersagen des heutigen Standardmodells hinaus gehen. Am LHC werden Protonen mit einer geplanten Schwerpunktsenergie von 14 TeV (aktuell 8 TeV, Stand Juli 2012) zur Kollision gebracht. Damit ist der LHC der erste Ringbeschleuniger auf der Welt, der solche Energien erreichen kann. Aus der zur Verfügung stehenden Schwerpunktsenergie werden Teilchen produziert und von Detektoren nachgewiesen. Dabei können neue Erkenntnisse über die Physik auf diesen Energieskalen gewonnen oder sogar völlig neue Elementarteilchen entdeckt werden.

LHCb steht abkürzend für LHC-beauty-Experiment und ist eine Kollaboration aus ca. 800 Wissenschaftlern an 59 Instituten, die über 16 Länder verteilt sind [1]. Ihr Hauptziel liegt in der Untersuchung der CP-Asymmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen. Dazu werden Zerfälle von B-Mesonen studiert und vor allem hinsichtlich möglicher CP-Verletzungen ausgewertet. Die wichtigsten Forschungsziele sind in einem sechs Punkte Plan [2] zusammengefasst. Um diese Ziele zu erreichen sind Präzisionsmessungen nötig, die die genaue Kenntnis wichtiger Parameter der B-Zerfälle erfordert.

Einer dieser Parameter ist die mittlere Lebensdauer der B-Mesonen, welche für den Zerfallskanal $B^+ \rightarrow J/\Psi K^+$ in dieser Bachelorarbeit bestimmt wird. Es wird erwartet, dass aufgrund der Vielzahl an gesammelten Daten und der exzellenten Zeitauflösung des LHCb Detektors, eine im weltweiten Vergleich zu anderen Experimenten, hohe Präzision bei der Bestimmung der Lebensdauer erzielt werden kann.

2 Das LHCb Experiment

Das LHCb Experiment ist eines der vier großen Experimente (neben ATLAS, CMS und ALICE) die momentan am LHC-Ringbeschleuniger in der Cern Forschungseinrichtung bei Genf laufen.

Das Hauptaugenmerk liegt auf der Forschung mit B-Mesonen, die hinsichtlich möglicher CP-Verletzungen untersucht werden. Die Vorhersagen des Standardmodells der Teilchenphysik für CP verletzende Zerfälle von B-Mesonen sollen mit hoher Präzision getestet werden.

2.1 Der LHCb Detektor

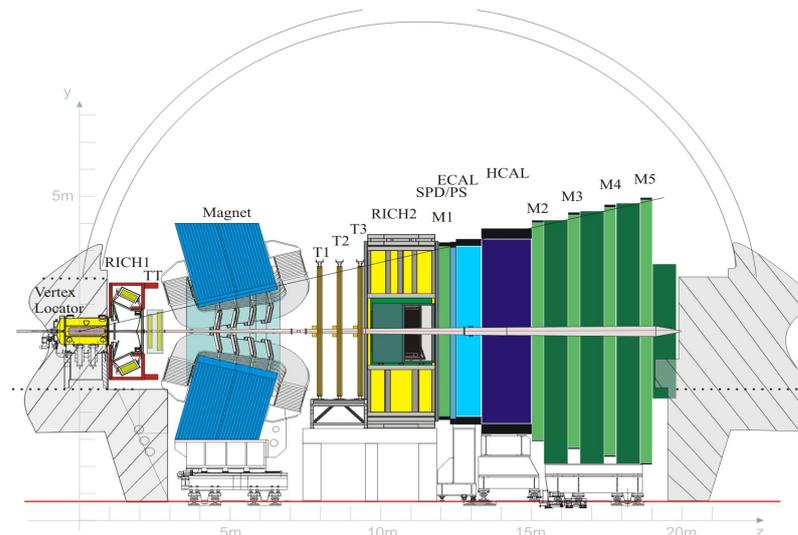


Abbildung 2.1: Schematischer Querschnitt des Detektors [1]

Wie man in Abbildung 1 erkennt deckt der LHCb Detektor nicht den gesamten Raumwinkel um den Proton-Proton Kollisionspunkt ab, sondern ist als Vorwärtspektrometer aufgebaut, womit ein kegelförmiger Abschnitt in eine Raumrichtung abgedeckt wird. Dies ist ausreichend, da mit ihm B-Mesonen untersucht werden, welche aufgrund ihrer relativ kleinen Masse fast ausschließlich in Richtung der Proton-Strahlachse weiterfliegen. Theoretisch wäre der gleiche Detektoraufbau in die andere Strahlrichtung möglich, um die aufgenommene Statistik zu verdoppeln, hierauf wurde jedoch aus finanziellen Gründen verzichtet.

Beschreibung der Detektorkomponenten:

- Vertex Locator: Der Vertex Locator (kurz VELO) besteht aus zwei beweglichen Hälften mit jeweils 42 halbkreisförmigen Halbleiter-Spuredetektoren. Mit ihnen wird der Zerfallsort der B-Mesonen, welche aufgrund ihrer relativ langen Lebensdauer (im Vergleich zu anderen Mesonen wie dem J/Ψ) erst nach einigen Millimetern zerfallen, genau vermessen. Durch die Auflösung der Halbleiterdetektoren von $10\ \mu\text{m}$ und ihrer Nähe zum Protonstrahl von bis zu 8 mm wird eine Ortsauflösung der Zerfalls- und Kollisionvertices von unter $50\ \mu\text{m}$ erreicht.
- Ring-Imaging-Cherenkov-Detektoren (RICH1 und RICH2): Der RICH1-Detektor befindet sich direkt hinter dem VELO-Detektor. In ihm kann die Cherenkov-Strahlung, welche geladene Teilchen beim Durchgang durch ein optisch dichtes Medium emittieren, wenn sie dieses Medium schneller durchfliegen als die lokale Lichtgeschwindigkeit, detektiert werden. Aus dem Öffnungswinkel der Strahlung kann dann die Geschwindigkeit des jeweiligen Teilchens bestimmt werden.
Der RICH2-Detektor funktioniert nach dem selben Prinzip und befindet sich weiter hinten im Aufbau um auch Teilchen mit höheren Impulsen zu vermessen. Die Informationen aus den RICH-Detektoren werden dann zur Teilchenidentifikation (PID) genutzt.
- Magnet: Der Dipolmagnet besitzt ein integriertes Magnetfeld von ca. 4 Tm. Durch ihn wirkt auf die durchfliegenden, geladenen Teilchen eine Lorentzkraft. Aus der entstehenden Krümmung der Teilchenspur im Magnetfeld ist es möglich, deren Impuls zu bestimmen. Da im LHCb Experiment vor allem Asymmetrien untersucht werden, ist es möglich die Polung des Magneten zu wechseln.
- Spur-System (TT und T1-T3): Das Spur-System besteht aus den Siliziumdetektoren des Trigger Tracker TT vor dem Magneten, sowie dem Inner und Outer Tracker (Tracking-Stationen). Der Inner Tracker besteht wie auch die Trigger Tracker aus Halbleiterdetektoren, während der Outer Tracker aus Driftröhren gebildet wird. Mit dem Spur-System kann die Flugbahn der Teilchen ermittelt werden. So kann man die Spuren vor und nach dem Magneten rekonstruieren und die Ablenkung durch ihn bestimmen, was die Messung der Impulse erlaubt [3][4].
- Kalorimeter (ECAL und HCAL): Hierbei handelt es sich um Kalorimeter in denen die Teilchen gestoppt werden und ihre Energie bzw. Flugrichtung erneut vermessen wird. In ECAL und HCAL können nun auch ungeladene Teilchen nachgewiesen werden. ECAL bezeichnet das elektromagnetischen Kalorimeter

in dem Elektronen, Positronen und Photonen gestoppt werden, HCAL dagegen ist ein hadronisches Kalorimeter welches z.b. Pionen und Kaonen vermessen kann [5].

- Myonen Detektoren (M1-M5): Dies sind Myonen-Kammern die speziell für den Nachweis von Myonen, die nur sehr gering mit Materie wechselwirken, ausgelegt sind.

3 Die Vorgehensweise zur Lebensdauerbestimmung

3.1 Untersucher Zerfall des B^+

Um die Lebensdauer des B^+ -Mesons zu bestimmen wird der folgende Zerfall studiert:

$$B^+ \rightarrow J/\Psi K^+ \rightarrow \mu^- \mu^+ K^+$$

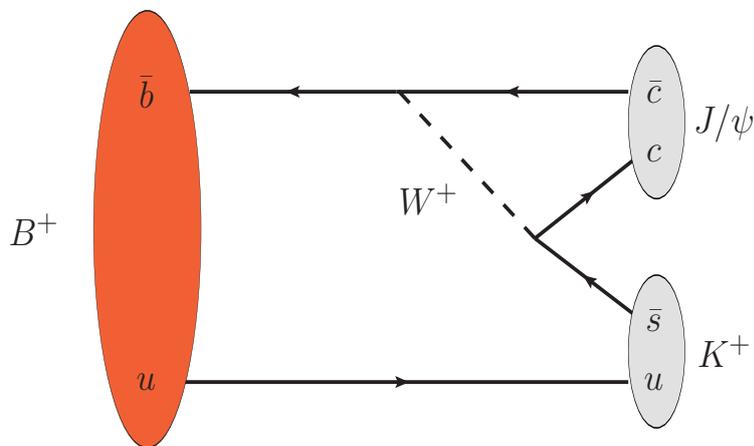


Abbildung 3.1: Feynman-Diagramm des untersuchten B^+ -Zerfalls [6]

Bedingt durch die Instabilität des B^+ wird dieses nicht direkt beobachtet, es werden jedoch die Endprodukte des Zerfalls durch die im vorherigen Kapitel beschriebenen Detektoren des LHCb-Detektors nachgewiesen. Hierbei wird der Impuls der Zerfallsteilchen möglichst genau bestimmt. Nun kann durch die 4er-Impulserhaltung und die nachvollziehbare Trajektorie der Zerfallsprodukte das ursprüngliche B rekonstruiert werden. Für die Viererimpulse \mathbf{p}_B , $\mathbf{p}_{J/\Psi}$ und \mathbf{p}_K gilt dabei:

$$\mathbf{p}_B^2 = (\mathbf{p}_{J/\Psi} + \mathbf{p}_K)^2$$

$$\mathbf{p}_{J/\Psi}^2 = (\mathbf{p}_{\mu^-} + \mathbf{p}_{\mu^+})^2$$

Bei der rekonstruierten Teilchentrajektorie wird zwischen dem *primären Vertex*, welcher der Proton-Proton Kollisionspunkt ist und damit auch der Punkt, an dem

das B-Meson produziert wird und dem *sekundären Vertex* an dem es zerfällt, unterschieden. Bei genauer Kenntnis der Distanz s zwischen den beiden Vertices und dem (nach obiger Formel rekonstruierbaren) Impuls des B-Mesons, kann die Lebensdauer des jeweiligen B's theoretisch aus der relativistischen Kinematik exakt bestimmt werden:

$$t_{echt} = \frac{s \cdot m_B}{|\vec{p}_B| \cdot c} \quad (3.1)$$

Der Index t_{echt} zeigt dabei an, dass es sich hier um die physikalisch echte Lebensdauer handelt. An diesem Punkt setzen jedoch auch die experimentellen Schwierigkeiten ein, auf die im weiteren Verlauf eingegangen wird.

3.2 Das Lebensdauer-Modell

Die Lebensdauerbestimmung beruht grundsätzlich auf der Anpassung (Fit) einer Exponentialfunktion an das Lebensdauerspektrum der B^+ -Mesonen. Die grundlegende Schwierigkeit wird sein, dieses Spektrum nach Signal und Untergrund zu trennen. Hierbei bezeichnet Signal einen B-Kandidaten, der korrekt aus seinen Zerfallsprodukten rekonstruiert werden konnte, Untergrund dagegen sind alle Kandidaten, die nicht richtig rekonstruiert wurden, jedoch dennoch als B^+ -Mesonen registriert wurden. Dies kann mehrere Gründe haben:

Zum einen kann ein Tochterteilchen des vermeintlichen B^+ selber nicht richtig detektiert worden sein, zum anderen können aber auch alle Tochterteilchen echte Signale sein aber zu anderen Zerfällen gehören und schlicht dem falschen B^+ zugeordnet werden. Für die Trennung von Signal und Untergrund wurden in dieser Arbeit zwei verschiedene Methoden verwendet, welche später noch ausführlich diskutiert werden. Beide haben das Ziel, nach ihrer korrekten Implementierung einen exponentiellen Fit an das Signalspektrum zu ermöglichen.

Um einen möglichst guten Fit an dieses Spektrum zu gewährleisten, müssen neben dem Untergrund noch zwei weitere wichtige Faktoren berücksichtigt werden. Der eine ist die Zeitauflösung des LHCb Detektors, welche vor allem für kurzlebige B-Mesonen eine Rolle spielt. Daher muss ein geeignetes Auflösungsmodell gefunden werden, mit dem die spätere Fitfunktion "verschmiert" wird um die Auflösungseffekte zu berücksichtigen. Praktisch wird dies mit einer Faltung mit der Summe aus mehreren Gaussfunktionen erreicht. Dafür muss die Detektorauflösung natürlich zunächst bestimmt werden.

Der andere Faktor ist die Akzeptanz des Detektors, d.h. die Effizienz mit welcher die Lebensdauer der zu untersuchenden B^+ -Mesonen rekonstruiert werden kann. Wenn diese unabhängig von der Lebensdauer wäre, müsste man sie nicht weiter betrachten, jedoch haben bereits frühere Lebensdauerermessungen bei LHCb ergeben, dass bei höherer Lebensdauer ein Nachlassen der Nachweiseffizienz des Detektors zu

beobachten ist [7]. Ein zusätzlicher Abfall der Effizienz bei sehr kleiner Lebensdauer bedingt durch die Datenselektion, welche später noch besprochen wird, kann in dieser Arbeit umgangen werden, in dem nur solche Selektionskriterien für die B^+ -Kandidaten angewandt werden, die diese Nachweiseffizienz nicht beeinträchtigen. Das Lebensdauermodell berücksichtigt also neben der exponentiellen Zerfallswahrscheinlichkeit ($\exp(-\frac{t_{echt}}{\tau})$) die Akzeptanz ($Acc(t_{echt})$) und die Auflösung (Faltung mit $Res(t_{echt}, t_{reco})$):

$$L(t_{reco}) = [A \cdot \exp(-\frac{t_{echt}}{\tau}) \cdot Acc(t_{echt})] \otimes Res(t_{echt}, t_{reco}) \quad (3.2)$$

Wobei t_{echt} die physikalisch-echte und t_{reco} die vom Detektor rekonstruierte Lebensdauer ist. Die Komponenten des Lebensdauermodells sind:

- A : Normierungsfaktor der Exponentialfunktion
- τ : Zu bestimmende mittlere Lebensdauer des B^+
- $Acc(t_{echt})$: Die Akzeptanzfunktion, für die gilt [7]:

$$Acc(t_{echt}) = 1 + \beta \cdot t_{echt} \quad (3.3)$$

- $Res(t_{echt}, t_{reco})$: Das Modell für die Zeitauflösung des Detektors. Für diese Arbeit wurde die Summe aus drei Gaussfunktionen gewählt:

$$Res(t_{echt}, t_{reco}) = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{[t_{reco} - t_{echt}] - \mu}{\sigma_i} \right)^2 \right) \right)$$

3.3 Zur Verfügung stehende Daten

Betrachtet man lediglich die vom LHCb Detektor aufgenommenen Daten, ist zunächst nicht klar wie die Akzeptanzkorrektur β im Lebensdauermodell ermittelt werden kann. Da die Daten bereits der Akzeptanzeinschränkung unterliegen fehlt ein Referenzwert, der das Verhältnis von bei einer gewissen Lebensdauer rekonstruierten B^+ -Mesonen und tatsächlich nach dieser Zeit zerfallenen beschreibt.

Für die Bestimmung können jedoch simulierte Daten des in dieser Arbeit untersuchten Zerfalls verwendet werden. Diese werden ebenfalls von der LHCb Kollaboration bereit gestellt und werden allgemein (und im weiteren Verlauf der Arbeit) *Monte Carlo* Simulationen (MC) genannt. Die simulierten Daten reproduzieren den Abfall der Nachweiseffizienz bei hoher Lebensdauer und bieten die Möglichkeit über die "MC Truth Information" nur Signal B-Kandidaten zu selektieren. Auch kann bei den simulierten Daten der Zusammenhang zwischen produzierten B^+ -Mesonen und deren Lebensdauer und den rekonstruierten B^+ -Kandidaten mit deren jeweiliger Lebensdauer eingesehen werden. Nachdem damit die korrekte Akzeptanzfunktion

bestimmt wurde kann dann die mittlere Lebensdauer anhand realer Daten extrahiert werden.

Für diese Arbeit standen dabei folgende Daten zur Verfügung:

Selektion	MC	Daten
ohne Cuts, alle Trigger Linien	2.1 M Ereignisse	311.000 Ereignisse
ohne Cuts, für Analyse benutzte Trigger Linien	1 M Ereignisse	118.000 Ereignisse
mit Cuts, alle Trigger Linien	640.000 Ereignisse	107.000 Ereignisse
mit Cuts, für Analyse benutzte Trigger Linien	320.000 Ereignisse	30.000 Ereignisse

In dieser Tabelle findet sich die Zusammenstellung der Anzahl an B^+ Signalereignissen nach der jeweiligen Selektionsstufe. Die Daten wurden 2011 bei einer Schwerpunktsenergie von 7 TeV aufgenommen und entsprechen einer Luminosität von $1fb^{-1}$. Mit der gleichen Schwerpunktsenergie ist auch die Monte Carlo Simulation erstellt worden [8]. Auf die Verifikation des aus der MC Simulation erhaltenen Akzeptanzmodells mittels echter Daten wurde in dieser Arbeit aus Zeitgründen verzichtet, prinzipiell ist dies jedoch notwendig.

Um die Daten auszuwerten wurde in dieser Arbeit die Datenanalyse Software ROOT, welche am CERN entwickelt wurde und auf der objektorientierten Programmiersprache C++ beruht, verwendet. In der Tabelle bezeichnet *Cut* die offline Selektion, welche erst beim Auswerten der Daten angewendet wird. Die hier gewählten Cuts beruhen auf den Standards vorheriger Untersuchungen zur Lebensdauer von B-Mesonen [7]. Sie können im Detail im Anhang eingesehen werden.

Zusätzlich können in der Analysesoftware auch noch *Trigger*entscheidungen erfragt werden. Die Trigger sind für die schnelle Auswahl der Daten am LHCb Detektor selbst verantwortlich und bilden damit eine zusätzliche Vorselektion. Es kann später dann entschieden werden welche Trigger Linien verwendet werden. Für die hier durchgeführte Lebensdauerbestimmung wurden nur solche Triggerselektionen verwendet, die nicht zur zusätzlichen Einschränkungen der Akzeptanz des Lebensdauerspektrums bei niedrigen Lebensdauern, wie sie z.b. durch ein Schnitt auf den Spurabstand vom Vertex erzeugt werden, führen. Als Nachteil ergibt sich daraus ein etwas höherer Untergrundanteil im Spektrum, jedoch müssen dafür keine Akzeptanzeffekte bei kurzen Lebensdauern ($\tau \leq 1ps$) berücksichtigt werden. Diese würden eine weitere Modifikation des Lebensdauermodells erfordern.

4 Vergleich der MC-Simulation und Daten

In diesem Kapitel werden wichtige Observablen der B^+ -Mesonen in beiden zur Verfügung stehenden Datensätzen (MC und Daten n-Tupel ¹) bestimmt und die Ergebnisse mit einander verglichen. Dies ist notwendig, da der in Kapitel 3.2 diskutierte β -Faktor mithilfe des MC n-Tupels bestimmt wird und dann später für die Lebensdauerbestimmung an echten Daten verwendet werden soll. Um dies rechtfertigen zu können, müssen jedoch wichtige Observablen in beiden Tupeln möglichst gut übereinstimmen, da sich die genaue Form der Akzeptanz mit ihnen ändert. Daher wurde zunächst ein Vergleich beider Datensätze durchgeführt in dem folgende Größen betrachtet werden:

1. p : Der Gesamtimpuls des B^+ in Strahlrichtung
2. p_t : Der Impulsanteil des B^+ senkrecht zur Strahlrichtung
3. η : Die Rapidity des B^+ entlang der Strahlachse. Diese Größe ist in der experimentellen Teilchenphysik definiert als

$$\eta = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E_B + |\vec{p}_B|}{E_B - |\vec{p}_B|}\right)$$

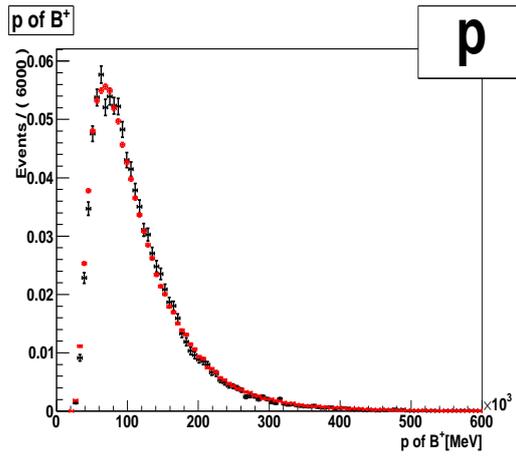
Dabei entspricht E_B der Gesamtenergie des B^+ . Sie ist ein Maß für den Winkel zwischen der Trajektorie des Teilchens und der ursprünglichen Strahlachse und wird daher in Kollisionsexperimenten betrachtet.

4. nPV : Anzahl der primären Vertices pro Ereignis
5. Spur-Multiplizität : Gibt die Gesamtanzahl an rekonstruierten Teilchenspuren pro Ereignis an

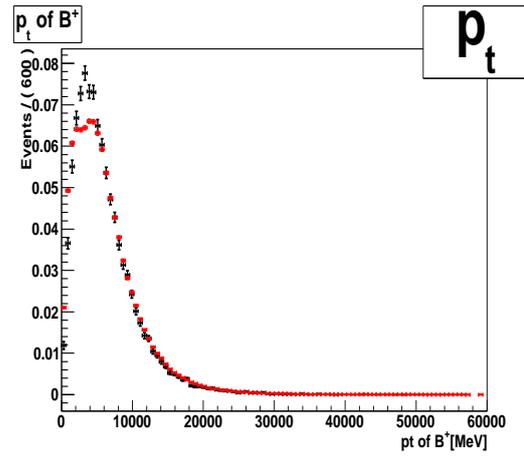
4.1 Vergleich der Observablen

Es folgen Histogramme, in denen die jeweiligen Größen aus den beiden Datensätzen aufgetragen sind. Dabei sind die Werte aus der MC-Simulation in Rot dargestellt, Werte aus dem Daten-Tupel sind in Schwarz abgebildet. Alle Histogramme sind auf dieselbe Fläche, d.h. die gleiche Zahl von Ereignissen, normiert um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, da die Anzahl der Ereignisse sich in den Tupeln unterscheidet (siehe 3.3).

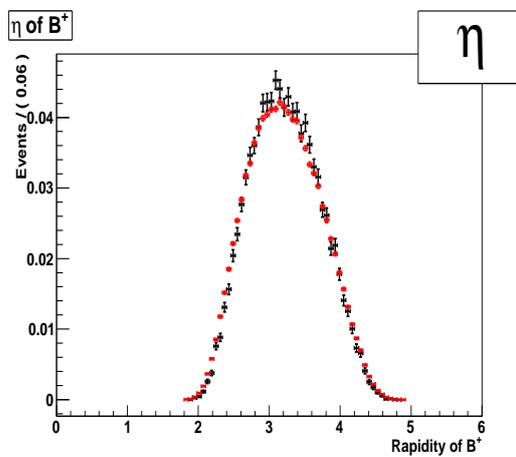
¹n-Tupel bezeichnet dabei eine Liste, in der die Daten vieler Ereignisse gespeichert werden



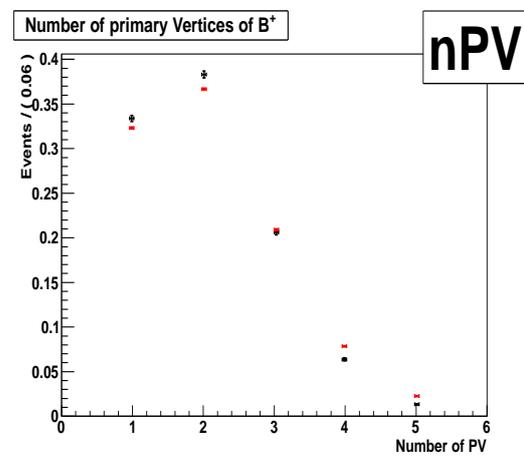
(a) Impuls des B^+



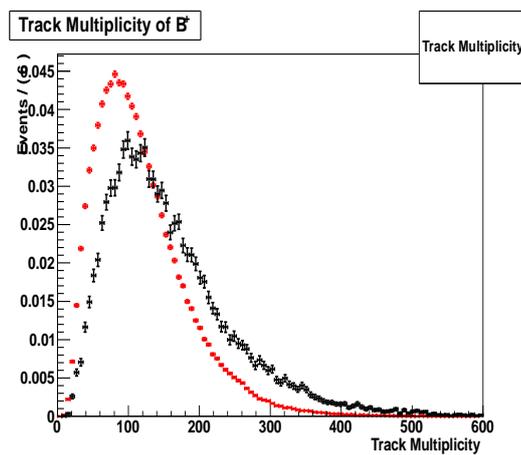
(b) Transversal-Impuls des B^+



(c) Rapidität des B^+



(d) Anzahl der primären Vertices



(e) Spur-Multiplizität

Abbildung 4.1: Vergleich der Observablen aus MC und Daten
MC in Rot, Daten in Schwarz

4.2 Neugewichtung

Beim Vergleich der Abbildungen 4.1 a)-e) zeigt sich das die Impulse, die Rapidität und die Anzahl der primären Vertices pro Ereignis bis auf kleinere Schwankungen gut übereinstimmen. Der Verlauf dieser Observablen ist für die MC-Simulation und für die realen Daten vergleichbar. Es muss jedoch auch festgestellt werden, dass die Spur-Multiplizität in beiden Tupeln nicht übereinstimmt. Die Kurve der realen Daten ist im Vergleich zu den MC Daten etwas breiter und nach rechts, d.h. hin zu höheren Multiplizitäten verschoben. Das ist ein bekanntes Phänomen, der verwendete MC Generator unterschätzt die totale Teilchenmultiplizität in Vorwärtsrichtung. Dies muss bei der späteren Bestimmung der Akzeptanzkorrektur β berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck werden die MC Daten in dieser Observablen neu gewichtet [9]. Die Gewichte werden erstellt, indem zunächst für die jeweilige Anzahl an primären Vertices die Spektren der Spur-Multiplizität ermittelt werden, da diese beiden Größen stark korreliert sind. Danach werden die Datenspektren durch die MC Spektren dividiert, so dass für die jeweilige Anzahl an primären Vertices ein Gewicht entsteht, welches die Verteilung der Spur-Multiplizität aus der MC-Simulation in die Verteilung der realen Daten überführt. Mit dieser Gewichtung können dann die Daten der MC-Simulation für die Spur-Multiplizität neu gewichtet werden und eine Übereinstimmung der Verläufe wird erreicht. Damit ist sichergestellt das die nach dieser Anpassung ermittelte Akzeptanzkorrektur β für die Lebensdauerbestimmung an echten Daten verwendet werden kann.

Als Test der Gewichtung wurde diese nun auf die Verteilung Spur-Multiplizität aus der MC-Simulation angewendet. Es ist bei korrekter Implementierung eine völlige Übereinstimmung mit dem Datenspektrum zu erwarten, welche in Abbildung 4.2 auch festgestellt werden kann.

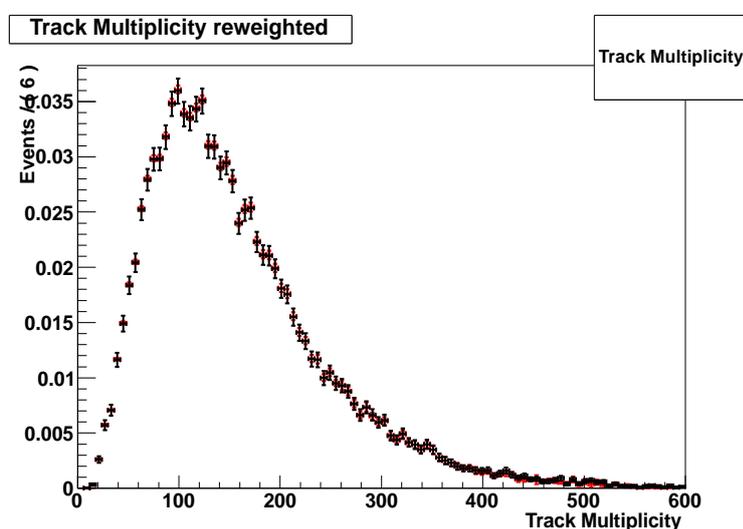
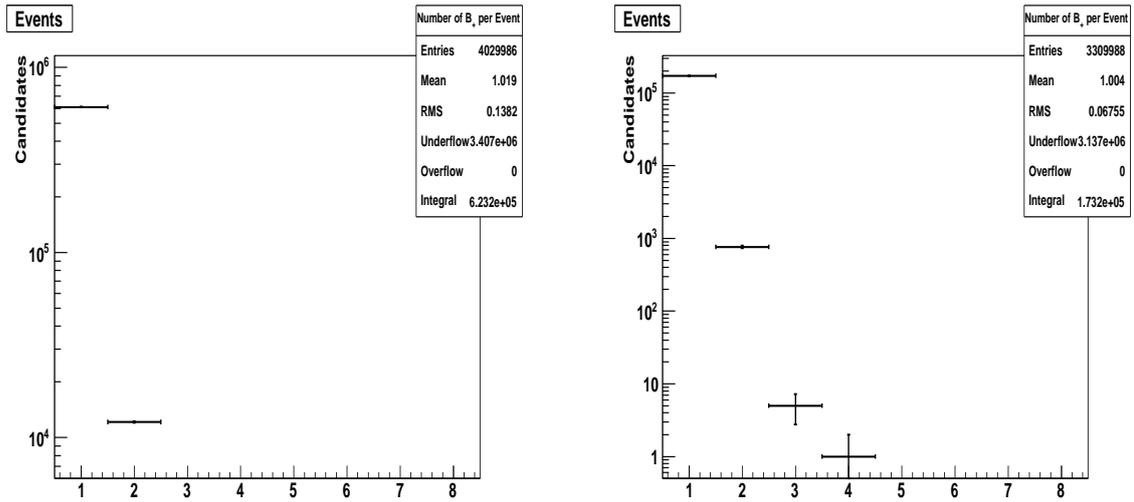


Abbildung 4.2: Vergleich der Spur-Multiplizität nach Neugewichtung

4.3 B^+ Kandidaten pro Ereignis

Ebenfalls zu beachten ist die Anzahl der B^+ -Kandidaten in einem einzelnen Ereignis. Falls in Daten und MC die Anzahl an Ereignissen mit mehr als einem Kandidaten vernachlässigbar klein ist ($\leq 1\%$) muss keine weitere Selektion getroffen werden. Sollte jedoch in einem oder beiden Datensätzen eine nicht vernachlässigbare Anzahl an Ereignissen mehr als einen Kandidaten vorweisen, muss dies weiter berücksichtigt werden.



(a) B^+ -Kandidaten pro Ereignis, MC

(b) B^+ -Kandidaten pro Ereignis, Daten

Abbildung 4.3: Vergleich der B^+ -Kandidaten pro Ereignis

Abbildung 4.3 zeigt, dass in der MC-Simulation die Anzahl der Ereignisse mit mehr als einem B^+ -Kandidaten vernachlässigbar ist, sie liegt deutlich unter einem Prozent. In den realen Daten zeigt sich jedoch, dass bei ca. zwei Prozent der Ereignisse mehr als ein Kandidat vorhanden ist. In diesen Fällen wird daher der B^+ -Kandidat ausgewählt, welcher den besten χ^2_{DTF} -Wert besitzt [7]. Dieser gibt die Güte des Fits an, welcher die Trajektorien und Impulse der Zerfallsprodukte bestimmt und auf das ursprüngliche B^+ zurückführt. Damit ist gewährleistet, dass in Daten und MC immer nur ein Kandidat pro Ereignis verwendet wird um physikalische Parameter zu bestimmen.

5 Bestimmung der Akzeptanz des Lebensdauerspektrums

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Bestimmung des β -Faktors der Akzeptanzfunktion (3.3). Sie wird später gebraucht, um den Verlust der Nachweiseffizienz für B^+ -Mesonen mit größerer Lebensdauer zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.2). Bestimmt wird der β -Faktor durch einen Fit an die Verteilung der B^+ -Lebensdauer, wobei durch den Zugriff auf die *Monte Carlo Truth Information* sichergestellt wird, dass nur Signalzerfälle betrachtet werden. Dieser Fit kann an zwei verschiedene Spektren erfolgen, in denen die Lebensdauer unterschiedlich bestimmt wurden:

1. Eine Möglichkeit ist, die Lebensdauer aus den simulierten Größen zu bestimmen. Dabei wird über die Position des primären und Zerfallsvertex der Abstand s zwischen diesen bestimmt, welcher der Flugstrecke des B^+ -Mesons entspricht. Bei genauer Kenntnis dieser Strecke und des Impulses des jeweiligen Mesons, kann die Lebensdauer aus der relativistischen Kinematik ermittelt werden:

$$t_{\text{echt}} = \frac{s \cdot m_B}{|\vec{p}_B| \cdot c} \quad (5.1)$$

Wobei c die Lichtgeschwindigkeit und m_B die Masse des Mesons ist. Durch die exakte Kenntnis der Observablen werden hier keine Zeitauflösungseffekte erwartet, weshalb der Fit ohne die Faltung mit Gaussfunktionen durchgeführt wird.

2. Die zweite Methode ist die Rekonstruktion des B^+ -Mesons und seines Zerfallsvertex aus den Impulsen und Trajektorien der Zerfallsprodukte, die im Detektor nachgewiesen werden. Dies ist auch die Methode, mit der die Lebensdauer für echte Daten bestimmt wird.

Für diese Arbeit werden beide Varianten verwendet, wobei der Fit an das Lebensdauerspektrum der ersten Methode (ohne Auflösungseffekte) verwendet wird um das Ergebnis des Fits an die rekonstruierten Lebensdauern zu überprüfen. Theoretisch sollten die erhaltenen Werte für den β -Faktor der Akzeptanzfunktion übereinstimmen, falls das Auflösungsmodell im zweiten Fit korrekt gewählt ist. Dazu wird nun zunächst im ersten Schritt die Zeitauflösung der Daten aus der MC-Simulation bestimmt.

5.1 Zeitauflösung in der MC-Simulation

Die Zeitauflösung wird bestimmt, indem die Differenzen der Lebensdauer aus B^+ -Rekonstruktion und der Lebensdauer gemäß Formel 5.1 (aus der MC Truth Information) betrachtet wird. Da für die Rekonstruktion mit Auflösungseffekten zu rechnen ist, für die Bestimmung aus den Größen die in der MC-Simulation bekannt sind jedoch nicht, wird die Breite der Verteilung der Differenzen aus diesen zwei Methoden ein Maß für die Zeitauflösung sein. Für die betrachtete Zeitdifferenz gilt:

$$\Delta t = t_{reco} - t_{echt}$$

Zu erwarten ist eine um Null zentrierte, gaussförmige Verteilung deren Standardabweichung σ der Zeitauflösung entspricht. Um die Verteilung möglichst gut beschreiben zu können, wurde sie mit der Summe aus drei Gaussfunktionen gefittet², welche sich auch im Auflösungsmodell $Res(t_{echt}, t_{reco})$ (siehe 3.2) wiederfinden. Die kombinierte Standardabweichung der Verteilung berechnet sich dann aus den einzelnen Standardabweichungen der Gaussfunktionen wie folgt:

$$\sigma = \sqrt{f_1 \cdot \sigma_1^2 + f_2 \cdot \sigma_2^2 + f_3 \cdot \sigma_3^2}$$

Hierbei ist f_i der Anteil der Ereignisse des jeweiligen Gauss zu der (auf eins normierten) Gesamtzahl an Ereignissen der Gesamtfunktion.

Es wurde ein *unbinned maximum log-likelihood* Fit durchgeführt, bei dem die Parameter der Fitfunktion so bestimmt werden, dass sie die Likelihood-Funktion $\mathcal{L} = \prod_i Pdf_i(\vec{x}_i|\vec{\vartheta})$ maximieren, welche die Wahrscheinlichkeitsdichte in Abhängigkeit der Funktionsparameter angibt [10]. $Pdf_i(\vec{x}_i|\vec{\vartheta})$ bezeichnet dabei die einzelnen Funktionen (hier die drei Gaussfunktionen) welche von den Variablen \vec{x}_i (hier $\Delta t = t_{reco} - t_{echt}$) abhängen und deren Parameter $\vec{\vartheta}$ (hier f_i, σ_i, μ) bestimmt werden sollen. Das Logarithmieren der Wahrscheinlichkeitsdichte führt zu

$$\log(\mathcal{L}) = \sum_i Pdf_i(\vec{x}_i|\vec{\vartheta}) \tag{5.2}$$

und wird aus praktischen Gründen durchgeführt. Beim maximum log-likelihood Fit werden nun die Parameter so bestimmt, dass sie Funktion 5.2 maximieren und damit die wahrscheinlichste (beste) Realisierung der Pdf_i darstellen.

In Abbildung 5.1 ist die Verteilung von Δt mit dem dazugehörigen Fit und den Fitparametern dargestellt. Für die Zeitauflösung ergibt sich ein Wert von

²Aufgrund verschiedener Rekonstruktionseffekte kann das Auflösungsmodell nicht durch eine einzelne Gaussfunktion beschrieben werden. Als am geeignetsten hat sich die Kombination dreier Gaussfunktionen herausgestellt.

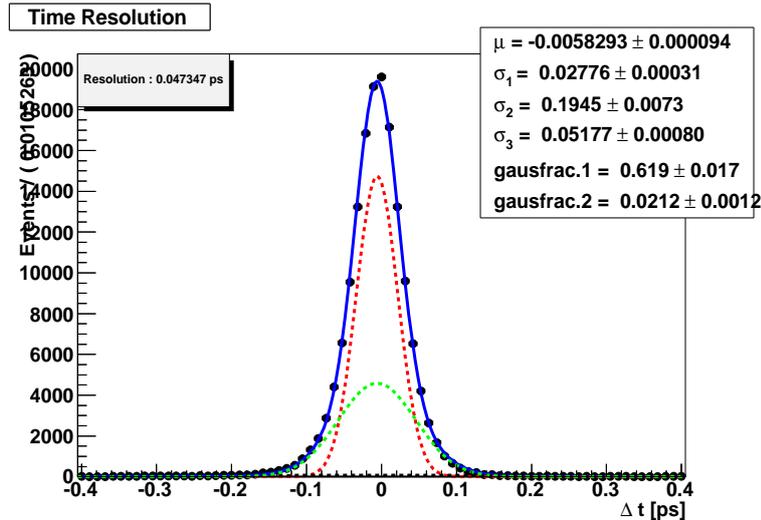


Abbildung 5.1: Bestimmung der Zeitaufösung aus MC Simulation
Gesamtfunktion in Blau, einzelne Gaussfunktionen in Rot, Grün und Schwarz (gestrichelt)

$$\Delta t = 47,35 fs.$$

Dieser Wert ist vergleichbar mit Ergebnissen früher Studien, wie z.b. in [7]. Die so bestimmten Parameter f_i, σ_i, μ der Summe aus den drei Gaussfunktionen werden fixiert und im nächsten Abschnitt als Auflösungsmodell $Res(t',t)$ verwendet.

5.2 Akzeptanzkorrektur β

Mit den nun bestimmten Parametern des Zeitaufösungsmodells kann das Spektrum der rekonstruierten Lebensdauer der B^+ -Mesonen mit der Funktion (3.2) gefittet werden. Die Faltung einer Funktion ist dabei definiert als:

$$f(t) \otimes g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t')g(t - t')dt'$$

Die Faltung mit einer Gaussfunktion (bzw. der Summe von Gaussfunktionen) bewirkt das "Ausschmieren" dieser Funktion, welches von der Breite der Gaussfunktion abhängt, sowie die Verschiebung des Ursprungs der gefalteten Funktion zum dem Mittelwert der Gaussfunktion. Anschaulich werden dabei Funktionswerte um ein Inkrement nach Links oder Rechts verschoben. Da dieses Inkrement fixiert ist, spielt die Faltung hier vor allem bei kleinen Lebensdauern, die in der Größenordnung der Zeitaufösung und damit der Standardabweichung der Gaussfunktionen liegen eine Rolle. Implementiert wurde die Faltung durch eine *schnelle Fourier-Transformation* (FFT), die einen komplexen Algorithmus zur effizienten Berechnung von diskreten Fourier-Transformationen darstellt. Nach dem Faltungstheorem gilt:

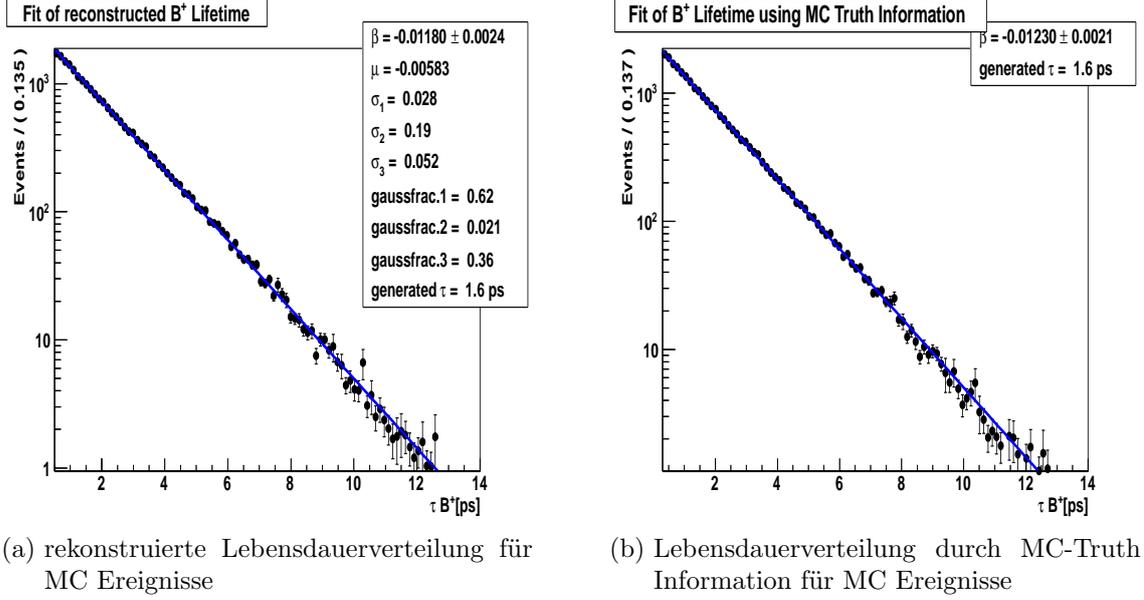


Abbildung 5.2: Vergleich der Fits an die beiden Lebensdauer-Verteilungen

$$\mathcal{F}[f \otimes g] = (2\pi)^{\frac{n}{2}} \mathcal{F}[f] \mathcal{F}[g]$$

Wobei n die Dimensionalität der Funktionen f und g ist. Dieser Zusammenhang wird ausgenutzt, indem die Fourier-Transformierten von f und g (hier Lebensdauer- und Zeitauflosungsmodell) berechnet werden und dann durch die inverse Fourier-Transformation die Faltung bestimmt wird [11]. Für den Fit an das aus Gleichung 5.1 berechnete Lebensdauerspektrum wird dagegen wie bereits diskutiert keine Faltung vorgenommen, da diese Verteilung nicht von Zeitauflosungseffekten betroffen ist.

In beiden Fällen wurden wieder *unbinned maximum log-likelihood* Fits durchgeführt, in denen alle Werte bis auf die Akzeptanzkorrektur β fixiert sind. Dabei sind die Auflösungsparameter der Gaussfunktionen auf die in Abschnitt 5.1 extrahierten Werte gesetzt, die mittlere Lebensdauer der B^+ -Mesonen auf den in der Simulation benutzten Wert von $\tau = 1.638ps$.

Abbildung 5.2 zeigt die beiden Lebensdauer-Verteilungen für simulierte MC-Ereignisse mit den dazugehörigen Fitparametern. Die Verteilungen wurden dafür nach der vollen Selektion und nach Simulation aller Trigger, die die Nachweiseffizienz der Lebensdauer nicht einschränken, sowie des Neugewichtens der Spur-Multiplizität aufgenommen. Der Fit ist in einem Zeitfenster von $t \in [0.3, 14]ps$ durchgeführt. Der von Null verschiedene Anfangspunkt des Fits berücksichtigt einen Schnitt auf die B^+ -Meson Lebensdauer, der alle Mesonen mit einer Lebensdauer $t \leq 0.3ps$ entfernt. Dieser Schnitt ist bereits auf den n -Tupeln vorhanden und wird dazu verwendet, den kurzlebigen Teil des Untergrundes herauszufiltern (prompte Ereignisse).

Die Werte für den Akzeptanzfaktor β sind:

$$\beta_{reco} = (-0.0118 \pm 0.0024)ps^{-1} ; \beta_{asso} = (-0.0123 \pm 0.0021)ps^{-1}$$

Sie stimmen verhältnismässig gut überein, die Fehler sind allerdings mit ca. 20% des Wertes für die rekonstruierten Lebensdauern, bzw. 17% für die Lebensdauern aus der MC-Truth Information relativ hoch und sind, da die gleichen MC Ereignisse verwendet wurden, stark korreliert. Ein Grund für die relativ großen Fehler ist die mangelnde Statistik bei längerer Lebensdauer. Ab ca. 9ps sind nur noch wenige Ereignisse (≤ 10 pro Bin) übrig, in diesem Bereich hat die Akzeptanz jedoch auch den größten Einfluss. Ein genaueres Ergebnis könnte demnach mit einer größeren Zahl von MC Ereignissen erreicht werden.

6 Messung der mittleren B^+ Lebensdauer

Mithilfe der in Kapitel 5.2 berechneten Akzeptanzkorrektur β ist das Lebensdauermodell eindeutig bestimmt. Um die Lebensdauer echter B^+ -Mesonen zu berechnen, muss nun noch die Zeitauflösung für reale Daten bestimmt werden, diese entspricht dann der Auflösung des Detektors. Damit wird in diesem Punkt die Analyse unabhängig von der MC-Simulation. Weiter muss das durch die Teilchenrekonstruktion erhaltene Lebensdauerspektrum der B^+ -Mesonen möglichst genau in Signal- und Untergrundereignisse separiert werden. Der spätere Fit des Lebensdauermodells darf nur an echte B^+ erfolgen, um die mittlere Lebensdauer so präzise wie möglich zu bestimmen. Der Untergrund, welcher möglicherweise ein anderes Zeitverhalten hat, darf nicht benutzt werden. Dafür kommen in dieser Arbeit zwei verschiedene Methoden zum Einsatz, die im folgenden erläutert werden. Zunächst wird aber die Zeitauflösung betrachtet, um erneut das Auflösungsmodell $Res(t_{echt}, t_{reco})$, dieses Mal für reale Daten, zu erhalten. Danach werden beide Methoden angewendet um die mittlere Lebensdauer des B^+ zu extrahieren.

6.1 Zeitauflösung für Daten

Um die Zeitauflösung für Daten zu bestimmen wird der prompte J/Ψ -Untergrund verwendet [7]. Dieser wird durch echte J/Ψ -Mesonen erzeugt, die ihren Ursprung direkt am primären Vertex haben. Ein falscher B^+ -Kandidat der aus solch einem J/Ψ rekonstruiert wird, hat per Konstruktion die Lebensdauer $t = 0ps$: Das mit dem Zerfallsvertex des falschen B^+ assoziierte J/Ψ stammt in Wahrheit aus dem primären Vertex, wo es aufgrund seiner vernachlässigbaren Lebensdauer auch "sofort" zerfällt. Man erwartet also für die falschen B^+ (mit prompten J/ψ) eine rekonstruierte Lebensdauer von $t = 0$. Aufgrund der endlichen Auflösung des Detektors misst man aber eine um Null verschmierte Verteilung, deren Breite die Zeitauflösung ist.

Für die Bestimmung der Zeitauflösung mit dem prompten J/Ψ Untergrund wurde ein spezielles *vorskaliertes* n-Tupel verwendet, bei dem der Schnitt auf rekonstruierte Lebensdauern die kleiner als $t = 0.3ps$ sind, weggelassen wurde. Dadurch wird der prompte Untergrund nicht (wie auf dem normalen Daten n-Tupel) herausgeschnitten und der Untergrundanteil an den Gesamt ereignissen steigt. Um den Anteil an B^+ -Signalereignissen herauszufiltern wurde in dieser Arbeit die sWeight Technik eingesetzt, welche in [12] ausführlich beschrieben wird. So wie hier eingesetzt, beruht die Technik darauf die Massenverteilung des B^+ zu fitten und dadurch jedem Ereignis ein Gewicht zuzuordnen, das je nach Position in der gaussförmigen Verteilung die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein betrachtetes Ereignis ein Signal bzw. Untergrundereignis ist. Danach kann z.B. das Lebensdauerspektrum mit diesen Gewichten

neugewichtet werden, um entweder alle Signal-oder alle Untergrundereignisse zu beschreiben.

Die Massenverteilung der rekonstruierten B^+ -Masse m_B wird mit der Summe aus einem Signalanteil (gausförmiger Massenpeak) und einem Untergrundanteil, der die B^+ -Kandidaten aus prompten $J\Psi$ berücksichtigt, beschrieben. Diese falschen B^+ -Kandidaten liegen in den Seitenbändern der Massenverteilung. Die Gesamtfunktion lautet:

$$M(m_{B^+}) = N_{Sig} \cdot \left[\sum_{i=1}^2 \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{m_{B^+} - \mu}{\sigma_i}\right)^2\right) \right] + N_{Ug} \cdot [a_0 + a_1 \cdot m_{B^+}] \quad (6.1)$$

Dabei ist der erste Term die Summe aus zwei Gaussfunktionen, die den Signalanteil des Peaks beschreiben soll, der zweite Term ein lineares Polynom das den Untergrund beschreibt. N_{Sig} und N_{Ug} sind die jeweilige Anzahl der B^+ -Kandidaten. Es wurde erneut ein *unbinned maximum log-likelihood* Fit durchgeführt.

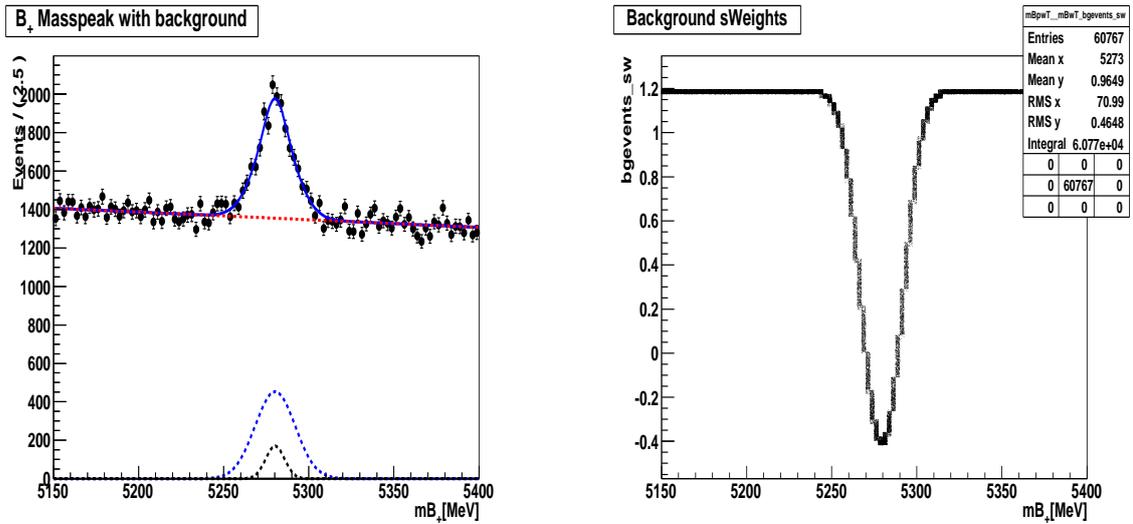
Abbildung 6.1 zeigt den Massenpeakfit (a) und die mit der sWeight-Technik ermittelten Gewichte für die Untergrundannahme (b). Man erkennt, dass B^+ -Kandidaten mit einer Masse die nahe der Peakposition liegt, ein geringes Gewicht besitzen und damit eine niedrige Wahrscheinlichkeit Untergrundereignisse zu sein. Je weiter die Entfernung zum Peak, desto wahrscheinlicher ist der B^+ -Kandidat Untergrund und desto größer ist auch das Untergrundgewicht.

Mit dem erhaltenen Gewicht wurde nun das Lebensdauerspektrum neugewichtet um möglichst alle vorhandenen B^+ -Signale zu unterdrücken und nur noch Untergrund von prompten J/Ψ -Mesonen zu behalten. Damit kann der Bereich um $t = 0ps$ gefittet werden, um wieder das Zeitauflosungsmodell $Res(t_{echt}, t_{reco})$ zu erhalten. Zwar kann mit der beschriebenen Methode der Anteil an Signal B^+ -Ereignissen unterdrückt werden, daneben gibt es aber noch eine langlebige Komponente aus anderen B-Zerfällen, die eine breite rekonstruierte B-Massenverteilung aufweist und die nicht unterdrückt werden kann. Dies muss in der Fitfunktion beachtet werden:

$$\mathcal{P}(t) = f_{prompt} \cdot [\delta(t_{echt}) \otimes Res(t_{echt}, t_{reco})] + (1 - f_{prompt}) \cdot \left[\exp\left(-\frac{t'}{\tau_{Uglang}}\right) \otimes Res(t_{echt}, t_{reco}) \right] \quad (6.2)$$

In obiger Formel ist der erste Term die Summe aus den drei Gaussfunktionen in $Res(t_{echt}, t_{reco})$, da die Faltung einer beliebigen Funktion mit einer Deltafunktion die Funktion selber zurück gibt. Der zweite Term berücksichtigt den besprochenen langlebigen Untergrund. Mithilfe dieser Funktion kann nun die Verteilung des prompten J/Ψ Untergrunds gefittet werden um $Res(t_{echt}, t_{reco})$ zu erhalten. Dabei werden alle Parameter zum anpassen freigelassen.

Mit den im Fit bestimmten Parametern $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ und μ , sowie den auf eins normierten Anteilen der Ereignisse der Gaussfunktionen zur Gesamtfunktion, ist das



(a) Massenverteilung für Ereignisse mit prompten (falschen) und sekundären (richtigen) J/Ψ

(b) Untergrundgewichtung

Abbildung 6.1: sWeight Technik

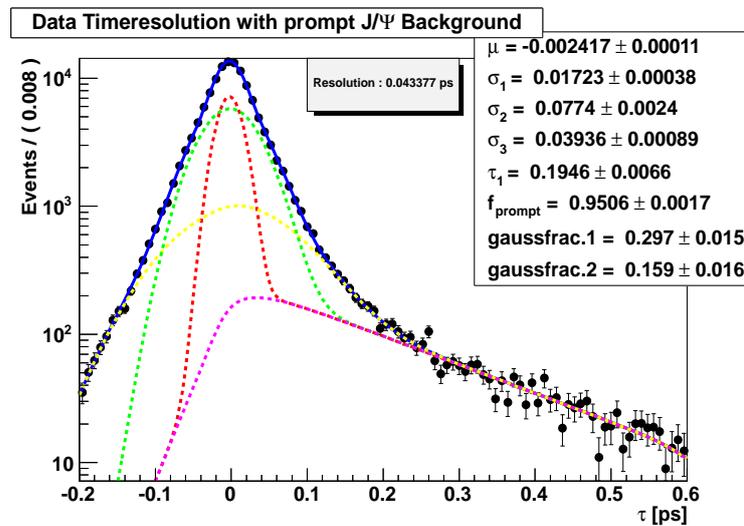


Abbildung 6.2: Bestimmung der Zeitauflösung anhand des prompten J/Ψ Untergrunds

Gaussfunktionen in Rot, Gelb und Grün (gestrichelt), langlebige Komponente in Magenta (gestrichelt), Gesamtfunktion in Blau

Zeitauflosungsmodell nun auch für echte Daten bestimmt. Die Parameter sind in Abbildung 6.2 zusammen mit dem Fit gezeigt. Dabei ist die (gestrichelte) grüne, rote und gelbe Linie jeweils einer der drei Gaussfunktionen zuzuordnen, die Linie in magenta gehört zu der Exponentialfunktion, welche den langlebigen Untergrund beschreibt. Für die so ermittelte Auflösung ergibt sich ein Wert von $\Delta t = 43.38 fs$, der gut mit der Simulation übereinstimmt.

6.2 Methode 1: Der 2-dimensionale Fit

Bei dieser Vorgehensweise wird ein 2-dimensionaler Fit an die B^+ Massenverteilung und das Lebensdauerspektrum durchgeführt um Signal- und Untergrundereignisse zu separieren. Bei dem gleichzeitigen Fit an das Massen- und Lebensdauerspektrum werden die B^+ -Masse m_{B^+} und die Lebensdauer t_{B^+} als Observablen verwendet. Das Ziel ist es, 2-dimensionale Modelle für den Signal- und Untergrundanteil der Ereignisse aufzustellen und so das Zeitverhalten für Signal und Untergrund einzeln zu beschreiben. Aus der Beschreibung des Zeitverhaltens der Signalereignisse kann dann die Lebensdauer extrahiert werden. Die Methode wird als *extended unbinned maximum log-likelihood* Fit implementiert, d.h. es wird wieder eine Likelihood-Funktion konstruiert[7]:

$$\log(\mathcal{L}) = \sum_{i=0}^N \mathcal{P}(\vec{x}_i | \vec{\vartheta}) \quad (6.3)$$

Dabei ist N die gesamte Anzahl an rekonstruierten B^+ -Kandidaten nach der vollen Selektion und den Triggern, $\vec{x}_i = (m_{B^+}, t_{B^+})$ das Paar der jeweiligen Observablen und $\vec{\vartheta}$ die Detektorparameter, welche Akzeptanz und Auflösung beschreiben. Um den Untergrund vom Signal trennen zu können muss sich die Gesamtfunktion, mit der der Fit durchgeführt wird, schreiben lassen als:

$$F = N_{Sig} \cdot F_{Sig} + N_{Ug} \cdot F_{Ug} \quad (6.4)$$

Hierbei steht die Abkürzung *Sig* für die Signalereignisse und *Ug* für den Untergrund. N_{Sig} und N_{Ug} entsprechen der Normierung von Signal und Untergrund. Die Verteilungen für die Signal- und Untergrund Ereignisse F_{Sig} bzw. F_{Ug} separieren in den beiden Observablen und lassen sich schreiben als:

$$F_y(\vec{x}_i | \vec{\vartheta}) = F_y(m_{B^+}) \cdot F_y(t_{B^+}) \quad (6.5)$$

Nun müssen die Funktionen definiert werden, mit denen die B^+ -Massenverteilung und das Lebensdauerspektrum gefittet werden. Diese werden getrennt für Signal- und Untergrundanteil aufgestellt und zu der finalen Fitfunktion (6.4) zusammengesetzt.

- Massenverteilung : Die Massenverteilung der rekonstruierten Signal B^+ -Mesonen ist gaussförmig um einen Mittelwert μ . Für den Signalanteil wurde ein Fit mit der Summe zweier Gaussfunktionen mit gemeinsamen Mittelwert gewählt, für den Untergrund, der vor allem durch die Seitenbänder festgelegt wird, ein lineares Polynom:

$$F_{Sig}(m_{B^+}) = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{m_{B^+} - \mu}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (6.6)$$

$$F_{Ug}(m_{B^+}) = a_0 + a_1 \cdot m_{B^+} \quad (6.7)$$

- Lebensdauerverteilung : Für die Lebensdauerverteilung wird ein exponentieller Fit verwendet, der in 3 Komponenten aufgeteilt ist. Eine Komponente ist der Zerfall aller Signal B^+ -Mesonen mit der in Kapitel 5.2 bestimmten Akzeptanzfunktion, die anderen beiden beschreiben den Untergrund. Dabei wird zwischen dem kurzlebigen und langlebigen Untergrund unterschieden. Jede der drei Exponentialfunktionen wird mit dem Auflösungsmodell gefaltet, das auch hier aus der Summe dreier Gaussfunktionen besteht, deren Parameter auf die in Kapitel 6.1 bestimmten Werte festgesetzt werden. Damit gilt:

$$F_{Sig}(t_{reco}|\vec{\vartheta}) = [A \cdot \exp\left(-\frac{t_{echt}}{\tau_{B^+}}\right) \cdot (1 + \beta t_{echt})] \otimes Res(t_{echt}, t_{reco}) \quad (6.8)$$

$$F_{Ug}(t_{reco}|\vec{\vartheta}) = [f_{Uglang} \cdot \exp\left(-\frac{t_{echt}}{\tau_{Uglang}}\right) + f_{Ugkurz} \cdot \exp\left(-\frac{t_{echt}}{\tau_{Ugkurz}}\right)] \otimes Res(t_{echt}, t_{reco}) \quad (6.9)$$

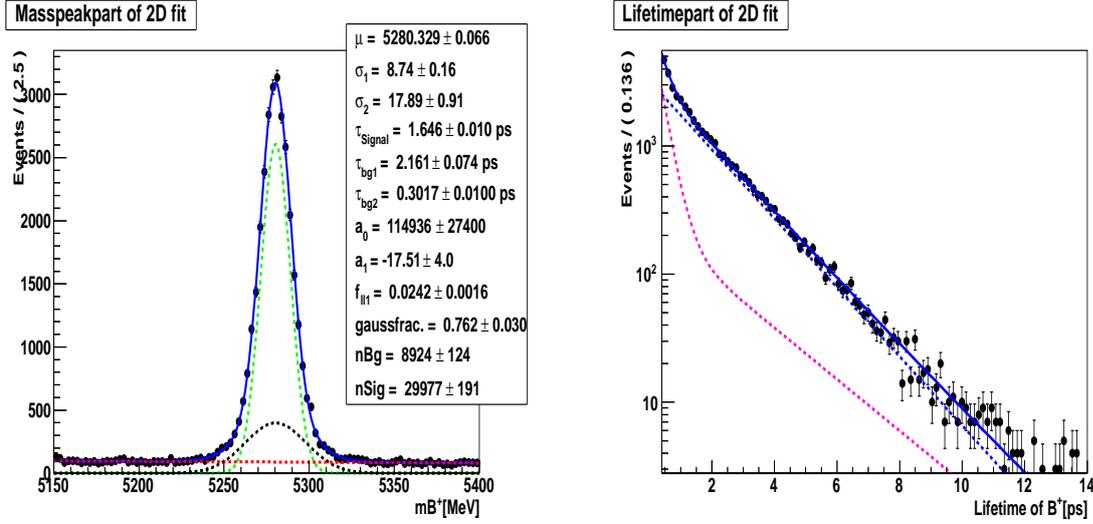
- Gesamte Fitfunktion : Die gesamte Fitfunktion setzt sich nun aus dem Signalteil und dem Untergrundteil zusammen zu (6.4):

$$F_{Sig}(t_{reco}, m_{B^+}|\vec{\vartheta}) = F_{Sig}(m_{B^+}) \cdot F_{Sig}(t_{reco}|\vec{\vartheta}) \quad (6.10)$$

$$F_{Ug}(t_{reco}, m_{B^+}|\vec{\vartheta}) = F_{Ug}(m_{B^+}) \cdot F_{Ug}(t_{reco}|\vec{\vartheta}) \quad (6.11)$$

Es werden dabei alle Parameter außer die des Auflösungsmodells $Res(t_{echt}, t_{reco})$ und der Akzeptanzfunktion (β -Faktor) zum anpassen freigelassen.

Abbildung 6.3 zeigt die Projektionen des 2-dimensionalen Fits an Massen- und Lebensdauerverteilung. Die magentafarbene, gestrichelte Linie im Lebensdauerfit ist dabei der Anteil des Untergrundes, der vom kurzlebigen Teil deutlich dominiert wird ($f_{Uglang} = 0.024 = 1 - f_{Ugkurz}$). Die blau gestrichelte Linie in diesem Spektrum zeigt



(a) Projektion des Massenpeakfits
 Gaussfunktionen in Grün und Schwarz,
 Untergrundpolynom in Rot (gestrichelt)

(b) Projektion des Lebensdauerfits im Bereich $t \in (0.3; 14)ps$, Untergrundzerfall in Magenta, Signalzerfall in Blau (gestrichelt)

Abbildung 6.3: Projektionen der beiden Teile des 2-dimensionalen Fits

den Anteil des Signal- B^+ Zerfalls. Der bestimmte Signalanteil an allen Ereignisse ist $\frac{nSig}{nSig+nBg} = 77\%$. Die extrahierte mittlere Lebensdauer der B^+ -Mesonen beträgt:

$$\tau_{B^+} = (1.646 \pm 0.010_{stat})ps$$

Alle Fitparameter sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Fitparameter	Ergebnis
μ	$5280.329 \pm 0.066 MeV$
σ_1	$8.74 \pm 0.16 MeV$
σ_2	$17.89 \pm 0.91 MeV$
τ_{Signal}	$1.646 \pm 0.010 ps$
τ_{Uglang}	$2.161 \pm 0.074 ps$
τ_{Ugkurz}	$0.302 \pm 0.010 ps$
a_0	114936 ± 27400
a_1	-17.51 ± 4.0
f_{Uglang}	0.0242 ± 0.0016
f_{Gauss1}	0.762 ± 0.030
N_{Ug}	8924 ± 124
N_{Sig}	29977 ± 191

Tabelle 6.1 : Ergebnisse des 2-dimensionalen Fits

6.3 Methode 2 : Bestimmung des Signalanteils mittels sWeights

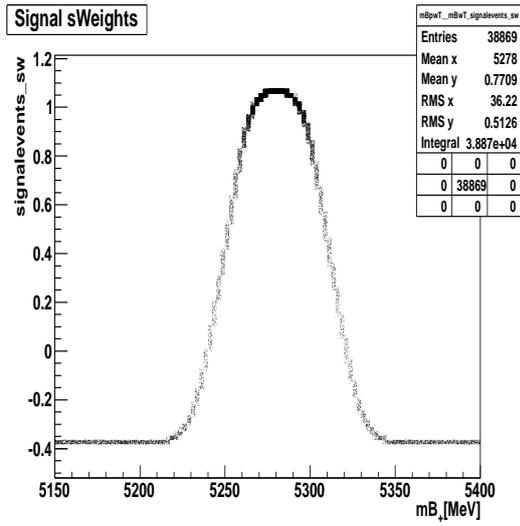
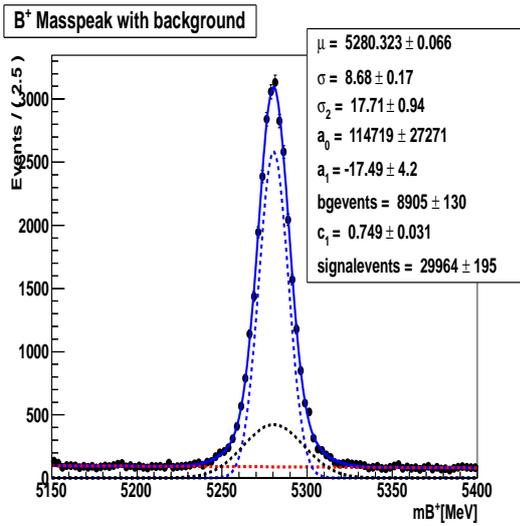
Die in Kapitel 6.1 bereits verwendete Technik der Neugewichtung des Lebensdauerspektrums mittels der sWeight-Methode kann auch verwendet werden, um den Untergrund in der Lebensdauerverteilung der B^+ -Mesonen zu unterdrücken. Dies entspricht genau dem umgekehrten Vorgehen zu 6.1, in dem alle Signalereignisse unterdrückt wurden um die Zeitauflösung anhand des prompten J/Ψ Untergrundes zu bestimmen. In diesem Kapitel wird die Gewichtung nun dazu eingesetzt, alle Untergrundereignisse aus dem Lebensdauerspektrum zu unterdrücken und damit den Fit des Lebensdauermodells (siehe Kapitel 3.2) an das gefilterte Spektrum, welches idealerweise nur noch Signalereignisse enthält, zu ermöglichen.

Dazu muss zunächst wieder die B^+ -Massenverteilung gefittet werden, wozu das Gleiche Modell wie in Kapitel 6.1 benutzt wird. Die Signalereignisse werden also durch die Summe zweier Gaussfunktionen, die Untergrundereignisse durch ein lineares Polynom modelliert (siehe Funktion 6.1). Um die Gewichtung zu erhalten wird wieder ein *extended unbinned maximum log-likelihood* Fit gewählt. Das Ergebnis und die daraus resultierenden sWeights für die Signalvents sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Man erkennt das B^+ -Ereignisse mit einer Masse nahe dem Zentrum der gaussförmigen Verteilung ein sehr hohes Signal-Gewicht haben und damit auch eine große Wahrscheinlichkeit besitzen, dass sie Signalereignisse sind, verglichen mit Ereignissen die weiter entfernt vom Peak liegen und daher mit großer Wahrscheinlichkeit zum Untergrund gehören. Die sWeights werden nun verwendet um das Lebensdauerspektrum der B^+ -Mesonen neu zu Gewichten und den Untergrund zu entfernen. Nach diesem Schritt kann dann das Lebensdauermodell an die verbliebenen Signalereignisse gefittet werden.

Abbildung 6.5 a) zeigt die Anteile der Lebensdauerverteilung. In blau sind die mittels der sWeight Methode als Untergrund klassifizierten Ereignisse gezeigt, in schwarz die Signalereignisse und in rot die gesamte Verteilung, welche sich ergibt wenn man die Beiden addiert, dargestellt. In 6.5 b) wird der *unbinned maximum log-likelihood* Fit im Intervall $t \in [0.3; 10]ps$ an die Verteilung der echten B^+ -Zerfälle gezeigt. Dabei sind alle Parameter die in den vergangenen Abschnitten bestimmt wurden (die Akzeptanzfunktion mit β -Faktor aus Kapitel 5.2 und das Auflösungsmodell aus Kapitel 6.1) fixiert und nur die Lebensdauer τ_{B^+} ist als einziger Fitparameter frei. Die so bestimmte mittlere Lebensdauer für B^+ -Mesonen ist:

$$\tau_{B^+} = (1.647 \pm 0.011_{stat})ps$$

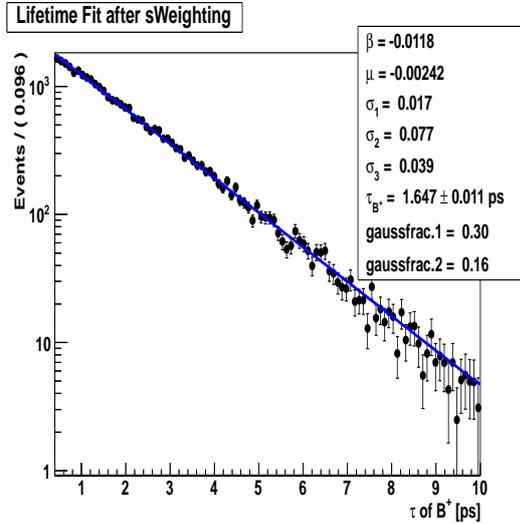
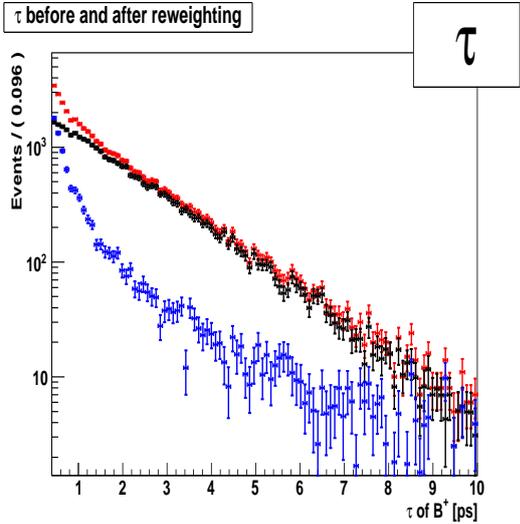
Die Ergebnisse der Fits aus beiden Methoden (6.2 und 6.3) für τ_{B^+} sind dabei kompatibel.



(a) Fit an den Massenpeak, Gaussfunktionen in Schwarz und Blau, Untergrundpolynom in Rot (gestrichelt)

(b) Signalgewichtung

Abbildung 6.4: Erstellen der sWeights für B^+ -Signalereignisse



(a) Komponenten der Lebensdauerverteilung, Untergrund in Blau, Signal in Schwarz, Gesamtverteilung in Rot

(b) Fit an die Signalereignisse

Abbildung 6.5: Neugewichtete Lebensdauerverteilung und Fit

6.4 Fittervalidierung anhand von MC Toy Studien

Um die Stabilität der 2-dimensionalen Fitmethode zu überprüfen, wurden in diesem Abschnitt sogenannte *Toy Studien* durchgeführt. Dabei wird anhand der aus dem Fit in Kapitel 6.2 gewonnenen 2-dimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung $F((t_{B^+}|m_{B^+}) = N_{Sig} \cdot F_{Sig} + N_{Ug} \cdot F_{Ug}$, mit allen gefitteten Parametern ein neuer Satz an Ereignissen erzeugt. Dieser Datensatz enthält die gleiche Anzahl an Einträgen, wie der ursprünglich zum Fitten verwendete Satz aus realen LHCb Daten in Kapitel 6.2, jedoch basiert die Verteilung vollständig auf der Fitfunktion. Die genaue Position der einzelnen Einträge (Ereignisse) wird dabei zufällig erzeugt, so dass mehrere Datensätze die auf der selben Fitfunktion mit den selben Parameter beruhen, trotzdem leicht unterschiedlich sind. Wenn nun die Funktion, welche zum Erzeugen der *Toy* Daten benutzt wurde an diese Datensätze gefittet wird, so ist zu erwarten dass alle Fitparameter und deren statistische Fehler reproduziert werden, falls die Fitmethode korrekt implementiert ist und die Größe der Datensätze mit der des ursprünglichen realen Satzes übereinstimmt (zweites gilt nur für die Fehler).

Um quantitative Aussagen darüber treffen zu können, werden eine Vielzahl solcher Datensätze (Toys) erzeugt und gefittet. Dabei erwartet man eine Normalverteilung der Fitparameter um ihren Eingabewert (der Wert mit dem alle Datensätze erzeugt werden). Weiter kann die Zuverlässigkeit des statistischen Fehlers der Parameter überprüft werden, da die gefitteten Werte des jeweiligen Parameters in 67% der Fälle innerhalb einer Standardabweichung um den Eingabewert liegen sollte [13]. Daraus ergibt sich, dass die Verteilung $\frac{x-x_0}{\Delta x}$, wobei x der gefittete Parameterwert, x_0 der Eingabewert und Δx der statistische Fehler von x ist, gaussförmig mit der Einheitsbreite und um null zentriert sein sollte. Diese Verteilung wird allgemein als *Pull Verteilung* bezeichnet.

In dieser Arbeit wurden 1.000 Toys erzeugt und gefittet, wobei für jeden Fitparameter die Verteilung des gefitteten Wertes, die Verteilung dessen Fehlers und die sich daraus ergebende Pull Distribution erstellt wurde. Die Pull Verteilungen werden dabei mit einer einfachen Gaussfunktion gefittet, um ihre Breite und den Mittelwert zu bestimmen. Abbildung 6.6 a) und b) zeigt die Verteilungen des Fitparameters für die Lebensdauer der echten B^+ -Mesonen, c) dessen Pull Verteilung. Die Werte für den Mittelwert und die Breite der Pull Verteilungen aller Fitparameter sind in Tabelle 6.2 zusammengestellt.

Einige Pull Mittelwerte weichen mehr als 3σ von Null ab (z.B. τ_{Signal}), N_{Ug} weicht sogar mehr als 5σ ab. Dies sind Hinweise auf eine systematische Unsicherheit in der Fitmethode, die allerdings klein ist gegenüber anderen Systematiken, welche in Kapitel 7 noch diskutiert werden. Die Zentralwerte für den Pull Mittelwert weichen in fast allen Fällen nicht mehr als 0.1 von Null ab. Betrachtet man diesen Wert für τ_{Signal} und beachtet den statistischen Fehler von $\Delta\tau_{sys} = 0.010ps$ dann ergibt sich aus der Verteilung $\frac{x-x_0}{\Delta x}$ eine systematische Unsicherheit von $\Delta\tau_{Fit} = 0.001ps$, was sehr gering ist.

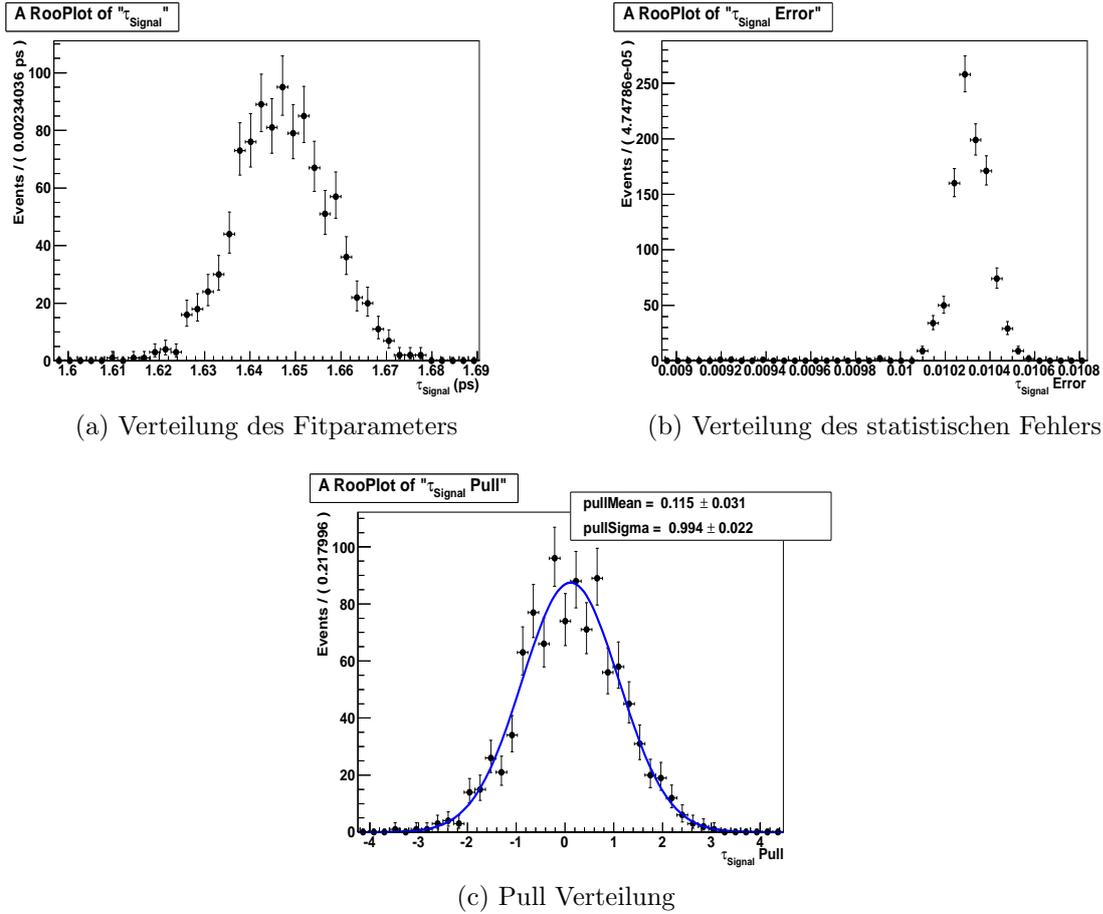


Abbildung 6.6: Verteilungen aus den Toy Studien für τ_{Signal}

Parameter	Pull μ	Pull σ
τ_{Signal}	0.115 ± 0.031	0.994 ± 0.022
τ_{bg1}	0.093 ± 0.032	0.999 ± 0.022
τ_{bg2}	-0.099 ± 0.030	0.959 ± 0.021
f_{ll1}	0.120 ± 0.031	0.966 ± 0.022
μ	0.039 ± 0.032	1.020 ± 0.023
σ_1	0.052 ± 0.032	1.012 ± 0.023
σ_2	0.014 ± 0.034	1.078 ± 0.024
gaussfrac.	0.125 ± 0.035	1.105 ± 0.025
a_0	0.054 ± 0.031	0.921 ± 0.025
a_1	0.109 ± 0.033	0.897 ± 0.024
N_{Sig}	0.128 ± 0.031	0.973 ± 0.022
N_{Ug}	-0.185 ± 0.033	1.034 ± 0.023

Tabelle 6.2 : Ergebnisse der Toy Studien

7 Abschätzung der systematischen Fehler

In diesem Kapitel werden die systematischen Fehler, die die Messung der mittleren Lebensdauer für B^+ -Mesonen in dieser Arbeit beeinflussen, diskutiert. Den größten Einfluss hat mit Abstand die Akzeptanzfunktion und damit der β -Faktor, da dieser durch ein Artefakt des Detektors überhaupt erst nötig wird. Würde kein Nachlassen der Nachweiseffizienz des Detektors bei höheren Lebensdauern auftreten, könnte man ihn ignorieren und auf Null setzen. Eine Abschätzung des Fehlers, der durch den Faktor entsteht, ist durch seine Variation möglich.

Ebenfalls Quelle von systematischen Fehlern ist das Modell, mit welchem die Massenverteilung des B^+ beschrieben wird. Hier gibt es mehrere Möglichkeiten das Massenspektrum zu beschreiben und keine von ihnen ist besonders ausgezeichnet. Denkbare wäre anstelle des linearen Ansatzes für den Untergrund (Kapitel 6) auch ein quadratisches Polynom oder eine Exponentialfunktion. Diese würde den Untergrund in den Seitenbändern ebenfalls gut beschreiben, im Bereich des Signals aber zu leicht unterschiedlichen Untergrundvorhersagen führen. Für den Signalteil kann auch der Fit mit der Summe aus drei Gaussfunktionen gewählt werden. Diese Fehler lassen sich durch Implementierung verschiedener Modelle und deren Auswirkung auf die bestimmte Lebensdauer abschätzen.

Da die Lebensdauer der B^+ anhand ihrer Zerfallslänge bestimmt wird, geht die Unsicherheit in der Positionsbestimmung des sekundären Vertex direkt in die Lebensdauer ein und muss daher ebenfalls berücksichtigt werden. Sie setzt sich im wesentlichen aus der Unsicherheit der Positionsbestimmung auf der Z-Achse zusammen, da die B-Mesonen Trajektorien größtenteils in Richtung der Strahlachse liegen (Kapitel 2.1).

Zuletzt muss auch die systematische Unsicherheit in der Impulsbestimmung des B^+ betrachtet werden, da diese Größe ebenfalls direkt in die Berechnung der Lebensdauer einfließt.

7.1 Modell der Massenverteilung

Um die Auswirkung verschiedener Modelle zu studieren wurde für den Untergrund ein quadratisches Polynom, sowie (unabhängig davon) eine Exponentialfunktion gewählt. Das Gesamtmodell für die Massenverteilung ergibt sich damit jeweils zu:

$$M(m_{B^+}) = N_{Sig} \cdot F_{Sig}(m_{B^+}) + N_{Ug} \cdot [a_0 + a_1 \cdot m_{B^+} + a_2 \cdot m_{B^+}^2] \quad (7.1)$$

$$M(m_{B^+}) = N_{Sig} \cdot F_{Sig}(m_{B^+}) + N_{Ug} \cdot A \cdot \exp(c \cdot m_{B^+}) \quad (7.2)$$

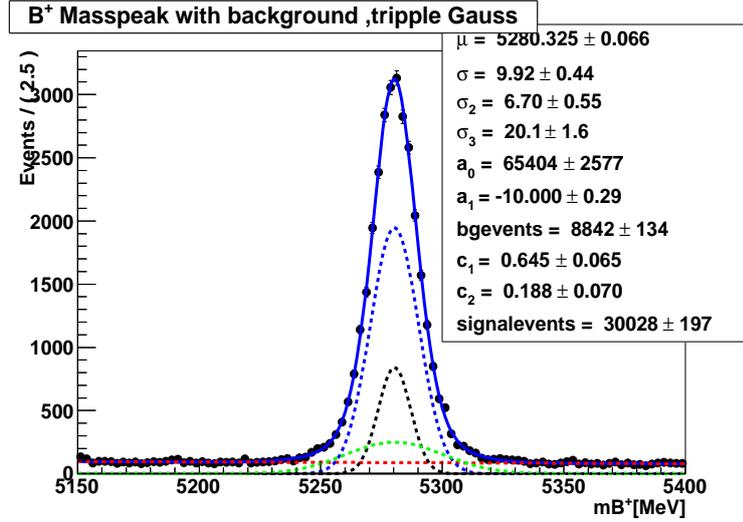


Abbildung 7.1: Fit der Massenverteilung mit einem dreifach-Gauss für den Signalteil
Gaussfunktionen in Blau, Schwarz und Grün , Untergrundpolynom
in Rot (gestrichelt)

Dabei ist $F_{Sig}(m_{B^+})$ das aus Kapitel 6 bekannte Modell mit der Summe aus zwei Gaussfunktionen. Zusätzlich wurde auch die Auswirkung betrachtet, die eine Änderung des Signalmodelles zu der Summe aus drei Gaussfunktionen bewirkt. Das zugehörige Gesamtmodell, in dem $F_{Ug}(m_{B^+})$ das bekannte Modell mit einem linearen Polynom ist, ergibt sich zu:

$$M(m_{B^+}) = N_{Sig} \cdot \left[\sum_{i=1}^3 \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{m_{B^+} - \mu}{\sigma_i}\right)^2\right) \right] + N_{Ug} \cdot F_{Ug}(m_{B^+}) \quad (7.3)$$

Abbildung 7.1 zeigt den Fit des Massenpeaks mit der Summe aus drei Gaussfunktionen. Die bestimmte Anzahl der Signal- und Untergrundereignisse stimmt innerhalb der Fehlergrenzen mit den Werten überein, die man aus dem Fit mit zwei Gaussfunktionen (Abbildung 6.4a)) erhält. Die Abweichungen zu dem Wert für τ_{B^+} aus Kapitel 6 konnte berechnet werden, indem jeweils das modifizierte Massenmodell für die Bestimmung der sWeight verwendet wurde und dann der Lebensdauerfit an das gewichtete Spektrum wiederholt wurde (Methode 2), bzw. der zwei dimensionale Fit mit dem neuen Massenmodell durchgeführt wurde (Methode 1). Die erhaltenen Abweichungen sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Modelländerung	Methode 1	Methode 2
quadratischer Untergrund	$\Delta\tau < 10^{-4}ps$	$\Delta\tau < 10^{-4}ps$
exponentieller Untergrund	$\Delta\tau = 0.001ps$	$\Delta\tau = 0.001ps$
dreifach-Gauss Signal	$\Delta\tau = 0.001ps$	$\Delta\tau = 0.001ps$

7.2 Akzeptanzfunktion (β -Faktor)

Eine genaue Fehlerabschätzung der Akzeptanzfunktion und damit des β -Faktors ist schwierig, da dieser nicht auf den eigentlichen Daten, sondern anhand einer MC-Simulation bestimmt wurde. Die Bestimmung des β -Faktors mit Hilfe realer Daten ist Gegenstand von Studien, die derzeit in der LHCb-Gruppe Heidelberg durchgeführt werden. Ihre Erörterung und Diskussion würde jedoch den Umfang dieser Bachelorarbeit erheblich ausdehnen, so dass dies im hier gegebenen Rahmen schlicht nicht möglich ist. Durch Gruppeninterne Gespräche ist jedoch bekannt, dass die Größenordnungen mit dem in dieser Arbeit bestimmten Wert vergleichbar sind. Als eine vernünftige Abschätzung des systematischen Fehlers wird aufgrund der Unsicherheit für den genauen Wert des β -Faktors der halbe Wert angenommen $\Delta\beta_{sys} = 0.5 \cdot \beta$. Daraus ergibt sich in beiden Methoden eine Änderung der mittleren Lebensdauer von $\Delta\tau = 0.0175ps$, was mit Abstand die größte systematische Unsicherheit ist.

7.3 Zerfallslänge

Die Lebensdauer der B-Mesonen wird mithilfe des Abstandes von primären- und sekundären Vertex im VELO gemessen. Die Genauigkeit mit der dieser Abstand bekannt ist hängt von der Genauigkeit in der Kenntnis der z-Skala des LHCb Detektors ab. Die Unsicherheit der Position entlang der z-Achse beträgt laut eines Vergleichs zwischen Präzisionsmessung und Bestimmung der Abstände bei der Installation $50\mu m$. Weitere Faktoren für die Ungenauigkeit sind die Anzahl der Spuren, welche vom sekundären Vertex ausgehen (für B^+ drei), sowie die Anzahl an Modulen welche im VELO getroffen werden können und die Tatsache dass es zu Hits in beiden Hälften des VELO kommen kann. Berücksichtigt man diese Faktoren und beachtet weiter, dass der B^+ Impuls auch eine transversale Komponente hat und daher die Position des sekundären Vertex in x- und y-Richtung auch eine Rolle spielt, kann man laut [7] einen Fehler für die Zerfallslänge von $\sigma_s = 1 \cdot 10^{-3} = 0.1\%$ annehmen. Diese Unsicherheit setzt sich gemäß

$$t_{echt} = \frac{s \cdot m_B}{|\vec{p}_B| \cdot c}$$

direkt in eine Ungenauigkeit der Lebensdauer von $\Delta\tau = 0.1\% \cdot \tau = 0.0017ps$ um.

7.4 Impulsskala

Die Impulsskala des LHCb Detektors ist bis auf eine Genauigkeit von $(0.05 \pm 0.02)\%$ kalibriert [14]. Wenn man den Effekt der Unsicherheit der Impulsskala auf die rekonstruierte invariante B^+ -Masse vernachlässigt, setzt sich dieser Fehler direkt in einen Fehler für τ um. Um den Effekt auf die B^+ -Masse zu berücksichtigen

wären weitere Analysen nötig, die wiederum den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würden. Es wird jedoch angenommen, dass der Effekt klein ist gegenüber der einfachen Unsicherheit durch die Impulsskala [7]. Damit ergibt sich eine Unsicherheit der Lebensdauer von $\Delta\tau = 0.0008ps$.

7.5 Zusammenstellung der systematischen Fehler

Alle systematischen Unsicherheiten, die in diesem Abschnitt diskutiert wurden, sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst. Da sich die Fehler für beide in Kapitel 6 verwendeten Methoden zur Lebensdauerbestimmung nicht unterscheiden, werden sie auch nicht getrennt betrachtet, es wird jedoch ein zusätzlicher systematischer Fehler von $\Delta\tau_{Fit} = 0.001ps$ für den 2-dimensionalen Fit angenommen (siehe Kapitel 6.4). Um den gesamten systematischen Fehler zu bestimmen wurden die Einzelfehler quadratisch addiert.

Fehlerquelle	systematischer Fehler
Massenmodell	$\Delta\tau = 0.001ps$
Zerfallslänge	$\Delta\tau = 0.0017ps$
Impulsskala	$\Delta\tau = 0.0008ps$
Akzeptanzfunktion	$\Delta\tau = 0.0175ps$
gesamter systematischer Fehler	$\Delta\tau_{Gesamt} = 0.018ps$

8 Zusammenfassung der Ergebnisse

In dieser Arbeit wurde die mittlere Lebensdauer von B^+ -Mesonen mithilfe von Daten des LHCb Detektors aus dem Jahr 2011 bei 7 TeV Schwerpunktsenergie entsprechend einer integrierten Luminosität von ca. $1fb^{-1}$ bestimmt. Dafür mussten zunächst alle Parameter des Lebensdauermodells aus Kapitel 3.2 berechnet werden um den späteren Fit an das Lebensdauerspektrum der B^+ vorzubereiten.

Zunächst wurde in Kapitel 5 die Akzeptanzfunktion für $B^+ \rightarrow J/\Psi K^+$ anhand einer MC-Simulation bestimmt, deren Nutzung durch den Vergleich der simulierten und echten Daten in Kapitel 4 gerechtfertigt wurde. Dafür musste auch die Zeitauflösung der Daten aus der MC-Simulation berechnet werden. Danach wurde dann das Zeitauflösungsmodell mithilfe des prompten J/Ψ -Untergrunds für die realen Daten bestimmt (Kapitel 6.1). Damit waren alle Detektorparameter des Fit-Modells bekannt und der Lebensdauerfit konnte durchgeführt werden, wobei zwei unterschiedliche Methoden zum Einsatz gekommen sind. Kapitel 6.2 beschäftigt sich mit der Implementierung eines 2-dimensionalen Fits, der die B^+ Masse und Lebensdauer simultan beschreibt und damit Signal und Untergrund getrennt voneinander parametrisiert um die echte Lebensdauer der Mesonen zu extrahieren. In 6.3 dagegen wird durch die sWeight Technik zunächst der Untergrund aus dem Lebensdauerspektrum unterdrückt und danach ein vergleichsweise simpler, 1-dimensionaler Fit der echten Lebensdauer durchgeführt. Die Ergebnisse aus beiden Methoden sind vollkommen kompatibel. Der für die 2-dimensionale Methode verwendete Fitter wurde anschließend in Kapitel 6.4 noch anhand von Toy Studien auf Stabilität und Zuverlässigkeit der statistischen Fehler untersucht. Dabei ergaben sich Hinweise auf eine mögliche systematische Unsicherheit in der Fitmethode, die jedoch klein ist. Zuletzt wurden in Kapitel 7 noch mögliche systematische Fehlerquellen untersucht, wobei festgestellt werden konnte, dass der systematische Fehler vollständig durch die Ungenauigkeit der Akzeptanzfunktion (β -Faktor) dominiert ist.

Es zeigt sich, dass auch im gesamten Fehler, welcher sich aus den statistischen und systematischen Unsicherheiten zusammensetzt, der β -Faktor der größte Beitrag ist. Die Lebensdauermessung ist dadurch in Hinsicht auf ihre Präzision durch diese Systematik limitiert, der statistische Fehler ist um einen Faktor von 1.6 bzw. 1.9 (abhängig von der betrachteten Methode) kleiner. Das bessere Verständnis und die bessere Beschreibung der Akzeptanz sollte daher ein Hauptaugenmerk weiterer Studien zur Lebensdauerbestimmung sein.

Methode	gemessene Lebensdauer	PDG Wert
2-dimensionaler Fit	$\tau = 1.646 \pm 0.010_{stat} \pm 0.019_{syst}ps$	$\tau_{PDG} = 1.641 \pm 0.008ps$
sWeights	$\tau = 1.647 \pm 0.011_{stat} \pm 0.018_{syst}ps$	"

Literatur

- [1] lhcb public web site : <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>
- [2] Roadmap for selected key measurements of LHCb, LHCb-PUB-2009-029 16 February 2010
- [3] The LHCb-Collaboration. LHCb Outer Tracker technical design report, CERN-LHCC/2001-024
- [4] The LHCb-Collaboration. LHCb Inner Tracker design report, CERN-LHCC/2002-029
- [5] The LHCb-Collaboration. LHCb Calorimeters technical design report, CERN-LHCC/2000-036.
- [6] JaxoDraw: A graphical user interface for drawing Feynman diagrams, Computer Physics Communications Volume 161, Issues 1-2, 1 August 2004, Pages 76-86
- [7] Selections and lifetime measurements for exclusive $B \rightarrow J/\Psi X$ decays with $J/\Psi \rightarrow \mu\mu$ with 2010 data , LHCb-ANA-2011-001 March 31, 2011
- [8] web site der LHC Statistik : <https://lhcb-statistics.web.cern.ch/LHC-Statistics/>
- [9] CERN Kollaborations-Plattform : <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCb/TrackingEffRatio>
- [10] John Aldrich: R. A. Fisher and the Making of Maximum Likelihood 1912-1922. In: Statistical Science. Band 12, Nr. 3, S. 162-176, 1997
- [11] Implementierte Faltung von Funktionen : <http://root.cern.ch/root/html/RooFFTConvPdf.html>
- [12] M. Pivk and F. Le Diberder, sPlot: a statistical tool to unfold data distributions, 1128 arXiv:physics/04020834
- [13] Weisstein, Eric W. "Standard Deviation." From MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/StandardDeviation.html>
- [14] M. Needham, "Momentum scale calibration with first LHCb data", LHCb-INT-2011-xx

Anhang

Angewendete Cuts für MC-Simulation und reale Daten [7]:

Decay mode	Cut parameter	Stripping value	Final value
$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$\Delta \ln \mathcal{L}_{\mu\pi}$	> 0	> 0
	$\chi_{\text{track}}^2/\text{nDoF}(\mu)$	< 5	< 4
	$\min(p_T(\mu^+), p_T(\mu^-))$	-	$> 0.5 \text{ GeV}/c$
	$\chi_{\text{vtx}}^2(J/\psi)$	< 16	< 11
	$ M(\mu^+\mu^-) - M(J/\psi) $	$< 80 \text{ MeV}/c^2$	$< 80 \text{ MeV}/c^2$
	$ M_{\text{reco}}(J/\psi) - M(J/\psi) /\sigma_{m_{J/\psi}}$	-	$< 1.4 \times 3$
	J/ψ mass constrained to PDG value		

Decay mode	Cut parameter	Stripping value	Final value
K^+	$\Delta \ln \mathcal{L}_{K\pi}$	> -2	> 0
	$\Delta \ln \mathcal{L}_{Kp}$	-	> -2
	$\chi_{\text{track}}^2/\text{nDoF}(K^+)$	< 5	< 4
	$p_T(K^+)$	$> 1 \text{ GeV}/c$	$> 1 \text{ GeV}/c$
	$p(K^+)$	-	$> 10 \text{ GeV}/c$
$B^+ \rightarrow J/\psi K^+$	$M(B^+)$	$\in [5100, 5550] \text{ MeV}/c^2$	$\in [5100, 5450] \text{ MeV}/c^2$
	$\chi_{\text{vtx}}^2(B^+)/\text{nDoF}$	< 10	< 10
	$\chi_{\text{DTF}(B^+PV)}^2(B^+)/\text{nDoF}$	-	< 5
	$\chi_{\text{IP}}^2(B^+)/\text{nDoF}$	-	< 25

- $\Delta \ln \mathcal{L}_{xy}$ bezeichnet die (logarithmische) Differenz der Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete Teilchen x tatsächlich ein x ist und nicht ein y. Je größer dieser Wert ist desto wahrscheinlicher ist es tatsächlich ein x zu betrachten, daher werden alle Ereignisse mit einer zu kleinen Differenz dieser Wahrscheinlichkeiten weggeschnitten.
- χ_{track}^2 beschreibt die Güte der Spurrekonstruktion. Je näher der Wert an 1 liegt desto besser konnte die Spur des Teilchens rekonstruiert werden. Ereignisse mit

Teilchen mit einer zu ungenau rekonstruierten Spur (zu hoher Wert) werden weggeschnitten.

- χ_{vtx}^2 ist ein Maß für die Güte der Bestimmung der Vertices der jeweiligen Teilchen. Ereignisse die Teilchen mit einem zu ungenau bestimmten Vertex enthalten werden weggeschnitten.
- χ_{DTF}^2 dieser Wert gibt die Güte des Fits an, welcher die Trajektorien und Impulse der Zerfallsprodukte bestimmt und auf das ursprüngliche B^+ zurückführt.
- χ_{IP}^2 Beschreibt den Impact Parameter des B^+ im Bezug auf den primären Vertex. Es muss beachtet werden das dieser Wert nicht unabhängig ist und gemäß $\chi_{DTF}^2 \approx \chi_{IP}^2 + \chi_{vtx}^2$ mit den anderen beiden χ^2 -Werten korreliert ist [7].
- M, p und p_t beschreiben Masse, Gesamtimpuls und Transversalimpuls des jeweiligen Teilchens

Erklärung:

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 3. August 2012