

Vergleich der Skalierungsmethoden des ATLAS-Level-2-Trigger mit Hilfe von Monte Carlo-Studien

Bachelor-Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science
(B.Sc.)



vorgelegt von
Uwe Mockenhaupt

November 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	LHC und ATLAS-Detektor	6
2.1	Der Large Hadron Collider	6
2.2	Das ATLAS-Experiment	8
3	Triggersystem des ATLAS-Detektors	16
3.1	Der Level-1-Trigger	17
3.2	Der High Level Trigger	19
3.3	Das HLT-Triggermenü	21
3.4	Der Myon-Trigger im HLT	22
4	Methodik und Realisierung der MC-Datenanalyse	24
4.1	Methodik der Analyse	24
4.2	Ereignisgenerierung	25
4.3	Realisation der L1- und L2-Triggerobjekte	26
4.4	Simulation des L1-Triggers	28
4.5	Simulation des L2-Triggers und der betrachteten Skalierungsmethoden	29
4.6	Erstellen der Häufigkeitsverteilungen	32
5	Analyse der Skalierungsmethoden	33
5.1	Bestimmung der Merkmale der Häufigkeitsverteilungen	33
5.1.1	L2_2mu4-Triggerkette	34
5.1.2	L2_mu4mu6-Triggerkette	38
5.2	Effizienzen der simulierten Triggerketten	39
5.2.1	Effizienzen der L2_2mu4-Triggerkette	40
5.2.2	Effizienzen der L2_mu4mu6-Triggerkette	43
5.3	Änderung der relative Breite aufgrund der Skalierung	46
5.3.1	L2_2mu4-Triggerkette	46
5.3.2	L2_mu4mu6-Triggerkette	52
6	Zusammenfassung	57
A	Häufigkeitsverteilungen am Eingang der L2-Triggerketten	61
B	Häufigkeitsverteilungen L2_mu4mu6	62

1 Einleitung

Seit November 2009 sind der Large Hadron Collider (LHC) und die daran befindlichen Experimente in Betrieb. Das ATLAS-Experiment ist eines der großen am LHC aufgebauten Universalexperimente. Zu seinen Zielen gehört die Bestätigung der aus dem Standardmodell der Teilchenphysik (SM) folgenden Vorhersagen. Wie beispielsweise das Higgs-Boson, dessen Entdeckung im Juli 2012 dem ATLAS-Experiment und dem CMS-Experiment, dem zweiten großen Universalexperiment am LHC, gelang. Ein weiteres Ziel des ATLAS-Experiments ist die Suche nach Neuer Physik, also physikalischen Phänomenen, die mit dem SM nicht erklärbar sind. Bei der Suche nach Neuer Physik gilt der Zerfallskanal $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ als besonders vielversprechend. Dieser Zerfallskanal ist im SM stark unterdrückt. Sein Verzweigungsverhältnis wird durch das SM zu $\text{BR}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-9}$ [1] vorhergesagt.

Die B-Physik-Arbeitsgruppe der Universität Siegen nimmt an der Suche nach diesem sehr seltenen Zerfall teil. Um in der Analyse die systematischen Unsicherheiten zu minimieren, wird das Verzweigungsverhältnis relativ zu dem Verzweigungsverhältnis der Kanals $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ bestimmt. Die der Analyse zugrundeliegenden Daten wurden im Jahr 2012 mit dem ATLAS-Detektor gewonnen. Die verwendeten Kollisionsdaten wurden hauptsächlich durch die Di-Myon-Triggerketten vom Triggersystem des ATLAS-Detektors ausgewählt.

Aufgrund der hohen Luminosität des LHCs und der Beschränkung der im Datennahmesystem zur Verfügung stehenden Bandbreite muss für einige dieser Triggerketten ein Skalierungsfaktor gesetzt werden, der die Anzahl der von dieser Triggerkette akzeptierten Ereignisse um einen bestimmten Faktor reduziert.

Ziel dieser Arbeit ist es, Einflüsse verschiedener Skalierungsmethoden im Level-2-Trigger des ATLAS-Detektors zu untersuchen.

In Kapitel 2 dieser Arbeit wird der Aufbau des ATLAS-Detektors während der ersten Datennahmephase (Run1) von November 2009 - Februar 2013 dargestellt. Seine Subdetektoren und deren Bestandteile, sowie die dabei genutzten Messverfahren werden kurz beschrieben.

Kapitel 3 beschreibt ausführlich das Triggerkonzept, mit dem während Run1 die Datenrate des ATLAS-Experiments begrenzt wurde. Dabei wird besonderes Augenmerk auf den Myon-Trigger und die darin genutzten Algorithmen gelegt, da diese zentraler Bestandteil dieser Arbeit sind. Es wird das zur Steuerung des ATLAS- Triggers genutzte Triggermenü erklärt, sowie der prinzipielle Aufbau der im Triggermenü zusammengefassten Triggerketten beschrieben.

Die Methodik der vorliegenden Analyse der Skalierungsmethoden im Level-2-Trigger wird in Kapitel 4 vorgestellt. Weiterhin wird dort das verwendete Verfahren zur Generierung von Pseudoereignissen, sowie die Simulation der benötigten Triggerobjekte und Triggerketten erklärt.

In Kapitel 5 wird untersucht, ob die betrachteten Skalierungsmethoden zu der durch den gesetzten Skalierungsfaktor geforderten Effizienzänderung führen und wie groß ihr Einfluss auf den Fehler der von der Triggerkette akzeptierten Ereignisanzahl ist.

2 LHC und ATLAS-Detektor

Am Europäischen Forschungszentrum für Teilchenphysik CERN in der Nähe von Genf, befindet sich in einem 26,7 km langen, ringförmigen Tunnel der Large Hadron Collider (LHC). In ihm werden in zwei getrennten Strahlröhren Pakete von Protonen in entgegengesetzten Richtungen beschleunigt. An vier Wechselwirkungspunkten kreuzen sich diese Strahlen und die Protonen können miteinander kollidieren.

2.1 Der Large Hadron Collider

Um möglichst hohe Kollisionsenergien zu erreichen, werden die Protonen vor Einschuss in den LHC durch eine Reihe von Vorbeschleunigern geführt, in denen sie sukzessive immer weiter an Energie gewinnen. Sie verlassen Linac2 mit 50 MeV, nach Passieren des Proton Synchrotron Booster (PBS) ist ihre Energie auf 1,4 GeV angewachsen, darauf folgt das Proton Synchrotron (PS), welches sie mit 25 GeV verlässt, um schließlich im Super Proton Synchrotron (SPS) auf die für den LHC benötigten Einschubenergie von 450 GeV beschleunigt zu werden. In der letzten geplanten Ausbaustufe des LHC sollen die Protonen dann in den beiden Strahlröhren des LHC auf bis zu 7 TeV beschleunigt werden, wodurch Proton-Proton-Kollisionen mit einer Schwerpunktsenergie von bis zu $\sqrt{s} = 14$ TeV möglich werden [2]. Diese Schwerpunktsenergie wurde bisher noch nicht erreicht. Nach einer beinahe zwei Jahre dauernden Betriebspause, in der der LHC aufgerüstet wurde, ist Anfang 2015 eine Schwerpunktsenergie von 13 TeV erreicht worden.

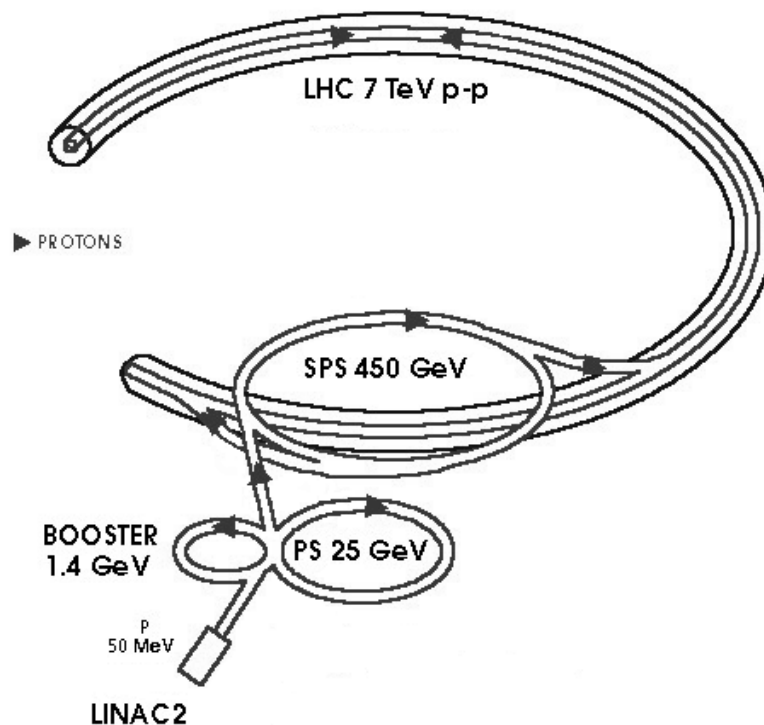


Abbildung 1: Die Vorbeschleunigerkette am LHC [2]

Damit die Protonen bei dieser Energie auf der gewünschten Bahn bleiben, werden 1232 supraleitende Dipolmagnete mit Feldstärken von bis zu 8,33 T benötigt. Diese Feldstärken sind nur erreichbar, wenn die Dipolmagnete mit suprafluidem Helium auf 1,9 K gekühlt werden. Jeder der beiden Strahlen besteht bei maximaler Füllung des LHC aus 2808 Paketen mit im Mittel je $1,15 \cdot 10^{11}$ Protonen. In den vier Wechselwirkungspunkten durchdringen sich die gegenläufigen Protonenstrahlen und die Protonen kollidieren miteinander [3].

Die erwartete Kollisionsrate \dot{N}_K wird durch das Produkt aus Luminosität L des Beschleunigers und Wechselwirkungsquerschnitt σ des Prozesses bestimmt:

$$\frac{dN_K}{dt} = L\sigma.$$

Die Luminosität des Beschleunigers wird durch:

$$L = nf \frac{N_1 N_2}{A}$$

bestimmt, dabei bezeichnet n die Anzahl der Protonen-Pakete pro Strahl, f die Rate der Stahldurchdringungen, N_1 und N_2 die Anzahl Protonen pro Paket in den beiden Strahlen und A die Querschnittfläche der Pakete.

Ist der LHC mit der maximalen Anzahl von Protonenpaketen gefüllt, so durchdringen sich alle 25 ns die gegenläufigen Protonenstrahlen. Im Mittel kommt es bei jeder dieser Durchdringungen zu 23 Proton-Proton-Kollisionen, worauf bis zu 1000 Teilchen in den Detektoren registriert werden [4].

Die großen Experimente am LHC An den vier Wechselwirkungspunkten sind die großen Experimente am LHC lokalisiert (siehe Abbildung 2):

ATLAS - A Torodial LHC Apparatus Der ATLAS-Detektor ist eines von zwei Universalexperimenten am LHC, zu seinen Zielen gehört die Suche nach dem Higgs-Boson, die Suche nach Anzeichen Neuer Physik, das heißt nach physikalischen Phänomenen, die mit dem Standardmodell der Teilchenphysik nicht erklärbar sind, wie beispielsweise die Existenz von Extradimensionen oder supersymmetrischer Teilchen. Sowie die detaillierte Untersuchung der Elementarteilchen die bei Proton-Proton-Kollisionen bei hoher Schwerpunktsenergie von bis zu $\sqrt{s} = 14$ TeV entstehen [6].

ALICE - A Large Ion Collider Experiment Der ALICE-Detektor ist der einzige große Detektor, der speziell zur Untersuchung der Kollisionen von Bleiionen konstruiert wurde. Mit ihm soll das Quark-Gluonen-Plasma untersucht werden, ein Materiezustand, bei dem die Quarks und Gluonen nicht mehr in den Hadronen gefangen sind [6].

CMS - Compact Muon Solenoid Der CMS-Detektor ist das zweite Universalexperiment am LHC. Mit ihm werden die gleichen Ziele wie mit ATLAS verfolgt, allerdings mit anderen Detektortechnologien [6].

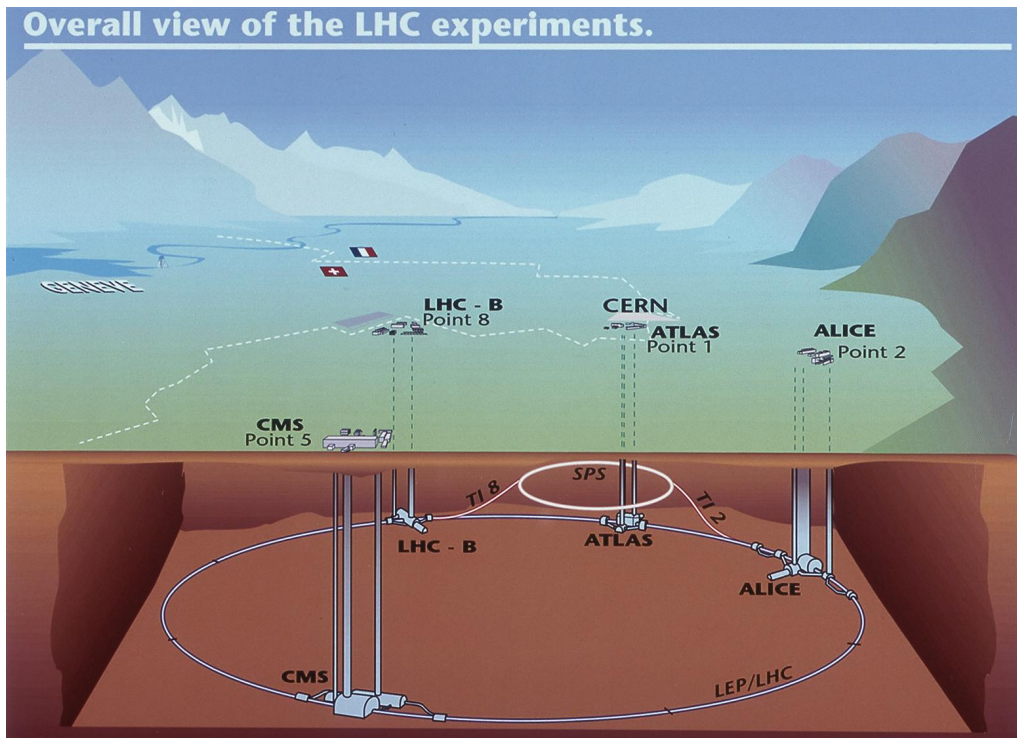


Abbildung 2: Die großen Experimente am LHC [5]

LHCb - Large Hadron Collider b Der LHCb-Detektor untersucht anhand von Teilchen, die Bottom-Quarks enthalten, den kleinen Unterschied im Verhalten von Materie und Antimaterie. Er geht der Frage nach, warum unser Universum hauptsächlich aus Materie besteht [6].

2.2 Das ATLAS-Experiment

Der ATLAS-Detektor ist der größte am LHC installierte Detektor. Er ist 44 m lang, bei einem Durchmesser von 25 m und einem Gesamtgewicht von 7000 t. Er ist aus mehreren Einzeldetektoren aufgebaut, die konzentrisch um den Wechselwirkungspunkt herum angeordnet sind. Aufgrund seiner Fass-artigen Form werden die Subdetektoren im Allgemeinen in drei Bereiche gegliedert, zwei Endkappen-Bereiche (*end-cap region*) und den Fass-Bereich (*barrel region*). Der Innere Detektor (ID) befindet sich am dichtesten am Wechselwirkungspunkt und wird von einem dünnen Solenoid umschlossen. Darauf folgen die elektromagnetischen- und hadronischen Kalorimeter, welche wiederum von dem Myonspektrometer eingehüllt werden. Das Magnetfeld für das Myonspektrometer wird durch drei Luftspulen-Magnetsysteme erzeugt, eins im Fass-Bereich und zwei in den Endkappen-Bereichen.

In den folgenden Abschnitten wird der ATLAS-Detektor so, wie er bis Februar 2013 (*Run 1*) aufgebaut war, beschrieben. Im Zeitraum von März 2013 bis März 2015 war der LHC außer Betrieb um verschiedene Upgrades durchzuführen. Zeitgleich dazu wurde auch der ATLAS-Detektor modifiziert, beispielsweise wurde im Inneren Detektor eine weitere Lage mit Pixel-Sensoren eingebaut. Auch die Trennung zwi-

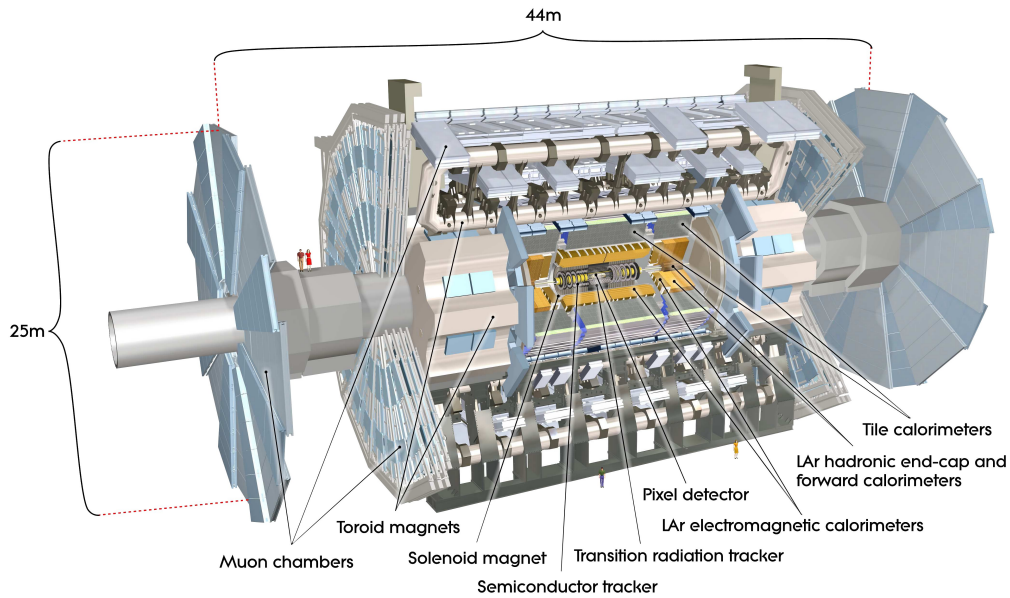


Abbildung 3: Der ATLAS-Detektor [4]

schen Level-2-Trigger und Eventfilter im Triggersystem des ATLAS-Detektors wurde aufgehoben. Soweit nicht anders gekennzeichnet, stammen alle in diesem Abschnitt wiedergegebenen Informationen aus [4].

Das Koordinatensystem im ATLAS-Detektor Der nominelle Wechselwirkungspunkt wird als Ursprung des Koordinatensystems definiert. Die Strahlrichtung bestimmt die z -Achse; senkrecht zu ihr liegt die x - y -Ebene, wobei die positive x -Achse auf den Mittelpunkt des LHC-Rings zeigt und die positive y -Richtung nach oben. Der Bereich positiver z -Koordinaten wird A-Seite des Detektors genannt, der mit negativen z -Koordinaten C-Seite. Weiter werden zwei Winkel definiert: erstens der Azimutwinkel ϕ ; er beschreibt die Lage in der x - y -Ebene senkrecht zur Strahlrichtung; und zweitens der Polarwinkel θ ; er gibt den Winkel zur Strahlrichtung an. Mit dem Polarwinkel θ wird die Pseudorapidität $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ definiert. Dies vereinfacht viele Rechnungen, da Differenzen der Pseudorapidität $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$ invariant gegenüber Lorentz-Boost sind. Als Maß für den Abstand innerhalb des Detektors wird nun noch $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$ eingeführt, auch diese Größe ist bei Lorentz-Boost invariant.

Der Innere Detektor Der Innere Detektor kann als ein zur Strahlachse paralleler Hohlzylinder mit Mittelpunkt im nominellen Wechselwirkungspunkt beschrieben werden. Er ist etwa 7 m lang, beginnt bei einem Radius von 50,5 mm von der Strahlachse entfernt und endet bei 1150 mm. Seine Aufgabe besteht in präziser Spur- und Impulsmessung der bei den Proton-Proton-Kollisionen entstehenden Teilchen im Pseudorapiditäts-Bereich $|\eta| < 2,5$. Mit den gewonnenen Spurinformatoren werden der Primärvertex, sowie sekundäre Vertices bestimmt. Der ID ist aus drei Subdetektoren aufgebaut.

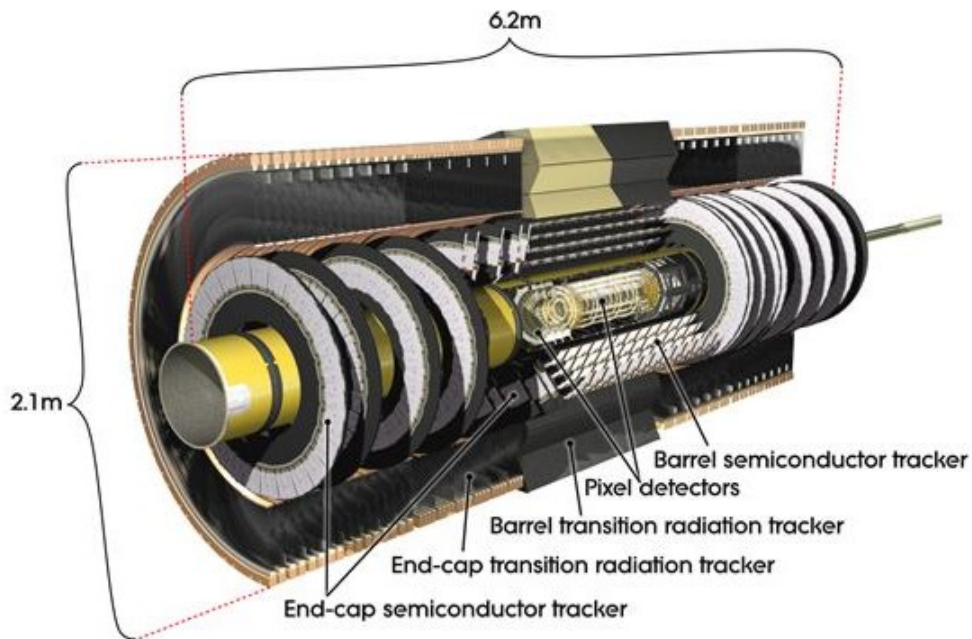


Abbildung 4: Der Innere Detektor des ATLAS-Detektors [4]

Der Innerste ist der Pixeldetektor. Er besteht im Fass-Bereich aus drei Lagen Pixel-Sensoren bei Radien von 50,5 mm, 88,5 mm und 122,5 mm. In den Endkappen-Bereichen aus drei, in 495 mm, 520 mm bzw. 650 mm von dem Wechselwirkungspunkt entfernten, senkrecht zur Strahlachse angebrachten Scheiben mit Pixel-Sensoren. Insgesamt enthält der Pixeldetektor 1744 Pixel-Sensoren mit je 47232 Pixeln. Durch die geringe Pixelgröße, von typischerweise $50 \times 400 \mu\text{m}^2$, wird nahe am Wechselwirkungspunkt, im Bereich großer Spurdichten, eine hohe räumliche Auflösung von etwa $14 \mu\text{m}$ erreicht. Der Pixeldetektor trägt mindestens drei Spurpunkte zur Spurrekonstruktion bei.

Auf den Pixeldetektor folgt der Semi-Conductor-Tracker (SCT). Er nutzt zur Spurbestimmung beidseitig, mit je 12 cm langen und $10 \mu\text{m}$ breiten Siliziumstreifen-Detektoren, bestückte Module. Um die Auflösung in der x-y-Ebene zu erhöhen, sind die Siliziumstreifen-Detektoren der Vorder- und Rückseite um 20 mrad gegeneinander verkippt. Die Module sind, analog zum Pixeldetektor, im Fass-Bereich auf vier Lagen bei Radien zwischen 299 mm bis 514 mm um die Strahlachse, in den Endkappen-Bereichen auf je neun Scheiben in Abständen zwischen 853,8 mm bis 2720,2 mm zum Wechselwirkungspunkt montiert. Zusammengenommen enthält der SCT 4088 Module mit je 768 Siliziumstreifen-Detektoren. Er liefert normalerweise vier Spurpunkte mit einer räumlichen Auflösung von $17 \mu\text{m}$ in radialer Richtung und $580 \mu\text{m}$ in Strahlrichtung.

Sowohl Pixeldetektor als auch SCT sind aus Halbleiter-Detektoren aufgebaut. Die das Halbleitermaterial durchdringenden Teilchen erzeugen Elektronen-Loch-Paare. Durch eine angelegte äußere Spannung wandern die entstandenen Elektronen und Löcher zur jeweils entsprechenden Elektrode und werden als ein Stromsignal gemessen.

Der äußerste Detektor im ID ist der Transition-Radiation-Tracker (TRT). Seine Funktionsweise basiert auf der Kombination von Driftrohrdetektoren und Übergangsstrahlungsdetektoren. Die Driftrohre sind mit einem Xenon-Gas (70% Xe, 27% CO₂ und 3% O₂) gefüllt und besitzen einen Durchmesser von 4 mm. An ihre Hülle ist eine Hochspannung von -1530 V angelegt und in ihrer Mitte verläuft ein geerdeter Anodendraht. Passiert ein Teilchen das Driftrohr, so ionisiert es das Xe-Gas und löst ein Stromsignal aus. Die Driftrohre sind eingebettet in ein Material mit stark unterschiedlichem Brechungsindex. In ihm erzeugen hochrelativistische, geladene Teilchen Übergangsstrahlung. Diese Röntgenquanten werden in den Driftrohren absorbiert und lösen eine Elektronenlawine aus. Im Vergleich zu einem Signal eines durchgehenden Teilchens hat dieses Signal eine höhere Amplitude. Da Elektronen im Vergleich zu Hadronen eine geringere Masse besitzen, sind sie deutlich schneller als Hadronen mit vergleichbarem Impuls. Daher können, anhand der unterschiedlichen Signal-Amplituden, Elektronen von Hadronen unterschieden werden.

Im Fass-Bereich besteht der TRT aus 73 Lagen parallel zur Strahlachse verlaufender Driftrohre mit einer Länge von je 144 cm, insgesamt gibt es 52444 Driftrohre. Jeder der beiden Endkappen-Bereiche setzt sich aus 160 Lagen senkrecht zur Strahlachse angebrachter, 37 cm langer Driftrohre zusammen, pro Seite je 122880 Stück. Mit dem TRT wird eine räumliche Auflösung von 130 μm erreicht. Er liefert im Mittel 36 Spurpunkte für die Spur eines geladenen Teilchens.

Alle 3 Einzeldetektoren des ID sind in ein, von einem dünnen Solenoid erzeugtes, 2 T starkes Magnetfeld eingebettet. Aus der genauen Kenntnis der Spur eines Teilchens im bekannten Magnetfeld kann sein Impuls und sein Ladungsvorzeichen bestimmt werden. Die Signatur eines durchgehenden Teilchens im TRT ermöglicht die Identifizierung von Elektronen.

Die Kalorimeter Die Energiemessung der Teilchen findet im Kalorimetersystem des ATLAS-Detektors statt. Es ist ebenfalls zylindersymmetrisch aufgebaut, beginnt außerhalb des den ID umschließenden Solenoids und deckt den Pseudorapiditäts-Bereich $|\eta| < 4,9$ ab. Das Kalorimetersystem gliedert sich in zwei Subsysteme: elektromagnetisches Kalorimeter und hadronisches Kalorimeter. Das elektromagnetische Kalorimeter ist darauf optimiert die Energie elektromagnetisch wechselwirkender Teilchen zu bestimmen, allerdings deponieren auch Hadronen dort Energie. Im hadronischen Kalorimeter wird die Energie der Teilchen gemessen, die die elektromagnetischen Kalorimeter passiert haben und der starken Wechselwirkung unterliegen, also hauptsächlich Hadronen. Bei beiden handelt es sich um Sampling-Kalorimeter. In ihnen wechseln sich Schichten aus Absorbern mit Schichten aus Auslesematerial ab. In den Absorbern entstehen, beispielsweise durch Bremsstrahlung oder Paarbildung, Teilchenschauer, deren Energie dann im Auslesematerial bestimmt wird.

Das Kalorimetersystem des ATLAS-Detektors enthält zwei verschiedene Auslesematerialien. Zum einen Plastikszintillatoren, bei denen die Energiebestimmung über die Messung des entstehenden Szintillationslichts erfolgt. Zum anderen flüssiges Argon (LAr) bei dem die freigesetzte Ladung zur Energiemessung genutzt wird.

Die Tiefe der Teilchenschauer hängt von der Energie des absorbierten Teilchens ab. Er setzt sich solange fort, bis die Energie eines Teilchens der letzten Genera-

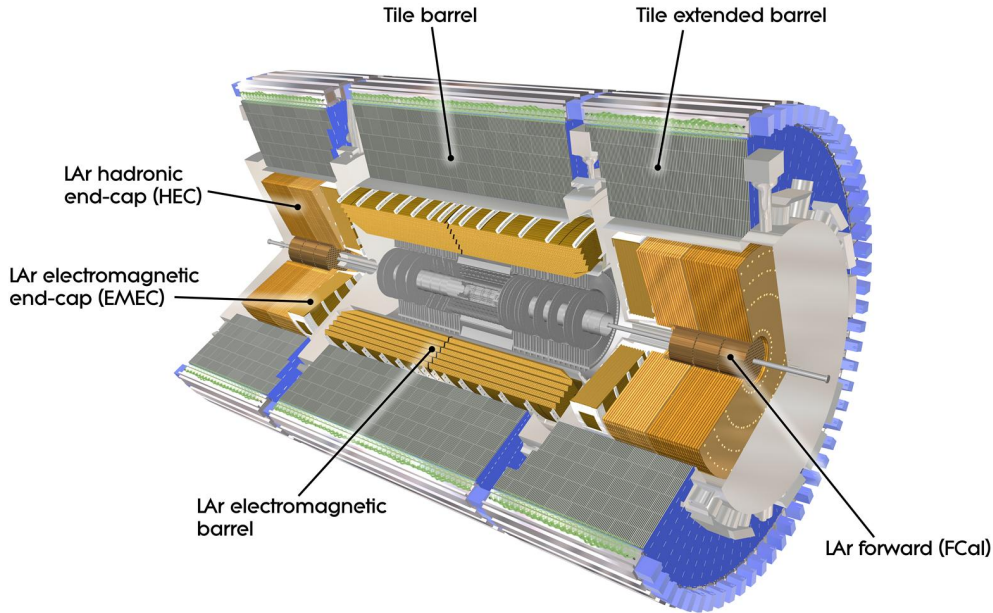


Abbildung 5: Das Kalimetersystem des ATLAS-Detektors [4]

tion die kritische Energie E_c unterschreitet. Bei der Auslegung eines Kalorimeters muss daher darauf geachtet werden, das auch die Teilchenschauer, ausgelöst durch ein Teilchen mit maximal anzunehmender Energie, die Kalorimeter nicht verlassen. Dazu gibt man die Dicke eines elektromagnetischen Kalorimeters in Einheiten der elektromagnetischen Strahlungslänge X_0 an, die eines hadronischen Kalorimeters in Einheiten der Wechselwirkungslänge λ . Nach einer Strahlungs- bzw. Wechselwirkungslänge ist die Energie der Teilchen im Mittel auf $1/e$ seiner Anfangsenergie gefallen.

Das elektromagnetische Kalorimeter gliedert sich in den Fass-Bereich ($|\eta| < 1,475$) und zwei Endkappen-Bereiche ($1,375 < |\eta| < 3,2$). Jeder dieser Bereiche besitzt einen eigenen Kryostaten. Im gesamten elektromagnetischen Kalorimeter dienen mit Edelstahl beschichtete Lagen aus Blei als Absorber und flüssiges Argon als Auslesematerial. Um eine lückenlose Abdeckung des Azimuts zu erreichen, ist die Schichtstruktur in einer speziellen Akkordeon-artigen Geometrie aufgebaut. Im Fass-Bereich beträgt die Dicke des elektromagnetischen Kalorimeters mehr als $22 X_0$, in den Endkappen-Bereichen mehr als $24 X_0$.

Das hadronische Kalorimeter setzt sich im Fass-Bereich aus dem *Tile-barrel*- ($|\eta| < 1,0$) und den beiden *Tile-extended-barrel*- ($0,8 < |\eta| < 1,7$) Kalorimetern zusammen. In ihnen dient Stahl als Absorbermaterial und die Messung erfolgt über Plastikszintillatoren, deren Szintillationslicht über Lichtleiter, die zusätzlich die Aufgabe eines Wellenlängenschleifers übernehmen, an Photomultiplier geleitet wird. In den Endkappen-Bereichen kommen wieder zwei Systeme zum Einsatz: die *LAr-hadronic-end-cap*-Kalorimeter (HEC) für den Pseudorapiditäts-Bereich $1,5 < |\eta| < 3,2$ und, für in Vorwärtsrichtung gestreute Teilchen, das *LAr-*

forward-Kalorimeter (FCal). Es deckt $3,1 < |\eta| < 4,9$ ab. Beide befinden sich in denselben Kryostaten wie die elektromagnetischen Endkappen-Kalorimeter und nutzen wiederum flüssiges Argon als Auslesematerial. Im HEC, wie in der ersten Lage des FCal, wird Kupfer als Absorbermaterial verwendet; in den beiden weiteren Lagen des FCal Wolfram.

Im Fass-Bereich beläuft sich die gesamte Dicke des Kalorimeter-Systems auf $9,7\lambda$, in den Endkappen-Bereichen auf etwa 10λ . Rechnet man noch alle weiteren nötigen Stütz- und Versorgungsstrukturen hinzu, so ergibt sich bei $\eta = 0$ eine Gesamtdicke von 11λ , die die Teilchen und deren Folgeprodukte bis an den äußeren Rand des Kalorimetersystems durchqueren müssen. Das ist ausreichend, um Durchschläge in das weiter außen liegenden Myonspektrometer auf ein Minimum zu reduzieren und ermöglicht in Kombination mit dem großen η -Bereich der Energiemessung eine gute Bestimmung der im Ereignis fehlenden Transversalenergie E_T^{miss} .

Das Myonspektrometer Das äußerste Messinstrument des ATLAS-Detektors ist das Myonspektrometer. Seine Aufgaben bestehen zum einen in präziser Spurrekonstruktion der das Kalorimetersystem verlassenden geladenen Teilchen im Pseudorapiditäts-Bereich $|\eta| < 2,7$, zum anderen darin, dem Level-1-Trigger sehr schnell Informationen über deren Transversalimpulse zur Verfügung zu stellen. Da Myonen minimal ionisierende Teilchen sind und zudem eine relative hohe Lebensdauer besitzen, sind sie die einzigen geladenen Teilchen, die das Myonspektrometer noch erreichen. Wie die anderen Komponenten des ATLAS-Detektors auch, ist das Myonspektrometer in den Fass-Bereich ($|\eta| < 1,05$), sowie zwei Endkappen-Bereiche ($1,05 < |\eta| < 2,7$) aufgeteilt.

Die Spurmessung erfolgt hauptsächlich mithilfe von Driftkammern (*Monitored drift tubes*, MDT). Sie erreichen eine Ortsauflösung von bis zu $35\mu\text{m}$ in z -Richtung. Im Fass-Bereich sind sie auf drei zylindrischen Schalen in Abständen von 5m , $7,5\text{m}$ und 10m zur Strahlachse angebracht und im Endkappen-Bereich auf vier großen Rädern, die senkrecht zur Strahlachse, im Abstand von $7,4\text{m}$, $10,8\text{m}$, 14m und $21,5\text{m}$ zum Wechselwirkungspunkt, montiert sind. Auf dem innersten Rad, im Pseudorapiditäts-Bereich $2,0 < |\eta| < 2,7$, nutzt man aufgrund der dort erwarteten hohen Ereignisrate Vieldrahtproportional-Kammern (*Cathode strip chambers*, CSC) zur Spurmessung. Sie arbeiten bis zu einer Ereignisrate von $1\text{kHz}/\text{cm}^2$ stabil, im Gegensatz zu den MDTs, die nur bis zu einer Rate von $150\text{Hz}/\text{cm}^2$ gute Ergebnisse liefern. Ihre Ortsauflösung beträgt $40\mu\text{m}$ in R -Richtung und 5mm in azimuthaler Richtung. Insgesamt benutzt das Myonspektrometer zur Spurmessung 1150 MDTs und 32 CSCs. Um die gewünschte Impulsauflösung von $\sigma_{p_T}/p_T = 10\%$ bei einem Transversalimpuls von $p_T = 1\text{TeV}$ zu erreichen, müssen die Positionen der MDT-Kammern untereinander mit einer Genauigkeit von $\leq 30\mu\text{m}$ bekannt sein. Dazu ermittelt ein optisches Überwachungssystem die Kammerposition in Bezug auf ihre Nachbarkammern.

Als Triggerkammern kommen im Fass-Bereich ($|\eta| < 1,05$) Widerstandsplattenkammern (*Resistive plate chambers*, RPC) zum Einsatz. In den Endkappen-Bereichen benutzt man Dünnsplattkammern (*Thin gap chambers*, TGC). Wegen der hohen Ereignisrate von im Mittel 23 Kollisionen, mit einer Rate von bis zu 40MHz , ist die

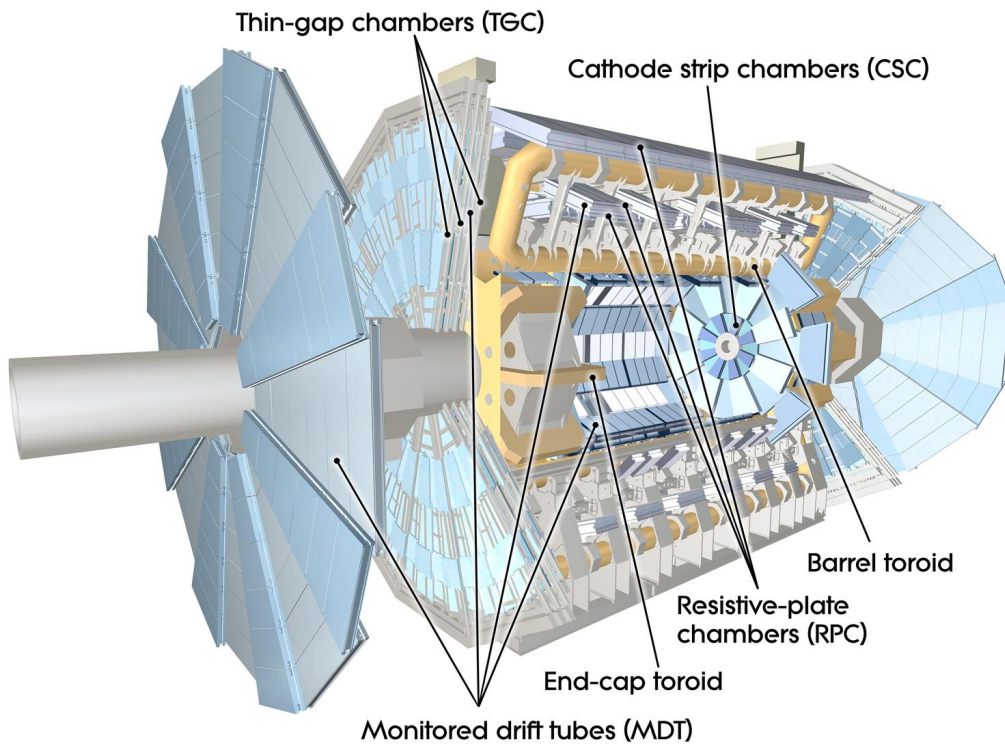


Abbildung 6: Das Myonspektrometer des ATLAS-Detektors [4]

wichtigste Eigenschaft der Triggerkammern ihre Geschwindigkeit. Die RPCs sind aus zwei in einem Abstand von 2 mm parallel zueinander liegenden Elektrodenplatten aufgebaut, in deren Zwischenraum sich ein Gas befindet. Durchfliegt ein Teilchen die Kammer, so ionisiert es das Gas und durch ein elektrisches Feld der Stärke $4,9 \text{ kV/mm}$ entstehen entlang der Spur des Teilchens Ladungslawinen, die ausgelesen werden. Die RPCs sind sehr schnell, schon nach $1,5 \text{ ns}$ geben sie das Signal mit einer Ortsauflösung von je 10 mm in z - und ϕ -Richtung weiter. In der mittleren Lage der MDT sind zwei Lagen RPCs realisiert, eine vor und eine hinter den MDT-Kammern. Eine weitere Lage mit RPCs befindet sich bei den äußersten MDTs. Bei den TGCs handelt es sich wie bei den CSCs auch um Vieldrahtproportional-Kammern, mit demselben Vorteil eine hohe Ereignisrate auflösen zu können. Sie sind in vier Lagen auf Rädern senkrecht zur Strahlachse angebracht, eine kurz vor der ersten Lage MDT, die restlichen drei verteilen sich um die zweite Lage MDT, eine vor ihr, zwei weitere vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen dahinter. Die TGCs erfüllen noch eine weitere Aufgabe. Sie liefern zusätzlich zu der von den MDTs bzw. CSCs ermittelten eine zweite, azimutale Spurkoordinate. Diese Information stellen sie innerhalb von nur 4 ns mit einer Ortsauflösung von 2 bis 6 mm in radialer-Richtung und 3 bis 7 mm in azimutaler Richtung bereit. Im Myonspektrometer befinden sich 606 RPCs und 3588 TGCs. Die sehr gute zeitliche Auflösung dieser Triggerkammern ermöglicht es zudem, zuverlässig die gemessenen Teilchen den Strahlkreuzungszeitpunkten zuzuordnen. Um aus den Spurpunkten der Myonen ihren Impuls bestimmen zu können, müssen ihre Bahnen von einem Magnetfeld gekrümmt werden, dazu sind

außerhalb des Kalorimetersystems drei Toroide installiert. Der Größte im Fass-Bereich ($|\eta| < 1,4$) besteht aus acht großen supraleitenden Luftspulen, die radialsymmetrisch um das Kalorimetersystem angeordnet sind und ein Magnetfeld von 0,5 T Stärke erzeugen. In jedem Endkappen-Bereich ist ein weiterer Toroid, wiederum bestehend aus acht Luftspulen, um $22,5^\circ$ verdreht in den Fass-Toroid eingelassen, sie erzeugen in den Endkappen-Bereichen ($1,6 < |\eta| < 2,7$) ein Magnetfeld von 1 T. Im Pseudorapiditäts-Bereich $1,3 < |\eta| < 1,65$, genannt Übergangsbereich (*Transition region*), überlappen sich die Fass- und Endkappen-Magnetfelder und gewährleisten so die Ablenkung der Myonen. Diese Anordnung der Magnete bewirkt ein soweit wie möglich immer senkrecht zur Flugbahn der Myonen stehendes Magnetfeld. Für eine möglichst exakte Impulsbestimmung muss das Magnetfeld mit hoher Genauigkeit bekannt sein. Dazu wird es kontinuierlich mit 1800 Hall-Sonden vermessen.

3 Triggersystem des ATLAS-Detektors

Die Detektoren des ATLAS-Experiments besitzen zusammen mehr als 160 Millionen Auslesekanäle. Während der Datennahmeperiode Run 1 kam es typischerweise alle 50 ns zu im Mittel 23 Proton-Proton-Kollisionen. Daraus ergibt sich eine Ereignisrate von nahezu 500 MHz. Es ist technisch weder möglich, die dabei anfallende Datenmenge aus dem Detektor auszulesen, noch sie zu speichern. Deswegen besitzt der ATLAS-Detektor ein mehrstufiges Triggersystem, das sukzessive die Ereignisrate von 500 MHz auf $\mathcal{O}(100)$ Hz reduziert. Das heißt: nur eins von mehreren Millionen Ereignissen wird gespeichert und steht zur späteren Untersuchung zur Verfügung. Dahingegen besitzen die meisten interessanten physikalischen Prozesse einen sehr kleinen Wirkungsquerschnitt und die damit einhergehenden niedrigen Ereignisraten. Das Triggersystem muss also Ereignisse, die solche Prozesse beinhalten könnten, schnell identifizieren und deren permanente Speicherung veranlassen. Im Verlauf der Run 1-Datennahme war ein dreistufiges System, bestehend aus dem Level-1-Trigger (L1-Trigger), dem Level-2-Trigger (L2-Trigger) und dem Eventfilter (EF), aktiv. L2-Trigger und EF werden zusammengenommen als High-Level-Trigger (HLT) bezeichnet [7].

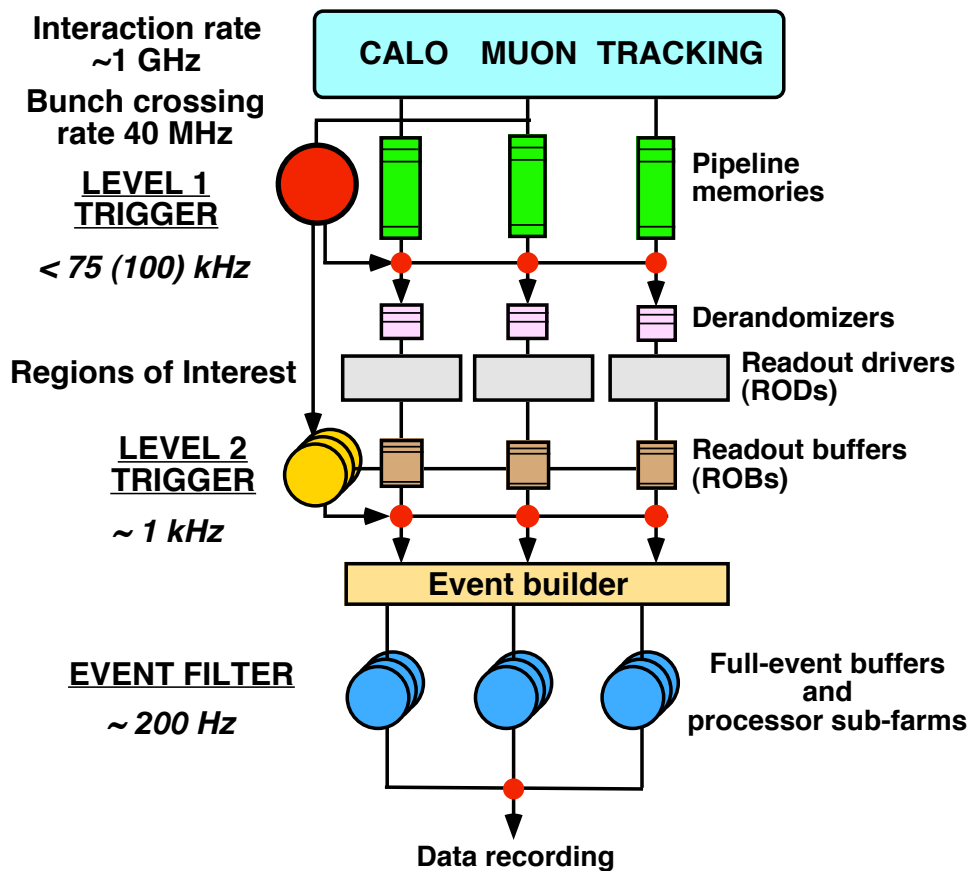


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Triggersystems des ATLAS-Detektors während Run1 [8]

3.1 Der Level-1-Trigger

Der L1-Trigger reduziert die Ereignisrate von 500 MHz auf etwa 75 kHz. Die Entscheidung, ob ein Ereignis zur weiteren Begutachtung an den L2-Trigger weitergeleitet wird oder nicht, wird auf der Grundlage von Daten reduzierter Granularität aus dem Myonspektrometer und den Kalorimetern getroffen. Dafür stehen $2,5 \mu\text{s}$ zur Verfügung. Während dieser Zeit werden alle Messdaten des Detektors in pipeline memories gespeichert. In Anbetracht dieser sehr kurzen Zeitspanne, wurde der L1-Trigger als Hardwarelösung mit eigens für diesen Zweck hergestellter Elektronik realisiert. Daher spricht man beim L1-Trigger auch von einem Hardwaretrigger. Um die Signallaufzeiten möglichst klein zu halten, befindet sich ein Teil dieser Elektronik direkt auf den Detektoren und der Rest in einer Kaverne in unmittelbarer Nachbarschaft zur großen Detektorkaverne. Dennoch stehen dem L1-Trigger im ungünstigsten Fall, nach Abzug der Flugzeit der Teilchen bis zu den äußersten Bereichen des Myonspektrometers, den Signallaufzeiten auf den bis zu 80 m langen Kabeln und einer Sicherheitszeitspanne von $0,5 \mu\text{s}$, nur noch $0,45 \mu\text{s}$ zur Analyse der Daten zur Verfügung [8].

Der Level-1 Muon Trigger (L1Muon) identifiziert Myonen mithilfe der schnellen Triggerkammern (RPC und TGC) des Myonspektrometers und ordnet sie unterschiedlichen Transversalimpulsbereichen zu. Das geschieht über ein Mustererkennungsverfahren. Ausgehend von einer Spurkoordinate eines durchgehenden Myons, gefunden in der zweiten Lage der RPC (bzw. der letzten Lage TGC), wird innerhalb eines kegelförmigen Bereiches des Myonspektrometers, nach weiteren Spurpunkten in den restlichen beiden Lagen Triggerkammern gesucht. Die Spitze dieses Kegels

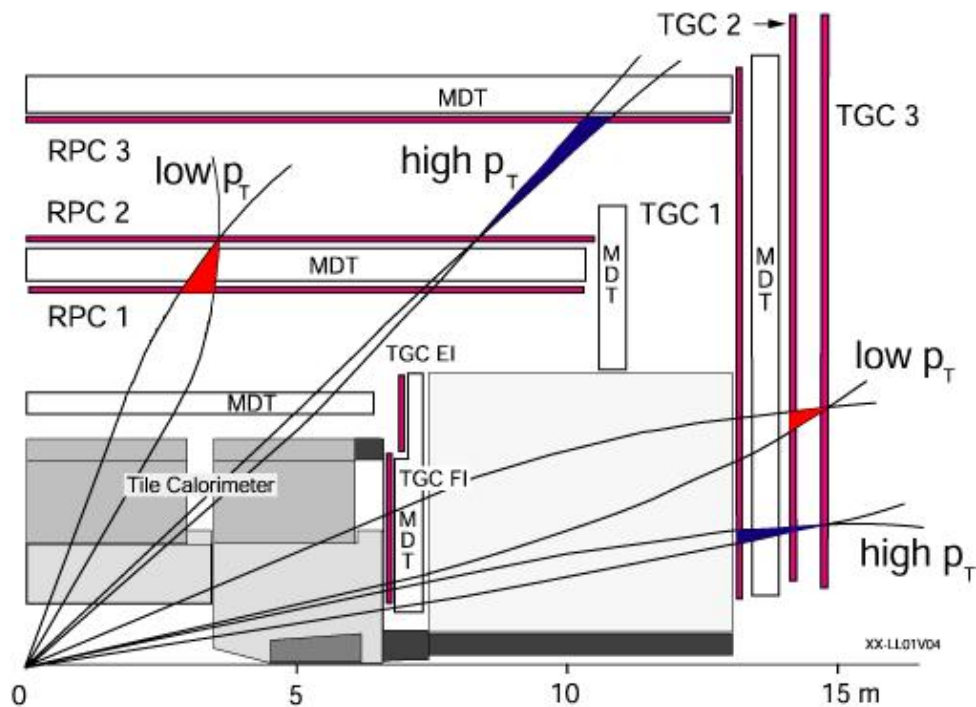


Abbildung 8: Myontrigger im Level-1 Trigger [9]

liegt im Wechselwirkungspunkt und seine Symmetrieachse verläuft durch die erste Spurkoordinate. Der Radius des Kegels wird von der gewünschten p_T -Schwelle bestimmt. Je höher die Schwellenenergie, desto kleiner ist der Öffnungswinkel des Kegels. Für Myonen mit geringem Transversalimpuls ($p_T \leq 10$ GeV) genügen Treffer innerhalb des entsprechenden Kegels in zwei Lagen der Triggerkammern. Die Identifikation eines Myons mit hohem Transversalimpuls erfordert Treffer in allen drei Lagen der Triggerkammern. Diese Logik ist in FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) realisiert. Sie ermöglichen die Programmierung von 6 unabhängigen p_T -Schwellen: drei für Myonen mit geringem p_T und drei weitere für solche mit hohem p_T [9].

Der Level-1 Calorimeter Trigger (L1Calo) sucht nach Objekten mit hoher transversaler Energie: Photonen, Elektronen, Jets und in Hadronen zerfallende τ -Leptonen; sowie nach Ereignissen mit hoher fehlender transversaler Energie E_T^{miss} , hoher transversaler Gesamtenergie E_T^{tot} oder hoher transversaler Gesamtenergie für Jet-Objekte $E_T^{tot}(Jet)$. Dazu verwendet er einen reduzierten Datensatz aus allen Subdetektoren des Kalorimetersystems. Die Datenreduktion erfolgt durch Summation über mehrere Zellen der Kalorimeter zu insgesamt 7168 sogenannten Triggertürmen (*Trigger towers*). Die Fläche, die ein Triggerturm abdeckt, reicht von $\Delta\phi \times \Delta\eta = 0,1 \times 0,1$ für $|\eta| < 2,5$ bis $0,4 \times 0,4$ für $|\eta| > 3,2$. Für jeden Objekttyp können mehrere p_T - oder Energieschwellen gesetzt werden. Jede dieser Schwellen entspricht einem Triggerobjekt [8], [7].

L1-Objekt	EM	Taus	Jets	E_T^{miss}	E_T^{tot}	$E_T^{tot}(Jet)$	$\mu \leq 10$ GeV	$\mu > 10$ GeV
Schwellen	8 - 16	0 - 8	12	8	4	4	3	3

Tabelle 1: L1-Objekte und die Anzahl derer Energie- bzw. p_T -Schwellen [7]

Eine weitere wichtige Aufgabe des L1-Trigger besteht in der Identifikation des Strahlkreuzungszeitpunktes von Interesse (*bunch-crossing identification*, BCID). Allerdings erstrecken sich die Signale der im ATLAS-Detektor benutzten LAr-Kalorimeter über mehrere hundert Nanosekunden. Außerdem liegt die Flugzeit der Myonen bis zu den äußersten Bestandteilen des Myonspektrometers ebenso über dem Strahlkreuzungsintervall von 50 ns. Diese beiden Tatsachen müssen bei der Zuordnung zu einer BCID berücksichtigt werden [9].

In einem Level-1-Triggermenü sind Triggerbedingungen spezifiziert, die zu einer positiven Triggerentscheidung, dem Level-1 accept (L1A) führen. Bei den Triggerbedingungen handelt es sich um einzelne Triggerobjekte, oder logische Kombinationen von ihnen. Insgesamt können im Level-1-Triggermenü bis zu 256 Triggerbedingungen definiert werden. Um bei Triggerbedingungen, deren beteiligte Prozesse einen relativ großen Wirkungsquerschnitt besitzen, die Ereignisraten weiter zu begrenzen, kann jeder Triggerbedingung ein Skalierungsfaktor S_1 (*prescale factor*) zugeordnet werden. Mit der Folge, dass nur jedes S_1 'te, eigentlich positiv gewertete Ereignis, zu einem L1A führt. Im L1-Trigger handelt es sich dabei um eine abzählende (deterministische) Skalierung nach der Triggerentscheidung [10].

Werden durch die durch L1Muon und L1Calo übermittelten Triggerobjekten eines Ereignisses eine oder mehrere der im Level-1-Triggermenü enthaltenen Trig-

gerbedingungen erfüllt, so generiert der Central Trigger Processor (CTP) ein L1A und für jedes beteiligte Triggerobjekt ein Gebiet von Interesse (*Region of Interest*, RoI). Das RoI setzt sich aus der (η, ϕ) -Richtung, in der das Triggerobjekt gefunden wurde, sowie dem Triggerobjekt selbst zusammen. Die RoI-Informationen werden an den L2-Trigger und das Datenerfassungssystem (*Data Acquisition system*, DAQ) übermittelt. Ist keine Triggerbedingung erfüllt, so wird das Ereignis verworfen und aus den pipeline memories gelöscht [9], [8].

3.2 Der High Level Trigger

Durch den Level-2-Trigger wird die Entscheidung des L1-Triggers anhand präziser Detektordaten innerhalb der RoIs verfeinert. So reduziert sich die Ereignisrate von 75 kHz auf eine Größenordnung von etwa 1 kHz. Im Gegensatz zum L1-Trigger ist der Level-2-Trigger ein Softwaretrigger, dessen schnelle Auswahlalgorithmen auf einer Prozessorfarm implementiert sind. Inklusive der Zeit für den Datentransfer stehen im Mittel 40 ms zur Entscheidungsfindung zur Verfügung. Durch parallele Datenverarbeitung ist es dennoch möglich, im Schnitt alle 10 μ s mit der Bearbeitung eines neuen Ereignisses zu beginnen [7].

Für jedes L1A eines Ereignisses bestimmt der L2-Trigger aus den RoI-Informationen in der entsprechenden (η, ϕ) -Richtung ein RoI-Fenster. Die Größe dieser RoIs hängt zum einen von der p_T - oder Energieschwelle und zum anderen von der Art des Triggerobjekts ab. Beispielsweise ist ein RoI für Elektronen kleiner als das RoI eines Jet-Objekts. Der L2-Trigger kann innerhalb der RoIs auf die hochauflösenden Daten aller Subdetektoren zugreifen, insbesondere auf die rekonstruierten Teilchenspuren aus dem Inneren Detektor (ID).

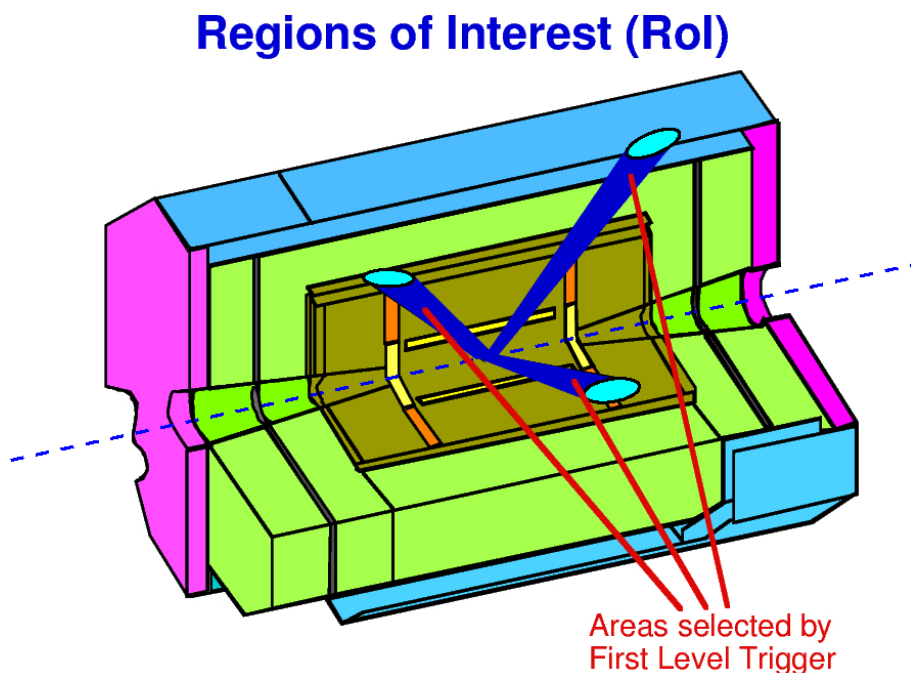


Abbildung 9: Schematische Darstellung des RoI Konzepts [11]

Der L2-Trigger und der EF nutzen für jede Art von Triggerobjekt mehrere Algorithmen, die die genauen Eigenschaften des Objekts bestimmen (*Feature extraction algorithms*, FEX-Algorithmen). Welcher dieser Algorithmen benutzt wird, hängt unter anderem davon ab, welcher Subdetektor die Daten liefert, oder nach welchen Eigenschaften gesucht wird. Die FEX-Algorithmen des L2-Triggers erhalten innerhalb der RoIs sukzessive präzise Daten von immer mehr Subdetektoren. Ein Hypothesen-Algorithmus (HYPO-Algorithmus) kombiniert die im Triggermenü geforderten Eigenschaften und überprüft anhand der Ergebnisse der FEX-Algorithmen, ob die Triggerbedingung noch erfüllt werden kann oder nicht. Sobald in dieser sequentiellen Bearbeitung der Triggerbedingungen sicher ist, dass das Ereignis die Triggerbedingung nicht mehr erfüllen kann, wird die Bearbeitung dieser RoIs abgebrochen und der entsprechende Speicherbereich im Read-out System der DAQ zur erneuten Verwendung freigegeben. So wird nur für die Ereignisse die gesamte Datenmenge übertragen, die mindestens eine Triggerbedingung erfüllen. Das RoI-Konzept reduziert die durch den L2-Trigger zu verarbeitende Datenmenge auf ca. 1 - 2% der Gesamtdatenmenge eines Ereignisses [4].

Wird ein Ereignis vom L2-Trigger akzeptiert, erzeugt der Event Builder (EB) aus allen mit diesem Ereignis in Verbindung stehenden Daten einen einzigen Datensatz. Dieser umfasst die Daten aller Subdetektoren und zusätzlich solche, die während der Entscheidungsfindung in den vorhergehenden Triggerstufen erzeugt wurden. Anschließend übergibt der EB das Ereignis zur weiteren Analyse dem EF.

Wie der L2-Trigger ist der EF auf einer Prozessorfarm realisiert. Durch ihn muss die Ereignisrate auf ungefähr 200 Hz reduziert werden, was, bei einer durchschnittlichen Datenmenge pro Ereignis von 1,5 MByte, einer Datenrate von etwa 300 MByte/s entspricht. Mit im Mittel 4s Bearbeitungszeit pro Ereignis steht ihm ein verhältnismäßig großer Zeitraum zur Verfügung. Dadurch ist die Nutzung derselben Algorithmen möglich, die auch in der Offline-Ereignisrekonstruktion und -analyse verwendet werden [4], [7].

Analog zum L2-Trigger, beginnt der EF seine Analyse innerhalb der von der vorhergehende Stufe übermittelten RoIs. Gegebenenfalls kann er allerdings auf die gesamten Detektordaten in voller Auflösung zugreifen. Und er nutzt genauere Kalibrierungsinformationen der einzelnen Subdetektoren. So präzisiert er die Bewertung des Ereignisses bezüglich der im HLT-Triggermenü geforderten Triggerketten. Ebenso wie im L2-Trigger wird, um Rechenzeit zu sparen, die Analyse eines Ereignisses zum frühestmöglichen Zeitpunkt abgebrochen [12].

Gleichzeitig klassifiziert der EF noch die akzeptierten Ereignisse und ordnet sie einem der ATLAS physics streams (Elektronen, Myonen, Jets, Photonen, E_T^{miss} & τ -Leptonen und B-Physik) zu. Die während dieser Analyse generierten Daten sowie die Klassifikation werden dem Datensatz des Ereignisses hinzugefügt. Der Datensatz wird zur permanenten Speicherung an den zentralen Datenspeicherungsdienst des CERN übermittelt [4].

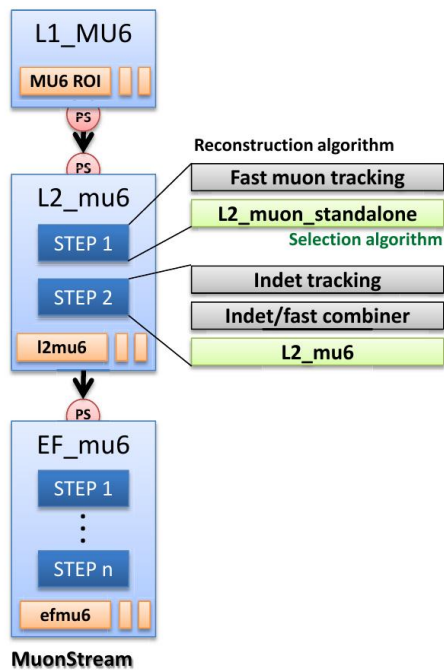


Abbildung 10: Beispiel einer Triggerkette im HLT [13]:

Nach der Level-1-Skalierung wird das Triggerobjekt L1_MU6 (einem durch den L1-Trigger als Myon identifiziertes Teilchen, mit $p_T \geq 6$ GeV) an den L2-Trigger übergeben. Dort durchläuft es erst die randomisierte Skalierung. Anschließend bewerten die FEX-Algorithmen muFast und muComb das Ereignis und übergeben es, bei positiver Entscheidung des HYPO-Algorithmus, als L2_mu6 an den EF. Dort durchläuft es wiederum die EF-Skalierung bevor eine genauere Analyse durch die EF-Algorithmen erfolgt. Bei einer weiterhin positiven Entscheidung, wird es als EF_mu6 dem Myon-Stream zugeordnet und zur permanenten Speicherung weitergegeben.

3.3 Das HLT-Triggermenü

Im HLT-Triggermenü sind Triggerketten definiert, die im jeweiligen Triggerlevel (L2-Trigger oder EF) erfüllt werden müssen. Diese Triggerketten werden wie oben beschrieben schrittweise bearbeitet. Dabei kann es sich um eine Kombination aus p_T - oder Energieschwellen sowie deren Multiplizität handeln. Es kann aber auch gefordert werden, dass nur bestimmte HLT-Algorithmen ein positives Ergebnis liefern.

Wie beim L1-Trigger, ist es auch hier möglich, die Rate einzelner Triggerketten durch einen Skalierungsfaktor S_2 herabzusetzen. Im Gegensatz zur deterministischen Skalierung im L1-Trigger wird hier eine randomisierte Skalierung angewendet. Dazu wird eine Pseudozufallszahl im Intervall $[0,1]$ generiert. Ist diese größer als $1/S_2$ so führt das unabhängig von der eigentlichen Bewertung der Triggerkette zu einer negativen Triggerentscheidung. Ein weiterer wichtiger Unterschied zur Skalierungsmethode im L1-Trigger ist, dass der Skalierungsvorgang in beiden Levels des HLT vor Kenntnis der Triggerentscheidung durchgeführt wird. Dadurch wird die benötigte Rechenzeit verkürzt. Wird der Skalierungsfaktor auf 0 gesetzt, ist die betreffende Triggerkette deaktiviert. Die aktuelle und alle in der Vergangenheit benutzten Konfigurationen des L1-Triggers und des HLT sind in einer relationalen Datenbank, der Trigger Configuration Database (TriggerDB), verfügbar. Bei der Erstellung eines Triggermenüs muss für jede einzelne Triggerkette berechnet werden, wie deren Effizienz für das mit ihr beabsichtigte physikalische Ziel ist und welche Bandbreite in der DAQ mit ihr verbraucht wird [13].

3.4 Der Myon-Trigger im HLT

Die genauere Analyse eines durch den L1-Trigger akzeptierten Ereignisses erfolgt in Abhängigkeit der erfüllten L1-Triggerobjekte durch unterschiedliche Algorithmen. Bei einem durch den L1-Trigger als Myon identifizierten Teilchen, spricht man im HLT von einem Myon-Kandidaten. Die wichtigsten vom HLT benutzten Algorithmen zur Bewertung eines Myon-Kandidaten werden in diesem Abschnitt kurz beschrieben.

Der muFast-Algorithmus Die Analyse eines Myon-Kandidaten beginnt im L2-Trigger mit dem muFast-Algorithmus. Er nutzt innerhalb der RoIs nur die Daten des Myonspektrometers, allerdings in voller Auflösung. Anhand der durch den L1-Trigger übermittelten RoIs, wird mithilfe der RPC-Spurpunkte ein Bahnbereich (Road) um die angenommene Flugbahn des Myons herum definiert. Der Radius dieses Bahnbereiches steht in Abhängigkeit zum im L1-Trigger bestimmten Transversalimpuls des Myon-Kandidaten. Für jede MDT-Lage wird die präzise Spurrekonstruktion, unter Beachtung der Driftzeiten innerhalb der Kammern, durchgeführt. Dazu werden nur die MDT-Kammern ausgewertet, die Teil dieses Bahnbereiches sind. Durch Kombination der Ergebnisse aller drei Lagen wird die Sagitta der Spur bestimmt. Um die Rechenzeiten zu minimieren, ist der lineare Zusammenhang zwischen der Sagitta und dem Verhältnis aus Ladung und Transversalimpuls in Abhängigkeit von η und ϕ , in Look-Up Tables hinterlegt. Das Ergebnis des muFast-Algorithmus ist der Transversalimpuls des Myon-Kandidaten an dessen Entstehungsort, sowie dessen Richtung im Raum (η , ϕ).

Der muComb-Algorithmus Bei dem muComb-Algorithmus handelt es sich um einen weiteren Algorithmus des L2-Triggers. Er kombiniert die Daten des Myonspektrometers mit den aus dem ID gewonnenen Informationen. Dazu verbindet er die Spureninformationen des muFast-Algorithmus mit Spuren des ID. Mithilfe von χ^2 -Tests wird die am besten passende ID-Spur ausgewählt. Der Transversalimpuls des Myon-Kandidaten errechnet sich durch das gewichtete Mittel der beiden unabhängig voneinander im Myonspektrometer beziehungsweise im ID bestimmten Transversalimpulse. Dadurch wird die Impulsauflösung erhöht, und Untergrundmyonen, sowie Myonen, die aus Kaonen- oder Pionzerfall stammen, werden besser erkannt [12].

Die Softwarepakete TrigMuonEF und TrigMuGirl Im EF wird die Analyse der Myonenspuren mit den beiden Softwarepaketen TrigMuonEF und TrigMuGirl durchgeführt. In beiden werden Rekonstruktion-Werkzeuge, die zur Offline-Analyse entwickelt wurden, genutzt. Sie unterscheiden sich in ihrer Vorgehensweise. In TrigMuonEF beginnt man mit den präzisen Spurpunkten aus den MDT-Kammern. Anschließend werden die Informationen der anderen Myondetektoren (RPC oder TGC) hinzugefügt und daraus die exakte Spur des Myon-Kandidaten im Myonspektrometer bestimmt. Im nächsten Schritt wird diese Spur unter Beachtung der Einflüsse durch das Magnetfeld sowie des durchquerten Materials, in Richtung des Wech-

selwirkungspunktes extrapoliert und zum Schluss mit im ID gefundenen, räumlich passenden Spurpunkten kombiniert. Die Kombination erfolgt durch eine gemeinsame Anpassung der Spurparametrisierung an alle im Myonspektrometer und ID gefundenen Spurpunkte. In TrigMuGirl geht man andersherum vor. Es beginnt mit innerhalb der RoIs gefundenen Spuren im ID. Im Anschluß daran werden diese in Spurrichtung bis hin zum Myonspektrometer extrapoliert und dort nach zugehörigen Spurpunkten in den Myondetektoren gesucht. Wie im TrigMuonEF steht am Ende wieder eine Anpassung der Spurparametrisierung an alle beteiligten Spurpunkte des Myonspektrometers und des ID [14].

4 Methodik und Realisierung der MC-Datenanalyse

4.1 Methodik der Analyse

In dieser Bachelorarbeit werden Auswirkungen unterschiedlicher Skalierungsmethoden in den Level-2-Triggerketten des ATLAS-Experiments auf die sich nach dem Level-2-Trigger (L2-Trigger) ergebenden Häufigkeiten der akzeptierten Ereignisse untersucht.

Dies geschieht mit Hilfe einer Toy-Monte-Carlo-Methode. Dazu werden 10 000 Sätze von Pseudo-Ereignissen (*Toys*) erzeugt. Alle Ereignisse eines Toys durchlaufen die Simulation des Level-1-Triggers (L1-Trigger). Die Abbruchbedingung der Ereignisgenerierung ist so gestaltet, dass für jedes Toy nach der L1_2MU4-Triggerbedingung die gleiche Anzahl akzeptierter Ereignisse vorliegt (siehe Abschnitt 4.4). Diese Festlegung wurde getroffen, um Schwankungen am Eingang der L2_2mu4-Triggerkette zu unterbinden und so in der Analyse dieser Triggerkette ausschließlich den Einfluß der unterschiedlichen Skalierungsmethoden zu beobachten. Die Anzahl der von der L1_MU4MU6-Triggerbedingung akzeptierten Ereignisse schwankt um einen Mittelwert. Anschließend durchlaufen die von dem L1-Trigger akzeptierten Ereignisse die Simulation des L2-Triggers. Hier sind parallel fünf Triggerketten mit unterschiedlichen Skalierungsmethoden, aber gleicher Triggerbedingung, realisiert. Dabei handelt es sich um zwei methodisch unterschiedliche Skalierungsalgorithmen: die deterministische Skalierung (detPS) und die randomisierte Skalierung (randPS). Diese werden zudem noch an zwei unterschiedlichen Positionen in der sequentiellen Bearbeitung der L2-Triggerkette angewendet, einmal vor der L2-Triggerentscheidung und einmal nach ihr. Das ergibt vier skalierte Triggerketten, für die jeweils der gleiche Skalierungsfaktor gesetzt wird. Als Bezugsgröße wird das Ergebnis der unskalierten L2-Triggerentscheidung betrachtet (siehe Abbildung 11). Mit der L2-Triggerentscheidung ist hier die Bewertung der Ereignisse durch die Triggeralgorithmen des L2-Triggers gemeint. Diese Prozedur wird für die Simulation zweier L2-Triggerketten (L2_2mu4 und L2_mu4mu6) mit unterschiedlichen Skalierungsfaktoren für dieselben Ereignisse durchgeführt.

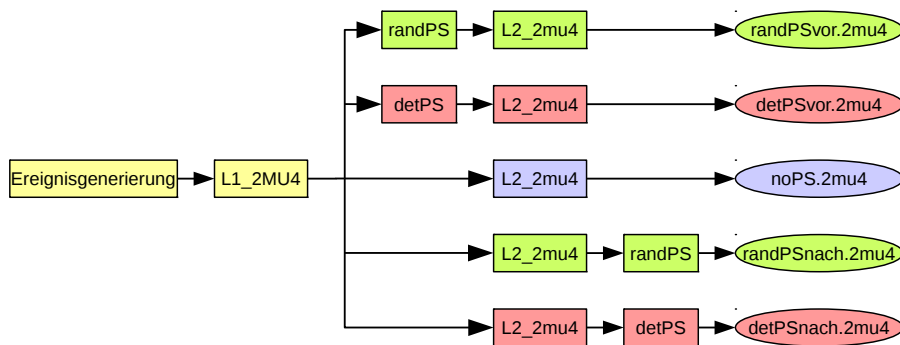


Abbildung 11: Übersicht der fünf Skalierungsmethoden am Beispiel der L2_2mu4-Triggerkette

Für jedes Toy wurde für jede Triggerkette separat die Anzahl akzeptierter Ereignisse in Abhängigkeit von der Skalierungsmethode gespeichert. Auf den sich daraus ergebenden Häufigkeitsverteilungen basiert die hier durchgeführte Analyse.

Die untersuchten Größen sind dabei: die relative Verbreiterung der Häufigkeitsverteilungen, sowie die Effizienzen der L2-Triggerketten in Abhängigkeit von der angewendeten Skalierungsmethode.

Als Näherung für die typischerweise im ATLAS-Experiment auftretenden Myon-Transversalimpulsverteilung wurde die folgende einfache Parametrisierung gewählt:

$$N(p_T) \sim e^{-0.35 p_t/\text{GeV}} . \quad (1)$$

Die Generierung der Toys, sowie die zur Auswertung benötigten Programme, wurden als Macros mithilfe des am CERN entwickelten Datenanalysepakets ROOT [15] geschrieben.

In Anlehnung an die im ATLAS-Experiment bestehende Konvention werden alle Triggerobjekte bzw. Triggerbedingungen des L1-Triggers mit Großbuchstaben geschrieben und die des L2-Triggers mit Kleinbuchstaben.

4.2 Ereignisgenerierung

Der Ereignisgenerierung liegt ein sehr einfaches Modell eines Ereignisses im ATLAS-Experiment zugrunde. Ein Ereignis besteht in dieser Simulation aus zwei Teilchen, im folgenden mit μ_1 und μ_2 bezeichnet. Jedem dieser Teilchen wird ein Transversalimpuls (p_T) als einzige Eigenschaft zugeordnet. Diese Zuordnung geschieht mittels des in der ROOT-Klasse *TRandom3* als Funktion zur Verfügung gestellten Zufallszahlengenerators *TRandom3::Rndm()*. Durch Zuhilfenahme der gegebenen Parametrisierung (1) werden Zufallszahlen erzeugt, die dieser Transversalimpulsverteilung folgen. Für ein Toy mit 200 000 akzeptierten Ereignissen nach der L1_2MU4-Bedingung ergibt sich beispielsweise für μ_1 die in Abbildung 12 gezeigte Verteilung.

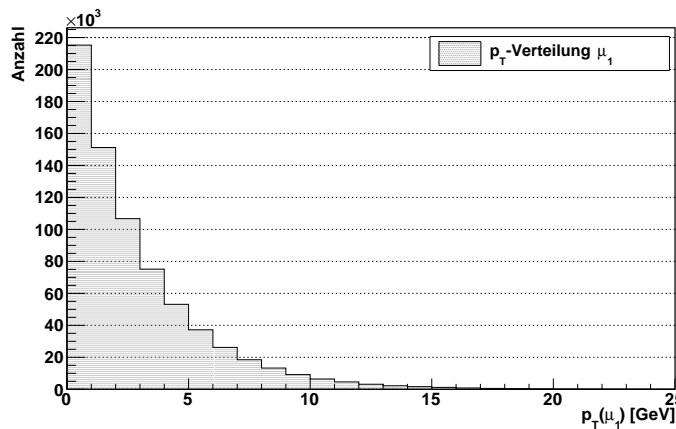


Abbildung 12: p_T -Verteilung für μ_1 nach Ereignisgenerierung für ein Toy mit 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

4.3 Realisation der L1- und L2-Triggerobjekte

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, besitzen die beiden Teilchen, aus denen sich in diesem Modell ein Ereignis zusammensetzt, als einzige Eigenschaft den Transversalimpuls p_T . Daher ist es naheliegend, das Akzeptanzverhalten der benötigten L1- und L2-Triggerobjekte durch p_T -abhängige Akzeptanzfunktionen $A(p_T)$ zu charakterisieren. Diese beschreiben die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen mit einem bestimmten Transversalimpuls p_T von dem Triggerobjekt akzeptiert wird. Für die beiden hier betrachteten Triggerstufen wurden die Akzeptanzfunktionen mit Hilfe der Fehlerfunktion

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$$

durch

$$A(p_T) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{p_T - \mu}{\sqrt{2} \sigma} \right) \right)$$

realisiert.

Dieses Modell bietet zwei Parameter, durch die sich die Akzeptanzkurve für das jeweilige Triggerobjekt anpassen lässt. Der Parameter μ gibt das p_T an, bei dem die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen durch das Triggerobjekt akzeptiert wird, 50 % beträgt. Die Impulsaufösung der der Triggerentscheidung zugrunde liegenden Daten spiegelt sich in dem zweiten Parameter σ wieder. Er beschreibt das Anstiegsverhalten der Akzeptanzkurve. Je kleiner σ gewählt wird, desto schneller steigt die Kurve an. Ein kleineres σ entspricht somit einer höheren Impulsaufösung der dem Triggerobjekt übergebenen Daten. Im ATLAS-Experiment stehen einer Triggerstufe Daten gleicher Impulsaufösung zur Verfügung, daher wurde in dieser Simulation den Triggerobjekten der gleichen Triggerstufe ein identisches σ zugewiesen.

Auf eine exakte Parametrisierung der realen im ATLAS-Experiment auftretenden Akzeptanzkurven wurde verzichtet, da nicht der Trigger selbst Gegenstand dieser Untersuchung ist, sondern der Einfluss der Skalierungsmethoden. Von daher ist es nur von Bedeutung, dass der Trigger für jede betrachtete Methode ein identisches Verhalten zeigt.

Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben, wird im ATLAS-Experiment die L1-Triggerentscheidung aufgrund des Ergebnisses eines Mustererkennungsverfahrens, das auf Daten mit geringer Impulsaufösung basiert, gefällt. Diese Daten wurden mithilfe der von den RPC- und TGC-Triggerkammern des Myonspektrometers übermittelten Spurpunkte bestimmt. Für die beiden L1-Akzeptanzkurven

$$A_{L1,i}(p_T) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{p_T - \mu_{L1,i}}{\sqrt{2} \sigma_{L1}} \right) \right) \quad \text{mit } i \in \{MU4, MU6\} \quad (2)$$

wurden folgende Parameter gewählt:

	$\mu_{L1,i}/\text{GeV}$	σ_{L1}/GeV
L1_MU4	2	1
L1_MU6	4	1

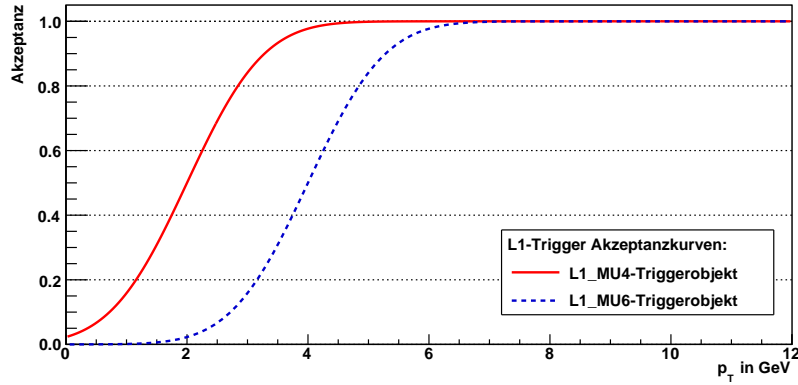


Abbildung 13: Akzeptanzkurven von L1_MU4 und L1_MU6

Abbildung 13 zeigt die in diesem Modell benutzten Akzeptanzkurven der L1-Triggerobjekte L1_MU4 und L1_MU6.

Im ATLAS-Experiment wird die Entscheidung der vorhergehenden Triggerstufe durch den L2-Trigger präzisiert. Dazu stehen ihm Daten höherer Präzision zur Verfügung. In diesem Modell wurde das durch die Wahl eines $\sigma_{L2} < \sigma_{L1}$ abgebildet. Für die Akzeptanzkurven

$$A_{L2,i}(p_T) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{p_T - \mu_{L2,i}}{\sqrt{2} \sigma_{L2}} \right) \right) \quad \text{mit } i \in \{mu4, mu6\} \quad (3)$$

des L2-Triggers wurden folgende Parameter gewählt:

	$\mu_{L2,i}/\text{GeV}$	σ_{L2}/GeV
L2_mu4	3,5	0,33
L2_mu6	5,5	0,33

Die Akzeptanzkurven der L2-Triggerobjekte L2_mu4 und L2_mu6 werden in Abbildung 14 gezeigt.

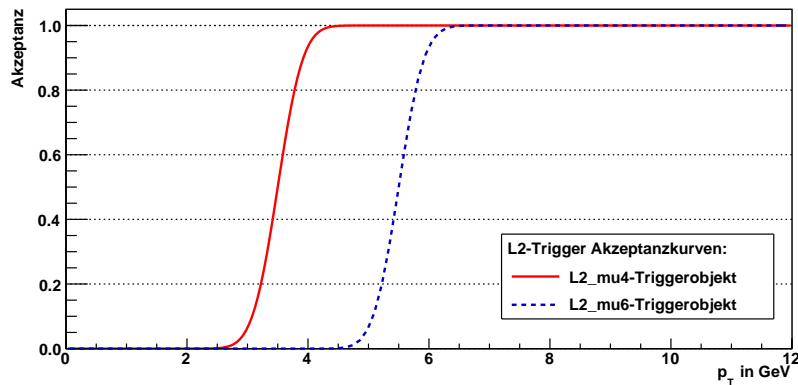


Abbildung 14: Akzeptanzkurven von L2_mu4 und L2_mu6

Mithilfe dieser vier Akzeptanzkurven wurden die in dieser Arbeit benötigten Triggerobjekte: L1_MU4, L1_MU6, L2_mu4 und L2_mu6 simuliert. Ein Teilchen mit dem Transversalimpuls p_T gilt als von dem Triggerobjekt akzeptiert, wenn

$$z < A(p_T)$$

gilt, wobei z einer zwischen 0 und 1 gleichverteilten Zufallszahl und $A(p_T)$ dem Funktionswert der dem betrachteten Triggerobjekt zugeordneten Akzeptanzkurve an der Stelle p_T entspricht. Pro Triggerstufe und pro Teilchen μ_k ($k = 1, 2$) wird je eine Zufallszahl $z_{L1,k}$ (bzw. $z_{L2,k}$) gezogen. Dass heißt, die Akzeptanztests eines Teilchens für die beiden Triggerobjekte einer Triggerstufe, L1_MU4 und L1_MU6 (bzw. L2_mu4 und L2_mu6), werden mit derselben Zufallszahl durchgeführt.

4.4 Simulation des L1-Triggers

Dieser Abschnitt beschreibt, wie der L1-Trigger durch des Setzen von Markierungen (*Flags*) in den Ereignissen simuliert wird. Alle genutzten Flags werden zu Beginn eines jeden Toys mit 0 initialisiert. Wenn im Weiteren das Setzen eines Flags erwähnt wird, so ist das so zu verstehen, dass dem entsprechenden Flag der Wert 1 zugewiesen wird.

In einem ersten Schritt wird getestet, ob die Teilchen μ_k ($k = 1, 2$) des Ereignisses durch das Triggerobjekt L1_MU4 akzeptiert werden. Es wird für beide Teilchen geprüft, ob

$$z_{L1,k} < A_{L1,MU4}(p_{T,k}) \Rightarrow Flag_MU4_k = 1 \quad \text{mit } k = 1, 2 \quad (4)$$

gilt. Für Teilchen, die diese Bedingung erfüllen, wird das Flag (*Flag_MU4*) gesetzt und anschließend durch

$$z_{L1,k} < A_{L1,MU6}(p_{T,k}) \Rightarrow Flag_MU6_k = 1 \quad \text{mit } k = 1, 2 \quad (5)$$

getestet, ob sie auch das L1_MU6-Triggerobjekt erfüllen. Ist dies der Fall, wird das entsprechende Flag (*Flag_MU6*) gesetzt. In Abbildung 15 ist die sich daraus ergebende Häufigkeitsverteilung, beispielhaft für μ_1 gezeigt.

Anhand dieser Flags ist für beide μ_k bekannt, welche Triggerobjekte des L1-Triggers sie akzeptieren. Die Bewertung des Ereignisses durch die L1-Triggerbedingungen wird durch logische Kombination dieser Flags realisiert:

- L1_2MU4-Triggerbedingung :

beide Teilchen müssen das L1_MU4-Triggerobjekt erfüllen, also:

$$Flag_MU4_1 == 1 \wedge Flag_MU4_2 == 1 \Rightarrow Flag_2MU4 = 1 \quad (6)$$

- L1_MU4MU6-Triggerbedingung :

beide Teilchen müssen das L1_MU4-Triggerobjekt erfüllen und ein beliebiges dieser Beiden zusätzlich noch die L1_MU6-Triggerbedingung, also:

$$Flag_2MU4 == 1 \wedge (Flag_MU6_1 == 1 \vee Flag_MU6_2 == 1) \\ \Rightarrow Flag_MU4MU6 = 1 \quad (7)$$

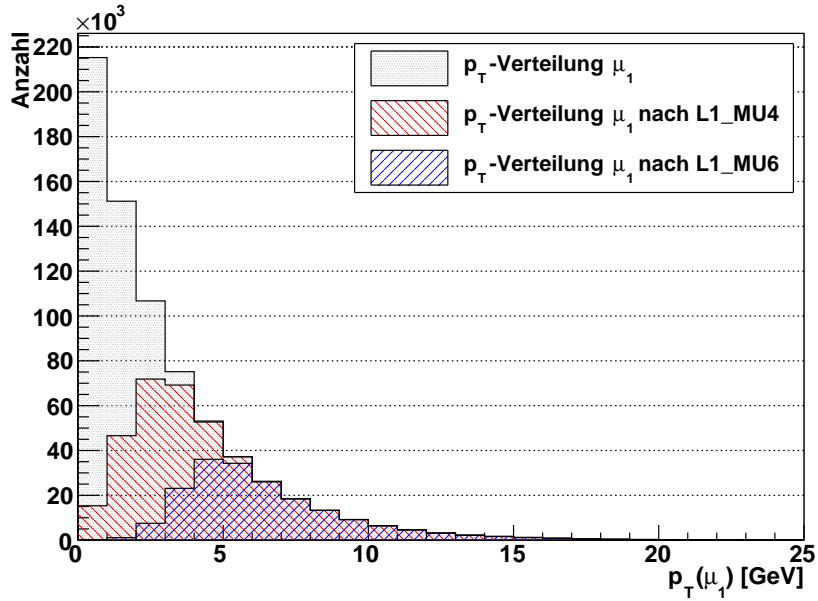


Abbildung 15: p_T -Verteilung für μ_1 nach L1-Trigger für ein Toy mit 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

In dem für diese Untersuchung geschriebenen ROOT-Macro wurde durch Zählen der Ereignisse, für die das $Flag_2MU4$ gesetzt ist, die Abbruchbedingung in der Ereignisgenerierung realisiert. Um den Einfluss unterschiedlicher Ereignismengen am Eingang der beiden L2-Triggerketten zu untersuchen, wurden drei Datensätze mit pro Toy je 2000, 20 000 bzw. 200 000 von der L1_2MU4-Triggerbedingung akzeptierten Ereignissen erzeugt.

Ein Ereignis wird entsprechend der im L1-Trigger erhaltenen Flags an die beiden L2-Triggerketten weitergegeben. Ist $Flag_2MU4$ gesetzt, wird es an die L2_2mu4-Triggerkette übergeben. Ist zusätzlich auch das $Flag_MU4MU6$ gesetzt, so wird es auch an die L2_mu4mu6-Triggerkette weitergegeben. Dabei bedingt die gewählte Abbruchbedingung, dass der L2_2mu4-Triggerkette in jedem Toy eine konstante Anzahl von Ereignissen übergeben wird. Die der L2_mu4mu6-Triggerkette übergebene Anzahl schwankt hingegen um einen sich aus der L1_MU4MU6-Triggerbedingung ergebenden Mittelwert (siehe Anhang A, Abbildung 32).

4.5 Simulation des L2-Triggers und der betrachteten Skalierungsmethoden

An Eingang des L2-Triggers wird für beide Teilchen eines Ereignisses μ_k ($k = 1, 2$) auf eine zur Vorgehensweise in der Simulation der L1-Triggerobjekte analoge Art und Weise geprüft, ob sie auch die L2-Triggerobjekte L2_mu4 und L2_mu6 erfüllen:

$$z_{L2,k} < A_{L2,mu4}(p_{T,k}) \quad \Rightarrow \quad Flag_mu4_k = 1 \quad \text{mit } k = 1, 2 \quad (8)$$

und

$$z_{L2,k} < A_{L2,mu6}(p_{T,k}) \quad \Rightarrow \quad Flag_mu6_k = 1 \quad \text{mit } k = 1, 2. \quad (9)$$

Im Anschluss daran wird ein Ereignis anhand der im L1-Trigger gesetzten Flags von den entsprechenden L2-Triggerketten bearbeitet. Wie auch in der Simulation des L1-Triggers, wird auch im L2-Trigger die Triggerentscheidung anhand der für jedes Teilchen des Ereignisses gesetzten Flags getroffen:

- L2_2mu4-Triggerbedingung :
beide Teilchen müssen das L2_mu4-Triggerobjekt erfüllen:

$$Flag_mu4_1 == 1 \wedge Flag_mu4_2 == 1 \Rightarrow Flag_2mu4 = 1, \quad (10)$$

- L2_mu4mu6-Triggerbedingung :
beide Teilchen müssen das L2_mu4-Triggerobjekt erfüllen und ein beliebiges dieser Beiden zusätzlich noch die L2_mu6-Triggerbedingung:

$$Flag_2mu4 == 1 \wedge (Flag_mu6_1 == 1 \vee Flag_mu6_2 == 1) \Rightarrow Flag_mu4mu6 = 1. \quad (11)$$

Während der Bewertung des Ereignisses durch die L2-Triggerkette werden vor und nach der L2-Triggerentscheidung Flags zur randomisierten- und zur deterministischen Skalierung gesetzt. Die dazu verwendeten Algorithmen sind für jede Skalierungsart identisch. Sie werden nur zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Ablauf der Bewertung des Ereignisses durch die L2-Triggerkette angewendet. Diese Flags zeigen an, von welchen Skalierungsmethoden das betreffende Ereignis akzeptiert wird. Die Skalierungsalgorithmen wurden wie folgt realisiert:

Randomisierte Skalierung:

Eine Skalierung um einen Faktor S_i bedeutet, dass von N Ereignissen nur N/S_i Ereignisse akzeptiert werden. Um dies zu realisieren, wird für jedes übergebene Ereignis eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Zufallszahl t gezogen. Dazu wird wiederum der Zufallszahlengenerator $TRandom3::Rndm()$ genutzt. Falls nun

$$t < \frac{1}{S_i} \quad \text{mit } i \in \{2mu4, mu4mu6\}$$

gilt, wird das Ereignis als durch die randomisierte Skalierung akzeptiert angesehen und ein entsprechendes Flag gesetzt.

Dabei wird die randomisierte Skalierung *vor* der L2-Triggerentscheidung mit

$$\Rightarrow Flag_randPS_i = 1 \quad \text{mit } i \in \{2mu4, mu4mu6\}$$

und die randomisierte Skalierung *nach* der L2-Triggerentscheidung mit

$$\Rightarrow Flag_i_randPS = 1 \quad \text{mit } i \in \{2mu4, mu4mu6\}$$

bezeichnet.

Deterministische Skalierung:

Die deterministische Skalierung um den Faktor S_i erfolgt durch Akzeptieren jedes S_i 'ten Ereignisses. Dazu wird für jedes übergebene Ereignis eine Zählvariable A_i um eins erhöht. Gilt daraufhin

$$A_i == S_i \quad \text{mit } i \in \{2\mu 4, \mu 4\mu 6\},$$

so wird das entsprechende Flag gesetzt und die Zählvariable zurückgesetzt ($A_i = 0$). Dabei wird die deterministische Skalierung *vor* der L2-Triggerentscheidung mit

$$\Rightarrow \text{Flag_detPS_}i = 1 \quad \text{mit } i \in \{2\mu 4, \mu 4\mu 6\}$$

und die deterministische Skalierung *nach* der L2-Triggerentscheidung mit

$$\Rightarrow \text{Flag_}i_ \text{detPS} = 1 \quad \text{mit } i \in \{2\mu 4, \mu 4\mu 6\}$$

bezeichnet.

In dem für diese Untersuchung geschriebenen ROOT-Macro wurden mithilfe dieser Methoden und Algorithmen fünf Skalierungsmethoden innerhalb der beiden betrachteten L2-Triggerketten, L2_2mu4 und L2_mu4mu6 (siehe Abbildung 11), simuliert:

1. randomisierte Skalierung *vor* der L2-Triggerentscheidung:
Die der L2-Triggerkette übergebenen Ereignisse werden randomisiert skaliert; anschließend wird die L2-Triggerentscheidung gefällt.
2. deterministische Skalierung *vor* der L2-Triggerentscheidung:
Die der L2-Triggerkette übergebenen Ereignisse werden deterministisch skaliert; anschließend wird die L2-Triggerentscheidung gefällt.
3. keine Skalierung.
4. randomisierte Skalierung *nach* der L2-Triggerentscheidung:
Die nach der L2-Triggerentscheidung akzeptierten Ereignisse werden randomisiert skaliert.
5. deterministische Skalierung *nach* der L2-Triggerentscheidung:
Die nach der L2-Triggerentscheidung akzeptierten Ereignisse werden deterministisch skaliert.

Wird ein Skalierungsalgorithmus vor der L2-Triggerentscheidung ausgeführt, so werden alle an die Triggerkette übergebenen Ereignisse skaliert. Bei Ausführung des Skalierungsalgorithmus nach der L2-Triggerentscheidung hingegen werden nur die durch die Triggerentscheidung akzeptierten Ereignisse skaliert. Zur randomisierten Skalierung vor bzw. nach der L2-Triggerentscheidung werden unterschiedliche Zufallszahlen benutzt.

4.6 Erstellen der Häufigkeitsverteilungen

Nachdem die Erzeugung eines Toy-Experiments beendet ist, werden die Anzahlen der durch die verschiedenen Skalierungsmethoden akzeptierten Ereignisse durch Kombination der gesetzten Flags ermittelt. Beispielfür die L2_2mu4-Triggerkette:

1. randomisierte Skalierung vor L2_2mu4:

$N_{randPS,2mu4}$ entspricht der Anzahl aller Ereignisse für die gilt:

$$Flag_{2MU4} = 1 \wedge Flag_{2mu4} = 1 \wedge Flag_{randPS_{2mu4}} = 1,$$

2. deterministische Skalierung vor L2_2mu4:

$N_{detPS,2mu4}$ entspricht der Anzahl aller Ereignisse für die gilt:

$$Flag_{2MU4} = 1 \wedge Flag_{2mu4} = 1 \wedge Flag_{detPS_{2mu4}} = 1,$$

3. keine Skalierung:

N_{2mu4} entspricht der Anzahl aller Ereignisse für die gilt:

$$Flag_{2MU4} = 1 \wedge Flag_{2mu4} = 1,$$

4. randomisierte Skalierung nach L2_2mu4:

$N_{2mu4,randPS}$ entspricht der Anzahl aller Ereignisse für die gilt:

$$Flag_{2MU4} = 1 \wedge Flag_{2mu4} = 1 \wedge Flag_{2mu4_{randPS}} = 1,$$

5. deterministische Skalierung nach L2_2mu4:

$N_{2mu4,detPS}$ entspricht der Anzahl aller Ereignisse für die gilt:

$$Flag_{2MU4} = 1 \wedge Flag_{2mu4} = 1 \wedge Flag_{2mu4_{detPS}} = 1.$$

Die Anzahlen der von der L2_mu4mu6-Triggerkette akzeptierten Ereignisse werden auf analoge Weise bestimmt.

Diese Anzahlen werden für jede L2-Triggerkette und jede Skalierungsmethode in Histogramme eingetragen. Nach Bearbeitung aller 10 000 Toys ergibt sich für jede Skalierungsmethode der beiden Triggerketten eine Häufigkeitsverteilung.

5 Analyse der Skalierungsmethoden

5.1 Bestimmung der Merkmale der Häufigkeitsverteilungen

Die charakteristischen Größen einer normalverteilten Häufigkeitsverteilung \mathcal{N}_x sind ihr Erwartungswert μ_x und ihre Varianz σ_x^2 . In diesem Modell beschreibt μ_x das arithmetische Mittel der von der Triggerbedingung / -kette x akzeptierten Ereigniszahlen nach Abschluss aller 10 000 Toy-Experimente. Aus der Varianz lässt sich die Breite σ_x der Häufigkeitsverteilung durch $\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$ bestimmen. Die Breite beschreibt die Weite der Streuung der Einträge der Häufigkeitsverteilung. Innerhalb von $1\sigma_x$ liegen 68,27% der Einträge der Häufigkeitsverteilung.

Bis auf zwei Ausnahmen sind die durch die im vorigen Kapitel beschriebenen Methoden erzeugten Häufigkeitsverteilungen normalverteilt. Bei den nicht normalverteilten Häufigkeitsverteilungen handelt es sich um die Verteilung nach der L1_2MU4-Triggerbedingung \mathcal{N}_{2MU4} , deren Einträge nach Voraussetzung immer den gleichen festen Wert besitzen, sowie die sich daraus durch deterministische Skalierung ergebende Verteilung $\mathcal{N}_{2MU4,detPS}(S_{2mu4})$. Da die deterministische Skalierung bei konstanter Eingangsgröße (N_{2MU4}) immer zum gleichen Ergebnis führt, besitzen auch die Einträge dieser Häufigkeitsverteilung immer den gleichen festen Wert. Hierbei beschreibt $\mathcal{N}_{2MU4,detPS}(S_{2mu4})$ die Häufigkeitsverteilung nach der L1_2MU4-Triggerbedingung und anschließender deterministischer Skalierung um den Faktor S_{2mu4} .

Für die normalverteilten Häufigkeitsverteilungen werden Schätzer für die charakteristischen Größen (μ_x, σ_x) durch Anpassung einer Gauß-Funktion und Auslesen des Erwartungswerts μ und der Breite σ dieser Gauß-Funktion bestimmt. Dies geschieht wiederum mithilfe des Datenanalysepakets *ROOT*. Bei den nicht-normalverteilten Häufigkeitsverteilungen wird der Erwartungswert gleich der (immer gleichen) Anzahl N_x nach der Triggerbedingung und die Breite $\sigma_x = 0$ gesetzt.

In den beiden folgenden Abschnitten werden für die beiden in dieser Arbeit betrachteten L2-Triggerketten L2_2mu4 und L2_mu4mu6 die zur Untersuchung der Skalierungsmethoden relevanten Größen bestimmt. Dazu werden beispielhaft alle Häufigkeitsverteilungen \mathcal{N}_x^{200k} für 10 000 Toys mit 200 000 Ereignissen nach der L1_2MU4-Triggerbedingung gezeigt und die sich daraus ergebenden Schätzer für die charakteristischen Größen angegeben.

Der L2_2mu4-Triggerkette wurde immer die gleiche feste Anzahl Ereignisse pro Toy übergeben, bei der L2_mu4mu6-Triggerkette hingegen folgt die ihr pro Toy übergebenen Anzahl einer Binomialverteilung (siehe Anhang A, Abbildung 32). Dies folgt daraus, dass diese Untersuchung für beide betrachteten Triggerkette mithilfe derselben Pseudo-Ereignisse durchgeführt wurde und auf die der L2_mu4mu6-Triggerkette übergebenen Ereignisse in der Simulation der L1-Triggerbedingung L1_MU4MU6 noch ein weiterer p_T -Schnitt angewendet wird. Es handelt sich bei diesen Ereignissen um eine echte Teilmenge der der L2_2mu4-Triggerkette übergebenen Pseudo-Ereignisse.

Dieses Vorgehen ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der am Eingang der Triggerkette stehenden Verteilung auf die unterschiedlichen Skalierungsmethoden.

5.1.1 L2_2mu4-Triggerkette

Unabhängig von der benutzten Skalierungsmethode wurde für die L2_2mu4-Triggerkette immer der gleiche Skalierungsfaktor $S_{2mu4} = 5$ benutzt.

Der L2_2mu4-Triggerkette werden die Ereignisse übergeben, die die L1_2MU4-Triggerbedingung erfüllen. Sie bilden das Eingangssignal für alle fünf betrachteten Skalierungsmethoden (siehe Abbildung 16). Die zugehörige Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4}^{200k}$ ist nach Voraussetzung nicht normalverteilt.

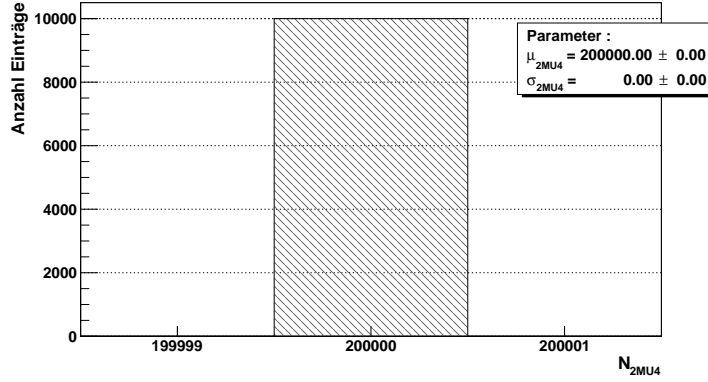


Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4}^{200k}$ nach der L1_2MU4-Triggerbedingung für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4. Es sind $\mu_{2MU4} = 200\,000$ und $\sigma_{2MU4} = 0$.

Die randomisierte Skalierung der von der L1_2MU4-Triggerbedingungen an die L2_2mu4-Triggerkette übergebenen Ereignisse führt zur Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4,randPS}^{200k}(S_{2mu4})$ (siehe Abbildung 17). Die L2-Triggerentscheidung wurde noch nicht ausgewertet, das heißt die Algorithmen des L2-Triggers haben die Ereignisse noch nicht bewertet.

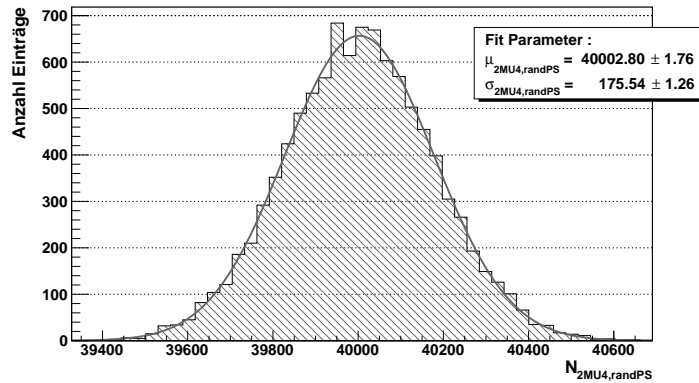


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4,randPS}^{200k}(S_{2mu4})$ nach der L1_2MU4-Triggerbedingung und randomisierter Skalierung um $S_{2mu4} = 5$ für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{2MU4,randPS} = 40\,002,80 \pm 1,76$ und $\sigma_{2MU4,randPS} = 175,54 \pm 1,26$.

Die deterministische Skalierung der von der L1_2MU4-Triggerbedingungen an die L2_2mu4-Triggerkette übergebenen Ereignisse führt zur Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4, detPS}^{200k}(S_{2mu4})$ (siehe Abbildung 18). Auch hier wurde die L2-Triggerentscheidung noch nicht ausgeführt.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4, detPS}^{200k}(S_{2mu4})$:

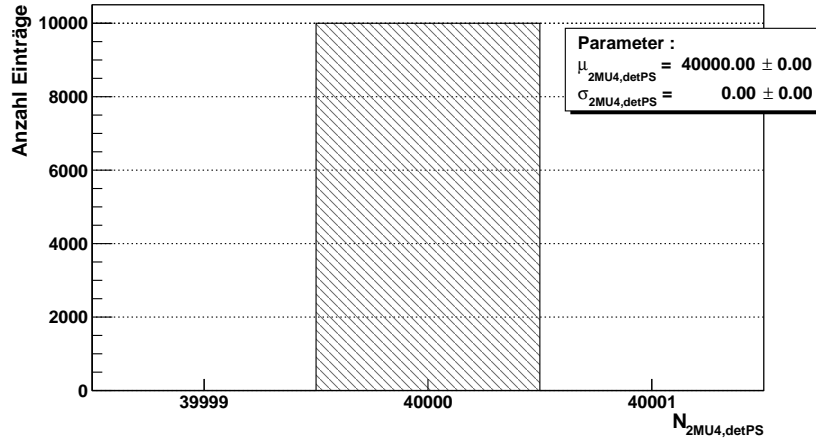


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4, detPS}^{200k}(S_{2mu4})$ nach der L1_2MU4-Triggerbedingung und deterministischer Skalierung um $S_{2mu4} = 5$ für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4. Es sind $\mu_{2MU4, detPS} = 40\,000$ und $\sigma_{2MU4, detPS} = 0$.

Ausschließliche Anwendung der L2_2mu4-Triggerentscheidung ohne Skalierung ergibt die Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2mu4}^{200k}$ (siehe Abbildung 19). Dies ist der Referenzkanal für den Vergleich der Skalierungsmethoden der L2_2mu4-Triggerkette.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2mu4}^{200k}$:

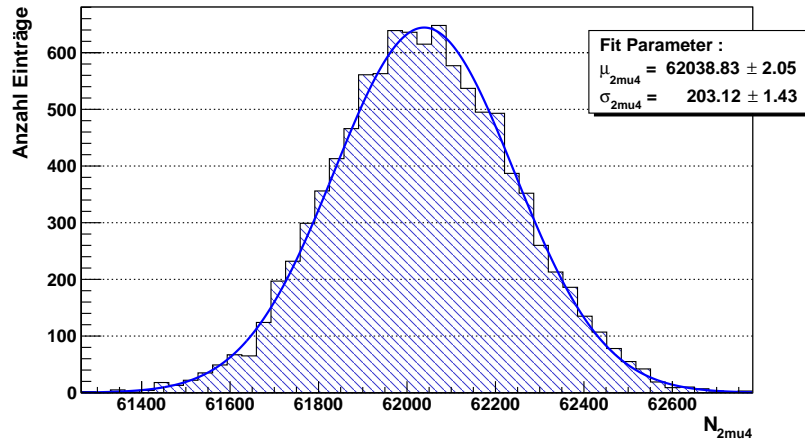


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2mu4}^{200k}$ nach der L2_2mu4-Triggerkette ohne Skalierung für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4. Es sind $\mu_{2mu4} = 62\,038,83 \pm 2,05$ und $\sigma_{2mu4} = 203,12 \pm 1,43$.

Die randomisierte Skalierung zu Beginn der L2_2mu4-Triggerkette führt zur Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$ (siehe Abbildung 20).

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$:

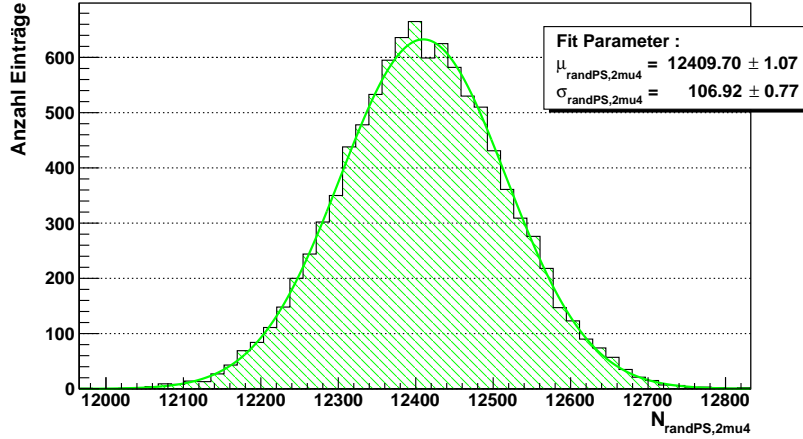


Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$ nach der L2_2mu4-Triggerkette mit randomisierter Skalierung um $S_{2mu4} = 5$ zu Beginn der L2-Triggerkette für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{randPS,2mu4} = 12\,409,70 \pm 1,07$ und $\sigma_{randPS,2mu4} = 106,92 \pm 0,77$.

Die deterministische Skalierung zu Beginn der L2_2mu4-Triggerkette führt zur Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$ (siehe Abbildung 21).

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$:

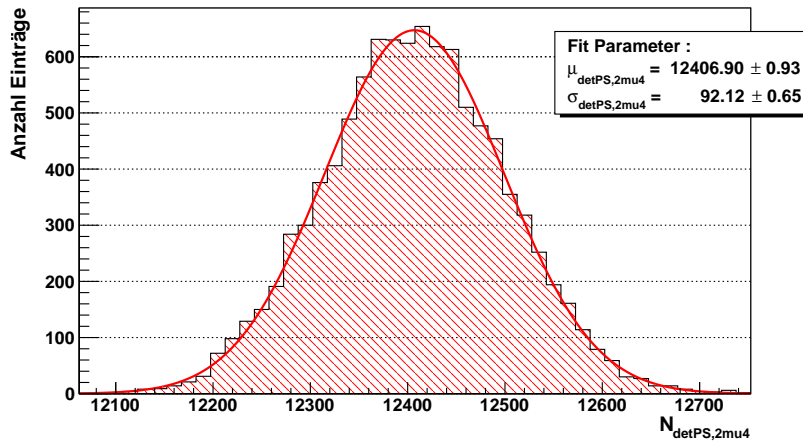


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$ nach der L2_2mu4-Triggerkette mit deterministischer Skalierung um $S_{2mu4} = 5$ zu Beginn der L2-Triggerkette für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{detPS,2mu4} = 12\,406,90 \pm 0,93$ und $\sigma_{detPS,2mu4} = 92,12 \pm 0,65$.

Die randomisierte Skalierung am Ende der L2_2mu4-Triggerkette führt zur Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4,randPS}^{200k}(S_{2\mu4})$ (siehe Abbildung 22).

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4,randPS}^{200k}(S_{2\mu4})$:

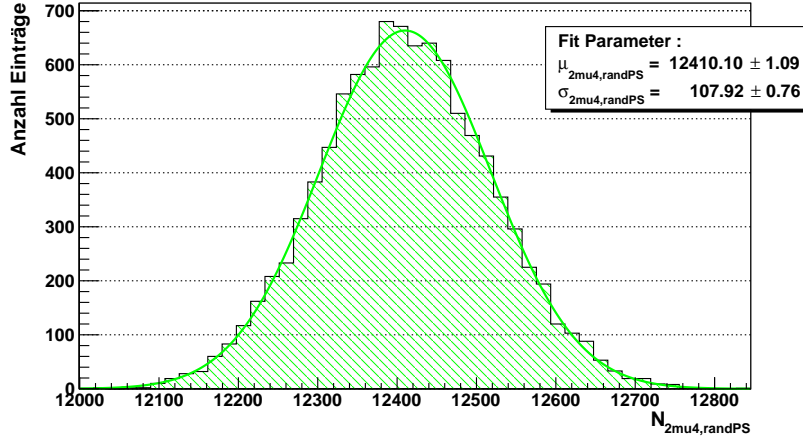


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4,randPS}^{200k}(S_{2\mu4})$ nach der L2_2mu4-Triggerkette mit randomisierter Skalierung um $S_{2\mu4} = 5$ am Ende der L2-Triggerkette für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{2\mu4,randPS} = 12410,10 \pm 1,09$ und $\sigma_{2\mu4,randPS} = 107,92 \pm 0,76$.

Die deterministische Skalierung am Ende der L2_2mu4-Triggerkette führt zur Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4,detPS}^{200k}(S_{2\mu4})$ (siehe Abbildung 23).

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4,detPS}^{200k}(S_{2\mu4})$:

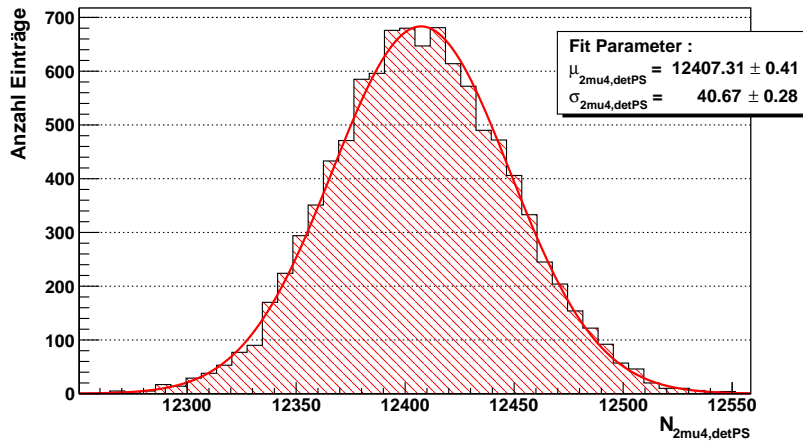


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4,detPS}^{200k}(S_{2\mu4})$ nach der L2_2mu4-Triggerkette mit deterministischer Skalierung um $S_{2\mu4} = 5$ am Ende der L2-Triggerkette für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{2\mu4,detPS} = 12407,31 \pm 0,41$ und $\sigma_{2\mu4,detPS} = 40,67 \pm 0,28$.

In Tabelle 2 sind die Schätzer für die charakteristischen Größen der Häufigkeitsverteilungen zusammengefasst. Zusätzlich sind auch noch die Ergebnisse für die Toys mit 2000 bzw. 20000 Ereignissen nach der L1_2MU4-Triggerbedingung angegeben. Sie wurden mittels der gleichen Vorgehensweise wie für die Toys mit 200000 Ereignissen nach der L1_2MU4-Triggerbedingung bestimmt.

		2000 Ereignisse	20000 Ereignisse	200000 Ereignisse
\mathcal{N}_{2MU4}	μ_{2MU4}	$2000,00 \pm 0,00$	$20000,00 \pm 0,00$	$200000,00 \pm 0,00$
	σ_{2MU4}	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$
$\mathcal{N}_{2MU4,randPS}$	$\mu_{2MU4,randPS}$	$399,96 \pm 0,18$	$3999,19 \pm 0,56$	$40002,80 \pm 1,76$
	$\sigma_{2MU4,randPS}$	$17,97 \pm 0,13$	$55,43 \pm 0,39$	$175,54 \pm 1,26$
$\mathcal{N}_{2MU4,detPS}$	$\mu_{2MU4,detPS}$	$400,00 \pm 0,00$	$4000,00 \pm 0,00$	$40000,00 \pm 0,00$
	$\sigma_{2MU4,detPS}$	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$
\mathcal{N}_{2mu4}	μ_{2mu4}	$620,26 \pm 0,21$	$6202,75 \pm 0,65$	$62038,80 \pm 2,05$
	σ_{2mu4}	$20,64 \pm 0,15$	$64,68 \pm 0,46$	$203,12 \pm 1,43$
$\mathcal{N}_{randPS,2mu4}$	$\mu_{randPS,2mu4}$	$123,94 \pm 0,11$	$1240,26 \pm 0,34$	$12409,70 \pm 1,07$
	$\sigma_{randPS,2mu4}$	$10,76 \pm 0,08$	$33,67 \pm 0,24$	$106,92 \pm 0,77$
$\mathcal{N}_{detPS,2mu4}$	$\mu_{detPS,2mu4}$	$123,93 \pm 0,09$	$1241,02 \pm 0,29$	$12406,90 \pm 0,93$
	$\sigma_{detPS,2mu4}$	$9,20 \pm 0,06$	$29,23 \pm 0,21$	$92,12 \pm 0,65$
$\mathcal{N}_{2mu4,randPS}$	$\mu_{2mu4,randPS}$	$123,99 \pm 0,11$	$1240,69 \pm 0,34$	$12410,10 \pm 1,09$
	$\sigma_{2mu4,randPS}$	$10,72 \pm 0,07$	$33,91 \pm 0,24$	$107,92 \pm 0,76$
$\mathcal{N}_{2mu4,detPS}$	$\mu_{2mu4,detPS}$	$123,65 \pm 0,04$	$1240,17 \pm 0,13$	$12407,31 \pm 0,41$
	$\sigma_{2mu4,detPS}$	$4,14 \pm 0,03$	$12,90 \pm 0,09$	$40,67 \pm 0,28$

Tabelle 2: Ergebnisse für die L2_2mu4-Triggerkette.

5.1.2 L2_mu4mu6-Triggerkette

Bei der Simulation der L2_mu4mu6-Triggerkette wurde für jeden skalierten Kanal der Skalierungsfaktor

$$S_{mu4mu6} = 2$$

benutzt. Im Gegensatz zur L2_2mu4-Triggerkette ist hier die Häufigkeitsverteilung nach der L1_MU4MU6-Triggerbedingung $\mathcal{N}_{2MU4}^{200k}$ normalverteilt (siehe Anhang B, Abbildung 33).

Durch analoges Vorgehen wie bei der L2_2mu4-Triggerkette wurden die in Tabelle 3 zusammengefassten charakteristischen Größen der in der Untersuchung der L2_mu4mu6-Triggerkette benötigten Häufigkeitsverteilungen bestimmt. In Anhang B sind für die Toy-Experimente mit je 200000 Ereignissen nach der L1_2MU4-Triggerbedingung alle, für die Untersuchung der unterschiedlichen Skalierungsmethoden in der L2_mu4mu6-Triggerkette, benutzten Häufigkeitsverteilungen abgebildet.

		2 000 Ereignisse	20 000 Ereignisse	200 000 Ereignisse
\mathcal{N}_{MU4MU6}	μ_{MU4MU6}	1 499,45 ± 0,20	14 995,60 ± 0,61	149 953,52 ± 1,91
	σ_{MU4MU6}	19,45 ± 0,14	60,59 ± 0,45	190,03 ± 1,33
$\mathcal{N}_{MU4MU6,randPS}$	$\mu_{MU4MU6,randPS}$	749,65 ± 0,21	7 497,85 ± 0,68	74 976,43 ± 2,18
	$\sigma_{MU4MU6,randPS}$	21,37 ± 0,15	67,26 ± 0,48	216,66 ± 1,53
$\mathcal{N}_{MU4MU6,detPS}$	$\mu_{MU4MU6,detPS}$	749,46 ± 0,10	7 497,53 ± 0,30	74 976,22 ± 0,95
	$\sigma_{MU4MU6,detPS}$	9,74 ± 0,07	30,24 ± 0,22	94,83 ± 0,66
\mathcal{N}_{mu4mu6}	μ_{mu4mu6}	463,08 ± 0,19	4 630,81 ± 0,59	46 317,21 ± 1,88
	σ_{mu4mu6}	18,79 ± 0,14	59,10 ± 0,43	186,41 ± 1,35
$\mathcal{N}_{randPS,mu4mu6}$	$\mu_{randPS,mu4mu6}$	231,59 ± 0,14	2 315,23 ± 0,45	23 159,07 ± 1,44
	$\sigma_{randPS,mu4mu6}$	14,19 ± 0,11	44,36 ± 0,31	143,00 ± 1,00
$\mathcal{N}_{detPS,mu4mu6}$	$\mu_{detPS,mu4mu6}$	231,21 ± 0,13	2 315,27 ± 0,41	23 159,81 ± 1,28
	$\sigma_{detPS,mu4mu6}$	12,98 ± 0,09	40,93 ± 0,29	127,39 ± 0,90
$\mathcal{N}_{mu4mu6,randPS}$	$\mu_{mu4mu6,randPS}$	231,63 ± 0,14	2 315,15 ± 0,45	23 159,02 ± 1,43
	$\sigma_{mu4mu6,randPS}$	14,32 ± 0,10	44,76 ± 0,32	141,79 ± 0,96
$\mathcal{N}_{mu4mu6,detPS}$	$\mu_{mu4mu6,detPS}$	231,29 ± 0,09	2 315,15 ± 0,30	23 158,46 ± 0,94
	$\sigma_{mu4mu6,detPS}$	9,40 ± 0,07	29,55 ± 0,22	93,09 ± 0,67

Tabelle 3: Ergebnisse für die L2_mu4mu6-Triggerkette.

5.2 Effizienzen der simulierten Triggerketten

Hier wird unter der Effizienz ε der Triggerkette das Verhältnis der Anzahl der durch die Triggerkette akzeptierten Ereignisse zu der Anzahl der ihr von der vorhergehenden Triggerstufe übergebenen Ereignisse verstanden. In dem in dieser Untersuchung verwendeten Modell berechnet sich die Effizienz aus:

$$\varepsilon(\mu_v, \mu_n) = \frac{\mu_n}{\mu_v}. \quad (12)$$

Hierbei bezeichnet μ_v den Schätzer für den Erwartungswert der Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_v(\mu_v, \sigma_v)$ vor der Anwendung der L2-Triggerkette und μ_n den Schätzer für den Erwartungswert der Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_n(\mu_v, \sigma_n)$ nach der Anwendung der L2-Triggerkette.

Eine größere Anzahl von Ereignissen am Eingang der L2-Triggerkette führt zu einer größeren Anzahl nach der L2-Triggerkette, das heißt μ_v und μ_n sind positiv korreliert. Daher berechnet sich der Fehler der Effizienz $\Delta\varepsilon$ aus:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon &= \sqrt{\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\mu_v}\Delta\mu_v\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\mu_n}\Delta\mu_n\right)^2 + 2\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\mu_v}\right)\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\mu_n}\right)\Delta\mu_v\Delta\mu_n\rho(\mu_v, \mu_n)} \\ &= \sqrt{\left(-\frac{\mu_n}{\mu_v^2}\Delta\mu_v\right)^2 + \left(\frac{1}{\mu_v}\Delta\mu_n\right)^2 - 2\frac{\mu_n}{\mu_v^3}\Delta\mu_v\Delta\mu_n\rho(\mu_v, \mu_n)} \\ &= \varepsilon\sqrt{\left(\frac{\Delta\mu_v}{\mu_v}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\mu_n}{\mu_n}\right)^2 - 2\frac{\Delta\mu_v\Delta\mu_n}{\mu_v\mu_n}\rho(\mu_v, \mu_n)} \end{aligned} \quad (13)$$

wobei $\rho(\mu_v, \mu_n)$ der Korrelationskoeffizient der Erwartungswerte der beiden Vertei-

lungen \mathcal{N}_v und \mathcal{N}_n ist. Dieser kann bestimmt werden aus:

$$\varrho(\mu_v, \mu_n) = \frac{\sum_{i=1}^N (N_{v,i} - \mu_v)(N_{n,i} - \mu_n)}{N\sigma_v\sigma_n} \quad \text{mit } i = 1, \dots, N \text{ und } N = \text{Anzahl der Toys}$$

5.2.1 Effizienzen der L2_2mu4-Triggerrkette

Der L2_2mu4-Triggerrkette wird in diesem Modell pro Toy immer die gleiche Anzahl an Ereignissen N_{2MU4} übergeben (siehe Abbildung 16). Aus dieser Voraussetzung folgt $\Delta\mu_{2MU4} = 0$. Einsetzen in die Gleichungen (12) und (13) ergibt für die Effizienzen ε der simulierten L2_2mu4-Triggerrketten und deren Fehler $\Delta\varepsilon$:

1. für die randomisierte Skalierung *vor* der L2-Triggerentscheidung durch:

$$\varepsilon_{randPS,2mu4} = \frac{\mu_{randPS,2mu4}}{\mu_{2MU4}}, \quad \Delta\varepsilon_{randPS,2mu4} = \varepsilon_{randPS,2mu4} \frac{\Delta\mu_{randPS,2mu4}}{\mu_{randPS,2mu4}},$$

2. für die deterministische Skalierung *vor* der L2-Triggerentscheidung durch:

$$\varepsilon_{detPS,2mu4} = \frac{\mu_{detPS,2mu4}}{\mu_{2MU4}}, \quad \Delta\varepsilon_{detPS,2mu4} = \varepsilon_{detPS,2mu4} \frac{\Delta\mu_{detPS,2mu4}}{\mu_{detPS,2mu4}},$$

3. für die unskalierte L2-Triggerentscheidung durch:

$$\varepsilon_{2mu4} = \frac{\mu_{2mu4}}{\mu_{2MU4}}, \quad \Delta\varepsilon_{2mu4} = \varepsilon_{2mu4} \frac{\Delta\mu_{2mu4}}{\mu_{2mu4}},$$

4. für die randomisierte Skalierung *nach* der L2-Triggerentscheidung durch:

$$\varepsilon_{2mu4,randPS} = \frac{\mu_{2mu4,randPS}}{\mu_{2MU4}}, \quad \Delta\varepsilon_{2mu4,randPS} = \varepsilon_{2mu4,randPS} \frac{\Delta\mu_{2mu4,randPS}}{\mu_{2mu4,randPS}},$$

5. für die deterministische Skalierung *nach* der L2-Triggerentscheidung durch:

$$\varepsilon_{2mu4,detPS} = \frac{\mu_{2mu4,detPS}}{\mu_{2MU4}}, \quad \Delta\varepsilon_{2mu4,detPS} = \varepsilon_{2mu4,detPS} \frac{\Delta\mu_{2mu4,detPS}}{\mu_{2mu4,detPS}}.$$

In Tabelle 4 sind die sich ergebenden Effizienzen angegeben. In Abbildung 24 sind diese graphisch dargestellt. Dabei ist die Effizienz der skalierten L2_2mu4-Triggerrkette auf der primären (linken) y-Achse angegeben und für die unskalierte Triggerrkette auf der sekundären (rechten) y-Achse. Da in der L2_2mu4-Triggerrkette ein Skalierungsfaktor von $S_{2mu4} = 5$ gesetzt wurde, entspricht die Skala der sekundären Achse genau dem fünffachen der primären Achse.

	$N_{2MU4} = 2\,000$	$N_{2MU4} = 20\,000$	$N_{2MU4} = 200\,000$
ε_{2mu4}	0,31013 \pm 0,00010	0,310138 \pm 0,000032	0,310194 \pm 0,000010
$\varepsilon_{randPS,2mu4}$	0,06197 \pm 0,00005	0,062013 \pm 0,000017	0,062049 \pm 0,000005
$\varepsilon_{detPS,2mu4}$	0,06196 \pm 0,00005	0,062051 \pm 0,000015	0,062035 \pm 0,000005
$\varepsilon_{2mu4,randPS}$	0,06199 \pm 0,00005	0,062034 \pm 0,000017	0,062051 \pm 0,000005
$\varepsilon_{2mu4,detPS}$	0,06183 \pm 0,00002	0,062009 \pm 0,000006	0,062037 \pm 0,000002

Tabelle 4: Effizienzen der unterschiedlichen L2_2mu4-Triggerketten

Die Aufgabe der Skalierung ist es, die Datenraten nach der L2_2mu4-Triggerkette um den Skalierungsfaktor S_{2mu4} zu reduzieren. Das heißt, für die Effizienzen $\varepsilon_{skaliert}$ der skalierten L2_2mu4-Triggerketten muss gelten:

$$\varepsilon_{2mu4} = \varepsilon_{skaliert} S_{2mu4}. \quad (14)$$

Die Gleichung (14) gilt für den Fall, dass die benutzte Skalierungsmethode die Effizienz exakt um den Skalierungsfaktor $S_{2mu4} = 5$ reduziert. Durch das Verhältnis der Effizienz der unskalierten L2_2mu4-Triggerkette zu der Effizienz der skalierten L2_2mu4-Triggerkette lässt sich für die unterschiedlichen Skalierungsmethoden ein effektiver Skalierungsfaktor S_i^{Eff} berechnen:

$$S_i^{Eff} = \frac{\varepsilon_{2mu4}}{\varepsilon_i} \quad (15)$$

mit $i \in \{randPS, 2mu4; detPS, 2mu4; 2mu4, randPS; 2mu4, detPS\}$.

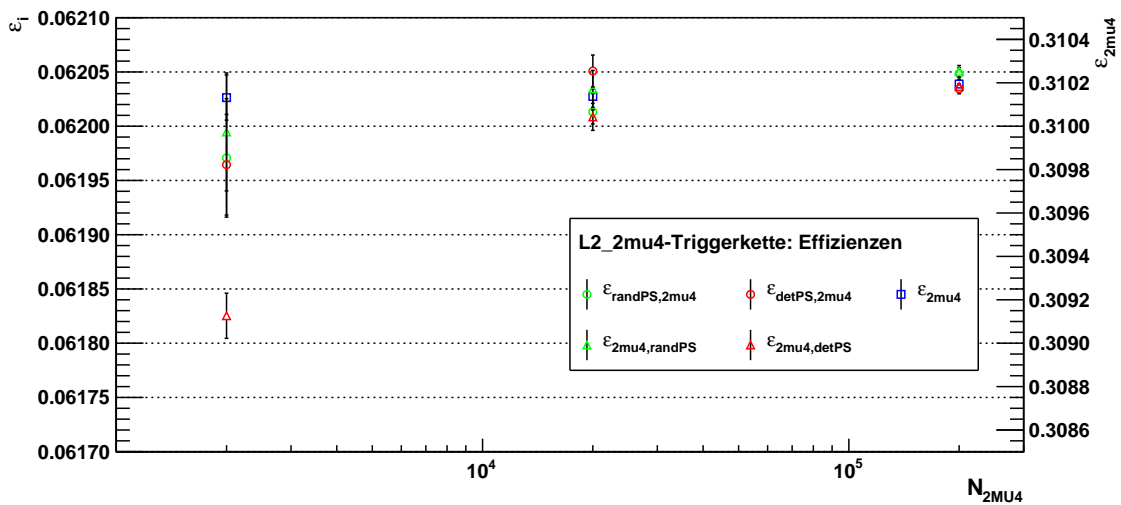


Abbildung 24: Effizienzen der unterschiedlichen L2_2mu4-Triggerketten für $N_{2MU4} = 2\,000, 20\,000$ und $200\,000$ Ereignisse. Die Skala der sekundären Achse ist gleich dem fünffachen der Skala der primären Achse.

In Tabelle 5 sind die effektiven Skalierungsfaktoren für alle betrachteten Skalierungsmethoden zusammengefasst. In Abbildung 25 sind sie für die unterschiedlichen Ereignisanzahlen am Eingang der L2_2mu4-Triggerkette dargestellt.

	$N_{2MU4} = 2\,000$		$N_{2MU4} = 20\,000$		$N_{2MU4} = 200\,000$	
$S_{randPS,2mu4}^{Eff}$	5,004	$\pm 0,004$	5,001	$\pm 0,001$	4,9992	$\pm 0,0004$
$S_{detPS,2mu4}^{Eff}$	5,005	$\pm 0,003$	4,998	$\pm 0,001$	5,0003	$\pm 0,0003$
$S_{2mu4,randPS}^{Eff}$	5,003	$\pm 0,004$	4,999	$\pm 0,001$	4,9991	$\pm 0,0004$
$S_{2mu4,detPS}^{Eff}$	5,016260	$\pm 6 \cdot 10^{-6}$	5,001525	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$	5,00018506	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 5: Effektive Skalierungsfaktoren der verschiedenen Skalierungsmethoden in der L2_2mu4-Triggerkette.

Durch alle vier betrachteten Skalierungsmethoden reduziert sich die Effizienz um den gewünschten Skalierungsfaktor $S_{2mu4} = 5$. Keine Skalierungsmethode bietet entscheidende Vorteile im Skalierungsverhalten. Das schlechteste Skalierungsergebnis erzielt die deterministische Skalierung nach der L2-Triggerentscheidung für nur 2000 Ereignisse am Eingang der Triggerkette. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Algorithmus dieser Skalierungsmethode in jedem Toy

$$n_r = N_{2mu4} \bmod S_{2mu4}$$

Ereignisse nicht behandelt. Effektiv entspricht das einer Verringerung der dem Skalierungsalgorithmus übergebenen Ereignisanzahl um n_r . Mit anderen Worten: jede

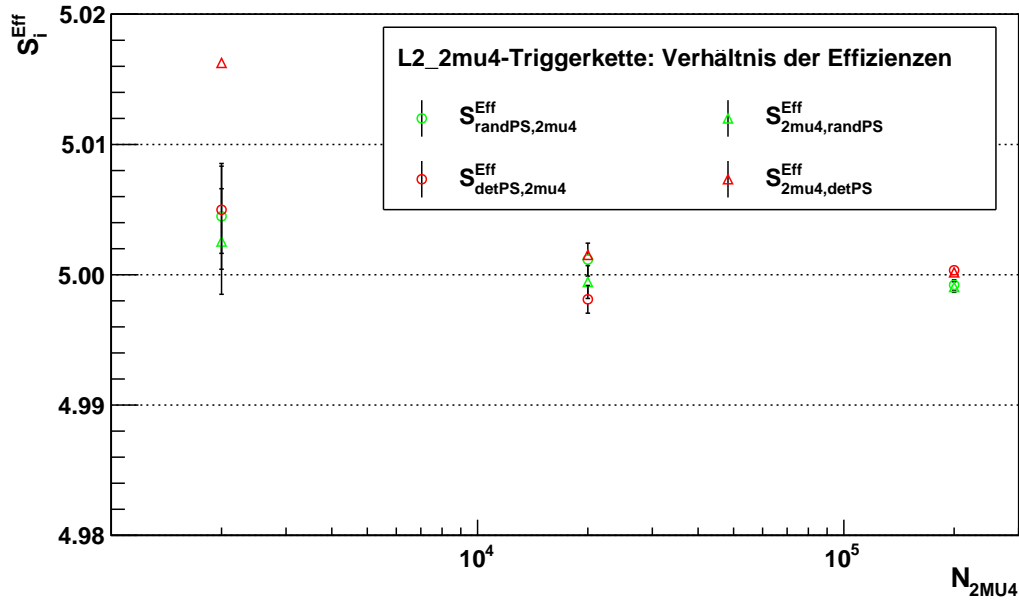


Abbildung 25: Effektive Skalierungsfaktoren der verschiedenen Skalierungsmethoden in der L2_2mu4-Triggerkette für $N_{2MU4} = 2\,000, 20\,000$ und $200\,000$ Ereignisse.

Ereignisanzahl zwischen $N_{2\mu 4} - n_r$ bis $N_{2\mu 4}$ führt nach Anwendung des deterministischen Skalierungsalgorithmus zur gleichen Anzahl akzeptierter Ereignisse. Daraus folgt, dass für den effektiven Skalierungsfaktor $S_{2\mu 4, detPS}^{Eff}$ der deterministischen Skalierung am Ende der L2_2mu4-Triggerkette immer $S_{2\mu 4, detPS}^{Eff} \geq S_{2\mu 4}$ gilt. Dieser Effekt wird mit steigender Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette immer kleiner, bei 200 000 Ereignissen am Eingang der Triggerkette ist die Abweichung des effektiven Skalierungsfaktor $S_{2\mu 4, detPS}^{Eff}$ von dem gewünschten Skalierungsfaktor $S_{2\mu 4}$ in der gleichen Größenordnung wie bei den übrigen drei Skalierungsmethoden. Wird im ATLAS-Experiment für eine Triggerkette ein Skalierungsfaktor gesetzt, so liegt bei dieser im Allgemeinen eine hohe Ereignisanzahl vor und der oben beschriebene Effekt führt zu keiner größeren Abweichung von dem gewünschten Skalierungsfaktor als durch die anderen Skalierungsmethoden.

Weiterhin fällt der im Vergleich zu den übrigen Skalierungsmethoden sehr kleine Fehler des effektiven Skalierungsfaktors $\Delta S_{2\mu 4, detPS}^{Eff}$ auf. Dies erklärt sich dadurch, dass die Erwartungswerte der beiden Häufigkeitsverteilungen $\mathcal{N}_{2\mu 4}$ und $\mathcal{N}_{2\mu 4, detPS}$, die in die Berechnung des effektiven Skalierungsfaktors eingehen, stark positiv korreliert sind. Daraus folgt, dass der Korrelationsterm in (13) die quadratische Summe der Einzelfehler verringert und somit auch den Gesamtfehler $\Delta S_{2\mu 4, detPS}^{Eff}$.

5.2.2 Effizienzen der L2_mu4mu6-Triggerkette

In dieser Untersuchung wird die Simulation der L2_mu4mu6-Triggerkette mit den gleichen Pseudo-Ereignissen durchgeführt, die auch zur Simulation der L2_2mu4-Triggerkette genutzt wurden. Die Abbruchbedingung in der Ereignisgenerierung bezieht sich allerdings auf die nach der L1_2MU4-Triggerbedingung akzeptierte Ereignisanzahl. Die L1_MU4MU6-Triggerbedingung fordert zusätzlich noch das eins der beiden Teilchen eines Ereignisses das L1_MU6-Triggerobjekt erfüllt. Daher ist die Anzahl der der L2_mu4mu6-Triggerkette übergebenen Ereignisse nicht für jedes Toy gleich. Somit sind auch die Einträge in die Häufigkeitsverteilung \mathcal{N}_{MU4MU6} unterschiedlich (siehe Anhang B, Abbildung 33). Dies hat zur Folge, dass für den Fehler auf den Erwartungswert dieser Häufigkeitsverteilung $\Delta \mu_{MU4MU6} \neq 0$ gilt. Damit folgt nach (12) und (13) für die Effizienzen der unterschiedlichen L2_mu4mu6-Triggerketten und deren Fehler:

$$\varepsilon_i = \frac{\mu_i}{\mu_{MU4MU6}} \quad ,$$

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i \sqrt{\left(\frac{\Delta \mu_{MU4MU6}}{\mu_{MU4MU6}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mu_i}{\mu_i}\right)^2 - 2 \frac{\Delta \mu_{MU4MU6} \Delta \mu_i}{\mu_{MU4MU6} \mu_i} \rho(\mu_{MU4MU6}, \mu_i)} \quad , \text{ mit}$$

$$i \in \{randPS, mu4mu6; detPS, mu4mu6; mu4mu6, randPS; mu4mu6, detPS\}.$$

Die sich damit ergebenden Effizienzen der L2_mu4mu6-Triggerkette mit den unterschiedlichen Skalierungsmethoden sind in Tabelle 6 zusammengefasst und in Abbildung 26 dargestellt.

	$N_{2MU4} = 2\,000$	$N_{2MU4} = 20\,000$	$N_{2MU4} = 200\,000$
ε_{mu4mu6}	0,30884 ±0,00012	0,30881 ±0,00004	0,308877 ±0,000012
$\varepsilon_{randPS,mu4mu6}$	0,15445 ±0,00009	0,15439 ±0,00003	0,154442 ±0,000009
$\varepsilon_{detPS,mu4mu6}$	0,15420 ±0,00009	0,15440 ±0,00003	0,154447 ±0,000008
$\varepsilon_{mu4mu6,randPS}$	0,15448 ±0,00009	0,15439 ±0,00003	0,154441 ±0,000009
$\varepsilon_{mu4mu6,detPS}$	0,15425 ±0,00006	0,15439 ±0,00002	0,154438 ±0,000007

Tabelle 6: Effizienzen der unterschiedlichen L2_mu4mu6-Triggerketten.

Analog zum Vorgehen bei der L2_2mu4-Triggerkette wurden mithilfe dieser Effizienzen die effektiven Skalierungsfaktoren für die unterschiedlichen Skalierungsmethoden aus:

$$S_i^{Eff} = \frac{\varepsilon_{mu4mu6}}{\varepsilon_i}, \quad (16)$$

mit $i \in \{randPS, mu4mu6; detPS, mu4mu6; mu4mu6, randPS; mu4mu6, detPS\}$, bestimmt. Diese sind in Tabelle 7 zusammengefasst. In Abbildung 27 sind sie für die in dieser Untersuchung betrachteten drei Ereignisanzahlen nach der L1_2MU4-Triggerbedingung dargestellt.

In der Simulation der L2_mu4mu6-Triggerkette wurde der Skalierungsfaktor $S_{mu4mu6} = 2$ gesetzt. Die berechneten effektiven Skalierungsfaktoren S_i^{Eff} für $i \in \{randPS, mu4mu6; detPS, mu4mu6; mu4mu6, randPS; mu4mu6, detPS\}$ zeigen, dass auch hier alle angewendeten Skalierungsmethoden die Datenrate um den gewünschten Skalierungsfaktor reduzieren. Die Schwankung der Ereignisanzahl am Eingang der L2-Triggerkette führt bei den Toy-Experimenten mit nur 2000 Ereignissen nach der L1_2MU4-Triggerbedingung bei deterministischer Skalierung nach der L2-Triggerentscheidung zu einer geringeren relativen Abweichung des effektiven

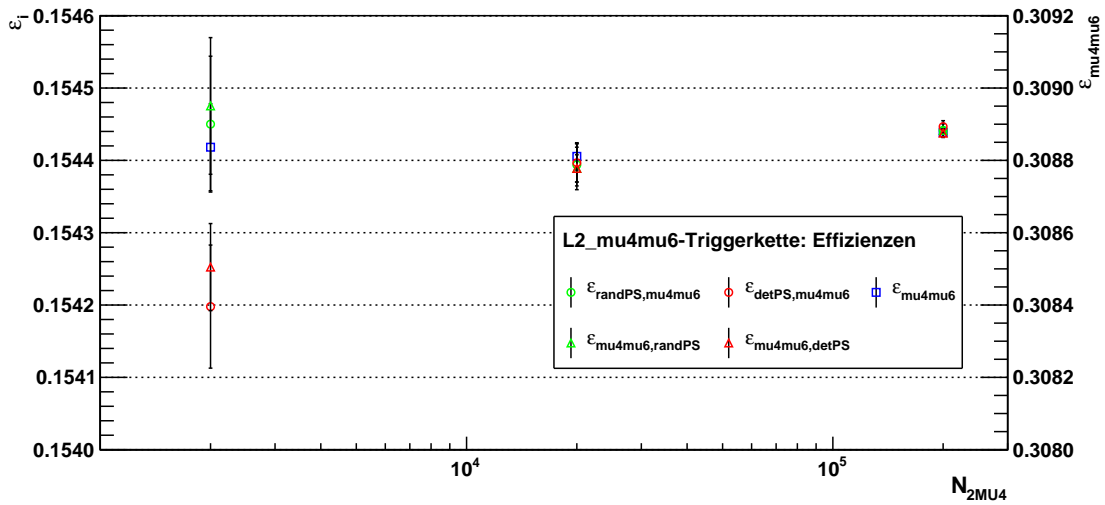


Abbildung 26: Effizienzen der unterschiedlichen L2_mu4mu6-Triggerketten für $N_{2MU4} = 2\,000, 20\,000$ und $200\,000$ Ereignisse. Die Skala der sekundären Achse ist gleich dem doppelten der Skala der primären Achse.

	$N_{2MU4} = 2\,000$		$N_{2MU4} = 20\,000$		$N_{2MU4} = 200\,000$	
$S_{randPS,mu4mu6}^{Eff}$	1,9996	$\pm 0,0009$	2,0002	$\pm 0,0003$	1,99996	$\pm 0,00009$
$S_{detPS,mu4mu6}^{Eff}$	2,0029	$\pm 0,0008$	2,0001	$\pm 0,0002$	1,99990	$\pm 0,00008$
$S_{mu4mu6,randPS}^{Eff}$	1,9993	$\pm 0,0009$	2,0002	$\pm 0,0003$	1,99996	$\pm 0,00009$
$S_{mu4mu6,detPS}^{Eff}$	2,002149	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	2,00021597	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$	2,00001230	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 7: Effektive Skalierungsfaktoren der verschiedenen Skalierungsmethoden in der L2_mu4mu6-Triggerkette.

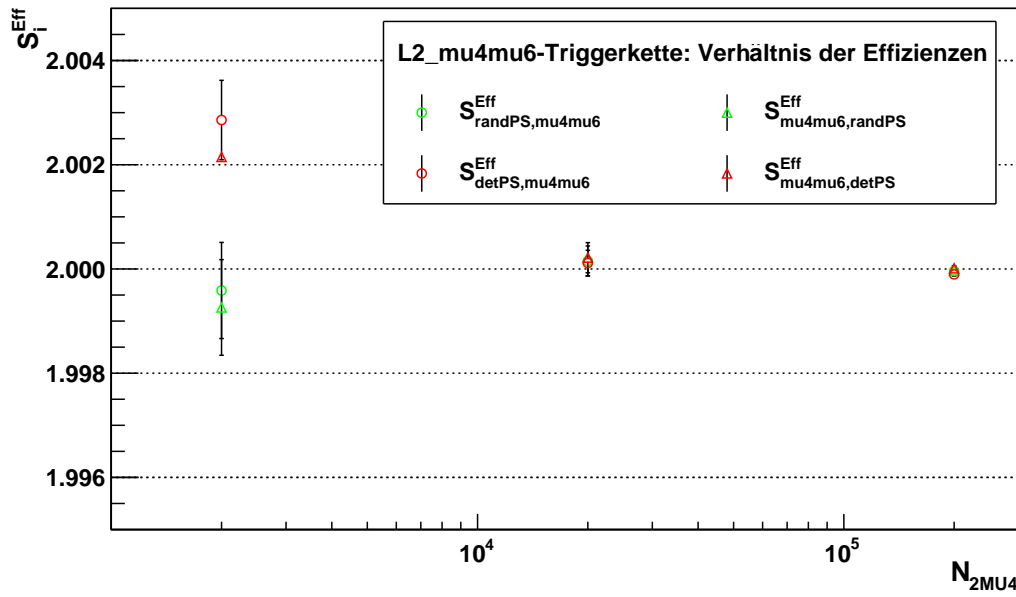


Abbildung 27: Effektive Skalierungsfaktoren der verschiedenen Skalierungsmethoden in der L2_mu4mu6-Triggerkette für $N_{2MU4} = 2\,000$, $20\,000$ und $200\,000$ Ereignisse

Skalierungsfaktors $S_{mu4mu6,detPS}^{Eff}$. Bei der L2_2mu4-Triggerkette, mit konstanter Ereigniszahl am Eingang der Triggerkette, beträgt sie

$$\left(\frac{S_{2mu4,detPS}^{Eff,200k}}{S_{2mu4}} - 1 \right) \cdot 100\% = 0,33\%.$$

In der L2_mu4mu6-Triggerkette, mit normalverteilter Ereigniszahl pro Toy am Eingang der Triggerkette, beträgt sie hingegen nur:

$$\left(\frac{S_{mu4mu6,detPS}^{Eff,200k}}{S_{mu4mu6}} - 1 \right) \cdot 100\% = 0,11\%.$$

5.3 Änderung der relative Breite aufgrund der Skalierung

Um die Streubreiten verschiedener Häufigkeitsverteilungen mit unterschiedlichen Erwartungswerten miteinander vergleichen zu können, bietet es sich an, die relative Breite b^{rel} (oder den Variationskoeffizienten $\text{VarK}(N)$) der Verteilungen zu bestimmen. Die relative Breite b_x^{rel} einer Verteilung \mathcal{N}_x berechnet sich aus dem Verhältnis ihrer Breite σ_x zu ihrem Erwartungswert μ_x :

$$b_x^{rel} = \text{VarK}(N_x) = \frac{\sigma_x}{\mu_x}. \quad (17)$$

wobei N_x die Einträge der Verteilung bezeichnet. Die relative Breite ist eine dimensionslose Größe, für sie gilt: je kleiner die relative Breite b_x^{rel} einer Häufigkeitsverteilung \mathcal{N}_x , desto stärker ist \mathcal{N}_x an der Stelle ihres Erwartungswerts μ_x lokalisiert. Die relative Breite ermöglicht es, die Breiten von Häufigkeitsverteilungen mit stark unterschiedlichem Erwartungswert miteinander zu vergleichen. Daher ist sie geeignet, um in dieser Untersuchung die sich nach der Skalierung ergebenden Häufigkeitsverteilungen mit der sich aus der unskalierten L2-Triggerkette ergebenden Häufigkeitsverteilung zu vergleichen.

Der Erwartungswert und die Breite einer Häufigkeitsverteilung sind korreliert, daher berechnet sich der Fehler der relativen Breite aus:

$$\Delta b_x^{rel} = b_x^{rel} \sqrt{\left(\frac{\Delta\sigma_x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\mu_x}{\mu_x}\right)^2 - 2\frac{\Delta\sigma_x\Delta\mu_x}{\sigma_x\mu_x}\varrho(\sigma_x, \mu_x)}. \quad (18)$$

Die Werte für σ_x , μ_x , $\Delta\sigma_x$, $\Delta\mu_x$ und $\varrho(\sigma_x, \mu_x)$ stammen aus der in Abschnitt 5.1.1 für die L2_2mu4-Triggerkette und in Abschnitt 5.1.1 für die L2_mu4mu6-Triggerkette beschriebenen Anpassung an die betreffenden Häufigkeitsverteilungen.

5.3.1 L2_2mu4-Triggerkette

Für die in der Simulation der L2_2mu4-Triggerkette auftretenden Häufigkeitsverteilungen sind die sich nach den Gleichungen (17) und (18) ergebenden relativen Breiten in Tabelle 8 zusammengefasst.

	$N_{2MU4} = 2\,000$	$N_{2MU4} = 20\,000$	$N_{2MU4} = 200\,000$
b_{2mu4}^{rel}	0,0333 ±0,0002	0,01043 ±0,00007	0,00327 ±0,00002
$b_{randPS,2mu4}^{rel}$	0,0868 ±0,0006	0,02715 ±0,00020	0,00862 ±0,00006
$b_{detPS,2mu4}^{rel}$	0,0743 ±0,0005	0,02356 ±0,00017	0,00743 ±0,00005
$b_{2mu4,randPS}^{rel}$	0,0864 ±0,0006	0,02733 ±0,00020	0,00870 ±0,00006
$b_{2mu4,detPS}^{rel}$	0,0335 ±0,0002	0,01040 ±0,00007	0,00328 ±0,00002

Tabelle 8: Relative Breiten der Häufigkeitsverteilungen nach den unterschiedlichen L2_2mu4-Triggerketten.

Abbildung 28 zeigt die relativen Breiten der Häufigkeitsverteilungen nach den unterschiedlichen L2_2mu4-Triggerketten. Die Breite σ einer Häufigkeitsverteilung ist in dieser Simulation ein Maß für die Unsicherheit der sich im ATLAS-Experiment

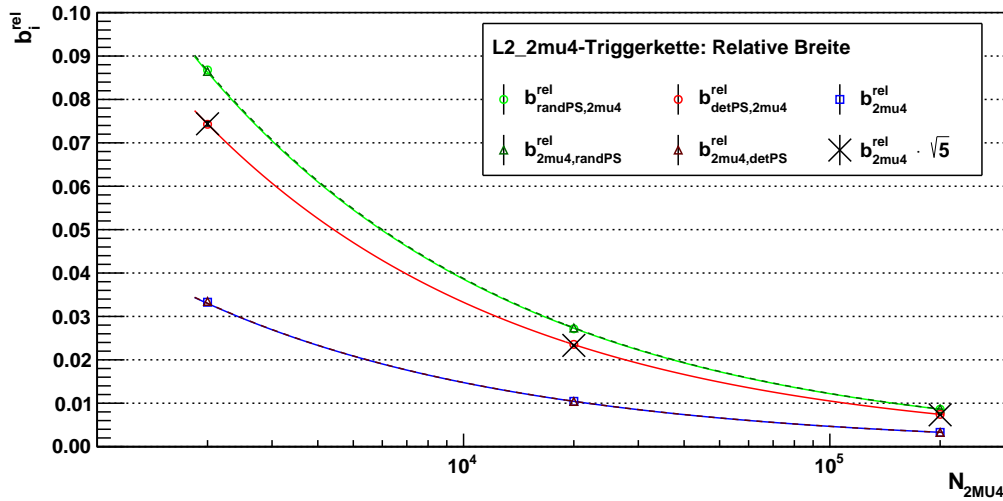


Abbildung 28: Relative Breiten der Häufigkeitsverteilungen nach den unterschiedlichen L2_2mu4-Triggerketten für $N_{2MU4} = 2000, 20000$ und 200000 Ereignisse.

nach der L2_2mu4-Triggerkette ergebenden Anzahl für ein Toy-Experiment mit N_{2MU4} Ereignissen nach der L1_2MU4-Triggerentscheidung. Für diese Unsicherheit gilt $\sigma \propto \sqrt{N}$, wobei N der Anzahl der Ereignisse am Eingang der L2-Triggerkette entspricht. Für den Erwartungswert der Häufigkeitsverteilung nach der Triggerkette gilt $\mu \propto N$. Daraus folgt für die relative Breite:

$$b^{rel} = \frac{\sigma}{\mu} \propto \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}.$$

Das heißt, die relative Breite sollte für steigendes N mit $1/\sqrt{N}$ fallen. Um zu verdeutlichen, dass die in dieser Simulation berechneten relativen Breiten diesem Verhalten folgen, wurde an die Tupel b_i^{rel} mit $i \in \{detPS, 2mu4; 2mu4, detPS; randPS, 2mu4; 2mu4, randPS; 2mu4\}$ jeweils eine Funktion $\sim 1/\sqrt{N}$ angepasst und in Abbildung 28 eingefügt.

Man entnimmt Abbildung 28, dass mit Ausnahme der deterministischen Skalierung am Ende der L2-Triggerkette alle Skalierungsmethoden zu einer größeren Streubreite der Häufigkeitsverteilung nach der Triggerkette führen, als im unskalierten Fall. Um diese Verbreiterung der Häufigkeitsverteilungen durch die unterschiedlichen Skalierungsmethoden quantifizieren zu können, wird das Verhältnis der relativen Breiten der sich durch die skalierten Triggerketten ergebenden Häufigkeitsverteilungen zu der relativen Breite der Häufigkeitsverteilung, die sich im unskalierten Fall ergibt, gebildet:

$$R_i^{b^{rel}} = \frac{b_i^{rel}}{b_{2mu4}^{rel}}, \quad (19)$$

mit $i \in \{randPS, 2mu4; detPS, 2mu4; 2mu4, randPS; 2mu4, detPS\}$. Das durch $R_i^{b^{rel}}$ bestimmte Verhältnis wird im Weiteren als relative Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung aufgrund der durch die Skalierungsmethode i erfolgten Skalierung

innerhalb der Triggerkette, bezeichnet.

Die sich aus die Gleichung (19) ergebenden relativen Verbreiterungen sind für alle drei Ereignisanzahlen in Tabelle 9 zusammengefasst und in Abbildung 29 dargestellt. Mithilfe des durch das Datenanalysepakets ROOT bereitgestellten Algorithmus TGraph::Fit("pol0") wurde an jedes Tupel $R_i^{b^{rel}}$ eine konstante Funktion angepasst und in Abbildung 29 eingefügt. Die Ergebnisse dieser Anpassung sind in der letzten Spalte von Tabelle 9 angegeben.

	$N_{2MU4} = 2000$		$N_{2MU4} = 20000$		$N_{2MU4} = 200000$		Fit-Ergebnis	
$R_{randPS,2mu4}^{b^{rel}}$	2,61	$\pm 0,03$	2,60	$\pm 0,03$	2,63	$\pm 0,03$	2,61	$\pm 0,02$
$R_{detPS,2mu4}^{b^{rel}}$	2,24	$\pm 0,02$	2,26	$\pm 0,02$	2,27	$\pm 0,02$	2,25	$\pm 0,01$
$R_{2mu4,randPS}^{b^{rel}}$	2,60	$\pm 0,03$	2,62	$\pm 0,03$	2,66	$\pm 0,03$	2,62	$\pm 0,02$
$R_{2mu4,detPS}^{b^{rel}}$	1,01	$\pm 0,01$	1,00	$\pm 0,01$	1,00	$\pm 0,01$	1,01	$\pm 0,01$

Tabelle 9: Verhältnis der relativen Breiten der skalierten L2_2mu4-Triggerketten zu der relativen Breite der unskalierten Triggerkette und das Ergebnis der Anpassung einer Konstanten an die Tupel $R_i^{b^{rel}}$.

In Abbildung 29 ist deutlich ersichtlich, dass die relative Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung durch die verschiedenen Skalierungsmethoden unabhängig von der Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette ist. Für alle betrachteten Ereignisanzahlen ergibt sich ein innerhalb der Fehler identischer Wert $R_i^{b^{rel}}$ für die relative Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung \mathcal{N}_{2mu4} durch die Skalierungsmethode i , mit $i \in \{randPS, 2mu4; detPS, 2mu4; 2mu4, randPS; 2mu4, detPS\}$.

Im Folgenden wird eine Erwartung für die relative Verbreiterung durch die unterschiedlichen Skalierungsmethoden formuliert und anschließend mit den in dieser

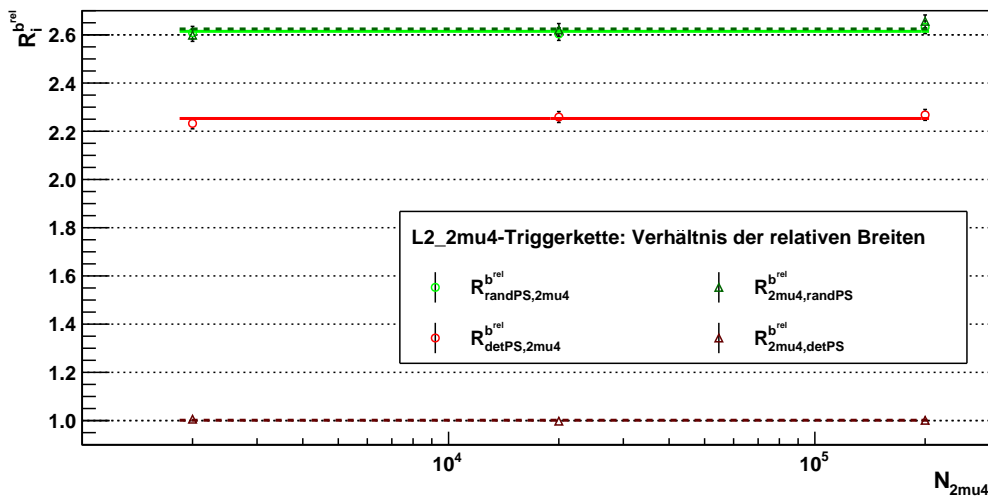


Abbildung 29: Verhältnis der relativen Breiten der skalierten L2_2mu4-Triggerketten zu der relativen Breite der unskalierten Triggerkette für $N_{2MU4} = 2000, 20000$ und 200000 Ereignisse.

Untersuchung bestimmten Werten verglichen.

Die deterministische Skalierung *nach* der L2_2mu4-Triggerentscheidung bewirkt veranschaulichend dargestellt, dass in dem Histogramm der Häufigkeitsverteilung nach der unskalierten L2_2mu4-Triggerentscheidung \mathcal{N}_{2mu4} (siehe Abbildung 19) der Wert jedes Bins um den Skalierungsfaktor $S_{2mu4} = 5$ reduziert wird. Die Anzahl der Einträge der Bins bleiben hingegen unverändert. Bildlich gesprochen kann man sagen, dass die Häufigkeitsverteilung auf der x-Achse nach links verschoben wird. Das führt zu der Häufigkeitsverteilung, die sich durch die deterministische Skalierung nach der L2-Triggerentscheidung ergibt (siehe Abbildung 23). Dass heißt, die Breite der Verteilung verringert sich im gleichen Maße wie ihr Erwartungswert. Damit kann als Erwartung an die relative Breite der Häufigkeitsverteilung, die sich durch deterministische Skalierung nach der L2-Triggerentscheidung ergibt, formuliert werden:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_{2mu4,detPS} &= \frac{\mu_{2mu4}}{S_{2mu4}} \quad , \quad \tilde{\sigma}_{2mu4,detPS} = \frac{\sigma_{2mu4}}{S_{2mu4}} \\ \Rightarrow \tilde{b}_{2mu4,detPS}^{rel} &= b_{2mu4}^{rel} \quad \Rightarrow \tilde{R}_{2mu4,detPS}^{brel} = \frac{\tilde{b}_{2mu4,detPS}^{rel}}{b_{2mu4}^{rel}} = 1 . \end{aligned} \quad (20)$$

Dieser Zusammenhang ist für die in dieser Untersuchung bestimmte relative Verbreiterung $R_{2mu4,detPS}^{brel}$ durch deterministische Skalierung nach der Triggerentscheidung in der L2_2mu4-Triggerkette in Tabelle 9 und Abbildung 29 deutlich sichtbar.

Die deterministische Skalierung *vor* der L2_2mu4-Triggerentscheidung bewirkt, dass den Bewertungsalgorithmen in der L2_2mu4-Triggerkette eine um den Skalierungsfaktor S_{2mu4} geringere Menge an Ereignissen übergeben wird (siehe Abbildung 18). Für die Unsicherheit σ_x eines Zählexperimentes mit einer Grundmenge von N_x kann angenommen werden, das

$$\sigma_x \simeq \sqrt{N_x}$$

gilt. Daraus folgt für die Unsicherheiten der in dieser Triggerkette auftretenden Häufigkeitsverteilungen:

$$\begin{aligned} \sigma_{2mu4} &\simeq \sqrt{N_{2MU4}} \quad , \\ \sigma_{detPS,2mu4} &\simeq \sqrt{\frac{N_{2MU4}}{S_{2mu4}}} = \frac{\sigma_{2mu4}}{\sqrt{S_{2mu4}}} . \end{aligned}$$

Der Erwartungswert nach der L2_2mu4-Triggerentscheidung verringert sich hingegen, wie in Abschnitt 5.2.1 gezeigt, um den Skalierungsfaktor S_{2mu4} :

$$\mu_{detPS,2mu4} \simeq \frac{\mu_{2mu4}}{S_{2mu4}} .$$

Damit kann eine Abschätzung für die relative Breite der sich durch deterministische Skalierung nach der L2_2mu4-Triggerentscheidung ergebenden Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,2mu4}$ gegeben werden:

$$\tilde{b}_{detPS,2mu4}^{rel} = \frac{\sigma_{detPS,2mu4}}{\mu_{detPS,2mu4}} \simeq \frac{\sigma_{2mu4}}{\sqrt{S_{2mu4}}} \cdot \left(\frac{\mu_{2mu4}}{S_{2mu4}} \right)^{-1} = \sqrt{S_{2mu4}} \cdot \frac{\sigma_{2mu4}}{\mu_{2mu4}} ,$$

$$\tilde{b}_{detPS,2mu4}^{rel} \simeq \sqrt{S_{2mu4}} b_{2mu4}^{rel} .$$

Und somit eine Abschätzung für der Verhältnis der relativen Breiten:

$$\Rightarrow \tilde{R}_{detPS,2\mu4}^{b^{rel}} = \frac{\tilde{b}_{detPS,2\mu4}^{rel}}{b_{2\mu4}^{rel}} \simeq \sqrt{S_{2\mu4}} = \sqrt{5} \approx 2,24. \quad (21)$$

Der in dieser Untersuchung bestimmte Wert $R_{detPS,2\mu4}^{b^{rel}} = (2,25 \pm 0,01)$ für die relative Verbreiterung durch deterministische Skalierung am Eingang der L2_2mu4-Triggerecke bestätigt die von Abschätzung (21) gemachte Vorhersage.

Um eine Abschätzung der relativen Verbreiterung durch randomisierte Skalierung *vor* der L2_2mu4-Triggerecke zu erhalten, nimmt man an, dass es sich bei der nach der Triggerecke ergebenden Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,2\mu4}$ und auch bei der sich im unskalierten Fall ergebenden Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4}$, um Binomialverteilungen handelt.

Die Binomialverteilung $\mathcal{B}(k|n, p)$ ergibt sich aus einer Serie von n gleichartigen, voneinander unabhängigen Experimenten, deren Ergebnismenge nur zwei Zustände umfasst. Die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines bestimmten dieser beiden Ergebnisse ist p . Die Binomialverteilung gibt nun die Wahrscheinlichkeit dafür an, bei n gleichartigen und voneinander unabhängigen Experimenten k mal das Ergebnis, dem die Wahrscheinlichkeit p zugeordnet ist, zu erhalten. Für hinreichend große n konvergiert die Binomialverteilung gegen die Normalverteilung.

Für den Erwartungswert μ und die Breite σ einer Binomialverteilung gilt:

$$\mu = np, \quad (22)$$

$$\sigma = \sqrt{np(1-p)}. \quad (23)$$

Die in dieser Untersuchung durchgeführten Toy-Experimente bilden diesen Aufbau ab: in jedem Toy werden der L2_2mu4-Triggerecke die gleiche feste Anzahl $N_{2\mu4}$ Ereignisse übergeben. Die L2_2mu4-Triggerecke akzeptiert ein ihr übergebenes Ereignis mit der Wahrscheinlichkeit p . Mit der Wahrscheinlichkeit $(1-p)$ wird es von der Triggerecke verworfen. Die Akzeptanzwahrscheinlichkeiten p der L2_2mu4-Triggerecke bestimmt sich aus ihrer in Abschnitt 5.2.1 berechneten unskalierten Effizienz und gegebenenfalls dem Skalierungsfaktor:

$$p_{2\mu4} = \varepsilon_{2\mu4},$$

$$p_{randPS,2\mu4} = \frac{1}{S_{2\mu4}} \cdot \varepsilon_{2\mu4} = p_{PS} \varepsilon_{2\mu4}, \quad \text{mit } p_{PS} = \frac{1}{S_{2\mu4}}.$$

Hiermit lässt sich nun mit den Gleichungen (22) und (23) eine Erwartung für die relative Breite $\tilde{b}^{rel} = \sigma/\mu$ der Häufigkeitsverteilungen $\mathcal{N}_{randPS,2\mu4}$ und $\mathcal{N}_{2\mu4}$ berechnen. Aus diesen bestimmt sich dann der erwartete Wert für die relative Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2\mu4}$ durch randomisierte Skalierung vor der Triggerentscheidung.

Die erwarteten relativen Breiten von \mathcal{N}_{2mu4} und $\mathcal{N}_{randPS,2mu4}$:

$$\tilde{b}_{2mu4}^{rel} = \frac{\tilde{\sigma}_{2mu4}}{\tilde{\mu}_{2mu4}} = \frac{\sqrt{N_{2MU4} \varepsilon_{2mu4} (1 - \varepsilon_{2mu4})}}{N_{2MU4} \varepsilon_{2mu4}} = \sqrt{\frac{1 - \varepsilon_{2mu4}}{N_{2MU4} \varepsilon_{2mu4}}}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \tilde{b}_{randPS,2mu4}^{rel} &= \frac{\tilde{\sigma}_{randPS,2mu4}}{\tilde{\mu}_{randPS,2mu4}} = \frac{\sqrt{N_{2MU4} p_{PS} \varepsilon_{2mu4} (1 - p_{PS} \varepsilon_{2mu4})}}{N_{2MU4} p_{PS} \varepsilon_{2mu4}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - p_{PS} \varepsilon_{2mu4}}{N_{2MU4} p_{PS} \varepsilon_{2mu4}}} = \sqrt{\frac{S_{2mu4} - \varepsilon_{2mu4}}{N_{2MU4} \varepsilon_{2mu4}}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Für den erwarteten Wert der relativen Verbreiterung $\tilde{R}_{randPS,2mu4}^{b^{rel}}$ gilt damit:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{randPS,2mu4}^{b^{rel}} &= \frac{\tilde{b}_{randPS,2mu4}^{rel}}{\tilde{b}_{2mu4}^{rel}} \\ &= \sqrt{\frac{S_{2mu4} - \varepsilon_{2mu4}}{N_{2MU4} \varepsilon_{2mu4}}} \cdot \sqrt{\frac{N_{2MU4} \varepsilon_{2mu4}}{1 - \varepsilon_{2mu4}}} \\ &= \sqrt{\frac{S_{2mu4} - \varepsilon_{2mu4}}{1 - \varepsilon_{2mu4}}} \\ \Rightarrow \tilde{R}_{randPS,2mu4}^{b^{rel}} &= \sqrt{\frac{5 - 0,3102}{1 - 0,3102}} \approx 2,607. \end{aligned} \quad (26)$$

Der in dieser Untersuchung bestimmte Wert $R_{randPS,2mu4}^{b^{rel}} = (2,61 \pm 0,02)$ erfüllt diese Erwartung für die relative Verbreiterung von \mathcal{N}_{2mu4} aufgrund randomisierter Skalierung vor der L2-Triggerentscheidung.

Für die Berechnung des erwarteten Wert der relativen Verbreiterung für die randomisierte Skalierung *nach* der L2-Triggerkette benötigt man die Akzeptanzwahrscheinlichkeit $p_{2mu4,randPS}$. Hierfür gilt:

$$p_{2mu4,randPS} = \varepsilon_{2mu4} p_{PS} = p_{PS} \varepsilon_{2mu4} = p_{randPS,2mu4}.$$

Daraus folgt direkt:

$$\tilde{R}_{2mu4,randPS}^{b^{rel}} = \tilde{R}_{randPS,2mu4}^{b^{rel}} \approx 2,607.$$

Auch der dafür bestimmte Wert $R_{randPS,2mu4}^{b^{rel}} = (2,62 \pm 0,02)$ erfüllt die an ihn formulierte Erwartung.

Das die randomisierte Skalierung *vor* oder *nach* der L2-Triggerentscheidung zu einer identischen Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung \mathcal{N}_{2mu4} führt, kann man sich auch anhand einiger einfacher Überlegungen veranschaulichen. Der Skalierungsalgorithmus ist vollkommen unabhängig von den Triggeralgorithmen. Es ist egal, ob man nun zuerst den S_{2mu4} 'ten Teil der N_{2MU4} Ereignisse mithilfe eines auf Zufallszahlen basierenden Skalierungsalgorithmus markiert und anschließend aus diesen

markierten Ereignissen von den Triggeralgorithmen 31,02% auswählen lässt. Oder im umgekehrten Fall, erst von den Triggeralgorithmen 31,02% der N_{2MU4} Ereignisse markieren lässt und davon dann nur der S_{2mu4} 'ten Teil von demselben zufallsbasiertem Skalierungsalgorithmus akzeptiert wird. Beides führt zu Häufigkeitsverteilung mit innerhalb ihrer Fehlern identischen Schätzern ihres Erwartungswertes μ_i und ihrer Breite σ_i mit $i \in \{randPS, 2mu4; 2mu4, randPS\}$ (siehe Tabelle 2).

Bei der deterministischen Skalierung nach der L2-Triggerentscheidung hingegen, hängt das Ergebnis des Skalierungsalgorithmus von dem Ergebnis der Triggeralgorithmen ab. Die im deterministischen Skalierungsalgorithmus benutzte Zählvariable wird bei der deterministischen Skalierung nach der L2-Triggerentscheidung nur dann erhöht, wenn ein Ereignis von den Triggeralgorithmen akzeptiert wurde. Es wird genau jedes S_{2mu4} 'te durch die Bewertungsalgorithmen akzeptierte Ereignis von dem Skalierungsalgorithmus akzeptiert. Dadurch erklärt sich, warum, obwohl beide Skalierungsalgorithmen nach der Triggerentscheidung ausgeführt werden, die randomisierte Skalierung zu einer Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung führt, die deterministische hingegen nicht.

5.3.2 L2_mu4mu6-Triggerkette

Im Unterschied zur im Abschnitt 5.3.1 betrachteten L2_2mu4-Triggerkette wird der L2_mu4mu6-Triggerkette nicht immer die gleich Ereignisanzahl übergeben. Die für alle Toys der L2_mu4mu6-Triggerkette übergebenen Ereignisanzahlen ergeben die Häufigkeitsverteilung \mathcal{N}_{MU4MU6} (siehe Anhang B, Abbildung 33). Ansonsten unterscheiden sich diese beiden Triggerketten noch im gewählten Skalierungsfaktor. Für die L2_mu4mu6-Triggerkette wurde $S_{mu4mu6} = 2$ gesetzt.

Die zur Untersuchung der relativen Verbreiterung aufgrund der Skalierungsmethoden nötigen Größen wurden auf zum Vorgehen in der L2_2mu4-Triggerkette analoge Weise bestimmt. Die durch die Gleichungen (17) und (18) bestimmten relativen Breiten sind in Tabelle 10 zusammengefasst und in Abbildung 30 dargestellt.

	$N_{2MU4} = 2\,000$	$N_{2MU4} = 20\,000$	$N_{2MU4} = 200\,000$
b_{mu4mu6}^{rel}	0,0406 ±0,0003	0,01276 ±0,00009	0,00403 ±0,00003
$b_{randPS,mu4mu6}^{rel}$	0,0613 ±0,0005	0,01916 ±0,00014	0,00618 ±0,00004
$b_{detPS,mu4mu6}^{rel}$	0,0561 ±0,0004	0,01768 ±0,00013	0,00550 ±0,00004
$b_{mu4mu6,randPS}^{rel}$	0,0618 ±0,0004	0,01933 ±0,00014	0,00612 ±0,00004
$b_{mu4mu6,detPS}^{rel}$	0,0406 ±0,0003	0,01276 ±0,00009	0,00402 ±0,00003

Tabelle 10: Relative Breiten der Häufigkeitsverteilungen nach den unterschiedlichen L2_mu4mu6-Triggerketten.

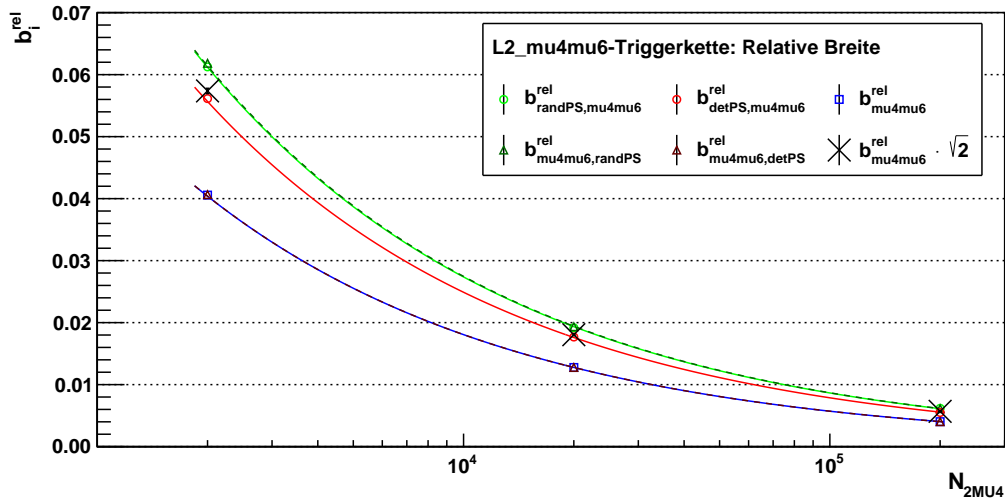


Abbildung 30: Relative Breiten der Häufigkeitsverteilungen nach den unterschiedlichen L2_mu4mu6-Triggerketten für $N_{2MU4} = 2000, 20000$ und 200000 Ereignisse.

Auch die relativen Verbreiterungen $R_i^{b^{rel}}$ der sich durch die skalierten Triggerketten ergebenden Häufigkeitsverteilungen im Vergleich zu der sich aus der unskalierten L2_mu4mu6-Triggerentscheidung ergebenden Häufigkeitsverteilung wurden durch das gleiche Verfahren wie in Abschnitt 5.3.1 aus

$$R_i^{b^{rel}} = \frac{b_i^{rel}}{b_{mu4mu6}^{rel}},$$

mit $i \in \{randPS, mu4mu6; detPS, mu4mu6; mu4mu6, randPS; mu4mu6, detPS\}$ bestimmt. Einen Überblick über die so bestimmten relativen Verbreiterungen gibt Tabelle 11. In Abbildung 31 sind sie dargestellt.

	$N_{2MU4} = 2000$	$N_{2MU4} = 20000$	$N_{2MU4} = 200000$	Fit Ergebnis
$R_{randPS,mu4mu6}^{b^{rel}}$	1,51 ±0,02	1,50 ±0,02	1,53 ±0,02	1,52 ±0,01
$R_{detPS,mu4mu6}^{b^{rel}}$	1,38 ±0,01	1,39 ±0,01	1,37 ±0,01	1,38 ±0,01
$R_{mu4mu6,randPS}^{b^{rel}}$	1,52 ±0,02	1,51 ±0,02	1,52 ±0,02	1,52 ±0,01
$R_{mu4mu6,detPS}^{b^{rel}}$	1,00 ±0,01	1,00 ±0,01	1,00 ±0,01	1,00 ±0,01

Tabelle 11: Verhältnis der relativen Breiten der skalierten L2_mu4mu6-Triggerketten zu der relativen Breite der unskalierten Triggerkette.

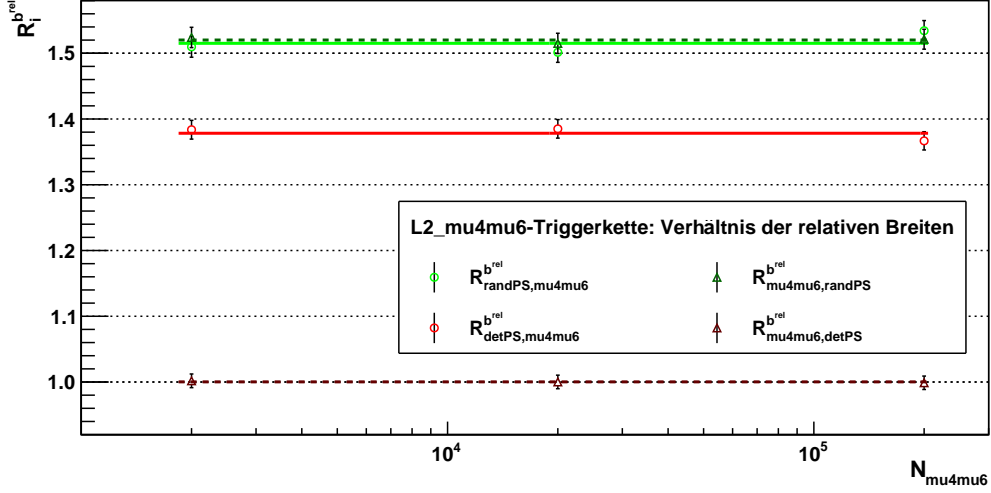


Abbildung 31: Verhältnis der relativen Breiten der skalierten L2_μ4μ6-Triggerecken zu der relativen Breite der unskalierten Triggerecke für $N_{2MU4} = 2\,000$, $20\,000$ und $200\,000$ Ereignisse.

Für die deterministische Skalierung *nach* der L2-Triggerecke erwartet man aufgrund einer gleichartigen Argumentation wie bei der Betrachtung der selben Skalierungsmethode für die L2_2μ4-Triggerecke eine relative Verbreiterung von

$$\tilde{R}_{\mu4\mu6,detPS}^{b,rel} = 1 .$$

Die in dieser Untersuchung bestimmte relative Verbreiterung

$$R_{\mu4\mu6,detPS}^{b,rel} = (1,00 \pm 0,01)$$

(siehe Tabelle 11 und Abbildung 31) bestätigt diesen Zusammenhang auch für die L2_μ4μ6-Triggerecke mit normalverteilter Ereignisanzahl am Eingang der Triggerecke.

Die deterministische Skalierung *vor* der L2-Triggerecke reduziert die Ereignisanzahl um den Skalierungsfaktor $S_{\mu4\mu6} = 2$ (siehe Anhang B, Abbildung 35). Daher kann eine Abschätzung für die erwartete relative Verbreiterung in der L2_μ4μ6-Triggerecke mit

$$\tilde{R}_{detPS,\mu4\mu6}^{b,rel} \simeq \sqrt{2} \approx 1,41$$

angegeben werden. Die in dieser Untersuchung bestimmte relative Verbreiterung für diesen Fall

$$R_{detPS,\mu4\mu6}^{b,rel} = (1,38 \pm 0,01)$$

weicht um 3 Standardabweichungen von der Erwartung ab.

Auch in der L2_μ4μ6-Triggerecke besitzen die beiden in dieser Untersuchung bestimmten relativen Verbreiterungen bei randomisierte Skalierung *vor* oder *nach* der L2-Triggerecke den gleichen Wert:

$$R_{randPS,\mu4\mu6}^{b,rel} = R_{\mu4\mu6,randPS}^{b,rel}$$

(siehe Tabelle 11). Der Austausch der Häufigkeitsverteilung mit konstanten Einträgen, wie sie in der bei der Betrachtung der L2_2mu4-Triggerkette am Eingang vorlag, durch eine normalverteilte Häufigkeitsverteilung am Eingang der L2_mu4mu6-Triggerkette hat keinen Einfluss auf die Kommutativität der randomisierten Skalierung innerhalb der Triggerkette.

Die beiden Werte für die randomisierte Skalierung innerhalb der L2_mu4mu6-Triggerkette wurden zu:

$$\begin{aligned} R_{randPS,mu4mu6}^{brel} &= (1, 51 \pm 0, 02), \\ R_{mu4mu6,randPS}^{brel} &= (1, 52 \pm 0, 02) \end{aligned}$$

bestimmt.

Um den Einfluss der normalverteilten Häufigkeitsverteilung am Eingang der L2_mu4mu6-Triggerkette auf die relative Verbreiterung bestimmen zu können, wurden die erwarteten relativen Verbreiterungen für die L2_mu4mu6-Triggerkette mit einer konstante Ereignisanzahl $N_{MU4MU6}^* = \mu_{MU4MU6}$ am Eingang der Triggerkette bestimmt. Dazu wurden das in Abschnitt 5.3.1 bei der Untersuchung der randomisierten Skalierung innerhalb der L2_2mu4-Triggerkette genutzte Verfahren verwendet. Zur eindeutigen Unterscheidung wurden die Größen X , die sich auf die Abschätzung bei fester Ereignisanzahl beziehen, mit einem Stern X^* gekennzeichnet.

Die Akzeptanzwahrscheinlichkeiten der L2_mu4mu6-Triggerketten sind:

$$\begin{aligned} p_{mu4mu6}^* &= \varepsilon_{mu4mu6}, \\ p_{randPS,mu4mu6}^* &= \frac{1}{S_{mu4mu6}} \cdot \varepsilon_{mu4mu6} = p_{PS}^* \varepsilon_{mu4mu6}, \quad \text{mit } p_{PS}^* = \frac{1}{S_{mu4mu6}}. \end{aligned}$$

Damit wurde durch die zu (26) analoge Formel für die erwartete relative Verbreiterung:

$$\tilde{R}_{randPS,mu4mu6}^{brel*} = \sqrt{\frac{1 - p_{PS}^* \varepsilon_{mu4mu6}}{p_{PS}^* (1 - \varepsilon_{mu4mu6})}} \approx 1, 564$$

bestimmt. Dieser Wert für die erwartete Verbreiterung bei einer konstanten Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette ist um mehr als zwei Standardabweichungen größer als die in dieser Untersuchung bestimmten Werte für die relative Verbreiterung durch randomisierte Skalierung innerhalb der L2_mu4mu6-Triggerkette bei normalverteilter Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette.

Dass heißt mit einer normalverteilten Häufigkeitsverteilung am Eingang, verringert sich die relative Verbreiterung um

$$\left(1 - \frac{R_{randPS,mu4mu6}^{brel} + R_{mu4mu6,randPS}^{brel}}{2} \cdot \frac{1}{\tilde{R}_{randPS,mu4mu6}^{brel*}} \right) \approx 3, 1\%. \quad (27)$$

Dieses Ergebnis widerspricht auf den ersten Blick der intuitiven Vorstellung, dass eine breitere Verteilung am Eingang der Triggerkette auch breitere Verteilungen (unkaliert und skaliert) am Ausgang zur Folge haben sollte. Die Betrachtung der in die

Berechnung von $\tilde{R}_{randPS,mu4mu6}^{b^{rel,*}}$ eingehenden, erwarteten relativen Breiten für eine feste Anzahl am Eingang der L2_mu4mu6-Triggerkette führt zu (siehe Gleichungen (24) und (25), Abschnitt 5.3.1):

$$\begin{aligned}\tilde{b}_{mu4mu6}^{rel,*} &= \sqrt{\frac{1 - \varepsilon_{mu4mu6}}{N_{mu4mu6}^* \varepsilon_{mu4mu6}}} \approx 0,00386, \\ \tilde{b}_{randPS,mu4mu6}^{rel,*} &= \sqrt{\frac{1 - p_{PS}^* \varepsilon_{mu4mu6}}{N_{MU4MU6}^* p_{PS}^* \varepsilon_{mu4mu6}}} \approx 0,00604 \\ &\text{(mit } N_{MU4MU6}^* = 149953,52\text{)}.\end{aligned}$$

Vergleicht man diese erwarteten relativen Breiten für den Fall einer festen Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette mit den in dieser Untersuchung bestimmten relativen Breiten der L2_mu4mu6-Triggerkette für eine normalverteilte Ereignisanzahl am Eingang (siehe Tabelle 10) und setzt diese ins Verhältnis:

$$\begin{aligned}\frac{b_{mu4mu6}^{rel}}{\tilde{b}_{mu4mu6}^{rel,*}} &\approx 1,044, \\ \frac{b_{randPS,mu4mu6}^{rel}}{\tilde{b}_{randPS,mu4mu6}^{rel,*}} &\approx 1,018,\end{aligned}$$

so sieht man, dass die Breiten beider Verteilungen durch eine normalverteilte Häufigkeitsverteilung am Eingang der Triggerkette wachsen, für die unskalierte Verteilung allerdings stärker als für die skalierte. Die unterschiedliche Stärke des Wachstums erklärt, warum die in dieser Arbeit bestimmte relative Verbreiterung $R_{randPS,mu4mu6}^{b^{rel,*}}$ kleiner ist, als die für eine feste Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette abgeschätzte.

Unter der Annahme, dass die Verminderung der relativen Verbreiterung für die randomisierte Skalierung innerhalb der L2_mu4mu6-Triggerkette auf die normalverteilte Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette zurückzuführen ist, berechnet man erneut unter Beachtung von (27) die erwartete relative Verbreiterung aufgrund deterministischer Skalierung am Eingang der L2_mu4mu6-Triggerkette, so führt das zu:

$$\tilde{R}_{detPS,mu4mu6}^{b^{rel}} \simeq \sqrt{2} \cdot (1 - 0,031) \approx 1,37$$

Mit dieser modifizierten Abschätzung stimmt der in dieser Untersuchung bestimmte Wert für die relative Verbreiterung bei deterministischen Skalierung am Eingang der L2_mu4mu6-Triggerkette

$$R_{detPS,mu4mu6}^{b^{rel}} = (1,38 \pm 0,01)$$

innerhalb seiner Fehler überein.

6 Zusammenfassung

Die bei der Suche nach dem sehr seltenen Zerfall $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ genutzten ATLAS-Daten stammen größtenteils aus dem Jahr 2012. Für einige der für die Analyse interessanten HLT-Triggerketten waren zur Zeit der Datennahme Skalierungsfaktoren gesetzt. Bei der angewendeten Skalierungsmethode handelte es sich um eine randomisierte Skalierung am Eingang der Level-2-Triggerkette.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, den Einfluss unterschiedlicher Skalierungsalgorithmen bei der Anwendung der Skalierung innerhalb der Triggerketten des Level-2-Triggers am ATLAS-Detektors auf die Effizienzen der Triggerketten und die Fehler der Effizienzen zu bestimmen.

Dazu wurden einfache Modelle der Level-2-Triggerobjekte L2_mu4 und L2_mu6 unter Zuhilfenahme des Datenanalyse-Pakets ROOT entwickelt. Die Simulation dieser Triggerobjekte basiert auf Akzeptanzkurven, mit denen die verschiedenen p_T -Schnitte (4 GeV und 6 GeV) auf einer Menge zuvor generierter Pseudo-Ereignisse durchgeführt werden (siehe Abschnitt 4.3). Anhand dieser Triggerobjekte wurden die zwei Level-2-Triggerketten L2_2mu4 und L2_mu4mu6 simuliert. In diesen Triggerketten wurden vier unterschiedlich skalierte Kanäle implementiert, dabei handelt es sich um zwei methodisch unterschiedliche Skalierungsalgorithmen: ein abzählender (deterministischer) Algorithmus und ein auf Zufallszahlen basierender (randomisierter) Algorithmus. Zudem wurden diese Skalierungsalgorithmen noch an verschiedenen Positionen innerhalb der Triggerkette angewendet: am Eingang der Triggerkette, bevor die Triggeralgorithmen das Ereignis bewerten, und alternativ dazu am Ende der Triggerkette. Um den Einfluss dieser vier Skalierungsmethoden beurteilen zu können, wurde die unskalierte Triggerentscheidung als Referenzkanal simuliert (siehe Abschnitt 4.5).

Mithilfe dieses Modells und einer auf das Wesentliche für diese Analyse reduzierten Ereignisdefinition wurde eine Monte Carlo-Studie durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie wurde in 10 000 Toy-Experimenten der Einfluss der unterschiedlichen Skalierungsmethoden auf die sich nach den beiden Triggerketten ergebenden Verteilungen bestimmt. Beiden Triggerketten wurden Ereignisse aus der gleichen Grundgesamtheit übergeben. Dabei wurde der L2_2mu4-Triggerkette pro Toy immer dieselbe, feste Ereignisanzahl N_{2MU4} übergeben. Auf die der L2_mu4mu6-Triggerkette übergebenen Ereignisse wurde noch ein zusätzlicher p_T -Schnitt angewendet, daher folgen die dieser Triggerkette übergebenen Ereignisanzahlen einer Binomialverteilung.

Bei der Effizienzanalyse konnte für beide betrachteten Triggerketten festgestellt werden, dass jede Skalierungsmethode zu der durch den gesetzten Skalierungsfaktor S erwarteten Effizienzänderung führt. Einzig bei deterministischer Skalierung am Eingang der L2_2mu4-Triggerkette, für niedrige Statistik und fester Ereignisanzahl weicht der effektive Skalierungsfaktor um 0,33% von dem geforderten Faktor ab. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Algorithmus zur deterministischen Skalierung nur zu exakten Ergebnissen führt, wenn die von ihm skalierte Ereignisanzahl einem ganzzahligen Vielfachen des Skalierungsfaktors entspricht. Andernfalls erhöht sich der effektive Skalierungsfaktor S_{2mu4}^{Eff} (siehe Abschnitt 5.2.1).

Bei der Untersuchung des Fehlers der Effizienz der Triggerkette wurden jeweils die sich nach 10 000 Toy-Experimenten ergebenden Breiten der Häufigkeitsverteilungen der durch die unterschiedlichen Skalierungsmethoden akzeptierten Ereignisanzahlen betrachtet. Dazu wurden die relativen Breiten dieser Verteilungen bestimmt und daraus durch Bildung des Verhältnisses der relativen Breite eines skalierten Kanals zur der des unskalierten Referenzkanals die relative Verbreiterung R^{brel} und somit die relative Änderung des Fehlers der Effizienz aufgrund der betrachteten Skalierungsmethode bestimmt.

Für die L2_2mu4-Triggerkette mit fester Ereignisanzahl pro Toy am Eingang der Triggerkette und Skalierung um den Faktor $S_{2mu4} = 5$ wurde:

- bei Anwendung der deterministischen Skalierung am Eingang der Triggerkette die relative Verbreiterung zu

$$\left(R_{detPS,vor}^{brel}\right)_{2mu4} = (2,25 \pm 0,01)$$

bestimmt. Das entspricht der aufgrund der verringerten Statistik erwarteten relativen Verbreiterung:

$$\left(\tilde{R}_{detPS,vor}^{brel}\right)_{2mu4} = \sqrt{S} \approx 2,24.$$

- bei Anwendung der deterministischen Skalierung am Ende der Triggerkette die relative Verbreiterung zu

$$\left(R_{detPS,nach}^{brel}\right)_{2mu4} = (1,01 \pm 0,01)$$

bestimmt. Dieses Ergebnis entspricht ebenso der Erwartung, da diese Skalierungsmethode die Form der Verteilung nicht beeinflusst.

- bei Anwendung der randomisierten Skalierung am Eingang oder am Ende der Triggerkette die relativen Verbreiterungen zu

$$\begin{aligned} \left(R_{randPS,vor}^{brel}\right)_{2mu4} &= (2,61 \pm 0,02), \\ \left(R_{randPS,nach}^{brel}\right)_{2mu4} &= (2,62 \pm 0,02) \end{aligned}$$

bestimmt. Auch hier wurde die aus einem Binomialmodell der L2_2mu4-Triggerkette mit randomisierter Skalierung gewonnene Erwartung

$$\left(\tilde{R}_{randPS}^{brel}\right)_{2mu4} = \sqrt{\frac{S_{2mu4} - \varepsilon_{2mu4}}{1 - \varepsilon_{2mu4}}} \approx 2,605$$

erfüllt. Da der Skalierungsalgorithmus und die Triggeralgorithmen unabhängig voneinander sind, vertauschen sie und führen daher zu einer identischen relativen Verbreiterung.

Zur relativen Verbreiterung der L2_2mu4-Triggerkette siehe auch die detaillierte Beschreibung in Abschnitt 5.3.1.

Für die L2_mu4mu6-Triggerkette mit binomialverteilter Ereignisanzahl pro Toy am Eingang der Triggerkette und Skalierung um den Faktor $S_{mu4mu6} = 2$ wurde:

- bei Anwendung der deterministischen Skalierung am Eingang der Triggerkette die relative Verbreiterung zu

$$\left(R_{detPS,vor}^{brel}\right)_{mu4mu6} = (1,38 \pm 0,01)$$

bestimmt. Dieser Wert ist kleiner als der, den man aufgrund der verringerten Statistik erwarten würde:

$$\left(\tilde{R}_{detPS,vor}^{brel}\right)_{mu4mu6}^{Fix} = \sqrt{2} \approx 1,41.$$

- bei Anwendung der deterministischen Skalierung am Ende der Triggerkette die relative Verbreiterung zu

$$\left(R_{detPS,nach}^{brel}\right)_{mu4mu6} = (1,00 \pm 0,01)$$

bestimmt. Auch hier wird die Form der Verteilung von der Skalierung nicht beeinflusst.

- bei Anwendung der randomisierten Skalierung am Eingang oder am Ende der Triggerkette die relativen Verbreiterungen gleichermaßen zu

$$\begin{aligned} \left(R_{randPS,vor}^{brel}\right)_{mu4mu6} &= (1,52 \pm 0,01), \\ \left(R_{randPS,nach}^{brel}\right)_{mu4mu6} &= (1,52 \pm 0,01) \end{aligned}$$

bestimmt. Diese Werte sind kleiner, als die, aus einem Binomialmodell für die L2_mu4mu6-Triggerkette mit randomisierter Skalierung und konstanter Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette folgende, Erwartung:

$$\left(\tilde{R}_{randPS}^{brel}\right)_{mu4mu6}^{Fix} = \sqrt{\frac{S - \varepsilon_{var}}{1 - \varepsilon_{var}}} \approx 1,564.$$

Es konnte numerisch ein Parameter für die in dieser Arbeit genutzte Verteilung am Eingang der L2_mu4mu6-Triggerkette und dem gewählten Skalierungsfaktor $S_{mu4mu6} = 2$, bestimmt werden, mit dem die relative Verbreiterung bei binomialverteilter Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette aus der erwarteten Verbreiterung für eine feste Ereignisanzahl am Eingang der Triggerkette bestimmt werden kann:

$$\left(R_{detPS,vor}^{brel}\right)_{mu4mu6} = (1 - 0,031) \cdot \left(\tilde{R}_{detPS,vor}^{brel}\right)_{mu4mu6}^{Fix}$$

$$\left(R_{randPS}^{brel}\right)_{mu4mu6} = (1 - 0,031) \cdot \left(\tilde{R}_{randPS}^{brel}\right)_{mu4mu6}^{Fix}$$

Eine weitere numerische Untersuchung dieses Parameters und eine eventuelle Abhängigkeit von dem Skalierungsfaktor, sowie von den Merkmalen der Verteilung der der L2_mu4mu6-Triggerkette übergebenen Ereignis-Anzahlen soll in einer zukünftigen Studie durchgeführt werden.

Hierbei könnte der folgende doppelt binomische Ansatz [16] hilfreich sein:

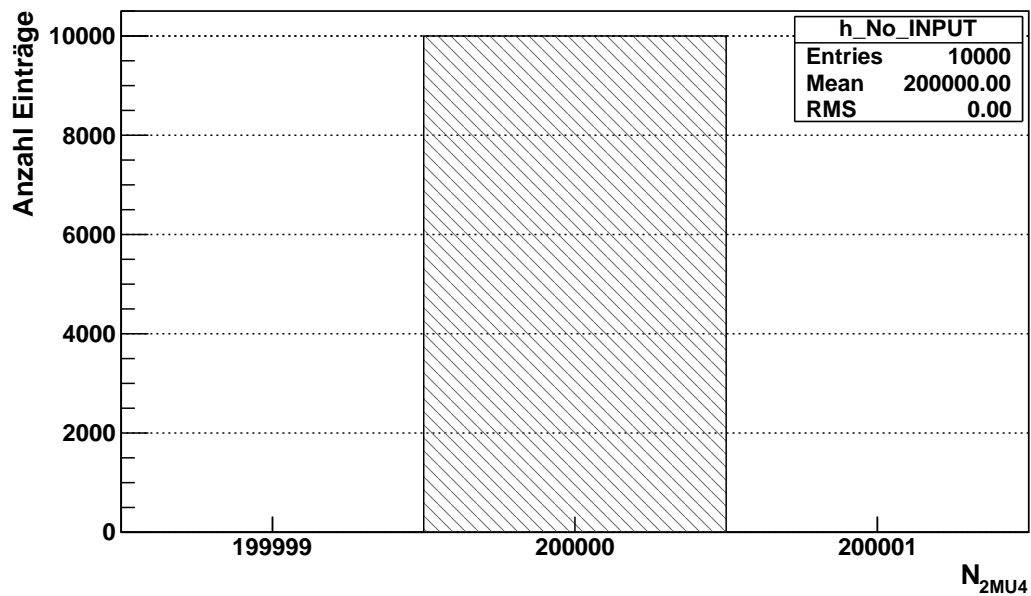
$$f(k) = \sum_{i=0}^{N_0} \mathcal{B}(N_i|N_0, p_{L1}) \mathcal{B}(k|N_i, p_{L2}).$$

Dabei beschreibt $\mathcal{B}(N_i|N_0, p_{L1})$ das Akzeptanzverhalten der L1_MU4MU6-Triggerbedingung mit seiner Effizienz p_{L1} für die Grundgesamtheit der Ereignisse N_0 und $\mathcal{B}(k|N_i, p_{L2})$ das Akzeptanzverhalten der L2_mu4mu6-Triggerkette für N_i durch die L1_MU4MU6-Triggerbedingung übergebene Ereignisse. Für die Akzeptanzwahrscheinlichkeit p_{L2} der L2_mu4mu6-Triggerkette gilt:

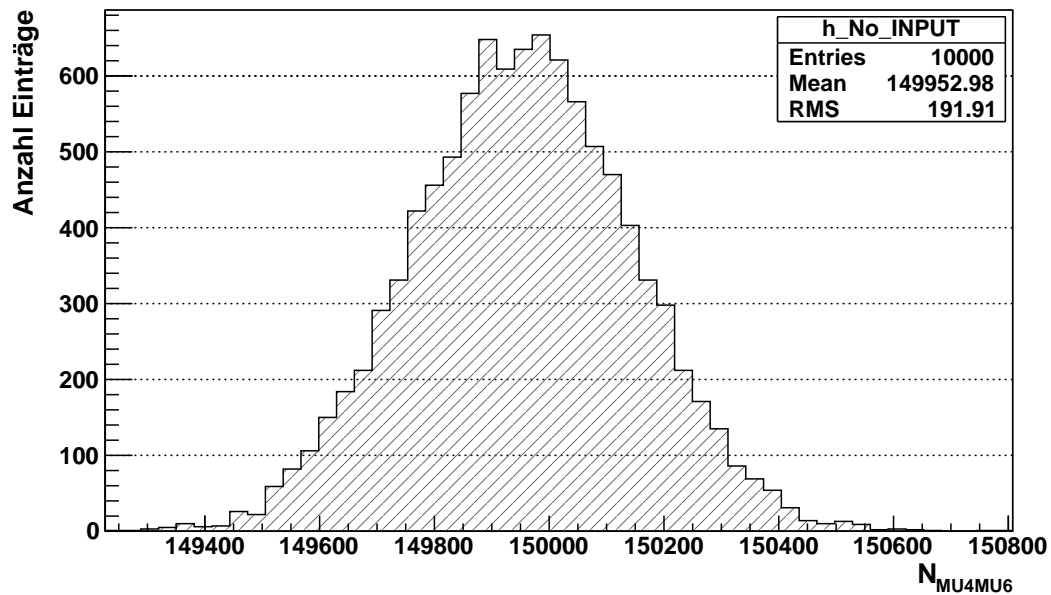
$$\begin{aligned} p_{L2} &= \varepsilon_{mu4mu6} && \text{im unskalierten Fall,} \\ p_{L2} &= \frac{1}{S_{mu4mu6}} \varepsilon_{mu4mu6} && \text{für Skalierung um } S_{mu4mu6}. \end{aligned}$$

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die möglichen Skalierungsmethoden im Detail verstanden sind.

A Häufigkeitsverteilungen am Eingang der L2-Triggerketten



(a) Nach der L1_2MU4-Triggerbedingung.



(b) Nach der L1_MU4MU6-Triggerbedingung.

Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung nach den L1-Triggerbedingungen für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

B Häufigkeitsverteilungen L2_mu4mu6

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6}^{200k}$:

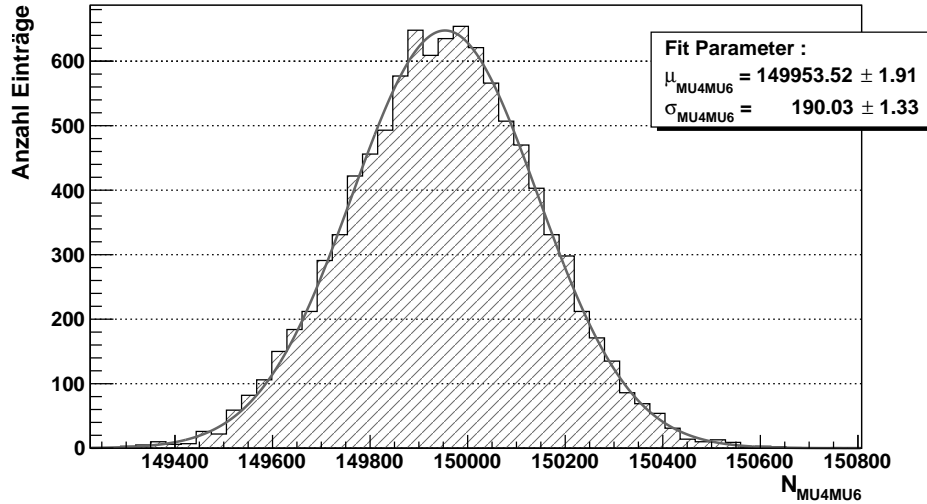


Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6}^{200k}$ nach der L1_MU4MU6-Triggerbedingung für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4. Es sind $\mu_{MU4MU6} = 149\,953,52 \pm 1,91$ und $\sigma_{MU4MU6} = 190,03 \pm 1,33$.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6,randPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$:

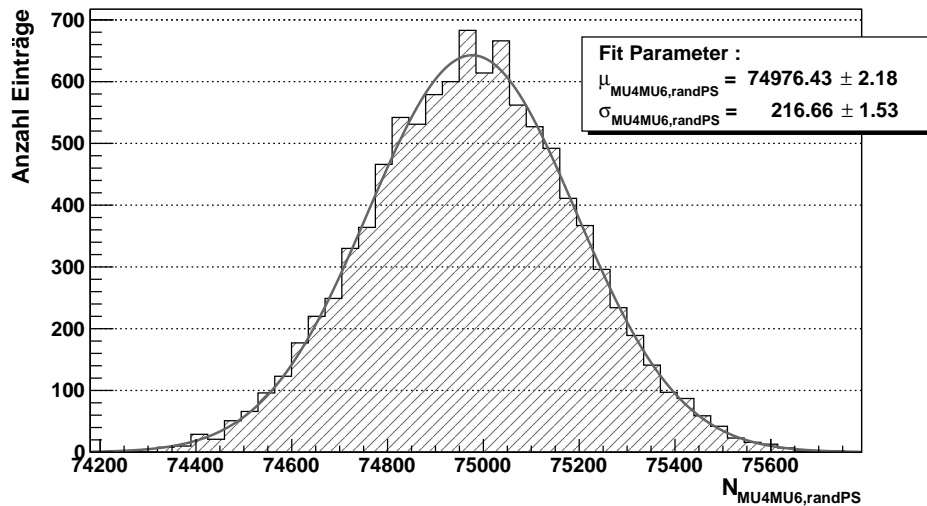


Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6,randPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$ nach der L1_MU4MU6-Triggerbedingung und randomisierter Skalierung um $S_{mu4mu6} = 2$ für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4. Es sind $\mu_{MU4MU6,randPS} = 74\,976,43 \pm 2,18$ und $\sigma_{MU4MU6,randPS} = 216,66 \pm 1,53$.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6,detPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$:

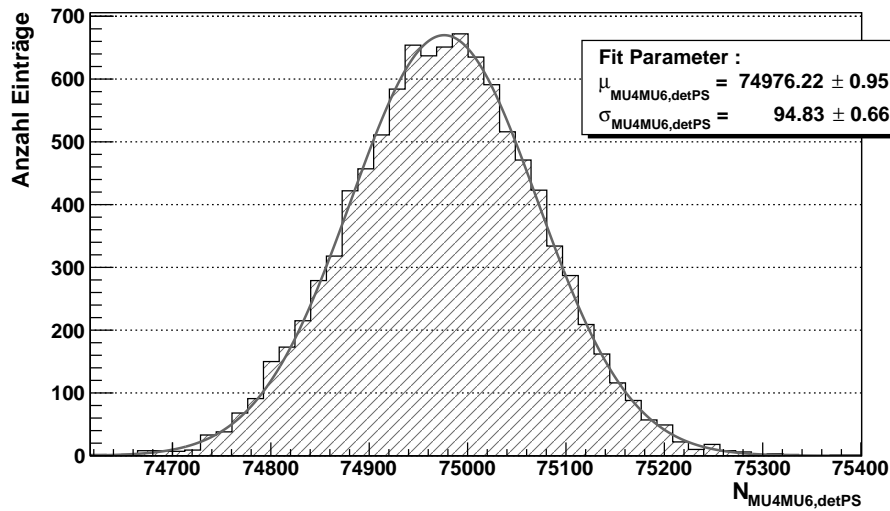


Abbildung 35: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6,detPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$ nach der L1_MU4MU6-Triggerbedingung und deterministischer um $S_{mu4mu6} = 2$ Skalierung für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4. Es sind $\mu_{MU4MU6,detPS} = 74\,976,22 \pm 0,95$ und $\sigma_{MU4MU6,detPS} = 94,83 \pm 0,66$.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{mu4mu6}^{200k}$:

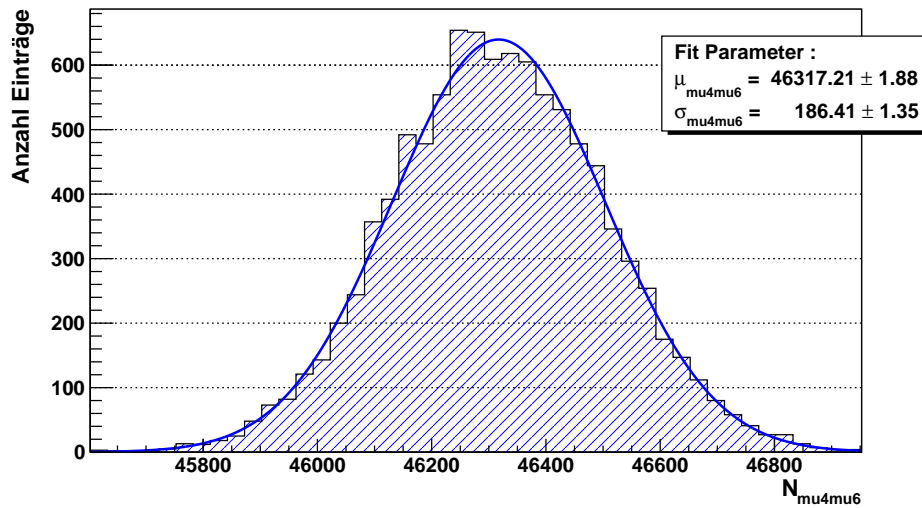


Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{mu4mu6}^{200k}$ nach der L2_mu4mu6-Triggerkette ohne Skalierung für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{mu4mu6} = 46\,317,21 \pm 1,88$ und $\sigma_{mu4mu6} = 186,41 \pm 1,35$.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,mu4mu6}^{200k}(S_{mu4mu6})$:

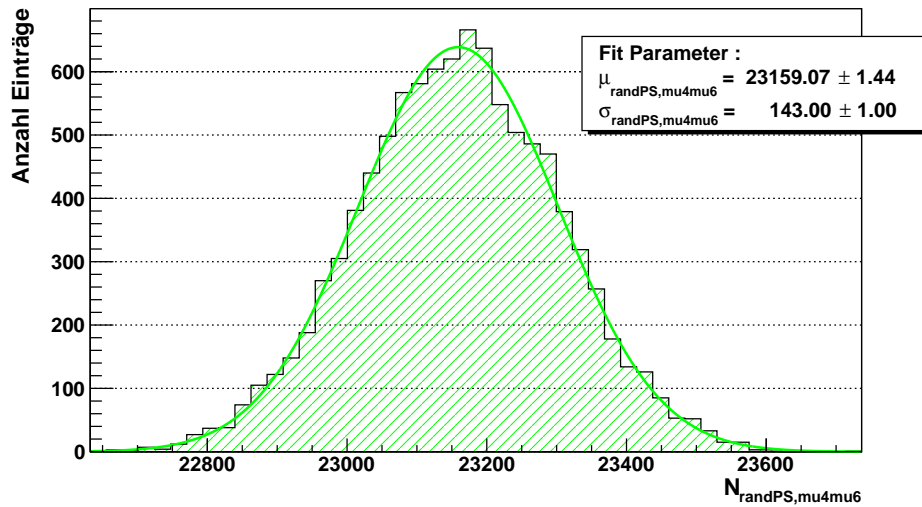


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,mu4mu6}^{200k}(S_{mu4mu6})$ nach der L2_mu4mu6-Triggerkette mit randomisierter Skalierung um $S_{mu4mu6} = 2$ zu Beginn der L2-Triggerkette für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{randPS,mu4mu6} = 23\,159,07 \pm 1,44$ und $\sigma_{randPS,mu4mu6} = 143,00 \pm 1,00$.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,mu4mu6}^{200k}(S_{mu4mu6})$:

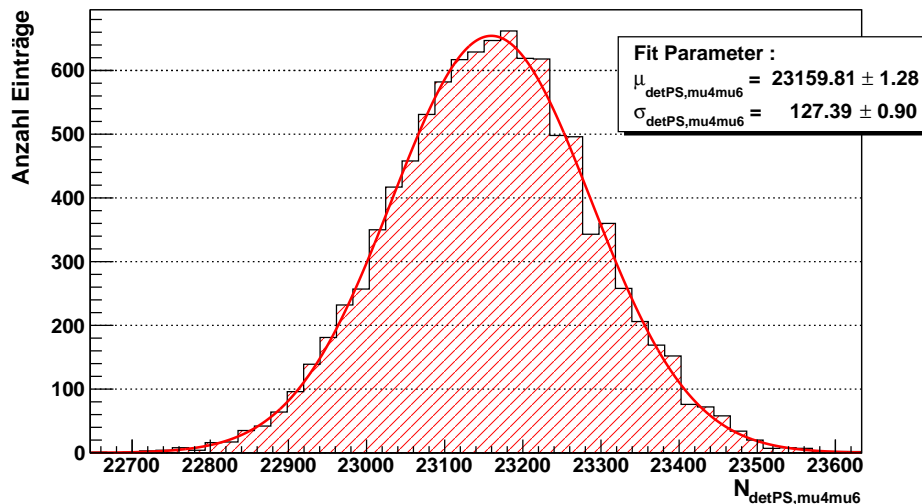


Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,mu4mu6}^{200k}(S_{mu4mu6})$ nach der L2_mu4mu6-Triggerkette mit deterministischer Skalierung um $S_{mu4mu6} = 2$ zu Beginn der L2-Triggerkette für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{detPS,mu4mu6} = 23\,159,81 \pm 1,28$ und $\sigma_{detPS,mu4mu6} = 127,39 \pm 0,90$.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{\mu 4\mu 6, \text{randPS}}^{200k}(S_{\mu 4\mu 6})$:

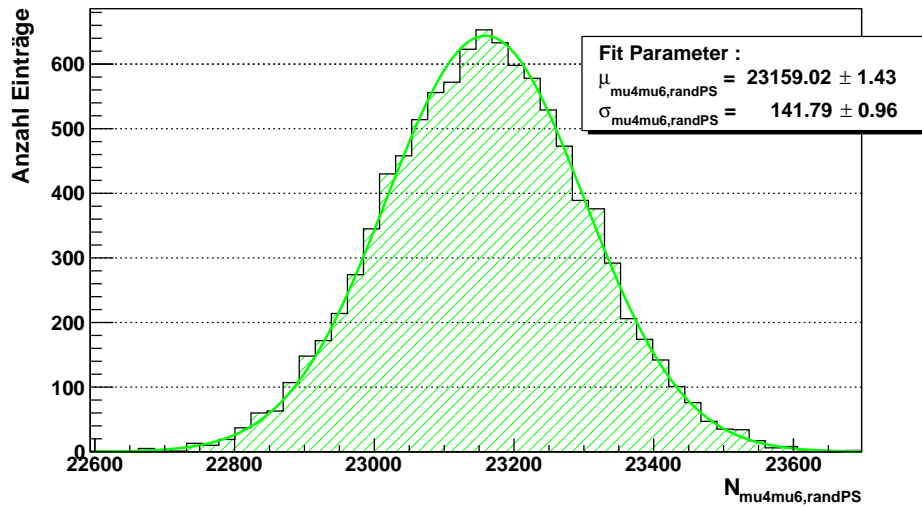


Abbildung 39: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{\mu 4\mu 6, \text{randPS}}^{200k}(S_{\mu 4\mu 6})$ nach der L2_μ4μ6-Triggerecke mit randomisierter Skalierung $S_{\mu 4\mu 6} = 2$ am Ende der L2-Triggerecke für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{\mu 4\mu 6, \text{randPS}} = 23\,159,02 \pm 1,43$ und $\sigma_{\mu 4\mu 6, \text{randPS}} = 141,79 \pm 0,96$.

Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{\mu 4\mu 6, \text{detPS}}^{200k}(S_{\mu 4\mu 6})$:

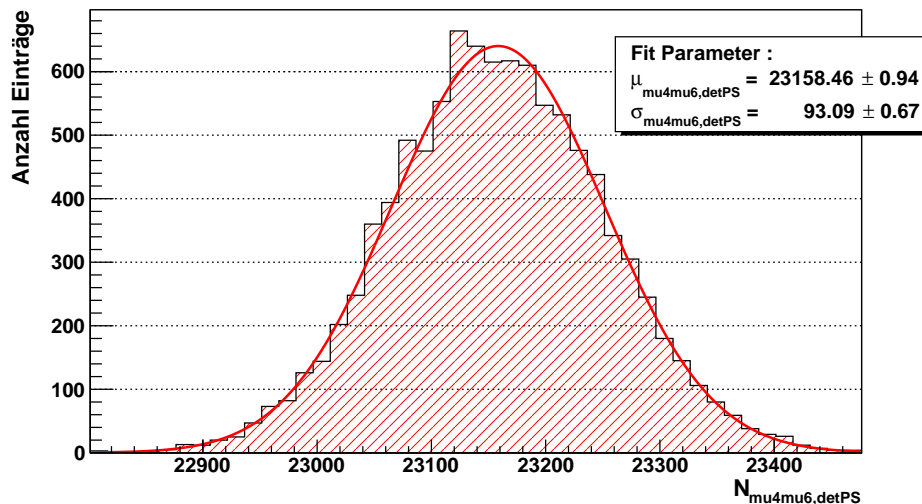


Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{\mu 4\mu 6, \text{detPS}}^{200k}(S_{\mu 4\mu 6})$ nach der L2_μ4μ6-Triggerecke mit deterministischer Skalierung $S_{\mu 4\mu 6} = 2$ am Ende der L2-Triggerecke für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.

Es sind $\mu_{\mu 4\mu 6, \text{detPS}} = 23\,158,46 \pm 0,94$ und $\sigma_{\mu 4\mu 6, \text{detPS}} = 93,09 \pm 0,67$.

Abbildungsverzeichnis

1	Die Vorbeschleunigerkette am LHC [2]	6
2	Die großen Experimente am LHC [5]	8
3	Der ATLAS-Detektor [4]	9
4	Der Innere Detektor des ATLAS-Detektors [4]	10
5	Das Kalorimetersystem des ATLAS-Detektors [4]	12
6	Das Myonspektrometer des ATLAS-Detektors [4]	14
7	Schematische Darstellung des Triggersystems des ATLAS-Detektors während Run1 [8]	16
8	Myontrigger im Level-1 Trigger [9]	17
9	Schematische Darstellung des RoI Konzepts [11]	19
10	Beispiel einer Triggerkette im HLT [13]	21
11	Übersicht der fünf Skalierungsmethoden am Beispiel der L2_2mu4- Triggerkette	24
12	p_T -Verteilung für μ_1 nach Ereignisgeneration für ein Toy mit 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.	25
13	Akzeptanzkurven von L1_MU4 und L1_MU6	27
14	Akzeptanzkurven von L2_mu4 und L2_mu6	27
15	p_T -Verteilung für μ_1 nach L1-Trigger für ein Toy mit 200 000 akzep- tierten Ereignissen nach L1_2MU4.	29
16	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4}^{200k}$	34
17	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4,randPS}^{200k}(S_{2mu4})$	34
18	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2MU4,detPS}^{200k}(S_{2mu4})$	35
19	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2mu4}^{200k}$	35
20	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$	36
21	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,2mu4}^{200k}(S_{2mu4})$	36
22	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2mu4,randPS}^{200k}(S_{2mu4})$	37
23	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{2mu4,detPS}^{200k}(S_{2mu4})$	37
24	L2_2mu4-Triggerkette: Effizienzen	41
25	L2_2mu4-Triggerkette: Effektive Skalierungsfaktoren	42
26	L2_mu4mu6-Triggerkette: Effizienzen	44
27	L2_mu4mu6-Triggerkette: Effektive Skalierungsfaktoren	45
28	L2_2mu4-Triggerkette: Relative Breiten der Häufigkeitsverteilungen	47
29	L2_2mu4-Triggerkette: Verhältnis der relativen Breiten	48
30	L2_mu4mu6-Triggerkette: Relative Breiten der Häufigkeitsverteilungen	53
31	L2_mu4mu6-Triggerkette: Verhältnis der relativen Breiten	54
32	Häufigkeitsverteilung nach den L1-Triggerbedingungen für 10 000 Toys mit jeweils 200 000 akzeptierten Ereignissen nach L1_2MU4.	61
33	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6}^{200k}$	62
34	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6,randPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$	62
35	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{MU4MU6,detPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$	63
36	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{mu4mu6}^{200k}$	63
37	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{randPS,mu4mu6}^{200k}(S_{mu4mu6})$	64
38	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{detPS,mu4mu6}^{200k}(S_{mu4mu6})$	64

39	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{mu4mu6,randPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$	65
40	Häufigkeitsverteilung $\mathcal{N}_{mu4mu6,detPS}^{200k}(S_{mu4mu6})$	65

Literaturnachweis

- [1] Andrzej J. Buras et al. “On the Standard Model prediction for $\text{BR}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ ”. In: *Eur. Phys. J. C* 72 (2012), p. 2172.
- [2] M. Benedikt et al. “LHC Design Report, Vol. 3: The LHC Injection Chain”. In: *Technical Design Report 3* (2004).
- [3] Lyndon Evans and Philip Bryant. “LHC Machine”. In: *Journal of Instrumentation* 3.08 (2008), S08001.
- [4] G. Aad et al. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. In: *Journal of Instrumentation* 3 (2008), S08003.
- [5] AC Team. “The four main LHC experiments”. 1999. URL: <http://cds.cern.ch/record/40525>.
- [6] C Lefevre. “LHC: the guide (German version). Guide du LHC (version allemande)”. 2009. URL: <https://cds.cern.ch/record/1214401>.
- [7] G. Aad et al. *Expected performance of the ATLAS experiment: detector, trigger and physics*. Geneva: CERN, 2009.
- [8] Will Buttinger. “The ATLAS Level-1 Trigger System”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 396.1 (2012), p. 012010.
- [9] ATLAS Collaboration. *ATLAS level-1 trigger: Technical Design Report*. Technical Design Report ATLAS. Geneva: CERN, 1998.
- [10] G. Aad et al. “Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ ”. In: *The European Physical Journal C* 75.3, 120 (2015).
- [11] ATLAS Collaboration. “Trigger and Data Acquisition”. URL: <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/documentation/poster/HTML/triggerdaq.html>.
- [12] Peter Jenni et al. *ATLAS high-level trigger, data-acquisition and controls: Technical Design Report*. Technical Design Report ATLAS. Geneva: CERN, 2003.
- [13] Jörg Stelzer and the ATLAS Collaboration. “The ATLAS High Level Trigger Configuration and Steering: Experience with the First 7 TeV Collision Data”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 331.2 (2011), p. 022026.
- [14] Andrea Ventura and the ATLAS Collaboration. “The muon high level trigger of the ATLAS experiment”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 219.3 (2010), p. 032025.
- [15] Rene Brun and Fons Rademakers. “ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework”. In: *Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A* 389 (1997) 81-86. See also <http://root.cern.ch/> ().
- [16] Dr. Wolfgang Walkowiak. “Privatmitteilung”.

Danksagung

Am Ende dieser Arbeit möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Als erstes möchte ich mich bei *Prof. Dr. Peter Buchholz* bedanken, der es mir ermöglichte, in der Arbeitsgruppe Experimentelle Teilchenphysik diese Bachelorarbeit zu schreiben. Sein hartnäckiges Nachfragen während meiner Besprechungsbeiträge hat viel zu meinem eigenen Verständnis der Thematik beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt *Dr. Wolfgang Walkowiak*. Durch seine Anleitung war es mir überhaupt erst möglich, diese Arbeit zu schreiben. In vielen Gesprächen hat er mir geholfen, die wichtigen Punkte dieser Arbeit herauszuarbeiten. Für jedes sich mir stellende Problem war er mir ein hilfsbereiter und geduldiger Ansprechpartner.

Dr. Bakul Gaur danke ich dafür, dass er mir eine Einführung in die Benutzung des Datenanalysepakets ROOT gegeben hat und mir immer bei jeglichen Programmierproblemen mit Rat und Tat zur Seite stand.

Für die ausführliche und verständliche Beantwortung aller Fragen rund um den ATLAS-Detektor danke ich *Dr. Iskander Ibragimov*.

Ich danke *Christian Dehn*, *Frederik Lauber* und *Sebastian Sonntag* für nette Unterhaltungen und ihre Hilfsbereitschaft, falls Linux, L^AT_EX oder ROOT und ich unterschiedlicher Meinung waren.

Ulrich Werthenbach danke ich für die kurzweiligen Raucherpausen.

Der *gesamten Arbeitsgruppe* Experimentell Teilchenphysik danke ich für das angenehme Umfeld, in dem ich diese Arbeit schreiben durfte.

Ich danke meinen Arbeitskollegen im St. Marien-Krankenhaus *Müno*, *Werner* und *Thorsten* dafür, dass sie mir Zeit gegeben haben, wenn ich sie brauchte.

Außerdem danke ich meinem Kommilitonen aus alten Tagen *Dr. Stefan Lammers*, der mir unermüdlich zu der Wiederaufnahme meines Studiums riet.

Mein größter Dank gilt meiner *Familie* für ihre Unterstützung, mit der sie zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Im Besonderen möchte ich dabei meiner Lebensgefährtin *Nancy* danken, sie musste mein, gegen Ende der Schreibphase doch recht angespanntes, Gemüt ertragen und hat mir dennoch Zuhause immer den Rücken frei gehalten.

Zum Schluss danke ich noch mir selbst dafür, dass ich nach so langer Zeit mein Physik-Studium doch noch zu einem glücklichen Ende gebracht habe.

Gut Ding will Weile haben...

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebene Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate und Ergebnisse Anderer kenntlich gemacht habe.

.....
(Ort) (Datum)

.....
(Unterschrift)