

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Simulation der Energierekonstruktion des Tile-Kalorimetertriggers des ATLAS-Detektors

Bachelor-Arbeit
zur Erlangung des Hochschulgrades
Bachelor of Science
im Bachelor-Studiengang Physik

vorgelegt von

Andreas Jansen
geboren am 20.06.1990 in Görlitz

Institut für Kern- und Teilchenphysik
Fachrichtung Physik
Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften
Technische Universität Dresden
2014

Eingereicht am 11. November 2014

1. Gutachter: Prof. Dr. Arno Straessner
2. Gutachter: Prof. Dr. Kai Zuber

Kurzdarstellung

In dieser Bachelorarbeit wird die Erweiterung des Simulationsprogramms AREUS um das Tile-Kalorimeter beschrieben. Dafür werden kurz die neu erstellten Module vorgestellt und erläutert. Durch Vergleiche mit Daten der ATHENA-Simulation wird die korrekte Funktionsweise dargelegt. Im Anschluss wird versucht, die von AREUS simulierten Transversalenergien so zu verschmieren, dass diese mit den tatsächlich gemessenen Werten der Tile-Kalorimeter Trigger-Auslese des ATLAS-Detektors übereinstimmen. Dazu werden zwei Methoden in AREUS implementiert und die damit erzeugten Ergebnisse im Anschluss diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das ATLAS-Experiment	3
2.1	Der Large Hadron Collider	3
2.2	Der ATLAS-Detektor	3
2.3	Das Tile-Kalorimeter	4
2.4	Triggersystem	5
2.5	Pläne für das Phase-I Upgrade	6
3	ATLAS Readout Electronics Upgrade Simulation	7
3.1	Allgemeiner Aufbau	7
3.2	Realisierung im Tile-System	8
3.2.1	Datenverarbeitung	8
3.2.2	Ausgabe	9
4	Anpassen der Energieverteilung	11
4.1	Einleitung	11
4.2	Methode 1: Gauss	15
4.3	Methode 2: Histogramm	20
5	Zusammenfassung und Diskussion	23
6	Literatur	25

1 Einleitung

Motivation für diese Arbeit ist das bevorstehende Phase-I Upgrade des ATLAS-Detektors am Large Hadron Collider. Im Zuge dessen soll unter anderem das elektromagnetische Flüssigargon-Kalorimeter mit neuer Ausleseelektronik ausgestattet werden. Zum Testen der anstehenden Veränderungen wird die neue Simulationssoftware AREUS entwickelt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Simulation um das noch fehlende Tile-Kalorimeter zu erweitern. Durch zum Beispiel elektronisches Rauschen weicht die tatsächlich gemessene Energie der Trigger-Auslese von den deponierten Energiewerten in den Zellen ab. Über Vergleiche mit der älteren ATHENA-Simulation wird versucht, die Energieverteilung in AREUS so zu verschmieren, dass diese Effekte simuliert werden können.

Um verwendete Begriffe und Größen zu erläutern, folgt in Kapitel 2 zunächst ein Überblick über den ATLAS-Detektor und das verwendete Trigger-System sowie Tile-Kalorimeter. Außerdem wird kurz das kommende Phase-I Upgrade näher erläutert.

In Kapitel 3 werden die Simulationssoftware AREUS und die hinzugefügten Module vorgestellt.

Im folgenden Kapitel wird die Ausgabe der ATHENA- sowie AREUS-Simulation verglichen. Darauf aufbauend werden die zwei verwendeten Methoden zur Verschmierung der AREUS-Energieverteilung vorgestellt und dessen Ergebnisse diskutiert.

Im letzten Teil werden abschließend alle Ergebnisse zusammengefasst.

2 Das ATLAS-Experiment

2.1 Der Large Hadron Collider

Der Large Hadron Collider (LHC) ist der größte Teilchenbeschleuniger weltweit. Gebaut wurde er von 1998 bis 2008 am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf. Forschungsziele waren und sind dabei die Überprüfung des aktuellen Standardmodells der Physik sowie die Forschung jenseits des Standardmodells. Dazu werden zwei gegenläufige Protonenstrahlen¹ in dem 26,7 km langen, in etwa 100 m unter der Erde befindlichen Ringtunnel auf bisher 7 TeV beschleunigt und zur Kollision in einer der vier Kammern entlang des Tunnels gebracht, wobei sich in jeder jeweils ein Teilchendetektor befindet [1].

2.2 Der ATLAS-Detektor

Der ATLAS-Detektor² [2] ist, neben LHCb, ALICE und CMS, einer der vier oben genannten Teilchendetektoren. Dabei besteht der ATLAS-Detektor selber aus verschiedenen Subdetektoren, welche zylindrisch sowie symmetrisch um die Strahlachse beziehungsweise den Kollisionspunkt angeordnet sind (s. Abbildung 2.1). Den Kern bildet der innere Detektor, welcher zur präzisen Positions- und Impulsbestimmung, der bei der Kollision entstehenden Teilchen, dient. Weiter außen liegt das elektromagnetische Flüssigargon-Kalorimeter³ und das darauf folgende hadronische Tile-Kalorimeter. Beide werden zur Energie- sowie weiteren Positionsbestimmung elektromagnetischer bzw. hadronischer Teilchen genutzt, wobei das Tile-Kalorimeter im nächsten Abschnitt 2.3 genauer beschrieben werden soll. Den äußersten Teil des ATLAS-Detektors bildet das Myon-System, welches zur Erkennung der in den anderen Detektorteilen nur wenig messbaren Myonen dient.

Beschreibt man Kollisionen im ATLAS-Detektor, liegt der Koordinatenursprung immer im Kollisionspunkt. Dabei ist die z-Achse in Strahlrichtung, die x-Achse vom Koordinatenursprung zum Zentrum des LHC-Rings und die y-Achse nach oben zeigend definiert.

¹Kollision auch mit Blei-Kernen möglich.

²ATLAS: „**A** Toroidal LHC Apparatu**S**“

³LAr-Kalorimeter, engl.: „Liquid Argon calorimeter“

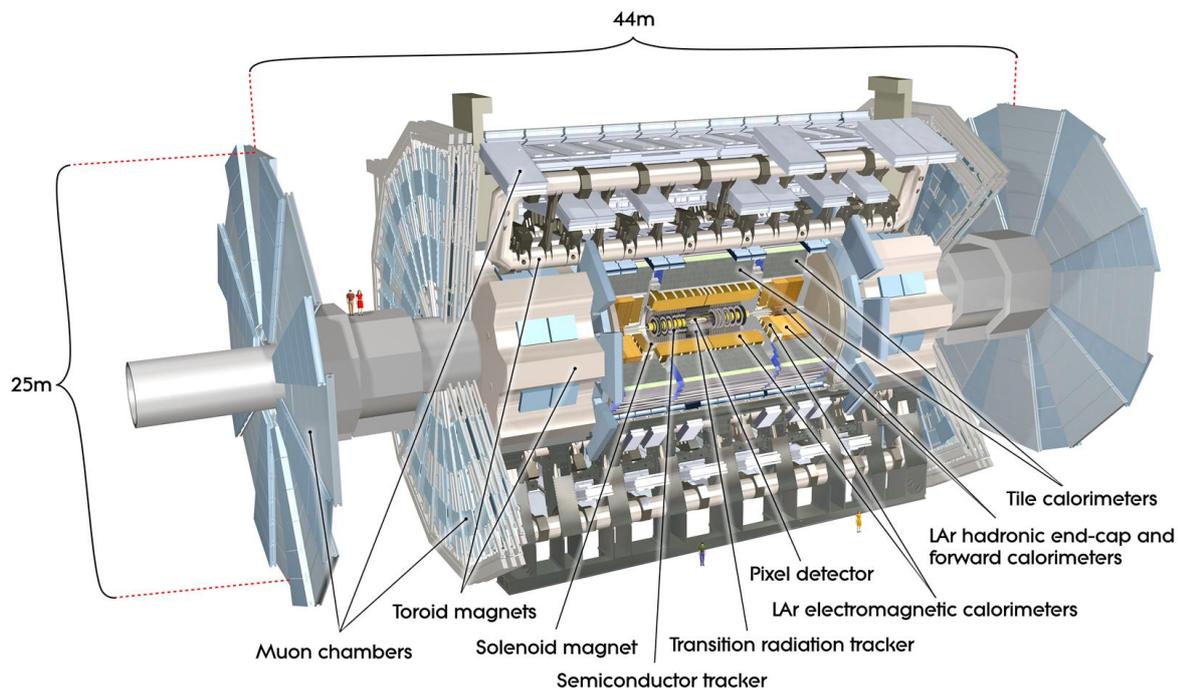


Abbildung 2.1: Computergenerierter Schnitt durch den gesamten ATLAS-Detektor [3] mit Kennzeichnung der oben genannten Teildetektoren.

Zur genauen Beschreibung der Teilchenpositionen dient der Azimutalwinkel ϕ , welcher um die Strahlachse herum gemessen wird. Als Winkel von der Strahlachse wird der Polarwinkel θ genutzt. Dieser wird im Folgenden durch die Pseudorapidität, definiert als $\eta = -\tan \frac{\theta}{2}$, ersetzt [4].

2.3 Das Tile-Kalorimeter

Das Tile-Kalorimeter ist eines von drei hadronischen Kalorimetern des ATLAS-Detektors und dient dem Messen von Energien und Richtungen der Hadronen und Jets. Es wird unterteilt in „Central Barrel“ ($|\eta| < 1,0$) und zwei „Extended Barrels“ ($0,8 < |\eta| < 1,7$) und gehört zur Kategorie der Sampling-Kalorimeter⁴. Hierbei werden Stahl als Absorber und Szintillator-Platten als aktives Material genutzt. Alle Barrels sind azimuthal in 64 Module der Größe $\Delta\phi \sim 0,1$ unterteilt. Radial besteht das Tile-Kalorimeter aus drei Segmenten, welche im Folgenden mit Layer A, Layer B⁵ und Layer D bezeichnet werden (s. Abbildung 2.2). Das Auslesen der Szintillator-Platten erfolgt über wellenlängen-verändernde Fasern. Diese sind an den Modulseiten befestigt und am Ende in mehreren „Photo Multiplier Tubes“ (kurz: „PMTs“) gebündelt. Dadurch wird eine annäherungsweise projektive Geometrie in η ermöglicht.

⁴Kalorimetertyp, bei welchem das Material zum Anschauen der Teilchen verschieden von dem zur Energiemessung ist.

⁵Layer C und Layer BC werden mit Layer B zusammengefasst.

2.4 Triggersystem

Die interessanten Ereignisse haben nur sehr geringe Wechselwirkungsquerschnitte. Damit diese dennoch beobachtet werden können, besitzt der LHC eine entsprechend große Luminosität⁶ von $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Über ein Triggersystem werden aus allen auftretenden Protonenkollisionen nur die relevanten Ereignisse herausgefiltert. Aktuell besteht das System aus den Stufen „Level 1“ (L1), „Level 2“ (L2) und dem „Event Filter“.

Dabei besitzt der L1-Trigger nur eine begrenzte Zeit von $2,5 \mu\text{s}$, um eine Entscheidung zu treffen. Damit dies gewährleistet werden kann, wird nur ein Bruchteil der zur Verfügung stehenden Detektorinformationen ausgewertet. Im Speziellen wird die in den Kalorimeterzellen deponierte Energie zu sogenannten „Trigger-Towern“ (kurz: „TT“) aufsummiert. Mithilfe verschiedener Trigger-Algorithmen wird versucht, diese Information so auszuwerten, dass nur auf gewünschte Ereignisse getriggert wird. Die TT des Tile-Kalorimeters besitzen eine Größe von $\eta \times \phi = 0,1 \times 0,1$ und sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

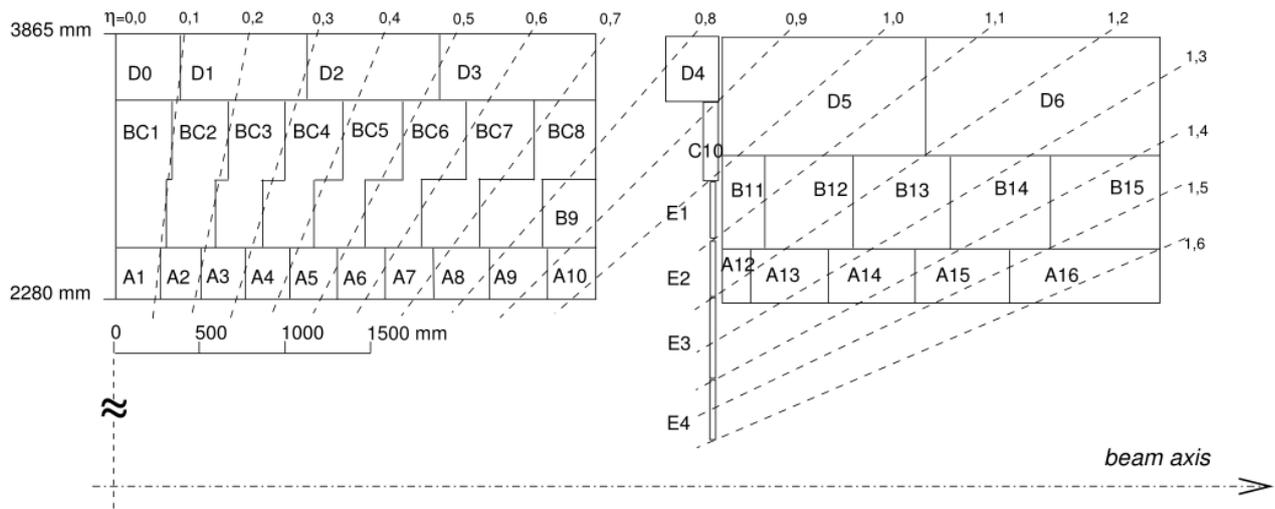


Abbildung 2.2: Horizontaler Schnitt durch das Tile-Kalorimeter mit Unterteilung in η (TT) sowie in die im Abschnitt 2.3 definierten Layer des Central (links) sowie Extended (rechts) Barrels. Die untere linke Ecke entspricht dem Koordinatenursprung, zu welchem das Kalorimeter symmetrisch aufgebaut ist [2, S. 125].

Jede weitere Stufe des Triggersystems verfeinert durch zusätzliche Kriterien die Auswahl der vorherigen. So ist es möglich, aus anfänglich 40 MHz eine Ereignisrate von 200 Hz zu erreichen. Ereignisse, welche nach dem L1 und L2 zusätzlich den Bedingungen des Event-Filters genügen, werden schließlich dauerhaft für die weitere Offline-Analyse gespeichert.

⁶Anzahl der Teilchenkollisionen pro Zeit und Fläche.

2.5 Pläne für das Phase-I Upgrade

Im August 2012 wurde die Entdeckung eines Teilchens, welches dem Higgs-Boson ähnlich ist, am CMS- sowie am ATLAS-Detektor bekannt gegeben [5]. Um an diesen Erfolg anknüpfen zu können und unter anderem das Messen der Eigenschaften des neuen Higgs-Bosons zu verbessern, soll ab dem Jahr 2019 die Luminosität am LHC auf etwa das Doppelte gesteigert werden. Diese Umrüstung wird mit „Phase-I Upgrade“ [6] bezeichnet. Dabei soll sowohl die Bandbreite, als auch die Energieschwelle des L1-Triggers konstant gehalten werden. Um dies zu erreichen, wird neue Trigger-Ausleseelektronik benötigt. Konkret soll die Granularität der Trigger-Auslese im LAr-Kalorimeter verbessert und vom System der Trigger-Tower (analog dem des Tile-Kalorimeters) auf das System der Superzellen umgestellt werden.

3 ATLAS Readout Electronics Upgrade Simulation

Um die Trigger-Auslese des LAr- sowie Tile-Kalorimeters vor der eigentlichen Inbetriebnahme im ATLAS-Detektor zu testen, wird die Elektronik vorher durch Software simuliert. Eines der dafür genutzten Programme ist die ATHENA-Simulation. Diese müsste nun an die im Abschnitt 2.5 beschriebenen Änderungen der Superzellen angepasst werden. Als Alternative dazu dient die neu entwickelte „ATLAS Readout Electronics Upgrade Simulation“ (kurz: „AREUS“) [7]. Damit kann bereits die neue LAr-Trigger Auslese simuliert werden, um für diese zum Beispiel neue digitale Filter zu entwickeln und zu testen. Ziel dieser Arbeit ist das Erweitern der Simulation um die noch fehlende Auslese des Tile-Kalorimeters. Damit stellt AREUS eine effiziente Lösung zum Optimieren des Triggersystems des Phase-I Upgrades dar.

3.1 Allgemeiner Aufbau

AREUS ist streng modular aufgebaut, das heißt, dass jedes Modul nur von wenigen Schnittstellendefinitionen abhängt und keine weiteren Verbindungen zu folgenden Modulen besitzt. Das primäre Entwurfsmuster ist dabei eine Variante des Beobachter-Subjekt-Musters. Hierbei verwaltet ein Objekt, das sogenannte Subjekt, eine Liste von abhängigen Objekten, genannt Beobachter, und benachrichtigt diese bei Änderungen innerhalb des Subjektes automatisch. Entscheidend dabei ist, dass das Subjekt die Änderungen völlig unspezifisch an jeden Beobachter der Liste meldet. Demzufolge besitzt oder benötigt es keine Kenntnisse über die genaue Struktur der Beobachter. Die Beobachter selber können im Folgenden für andere Beobachter als Subjekt agieren, wodurch eine Kette von Subjekt-Beobachtern gebildet wird.

Erstellt, konfiguriert und dem passenden Subjekt zugeordnet, werden die Beobachter von sogenannten Fabriken. Jede Fabrik kennt wiederum ihre Nachfolgende und weist diese an, den Beobachter für eben erstellte Subjekte (\equiv Beobachter des vorherigen Subjektes) zu erstellen. In Abbildung 3.1 ist das eben beschriebene Muster skizzenhaft dargestellt.

Die Konfiguration und Reihenfolge der Fabriken wird über eine separate XML-Datei definiert. Außerdem können darin Einstellungen, wie zum Beispiel Name und Speicherort von Ein- und Ausgabedateien sowie spezielle Parameter der zu erzeugenden Subjekte und Beobachter, ge-

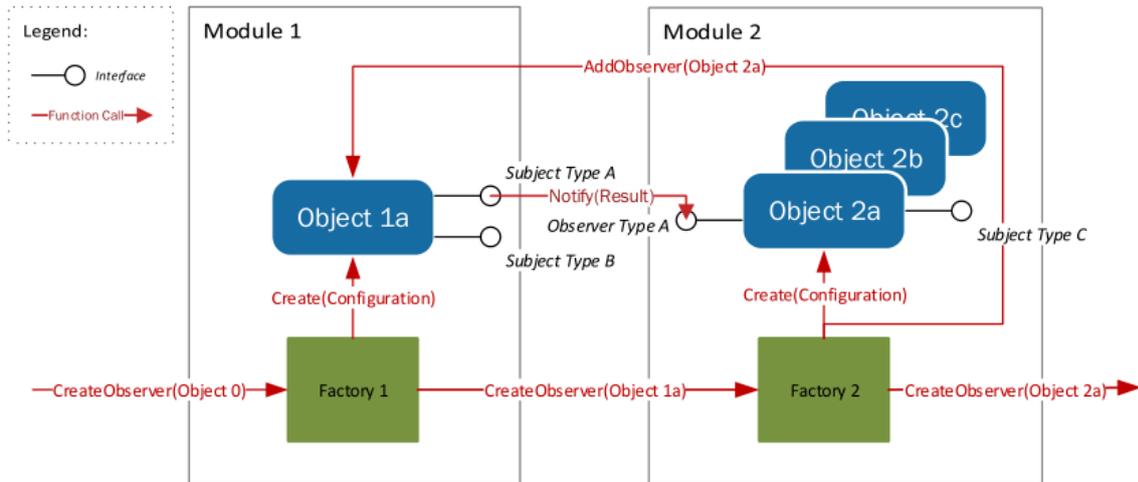


Abbildung 3.1: Prinzip des AREUS-Entwurfsmusters: Eine Folge von Fabriken erstellt und verbindet Beobachter und Subjekte [7].

treffen werden. Dies ermöglicht, dass AREUS auch genutzt und für eigene Voraussetzungen angepasst werden kann, ohne dass einzelne Module im Speziellen geändert, verstanden oder umgeschrieben werden müssten.

3.2 Realisierung im Tile-System

3.2.1 Datenverarbeitung

Die Module des Tile-Systems wurden in Anlehnung zu denen der bereits vorhandenen LAr-Trigger-Auslese-Simulation konzipiert. Das Erste ist das sogenannte „HitSample“-Modul, welches die Hits aus einer passenden Eingabedatei einliest, verarbeitet und entsprechende TileHit-Objekte erstellt. Diese werden von den folgenden Modulen in AREUS verwendet. Über die im Abschnitt 3.1 erwähnte XML-Datei, kann dabei der Nutzer eine eingeschränkte Kalorimeter-Region festlegen. Das Modul filtert alle Hits, welche außerhalb des definierten Bereichs liegen, heraus und verarbeitet nur den eingestellten Bereich. Dadurch wird die effektive Speichernutzung sowie ein schneller Prozessablauf sichergestellt. Als Eingabedatei dienen mit Geant4 [8, 9] erstellte Teilchenhits, welche auch für ATHENA-Simulationen benutzt werden können.

Die erstellten TileHits werden im Anschluss vom „TileTower“-Modul verarbeitet und entsprechend ihrer Position im Kalorimeter dem passenden TT zugeordnet. Zur Kontrolle speichert jedes so erstellte TT-Objekt alle ihm zugeordneten TileHits ab. Über interne Funktionen wird das direkte Auslesen der TT-Position, der Anzahl der Layer mit registriertem Hit, der Gesamtanzahl der TileHits sowie der Transversal- oder Gesamtenergie ermöglicht. Dadurch können die hier bereits nach „BunchCrossing“¹ (kurz: „BC“) sortierten Informationen der jeweiligen TT von den nachfolgenden Modulen schnell und direkt abgerufen werden.

¹BunchCrossing, engl.: „Strahlkreuzung“

3.2.2 Ausgabe

Die Datenausgabe in AREUS erfolgt über das Abspeichern der gewünschten Informationen in Root-Dateien. Das Format wird als Standard im Bereich der Teilchenphysik angesehen und ermöglicht das effektive Verwalten großer Datenmengen. Die Dateien können zur weiteren Verarbeitung mithilfe entsprechender Root-Skripte ausgelesen, visualisiert oder nach gewünschten Informationen durchsucht und gefiltert werden.

Die ersten Daten werden bereits vom TT-Modul abgespeichert. Sie enthalten die Information, welche Layer der einzelnen TT über alle BC hinweg mindestens einen Hit registriert haben. Es können sowohl die Layeranzahl der kompletten TT (s. Abbildung 3.2a), als auch direkt die Hits im speziellen Layer (s. Abbildung 3.2b) dargestellt werden.

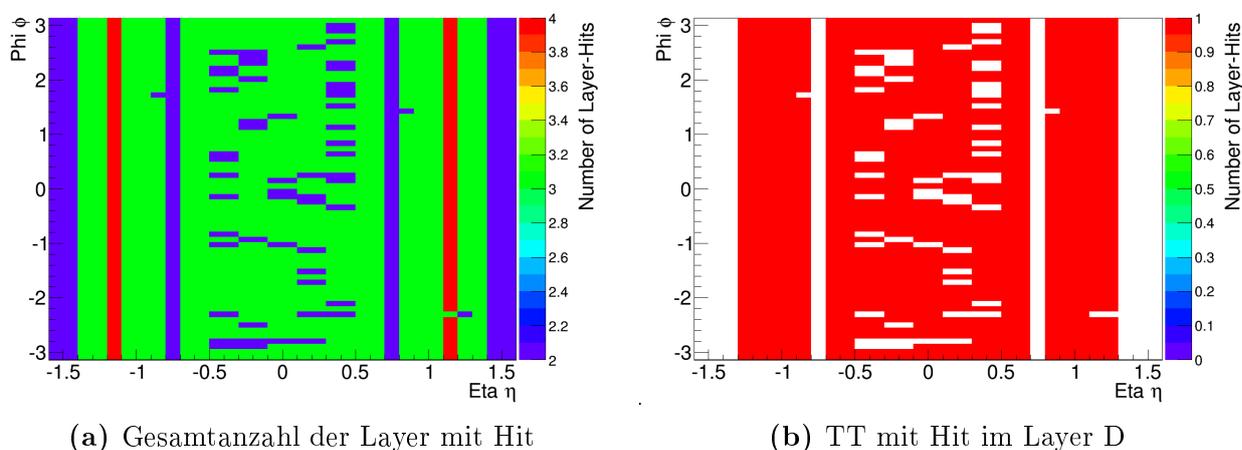


Abbildung 3.2: Gesamtanzahl der Layer mit Hit in einem TT (3.2a) sowie die TT mit Hit im Layer D (3.2b) über der kompletten Tile-Kalorimeter Detektorregion.

In den Plots der Abbildung 3.2a kann man die fehlerfreie Zuordnung der Hits zu den TT erkennen. Mit Ausnahme der zwei Positionen $\eta = \pm 1,2$, werden erwartungsgemäß maximal drei verschiedene Layer mit Hit in jedem TT gezählt. Die TT mit Hits in vier verschiedenen Layern entstehen durch den Übergang vom Central- zum Extended-Barrel. In diesem befinden sich noch sogenannte „Special-Gap-Scin-Cells“, welche von AREUS als separater Layer E gewertet werden. Der Layer, sowie die darin deponierten Energie, wird im Folgenden nicht mehr zu den TTn dazugezählt. Zum Vergleich des genauen Aufbaus der TT siehe Abbildung 2.2.

Zusätzlich sind für das Tile-Kalorimeter zwei direkte Ausgabemodule programmiert. Das erste Modul ist der „Trigger-Tower-Monitor“. Er beobachtet alle erstellten TT separat und speichert die darin befindlichen Informationen für jedes einzelne BC. Durch die getrennte Auflistung der TT können gesuchte Informationen direkt und ohne weitere Skripte ausgelesen werden. Das ermöglicht es zum Beispiel, gezielt nach Fehlern in einer Region zu suchen.

Das zweite Ausgabemodule ist der sogenannte „NTupleMaker“. Er wurde so programmiert, dass die abgespeicherten Informationen eine ähnliche Datenstruktur zu den Ausgabe-Dateien der ATHENA-Simulationen besitzen. Analog dem „TT-Monitor“ beobachtet das Modul alle erstellten TT. Die abgerufenen Informationen werden jedoch nicht separat für jeden TT in die Root-Datei geschrieben, sondern in größeren Kategorien zusammengefasst. Bei diesem Prozess gehen natürlich keine Information verloren, jedoch lassen sich die Daten schlechter visualisieren. Der Vorteil liegt darin, dass die so produzierten AREUS-Daten direkter und dadurch einfacher mit denen der ATHENA-Ausgabe vergleichbar sind. Für die weiteren Ergebnisse wurde daher stets die von diesem Modul erzeugte Ausgabe genutzt.

4 Anpassen der Energieverteilung

4.1 Einleitung

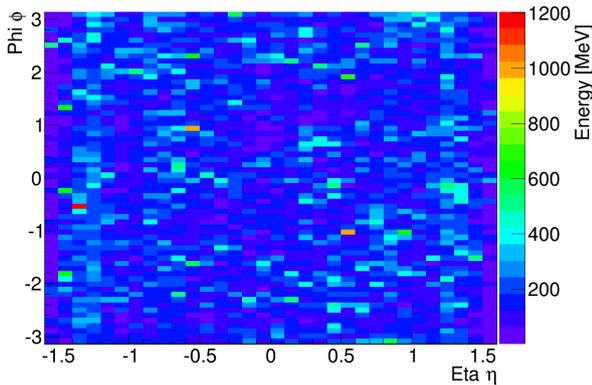
Wie bereits im Kapitel 3 diskutiert, sollen die von AREUS produzierten Datensätze der Tile-Kalorimeter Trigger-Auslese genutzt werden, um optimale Einstellungen des L1 Triggers des ATLAS-Detektors zu finden. Dafür müssen die simulierten TT-Energien so genau wie möglich mit denen der echten Ausleseelektronik übereinstimmen. Insbesondere sollten hierbei Effekte, wie zum Beispiel elektronisches Rauschen oder Pile-Up¹ des Signals, mit einbezogen werden. Die bisherigen Module von AREUS, welche im Abschnitt 3.2 ausführlich diskutiert wurden, ordnen jedoch alle kommenden Geant4-Hits völlig unverändert und rauschfrei den passenden TTn zu. Das Ziel dieses Kapitels soll es nun sein, die idealisierte Verteilung der TT-Energie der bisherigen AREUS-Ausgabe so zu „verschmieren“, dass sie möglichst genau der tatsächlich gemessenen Energieverteilung am ATLAS Detektor entspricht. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen jedoch nicht alle Faktoren, welche zu der entsprechend gemessenen Verteilung führen, einzeln untersucht werden. Stattdessen wird nur versucht, das Endresultat von AREUS so anzupassen, dass die finale Ausgabe mit denen der tatsächlich gemessenen Energieverteilung übereinstimmt, unabhängig davon was genau wann und wie zur Veränderung der eigentlichen Energie im TT beigetragen hat.

Die zum Vergleich benutzten Datensätze sind über die bereits mehrfach erwähnten ATHENA-Simulation erstellt worden. Damit ist es möglich, die bis dato vorliegende Ausleseelektronik, inklusive der Berücksichtigung der oben angesprochenen Effekte, sehr gut zu simulieren. Die erzeugten Daten können aus dem Grund genutzt werden, da im Phase-I Upgrade das Tile-Kalorimeter und dessen Auslese unverändert bleiben soll. Für diesen Teil ist die ATHENA-Simulation also weiterhin eine geeignete Lösung.

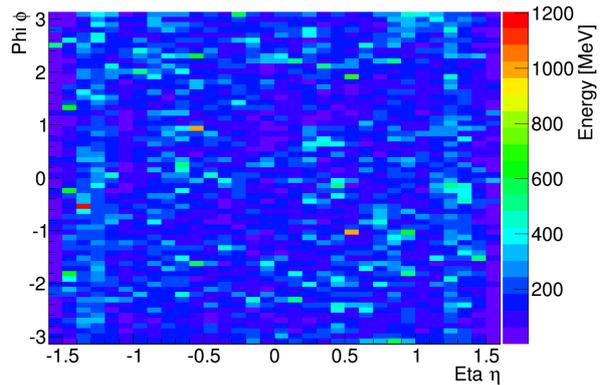
Für die konkreten Simulationen wurden mit Pythia8 [10, 11] Dijet-Samples mit einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 14$ TeV generiert. Über Geant4 wird damit die Energiedeposition in den einzelnen Detektorschichten simuliert und die entsprechende Eingabedatei für die weiteren Simulationen erstellt. Insgesamt wurden rund 10400 BCs betrachtet.

¹Bezeichnung weiterer Proton-Proton-Kollisionen, welche zusätzlich zur „interessanten Kollision“ des BCs auftreten.

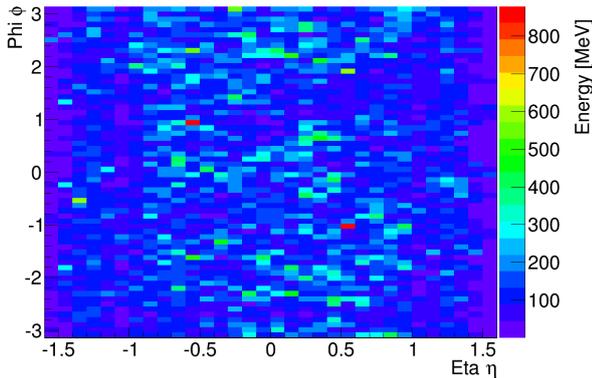
Als erste Übersicht und Kontrolle der Simulationsdaten dient die erstellte Abbildung 4.1. Hier sind alle registrierten Hits, über 800 BCs, mit ihrer jeweils gespeicherten Energie über dem kompletten Detektorbereich des Tile-Kalorimeters aufgetragen. Dadurch lassen sich Zusammenhänge und Unterschiede zwischen den originalen Geant4 Hits, sowie denen der AREUS- und ATHENA-Simulation erkennen. Zur Veranschaulichung wurde die Bin-Größe entsprechend der Größe der einzelnen TT gewählt.



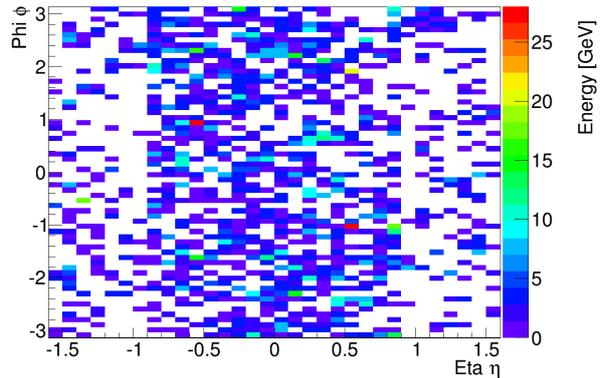
(a) Energie der originalen Hits der Geant4-Simulation.



(b) Energie der mit AREUS verarbeiteten Hits.



(c) Transversalenergie der mit AREUS verarbeiteten Hits.



(d) Transversalenergie der mit ATHENA verarbeiteten Hits.

Abbildung 4.1: Darstellung aller registrierten Hits über 800 BCs mit ihrer jeweils gespeicherten Transversal-/Energie über dem kompletten Detektorbereich des Tile-Kalorimeters.

AREUS verarbeitet alle Hits unverändert. Als Folge ist erwartungsgemäß das Histogramm der AREUS-Hits (4.1b) fast identisch zu dem der originalen Geant4-Hits (4.1a). In beiden Fällen liegen die TT mit besonders viel Energiedeposition an den gleichen Detektorpositionen: $(\eta \times \phi) = (0,6 \times -1,1)$, $(-0,6 \times 1,0)$ und $(-1,4 \times -0,6)$. Dieser Zusammenhang bleibt ebenso erhalten, wenn man die Transversalenergien der Hits (kurz: „ E_T^{Hit} “) der AREUS-Ausgabe (4.1c) benutzt. Dadurch wird lediglich die Energie im äußeren η -Bereich verringert, wodurch besonders der dritte oben genannte TT schwerer erkennbar ist.

Im Gegensatz dazu erkennt man deutliche Unterschiede im Histogramm der ATHENA-Hits (4.1d). Angepasst zur echten Tile-Kalorimeter Auslese-Elektronik ist die Einheit der Energie hier in ADC-Counts gegeben, wobei gilt: 1 count = 1 GeV. Außerdem werden Hits mit einer Energie $E_T^{\text{Hit}} \leq 1$ GeV vom ADC als count = 0 gewertet, wodurch das durch die vielen niederenergetischen Hits verursachte Rauschen unterdrückt ist. Dennoch ist auch hier der Zusammenhang durch das Übereinstimmen der TT mit besonders großer Energiedeposition erkennbar.

Wie bereits diskutiert, sollen im weiteren Verlauf der Arbeit nicht die genauen Veränderungen der einzelnen Hit-Energien E_T^{Hit} untersucht werden. Deshalb werden ab diesem Punkt nur noch die Transversalenergien der kompletten TT (kurz: „ E_T^{TT} “) nach einem BC betrachtet. Die genaue Abhängigkeit zwischen AREUS- und ATHENA- E_T^{TT} ist im Korrelationsplot in Abbildung 4.2 dargestellt. Es wurde separat für alle BC die gespeicherte E_T^{TT} jedes einzelnen TT miteinander verglichen und aufgetragen. Die Größe der Bins entspricht dabei der Auflösung der gespeicherten Energiewerte, das heißt konkret: $\Delta E_{T,AT}^{\text{TT}} = 1$ GeV, $\Delta E_{T,AR}^{\text{TT}} = 10$ MeV.

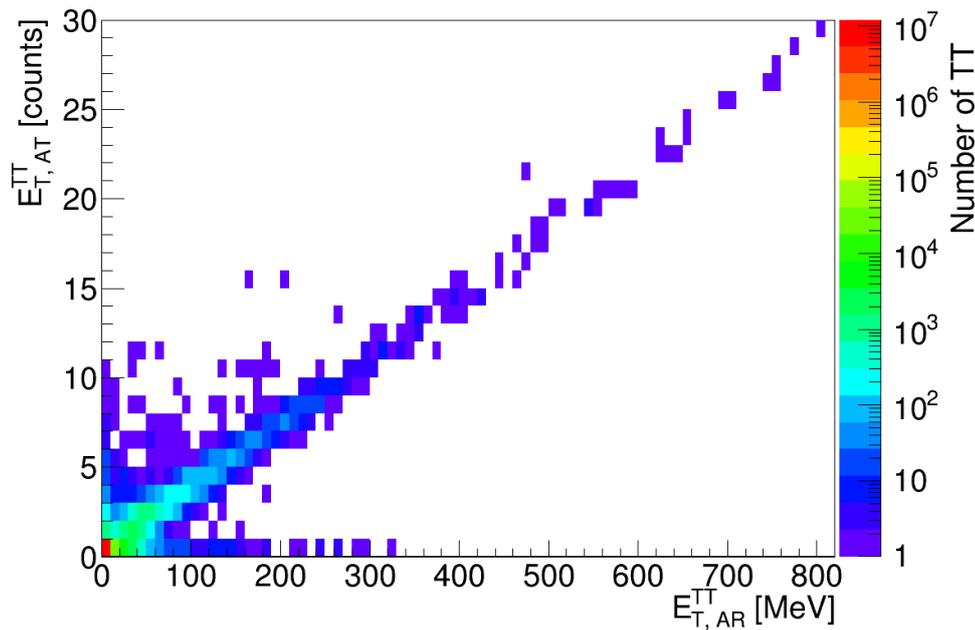


Abbildung 4.2: Korrelationsplot der direkten Abhängigkeit: $E_{T,AT}^{\text{TT}}$ vs. $E_{T,AR}^{\text{TT}}$

Man kann klar den erwarteten, linearen Zusammenhang zwischen beiden Simulationen erkennen. Das bedeutet, dass TT eines speziellen BCs, welche in AREUS eine hohe Energiedeposition registriert haben, ebenfalls in ATHENA an dieser Stelle viel Energie besitzen. Die Energieskala der ATHENA Simulation liegt im Bereich von 0 bis 30 GeV und ist damit deutlich größer als die der AREUS Simulation, welche nur bis knapp 1 GeV reicht. Dies folgt primär daraus, dass ATHENA, im Gegensatz zu AREUS, bereits Konstanten wie zum Beispiel die

Sampling Fraction² mit einbezieht. Somit wird die deponierte Energie um ein entsprechend Vielfaches vergrößert. Der Peak im Koordinatenursprung bedeutet, dass in beiden Simulationen der Großteil aller TT Energien bei $E_T^{TT} \simeq 0$ MeV liegt. Dies ist damit zu erklären, dass im größten Teil des Detektors während der einzelnen BCs keine Energie deponiert, dort demzufolge auch kein Hit registriert wird. Weiterhin stellt man fest, dass die Verschmierung der Energieverteilung im unteren Bereich am stärksten ist. Das ist eine Folge davon, dass Fehler, durch zum Beispiel Rauschen der Elektronik, bei kleineren Energien wesentlich stärker ins Gewicht fallen.

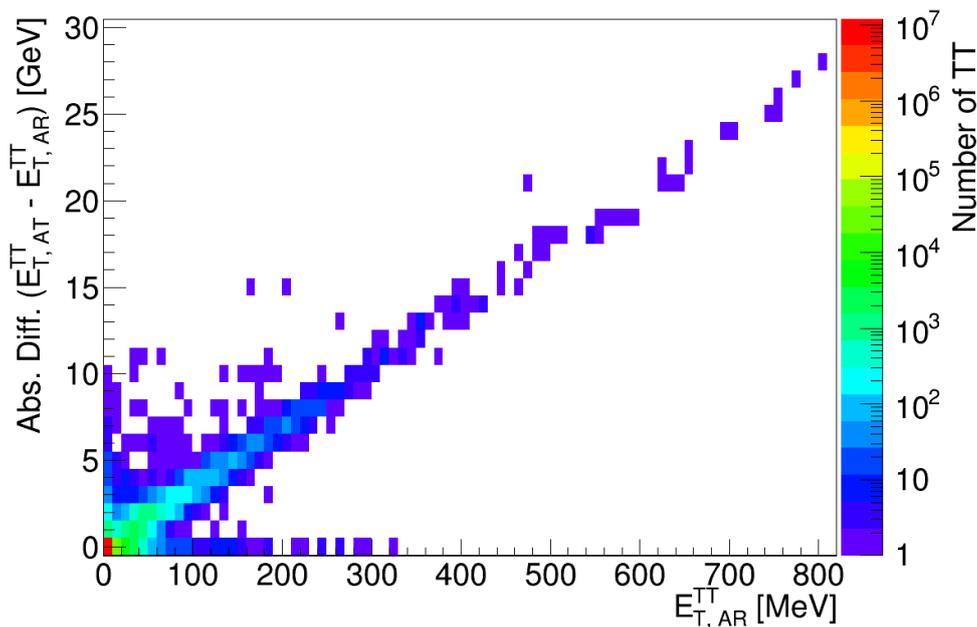


Abbildung 4.3: Korrelationsplot der absoluten Differenz: $(E_{T,AT}^{TT} - E_{T,AR}^{TT})$ vs. $E_{T,AR}^{TT}$.

Über einen 2D-Plot ist im obigen Histogramm (s. Abbildung 4.3) der Zusammenhang zwischen absoluter Differenz der E_T^{TT} beider Simulationen und $E_{T,AR}^{TT}$ dargestellt. Durch die stark abweichenden Energieskalen ähnelt das Histogramm der absoluten Differenz sehr dem vorangestellten Korrelationsplot der beiden Simulationen. Die Einteilung der y-Achse ist jetzt jedoch um 500 MeV verschoben. Die Änderung ist notwendig, da bei Subtraktion von E_T^{TT} im Bereich $E_{T,AT}^{TT} = 0$ GeV und $E_{T,AR}^{TT} \gtrsim 0$ MeV die absolute Differenz negativ ist. In der alten Achsen-einteilung wird diese in einem neuen, negativen Bin mit count = -1 dargestellt. Als Folge wäre also der einzelne große $E_{T,AT}^{TT} = 0$ GeV, $E_{T,AR}^{TT} \simeq 0$ MeV Peak in zwei Kleinere gespalten. Das Histogramm der absoluten Differenz wird in den folgenden Methoden zur Verschmierung der AREUS-Energieverteilung genutzt.

²Konstante, welche das Verhältnis zwischen dem absorbierenden und aktiven Material angibt.

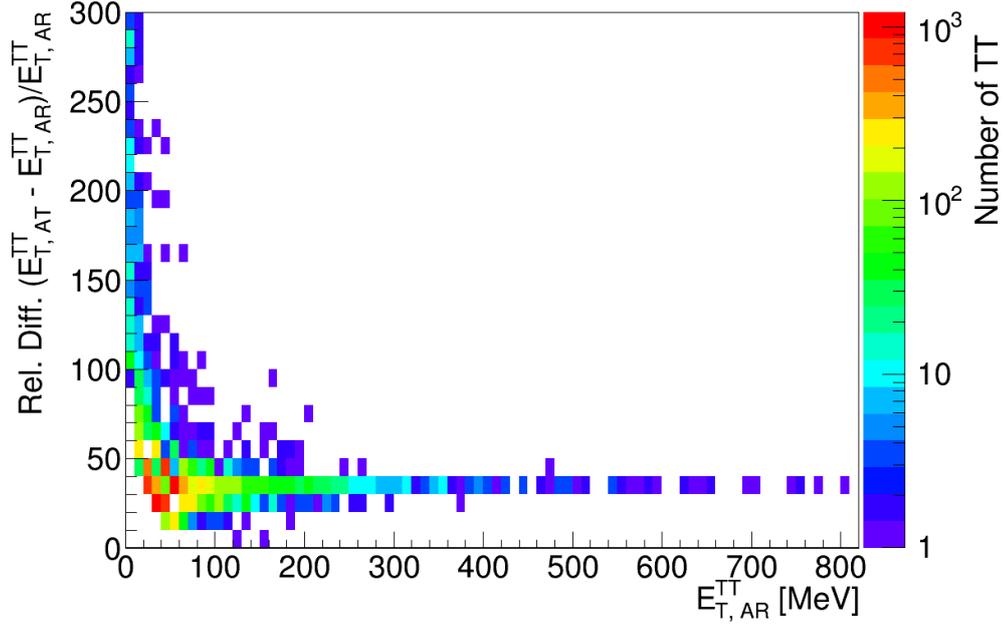


Abbildung 4.4: Korrelationsplot der relativen Differenz: $\frac{(E_{T,AT}^{TT} - E_{T,AR}^{TT})}{E_{T,AR}^{TT}}$ vs. $E_{T,AR}^{TT}$.

Im letzten Histogramm (s. Abbildung 4.4) ist der Korrelationsplot zwischen relativer Differenz der E_T^{TT} beider Simulationen und $E_{T,AR}^{TT}$ dargestellt. Hier wird noch einmal verdeutlicht, dass das Verschmieren von E_T^{TT} durch Rauscheffekte und Pile-Up vor allem bei kleinen Energien einen starken Einfluss hat. Im Bereich großer $E_{T,AR}^{TT}$ kann dieses allerdings nahezu vernachlässigt werden.

4.2 Methode 1: Gauss

Zur Verschmierung der ausgegebenen AREUS-Energieverteilung auf die der ATHENA Simulation wurden zwei Methoden getestet. Die erste soll im Folgenden als „Gauss-Methode“ bezeichnet werden. Um die Abhängigkeit der Verschmierung von $E_{T,AR}^{TT}$ zu ermitteln, wurden vom Histogramm der absoluten E_T^{TT} -Differenz (s. Abbildung 4.2) mehrere Projektionen entlang der y-Achse erstellt. Der Abstand von zwei einzelnen Projektionen beträgt genau ein Bin in x-Richtung, was einer Zunahme von jeweils $E_{T,AR}^{TT} = 10$ MeV entspricht. Jedes so erstellte, eindimensionale Histogramm wird näherungsweise mit einer Gauss-Funktion angepasst. Trägt man anschließend die erhaltenen Gauss-Parameter: Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung σ , über der jeweiligen $E_{T,AR}^{TT}$ auf, kann ein funktioneller Zusammenhang für diese bestimmt werden.

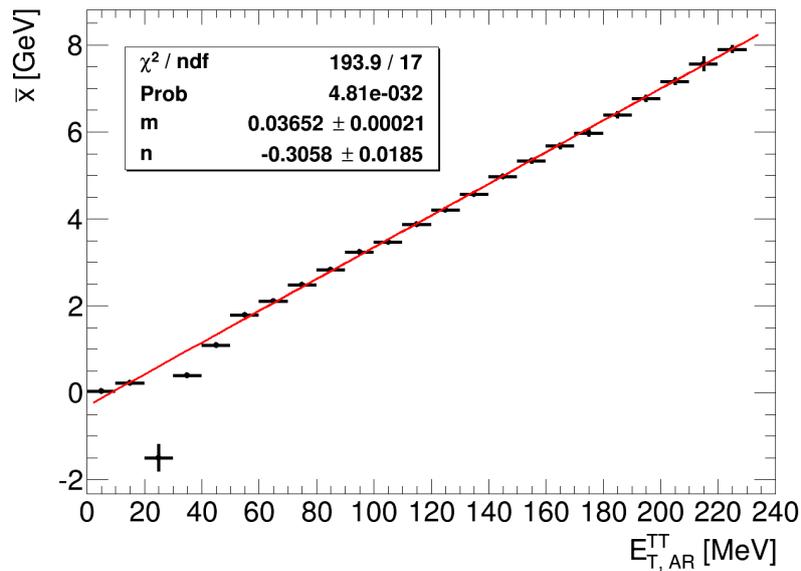


Abbildung 4.5: Abhängigkeit des Mittelwertes von $E_{T,AR}^{TT}$. In rot ist der lineare Fit über die Messwerte eingezeichnet.

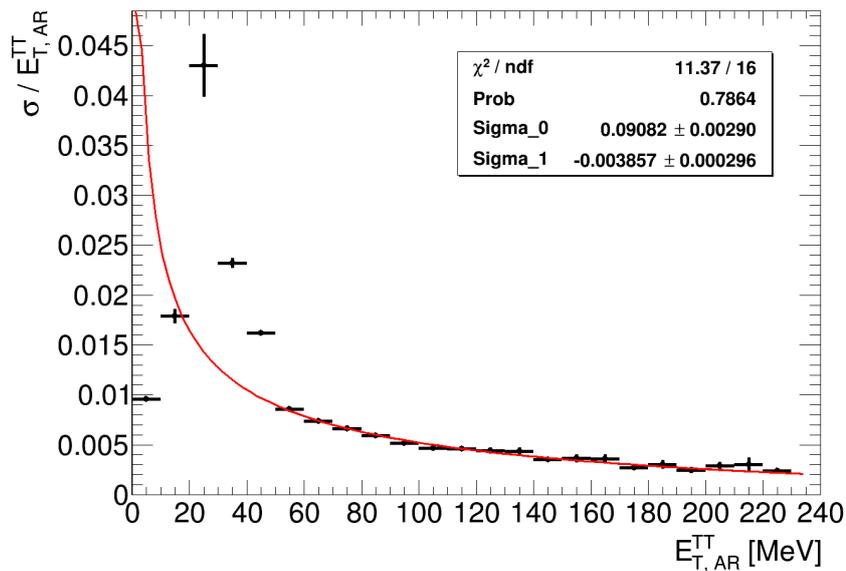


Abbildung 4.6: Abhängigkeit des Quotienten aus Standardabweichung und $E_{T,AR}^{TT}$. In rot ist der Fit über die Messwerte eingezeichnet, welcher der ATLAS-Note [2, S. 154] entnommen wurde.

In Abbildung 4.5 und 4.6 ist dieser Zusammenhang mit den dazu angepassten Funktionen dargestellt. Durch zu wenige, hochenergetische Ereignisse konnten die Gauss-Fits leider nur in einem Bereich von $0 \text{ MeV} \leq E_{T,AR}^{TT} \leq 230 \text{ MeV}$ durchgeführt werden. In Analogie zur Kalibrierung des LAr-Kalorimeters [2, S. 154], ist der Quotient aus Standardabweichung und $E_{T,AR}^{TT}$ über $E_{T,AR}^{TT}$ aufgetragen. Der Verlauf des Mittelwertes wurde mit einer linearen Funktion genähert.

Konkret lauten die in rot dargestellten Fit-Funktionen:

$$\bar{x}(E_{T,AR}^{TT}) = m \cdot E_{T,AR}^{TT} + n \quad (4.1a)$$

$$\frac{\sigma(E_{T,AR}^{TT})}{E_{T,AR}^{TT}} = \frac{a}{\sqrt{E_{T,AR}^{TT}}} + b \quad (4.1b)$$

Die ermittelten Parameter beider Fits ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} m &= 0,0365 \pm 0,0002 & n &= -0,3058 \pm 0,0185 \\ a = \text{Sigma}_0 &= 0,0538 \pm 0,0006 & b = \text{Sigma}_1 &= 0,0 \pm 0,0 \end{aligned}$$

Die Verschmierung der AREUS Ausgabe erreicht man dadurch, dass für jeden Wert von $E_{T,AR}^{TT}$ ein gaussverteilter Zufallswert mit dem entsprechend berechneten $\sigma(E_{T,AR}^{TT})$ und $\bar{x}(E_{T,AR}^{TT})$ gebildet wird. Aus dem so erhaltenen Wert der absoluten Differenz folgt, nach Summation mit $E_{T,AR}^{TT}$, direkt der verschmierte Wert $E_{T,AR, \text{Versch.}}^{TT}$. Zur Vermeidung physikalisch wenig sinnvoller negativer Energien, werden zur Berechnung der absoluten Differenz alle Mittelwerte $\bar{x}(E_{T,AR}^{TT} \leq 8,5 \text{ MeV})$, beziehungsweise direkt alle berechneten Differenz-Werte < 0 , auf Null festgelegt.

Den Vergleich zu den ATHENA Werten liefert das Histogramm in Abbildung 4.7, in welchem die verschmierten über den originalen AREUS-Werten aufgetragen sind.

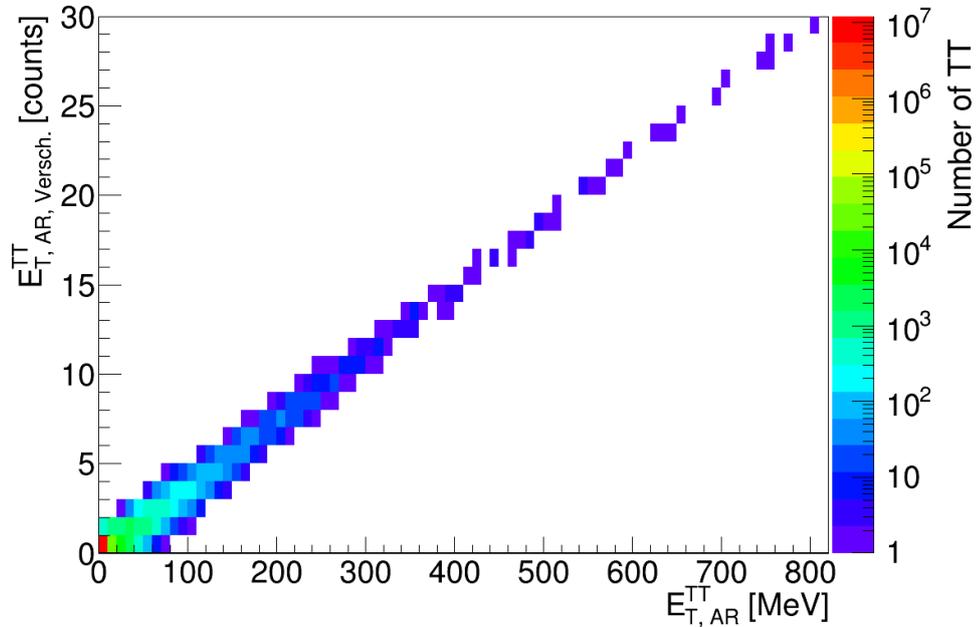


Abbildung 4.7: Mittels Gauss-Methode verschmierte gegen unveränderte AREUS- E_T^{TT} .

Erwartungsgemäß liegt der Großteil aller Ereignisse im Koordinatenursprung bei $E_T^{TT} = 0 \text{ MeV}$. Der lineare Zusammenhang, welcher auch schon in Abbildung 4.2 zu erkennen war, ist nun

wesentlich ausgeprägter. Dafür können größere Abweichungen von der Gauss-Methode nicht mehr berücksichtigt werden. Die Verschmierung der kleinen Energiewerte, welche bei ATHENA besonders stark ausgeprägt war, ist bei der Gauss-Methode nahezu nicht mehr erkennbar. Dies ist die Folge zweier Faktoren:

- Besonders im unteren Energiebereich weichen die angenommenen Fit-Funktionen für Mittelwert und Standardabweichung in Abbildung 4.5 und 4.6 von den eigentlichen Fit-Werten ab. Zusätzlich ist die gewählte Funktion der Standardabweichung, welche man aus Multiplikation von Formel 4.1b mit $E_{T,AR}^{TT}$ erhält, für $E_{T,AR}^{TT} = 0$ MeV ebenfalls Null und steigt erst mit größeren Energiewerten an. Dies ist dem Sachverhalt, dass die Verschmierung bei kleinen E-Werten am größten ist, genau entgegen gerichtet.
- Die Gauss-Fits der y-Achsen-Projektionen passen zwar bei höheren Energien (s. Abbildung 4.8), können jedoch im unteren Energiebereich den eigentlichen Histogrammverlauf nicht mehr richtig beschreiben. Die dort besonders stark ausgeprägte Verschmierung der Energie, welche man in Form des rechten Ausläufers in Abbildung 4.9 erkennen kann, wird von den angenäherten Gauss-Fits nicht mehr berücksichtigt. Demzufolge können auch bei der Verschmierung von $E_{T,AR}^{TT}$ in diesem Bereich keine passenden Ergebnisse erzielt werden.

Die Konsequenz ist, dass die so verwendete Gauss-Methode zur exakten Verschmierung der AREUS- E_T^{TT} nicht geeignet ist. Zur Verbesserung müsste man neue Funktionen zum Anpassen der Histogramme und der Standardabweichung suchen und testen. Durch die begrenzte Zeit konnte dies leider nicht mehr umgesetzt werden. Alternativ ist an dieser Stelle ebenso eine richtige Simulation zur Kalibrierung der Energie umsetzbar, welche vom Umfang her jedoch wesentlich größer wäre.

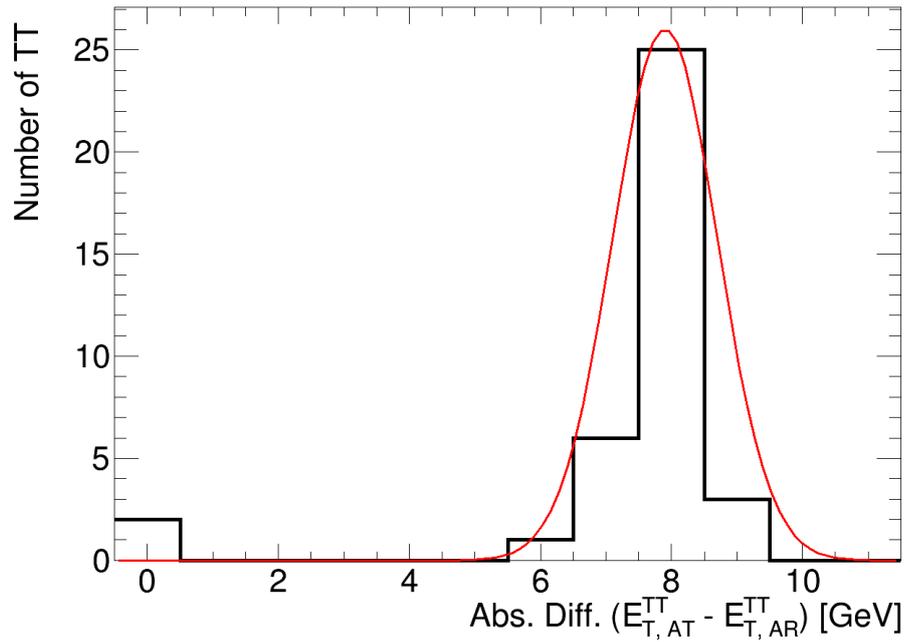


Abbildung 4.8: Dargestellt ist die y-Projektion im Bereich von $220 \text{ MeV} \leq E_{T,AR} \leq 230 \text{ MeV}$. Zu sehen ist die Anzahl der TT in Abhängigkeit von der Absoluten Differenz und zusätzlich der in Rot für diese Position berechnete Gaus-Fit mit den Parametern: $\bar{x} \simeq 7,9$; $\sigma \simeq 0,8$

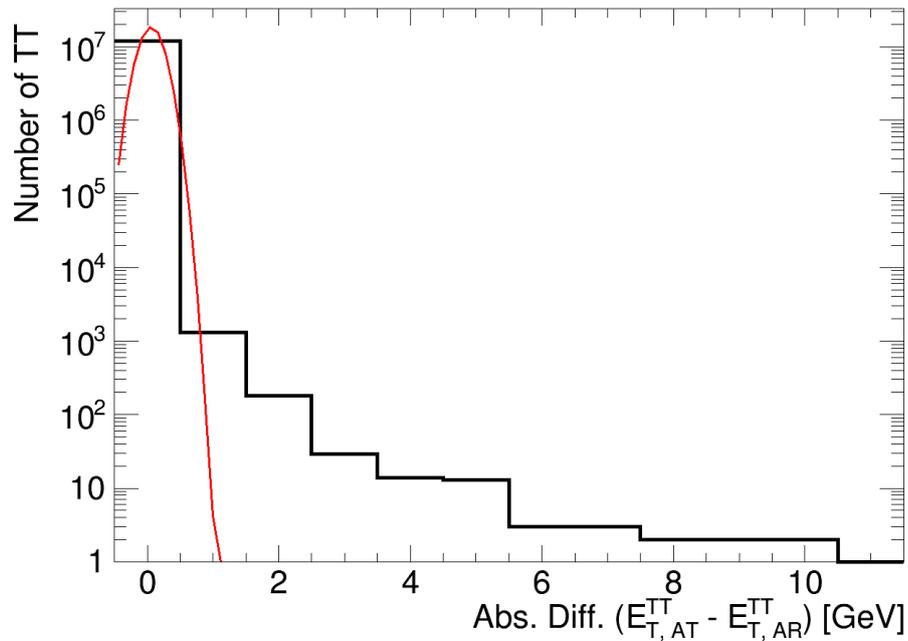


Abbildung 4.9: Als Vergleich die y-Projektion im Bereich von $0 \text{ MeV} \leq E_{T,AR} \leq 10 \text{ MeV}$. Die für diese Stelle berechneten Parameter des Gaus-Fits sind: $\bar{x} = 0,0$; $\sigma \simeq 0,2$

4.3 Methode 2: Histogramm

Um ein besseres Ergebnis als bei der Gauss-Methode zu erzielen, wurde für die zweite, welche im Folgenden mit „Histogramm-Methode“ bezeichnet wird, der direkte Weg gewählt. Dafür werden nochmals die oben bereits erzeugten y-Projektionen der absoluten E_T^{TT} -Differenz genutzt. Jedoch wird im Folgenden nicht versucht, den Verlauf mit einer Funktion anzunähern, sondern es wird direkt die Verteilung des jeweiligen Histogramms zur Verschmierung der Energieverteilung verwendet. An Stellen von $E_{T,AR}^{TT}$, an denen im Histogramm 4.2 kein Ereignis mit passender ATHENA- E_T^{TT} registriert wurde und damit auch keine geeignete y-Projektion erstellt werden kann, wird diese aus dem Mittelwert des nächst höheren und tieferen Histogramms gebildet. Der durch die Verteilung ermittelte Wert der absoluten Differenz wird auf ganze GeV gerundet. Nach Summation mit $E_{T,AR}^{TT}$ und erneutem Runden auf ganze GeV folgt sofort $E_{T,AR,Versch.}^{TT}$.

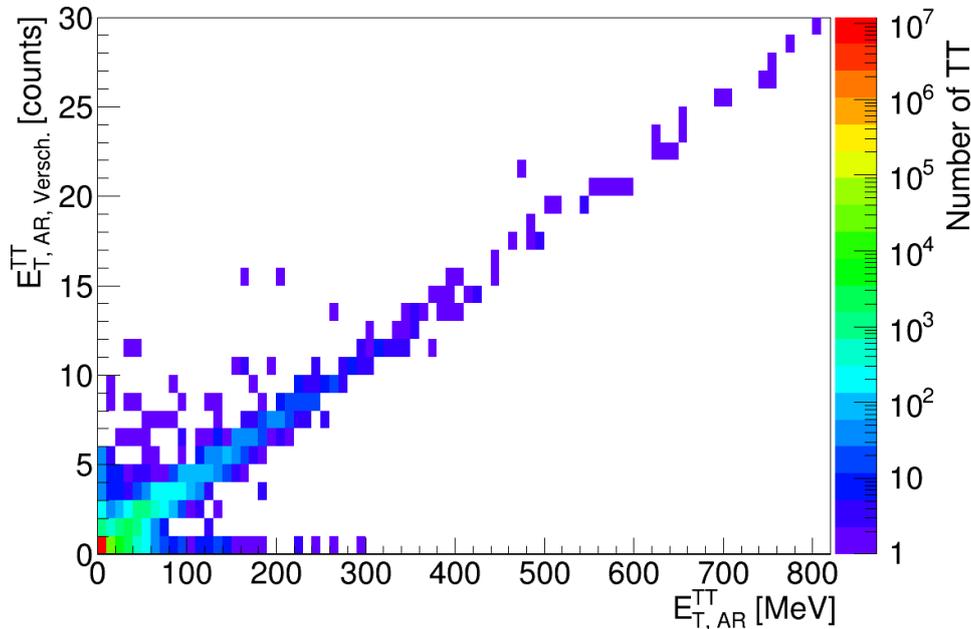


Abbildung 4.10: Mittels Histogramm-Methode verschmierte gegen unveränderte AREUS- E_T^{TT} .

In Abbildung 4.10 sind die so verschmierten Werte $E_{T,AR,Versch.}^{TT}$ über den unveränderten $E_{T,AR}^{TT}$ Werten in einem 2D-Plot dargestellt. Der Großteil aller Ereignisse liegt erwartungsgemäß auch hier bei $E_{T,AR}^{TT} = 0$ MeV. Die in der Gauss-Methode wenig sichtbare Verschmierung der Energie im unteren Bereich ist nun deutlich erkennbar. Im Vergleich mit den ATHENA-Werten in Abbildung 4.2 erkennt man allerdings auch, dass durch die direkte Nutzung der Projektions-Histogramme die auftretenden Signalfehler immer an identischen Positionen liegen. Bei der Histogramm-Methode sind diese also nicht mehr zufällig über den Bereich von $E_{T,AR}^{TT}$ verteilt, sondern hängen nur direkt von den verwendeten y-Projektionen ab. Ein weiterer Nachteil ist die Einschränkung der Verschmierung der AREUS-Energie auf den Bereich, in welchem

passende Histogramme erzeugt werden konnten. Außerdem ist die Qualität der Ergebnisse signifikant von der Statistik der zugrunde liegenden y -Projektionen abhängig. Um Einflüsse von zum Beispiel einzelnen, stärkeren Abweichungen zu reduzieren, müssten wesentlich größere Datensätze genutzt werden. Leider war es nicht mehr möglich, die Methode mit den hier erstellten Histogrammen an anderen Simulationswerten zu testen. Der genaue Effekt auf andere Energieverteilungen konnte deshalb nicht überprüft werden.

5 Zusammenfassung und Diskussion

Ziel der Arbeit war das Einbinden und Konfigurieren des Tile-Kalorimeters in die Simulationssoftware AREUS. Dabei sollte die ausgegebene Transversalenergie in AREUS so verschmiert werden, dass sie möglichst genau den tatsächlich gemessenen Werten der Tile-Kalorimeter Trigger-Auslese am ATLAS Detektor entspricht.

Bei der Erweiterung von AREUS um das Tile-Kalorimeter ist besonders darauf geachtet worden, dass bereits bestehende Modul-Schema beizubehalten und dieses lediglich durch eigene Module zu erweitern. Durch gezielte Ausgabe einiger Zwischenergebnisse konnte dabei die fehlerfreie Verarbeitung der Geant4-Eingabe-Hits bestätigt werden. Zum Vergleich wurden Datensätze der echten Tile-Kalorimeter Trigger-Auslese mithilfe von ATHENA simuliert.

Aus Korrelationsplots der AREUS- und ATHENA- E_T^{TT} konnte im Folgenden der lineare Zusammenhang zwischen beiden gezeigt werden. Es wurde festgestellt, dass besonders im unteren Energiebereich das Verschmieren der Energie durch elektronisches Rauschen und Pile-Up stark ausgeprägt ist. Zur Simulation dieser Effekte wurde die Gauss- sowie Histogramm-Methode getestet. Bei ersterer zeigt sich, dass die Gauss-Funktion insbesondere im relevanten Bereich der kleinen Energien die Histogramme nicht mehr ausreichend gut beschreibt. Außerdem werden größere „Ausreißer“ nicht berücksichtigt. Als Folge weicht das zum Vergleich erstellte Histogramm der verschmierten über der unveränderten AREUS- E_T^{TT} stark vom gewünschten ATHENA-Histogramm ab. Zur Verbesserung müsste hier eine geeignete Fit-Funktion der Histogramme beziehungsweise für die daraus folgenden Zusammenhänge zwischen Funktionsparametern und AREUS- E_T^{TT} gefunden werden.

Die Histogramm-Methode liefert im Vergleich ein wesentlich besseres Ergebnis. Die Verschmierung bei niedrigen $E_{T,AR}^{TT}$ ist nun deutlich erkennbar und stimmt mit der ATHENA-Simulation überein. Der Nachteil ist, dass die so berechneten AREUS-Daten stark von den zugrunde liegenden y-Projektions-Histogrammen abhängen. Besonders bei dieser Methode würde es sich daher anbieten, die erstellte Verschmierung an weiteren Datensätzen zu testen. Zur Verbesserung sollten außerdem entsprechende y-Projektions-Histogramme mit weit größerer Anzahl von Ereignissen erzeugt werden, um die zugrunde liegende Statistik zu verbessern.

6 Literatur

- [1] Lyndon Evans und Philip Bryant: *LHC Machine*. In: Journal of Instrumentation, Vol. 3 (2008). URL: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/3/08/S08001>.
- [2] The ATLAS Collaboration: *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*. In: Journal of Instrumentation, Vol. 3 (2008). URL: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/3/08/S08003>.
- [3] Joao Pequeno: *Computer generated image of the whole ATLAS detector*, Ref.-Nr.: CERN-GE-0803012, (2008). URL: <https://cds.cern.ch/record/1095924>.
- [4] Gérard Bachy: *The ATLAS coordinate system*, Ref.-Nr.: ATL-GE-CERN-QAP-0204.01, (1996).
- [5] The ATLAS Collaboration: *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, Ref.-Nr.: CERN-PH-EP-2012-218, (2012). URL: <https://cds.cern.ch/record/1471031>.
- [6] The ATLAS Collaboration: *ATLAS Liquid Argon Calorimeter Phase-I Upgrade Technical Design Report*, Ref.-Nr.: ATLAS-TDR-022, (2013). URL: <https://cds.cern.ch/record/1602230/>.
- [7] J. P. Grohs und S. Stärz: *AREUS - ATLAS Readout Electronics Upgrade Simulation, Release: 2.0.9*, (2014). URL: <https://cds.cern.ch/record/1546755>.
- [8] S. Agostinelli et al: *GEANT4 - A simulation toolkit*. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, (2003). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
- [9] J. Allison et al: *Geant4 developments and applications*. In: Nuclear Science, IEEE Transactions, Vol. 53 (2006). URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?isnumber=33833&arnumber=1610988&count=33&index=7.
- [10] T. Sjöstrand et al: *An Introduction to PYTHIA 8.2*, Ref.-Nr.: arXiv:1410.3012 [hep-ph], (2014).
- [11] S. Mrenna, T. Sjostrand und P. Skands: *PYTHIA 6.4 Physics and Manual*, Ref.-Nr.: arXiv:hep-ph/0603175, (2006).

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit im Rahmen der Betreuung am Institut für Kern- und Teilchenphysik ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst und alle Quellen als solche gekennzeichnet habe.

Andreas Jansen

Dresden, November 2014