



**Aufbau und Datenanalyse mit dem
Demonstrationssystem
des ATLAS LAr Kalorimetertriggers**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

vorgelegt von

Rico Hübscher

geboren am 11. April 1990 in Dresden

der

TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DRESDEN

INSTITUT FÜR KERN- UND TEILCHENPHYSIK

FACHRICHTUNG PHYSIK

FAKULTÄT MATHEMATIK UND NATURWISSENSCHAFTEN

2015

Eingereicht am 04. Oktober 2015

1. Gutachter: Prof. Dr. Arno Straessner
2. Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Schramm

Kurzdarstellung

Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in der Nähe von Genf ist der größte Ringbeschleuniger und das derzeit größte Teilchenkollisionsexperiment der Welt. Es werden Protonen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit und einer Energie bis zu 7 TeV zur Kollision gebracht. Diese Kollisionen erfolgen mit einer Frequenz von bis zu 40 MHz. Am LHC sind vier große Detektoren verbaut, darunter auch der ATLAS Detektor. Dieser ist in der Lage aufgrund seiner vielen Schichten die meisten Arten der bekannten Teilchen nachzuweisen, deren Eigenschaften präzise zu vermessen und neue physikalische Phänomene zu untersuchen.

In einem Wechsel von Kollisions- und Upgrade-Phasen wird der LHC stetig verbessert. Unter anderem ist für das kommende Phase-I Upgrade im Jahr 2018 eine Erhöhung der Luminosität auf $2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ geplant, womit die Ereignisrate der Kollisionen steigt. Um die damit einhergehende erhöhte Datenmenge bewältigen zu können, wird der ATLAS Detektor entsprechend aufgerüstet. Einen Teil dieser Maßnahmen betrifft das elektromagnetische Kalorimeter, dessen Ausleseelektronik mit einem Demonstrationssystem ausgestattet wurde. Dieses deckt einen Bereich von $1,767 < \phi < 2,160$ und $0 < \eta < 1,4$ ab. Es arbeitet parallel zum bisherigen System und dient der Erprobung der neuen Hard- und Softwareelemente.

Im Rahmen dieser Masterarbeit sollte zum einen ein via Ethernet funktionierendes Kontrollsystem (IPbus) untersucht, getestet und modifiziert werden. Das Kontrollsystem dient der Wartung und Statusabfrage des Demonstrationssystems. Zum anderen werden innerhalb des Demonstrationssystems die analogen Signale des Detektors digitalisiert. Für diese Signalkonvertierung wurde das elektronische Rauschen analysiert.

Abstract

The Large Hadron Collider (LHC) at CERN near Geneva is the largest ring accelerator, representing today the largest particle collision experiment in the world. Protons accelerated close to the speed of light and energies up to 7 TeV are brought to collisions. The frequency of these collisions is located in the MHz range up to designed 40 MHz. There are four large detectors located along the LHC. One of the general purpose detectors is the ATLAS, which is designed to detect or observe known particles and explore new physics phenomena.

The LHC is planning for continuous upgrades over time of operation. The next long shutdown for the LHC upgrade is planned for 2018. It will prepare LHC to operate at increased luminosity up to $2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. To manage larger data amounts the ATLAS detector will be upgraded too. As a part of Phase-I upgrade the readout electronics of the electromagnetic calorimeter covering an area of $1.767 < \phi < 2.160, 0 < \eta < 1.4$ has been equipped with a demonstration system. The purpose of this system is to test and evaluate new software and hardware components operating in parallel to the existing readout system.

In this thesis one of the subjects is to investigate, test and modify a control system called IPbus connected via Ethernet. The control system serves the demonstration system to receive status requests and for reasons of maintenance. Another subject is the digitization of the analog detector signals performed in the demonstrator system. The electronic noise behavior and analysis are presented.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Physikalische Motivation	3
2.1. Das Standardmodell der Teilchenphysik	3
2.2. Benötigte Begriffe	6
2.3. Die Physik am LHC	8
3. Der Large Hadron Collider	13
4. Der ATLAS Detektor	15
4.1. Das elektromagnetische Kalorimeter	17
4.2. Das Triggersystem	20
5. Die Upgradepläne des ATLAS Detektors	23
5.1. Phase-0	24
5.2. Phase-I	26
6. Technische Grundlagen	29
6.1. FPGA	29
6.2. VHDL	30
6.3. Transportprotokolle	32
7. IPbus	37
7.1. Das LAr Digital Processing System	37
7.2. Das Testboard	39
7.3. Die μ HAL Software	41
7.4. Die IPbus Firmware	44
7.4.1. Das IPbus-Protokoll	44
7.4.2. Signalverarbeitung	46
7.4.3. Slaves	48
8. Analyse des Rauschens des Demonstrationssystems	51
8.1. Elektronisches Rauschen	51
8.2. Autokorrelation	56
8.3. Kohärentes Rauschen	59
9. Zusammenfassung und Ausblick	65
A. VHDL-Code der konstruierten Module	67
B. Elektronisches Rauschen des Demonstrationssystems	71

C. Kohärentes Rauschen des Demonstrationssystems	73
Glossar	77
Abbildungsverzeichnis	81
Tabellenverzeichnis	83
Codeverzeichnis	85
Literaturverzeichnis	87

1. Einleitung

“Die physikalischen Modelle unterscheiden sich von der Realität wie die geographischen Karten von der Erdoberfläche.”

— Léon Brillouin

Ganz nach diesem Vergleich von L. Brillouin ist es wohl die Aufgabe jeder Generation anzuerkennen, welche Irrtümer die vorangegangenen bereits aus dem Weg räumen konnten und festzustellen, welche noch präsent sind. Dies gilt auch für die Teilchenphysik, einem noch relativ jungen Gebiet der Physik, auch wenn es schon die Philosophen der Antike bemüht hat herauszufinden, aus was wir bestehen und was das Kleinste ist. So wurden die faktenreichen Grundlagen für die Teilchenphysik erst Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckt und deren Schlussfolgerungen in den Folgejahren zusammengetragen. Dies geschah unter anderem durch die Entdeckung und Charakterisierung radioaktiver Strahlung durch Antoine Henri Becquerel, Ernest Rutherford und Marie und Pierre Curie. Bis schließlich mit den Siebzigern eine erste Formulierung des bis heute erfolgreichsten theoretischen Modells zur Beschreibung der Elementarteilchen und deren Wechselwirkung (WW) bzw. die Grundkräfte gefasst wurde, das Standardmodell der Teilchenphysik (SM) [1–7]. Dieses Modell zu prüfen, zu vermessen und zu erweitern stellen die Grunddisziplinen vieler Experimente der Teilchenphysik dar. Nach und nach wuchsen theoretische Beschreibungen zu einzelnen Teilchensorten zum Beispiel die Quantenchromodynamik (QCD) [8–11] für Quarks und Gluonen oder die Quantenelektrodynamik (QED) [12] der Leptonen, W^\pm - und Z -Bosonen und des Photons zusammen und bei allen herrschten hohe Kontraste zwischen dem, was man glaubte zu wissen oder zu finden und dem, was uns die Experimente über die Natur eröffneten.

Mittlerweile ist es das Ziel der Teilchenphysik herauszufinden, was uns das SM nicht erklären kann. Einige offene Fragen sind:

- Was ist dunkle Materie bzw. dunkle Energie?
- Warum sehen wir mehr Materie als Antimaterie im Universum?
- Wie lässt sich die Gravitation mit diesem Modell vereinen?

Wie an vielen Stellen in der Geschichte der Physik, zum Beispiel als sich herausstellte, dass die Newtonsche Mechanik nur ein Spezialfall der relativistischen ist, kommt auch hier der Gedanke auf, ob das SM aus einer übergeordneten Theorie abgeleitet werden kann. Und dabei ist es der Gegenstand einer Vielzahl von Theoretikern Modelle zu erdenken, die diese ungeklärten Phänomene erklären können, welche jedoch auch überprüfbar und darüber hinaus mit dem SM kompatibel sein müssen. Als ein Beispiel hierfür sei das Minimal supersymmetric standard model (MSSM) [13–15] genannt, welches das Prinzip bzw. die Eigenschaft der Supersymmetrie verwendet. Durch diese sollen Bosonen und Fermionen jeweils in die andere Teilchenklasse umgewandelt werden können. Kurz, es gilt immer noch das Rätsel, an dem sich schon A. Einstein versucht hatte, zu lösen, eine ‘Theory of everything’.

Um diesen Fragen auf den Grund zu gehen, werden in der Teilchenphysik zumeist zwei Arten von Teilchenkollisionsexperimenten aufgebaut. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Elektronen (e^-) und Positronen (e^+) wie es schon bei dem Vorgängerexperiment des Large Hadron Collider (LHC) [16] der Fall war, dem Large Electron-Positron Collider (LEP) [17]. Der Vorteil hierbei ist eine leicht zu handhabende Beschleunigung aufgrund der entgegengesetzten Ladungen der Kollisionsteilchen. Des Weiteren kann der Ausgangszustand genauer bestimmt werden, da die Elektronen und Positronen keine Substruktur besitzen. Auch führt der nicht vorhandene hadronische Untergrund zu einer besseren Auflösung der Ereignisse. Bei dieser Form des Untergrundes handelt es sich um die Quarks und Gluonen in einem Proton (p) einer pp -Kollision, welche nicht direkt an der Kollision beteiligt sind und versuchen den gestörten Zustand des zerstörten Protons im Zuge einer Hadronisierung auszugleichen.

Mit der zweiten Möglichkeit, der pp -Kollision, lassen sich zwar nicht so hohe Präzisionen erreichen, jedoch fällt damit die massenabhängige Synchrotronstrahlung mit dem circa 1800mal schweren Proton sehr viel geringer aus. Es werden somit die sonst enormen Verluste bei der Beschleunigung der Teilchen bis auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beherrschbar. Auch wäre es denkbar Protonen und Antiprotonen aufgrund der auch hier leichter zu handhabenden Beschleunigung zu verwenden, allerdings können die dafür notwendigen Antiprotonen nicht in rentabler Menge hergestellt werden. Daher werden zwei gegenläufige Strahlröhren zur Beschleunigung genutzt.

Zu letzterer Möglichkeit gehört auch der LHC mit den Detektoren LHCb [18], ALICE [19], CMS [20] und ATLAS [21]. Jüngst lieferten diese bereits interessante Ergebnisse zum Beispiel mit der Entdeckung des Higgs-Bosons [22]. Auch faszinieren einige Messungen, deren eindeutiger Nachweis noch nicht erbracht wurde, wie mit den seltenen und bisher wenig verstandenen Quarkzuständen, dem Tetraquark und dem Pentaquark [23–25].

Das Ziel ist es somit die überprüfbareren Parameter wie Massen und Wirkungsquerschnitte des SM und der Theorien wie dem MSSM zu vermessen bzw. deren Unsicherheiten durch höhere Präzision zu senken. Um dies zu erreichen, verfolgen der LHC und die genannten Detektoren verschiedenste Upgrade-Pläne.

Das Thema dieser Arbeit beschäftigt sich dabei mit einem Aspekt des Phase-I Upgrades des Flüssigargonkalorimeters des ATLAS Detektors. Mit der Verbesserung der Leistungsfähigkeit des LHC ist es auch notwendig die Ausleseelektronik des ATLAS Detektors zu verbessern. Zu diesem Zweck wurde in Vorbereitung des Upgrades ein Demonstrationssystem aufgebaut, welches bereits Teile der neuen Ausleseelektronik enthält und woran diese getestet werden sollen.

Anhand eines Testboardes mit einem Cyclone[®] V FPGA Chip soll die Kontrollstruktur zur Überwachung des Status des Datenflusses der zukünftigen Elektronik nachvollzogen, modifiziert und getestet werden. Diese Struktur heißt IPbus Firmware und soll via Ethernet ansprechbar sein. Um diese anzu steuern zu können, ist es nötig die zugehörige softwareseitige Benutzerschnittstelle zu untersuchen. Diese Software heißt μ HAL. Beide Themen werden in Kapitel 7 behandelt.

Zudem wird das elektronische Rauschen des Demonstrationssystems analysiert und mit dem Rauschen des Detektors bzw. den Daten der bestehenden Elektronik verglichen. Für die Extraktion und Aufbereitung der Daten wurden umfangreiche C++-Codes erstellt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 8 präsentiert.

2. Physikalische Motivation

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Einblick in das SM [1–7] und soll die Grundlage dieser Arbeit motivieren. Damit sind die Upgrades des LHC sowie die des ATLAS, speziell das Phase-I Upgrade des Flüssigargonkalorimeters, welches auch mit Liquid Argon (LAr) abgekürzt wird, gemeint.

2.1. Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das SM ist ein theoretisches Modell zur Beschreibung der fundamentalen¹ Teilchen und deren WWs. Es umfasst die fermionischen Materieteilchen (Leptonen und Quarks), aus welchen alle massebehafteten Strukturen aufgebaut sind sowie die bosonischen Wechselwirkungsteilchen, welche drei der vier Grundwechselwirkungen, die elektromagnetische, die schwache und die starke, vermitteln.

Die Gravitation als vierte Grundwechselwirkung wird vom SM nicht mit berücksichtigt. Ein Grund für diese Einschränkung liegt in der Bedingung an das SM eichinvariant zu sein, d.h. dass bei einer Veränderung der Parameter des SM zum Beispiel die Ruhemassen einzelner Teilchen sich die physikalischen Prozesse nicht verändern dürfen. Beispielsweise wurde versucht anhand der Einführung von Massentermen in den die Teilchen beschreibenden Feldgleichungen einen gravitativen Einfluss aufzubauen. Jedoch führen die Massenterme bei einer Umeichung (z.B. Veränderung der Massen) in der Regel zu nicht verschwindenden Beiträgen und sorgen damit für einen nicht eichinvarianten Einfluss. Dennoch ist klar, dass alle massebehafteten Teilchen des SM gravitativ wechselwirken. Dieser Beitrag ist allerdings im Vergleich zu den drei anderen Grundwechselwirkungen vernachlässigbar und wird im Weiteren auch nicht mehr berücksichtigt.

Im Folgenden werden die einzelnen Teilchensorten kurz beschrieben. Sämtliche hier genannten Werte sofern nicht anders gekennzeichnet können bei der Particle Data Group [26] nachgeschlagen werden.

1. **Die Materieteilchen:** Diese gehören zu den Fermionen und haben daher einen halbzahligen Spin. Da es sich um fundamentale Teilchen handelt, ist der Spin ein halb.

- a) DIE QUARKS (q)

Es gibt insgesamt sechs Quarks, welche in Dublettschreibweise in drei Generationen zusammengefasst werden. Dabei ist das obere Element vom Typ 'Up' und trägt die elektromagnetische Ladung $Q = +\frac{2}{3}$, das untere Element ist vom Typ 'Down' mit $Q = -\frac{1}{3}$, welche in Einheiten der Elementarladung e angegeben sind. Neben der elektromagnetischen Ladung besitzen die Quarks auch die Eigenschaften der

¹ Fundamental bezieht sich hier auf die derzeit anerkannten Elementarteilchen.

Tabelle 2.1.: Übersicht der Quarkgenerationen und deren elektromagnetische (Q) und schwache Ladung (I_3^W).

Q	I_3^W	Generation		
		1	2	3
$\begin{pmatrix} +\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \mathbf{up} \\ \mathbf{down} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \mathbf{charm} \\ \mathbf{strange} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \mathbf{top} \\ \mathbf{bottom} \end{pmatrix}$

schwachen (I_3^W) und der Farbladung und nehmen somit an der schwachen und starken WW teil.

Die schwache Ladung wird in Einheiten der schwachen Kopplung g bemessen und ist über

$$e = g \cdot \sin(\theta_W) ,$$

wobei θ_W der Weinbergwinkel² ist, mit der Elementarladung der elektromagnetischen WW verknüpft. Sie wird durch die dritte Komponente des schwachen Isospins I^W repräsentiert, womit der Begriff Ladung im Sinne der schwachen WW mit dem Konzept eines Drehimpulses verknüpft wird, der kein klassisches Pendant besitzt, analog dem Spin.

Die Farbladung kann blau (b), rot (r), grün (g) oder entsprechend der Antiteilchen antiblau (\bar{b}), antirot (\bar{r}) oder antigrün (\bar{g}) sein und ist nicht an spezifische Quarks gebunden. Gemäß der Confinement-Hypothese sind lediglich farblose Zustände stabil. Dies ist der Fall, wenn entweder alle drei Farben bzw. ihre Antifarben oder eine Farbe mit ihrer Antifarbe kombiniert wird. Das Ergebnis sind Hadronen in der Form von Baryonen (drei Quarks, alle Anti-/Farben) oder Mesonen (zwei Quarks, Farb-Antifarbe-Paar).

Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die Quarks und ihre elektromagnetische und schwache Ladung.

b) DIE LEPTONEN (l)

Ähnlich wie bei den Quarks gibt es auch sechs Leptonen, welche ebenfalls in Dublettschreibweise in drei Generationen eingeteilt werden können. Auch sie nehmen an der elektromagnetischen und der schwachen WW teil. Das Elektron (e), das Myon (μ) und das Tauon (τ) sind alle elektrisch geladen. Dabei hat das Myon eine circa 207fache Masse des Elektrons und das Tauon eine circa 3484fache. Die zu ihnen korrespondierenden Neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) sind elektrisch neutral und haben sehr geringe Massen (<2 eV) [26].

Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht über die Generationen der Leptonen und deren elektromagnetische und schwache Ladung.

2. **Die Wechselwirkungsteilchen:** Auch als Austauscheteilchen, Vektorbosonen oder Eichbosonen bezeichnet sind diese von bosonischer Natur und tragen somit einen ganzzahligen Spin. Im SM ist der Spin der Eichbosonen eins.

a) DAS PHOTON (γ)

Die elektromagnetische WW wird über das Photon vermittelt. Es besitzt weder eine

² Definiert über das Massenverhältnis von W- und Z-Boson wurde er auf $28,7^\circ$ bestimmt.

Tabelle 2.2.: Übersicht der Leptonengenerationen und deren elektromagnetische (Q) und schwache Ladung (I_3^W).

Q	I_3^W	Generation		
		1	2	3
$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

Masse noch eine Ladung und hat eine unendliche Reichweite.

b) DAS W-BOSON (W^\pm)

Aufgrund seiner elektrischen Ladung kommt das W-Boson als W^+ bzw. W^- vor. Es vermittelt in der schwachen WW die geladenen Ströme. Abgesehen von WWs mit anderen Eichbosonen, wechselwirken diese nur mit linkshändigen Fermionen und rechtshändigen Antifermionen.

Die Händigkeit eines Teilchens lässt sich anschaulich anhand der Helizität h erläutern. Diese wird über eine Projektion des Spins auf den Impuls eines Teilchens berechnet. Sie ist positiv, wenn die Projektion parallel zum Impuls ausgerichtet ist und umgekehrt. Die Händigkeit oder Chiralität ist für masselose Teilchen mit der Helizität identisch, wobei eine positive Helizität rechtshändige Teilchen beschreibt und umgekehrt.

Das W-Boson hat eine relativ hohe Masse von 80,4 GeV und eine mittlere Lebensdauer von $3,2 \cdot 10^{-25}$ s und wirkt somit im Femtometerbereich.

c) DAS Z-BOSON (Z^0)

Im Gegensatz zum W-Boson ist das Z-Boson elektromagnetisch neutral und vermittelt die ungeladenen Ströme. Die Chiralität spielt hier keine Rolle. Es ist mit 91,2 GeV schwerer als das W-Boson und hat auch eine kürzere mittlere Lebensdauer von $2,6 \cdot 10^{-25}$ s.

d) DAS GLUON (g)

Die Gluonen vermitteln die starke WW und sind weder elektrisch noch schwach geladen. Es gibt insgesamt acht verschiedene Gluonzustände. Nach der Darstellung durch die Gell-Mann Matrizen [27] tragen sechs davon je zwei Farbladungen, eine Farbladung und ihre nicht korrespondierende Antifarbladung. Auf diese Weise kann ein Gluon durch Auslöschung der ursprünglichen (Anti-)Farbladung eines Quarks die mitgeführte (Anti-)Farbladung übertragen. Die letzten zwei Gluonzustände sind Mischungen aus reinen Farb-Antifarbladung-Zuständen. Auch sie können zwischen Quarks ausgetauscht werden, ändern allerdings nicht die Farbladung. Sie übertragen lediglich ihren Impuls.

Auf experimenteller Seite kann nach bisherigem Stand nicht ausgeschlossen werden, dass die Gluonen eine Masse haben. Dass sie keine haben, ist jedoch eine Forderung der QCD³ und damit auch essenziell zur Stimmigkeit des SM. Die obere Grenze der Unsicherheit beläuft sich auf einige MeV [28].

³ Quantenfeldtheorie zur Beschreibung der starken WW.

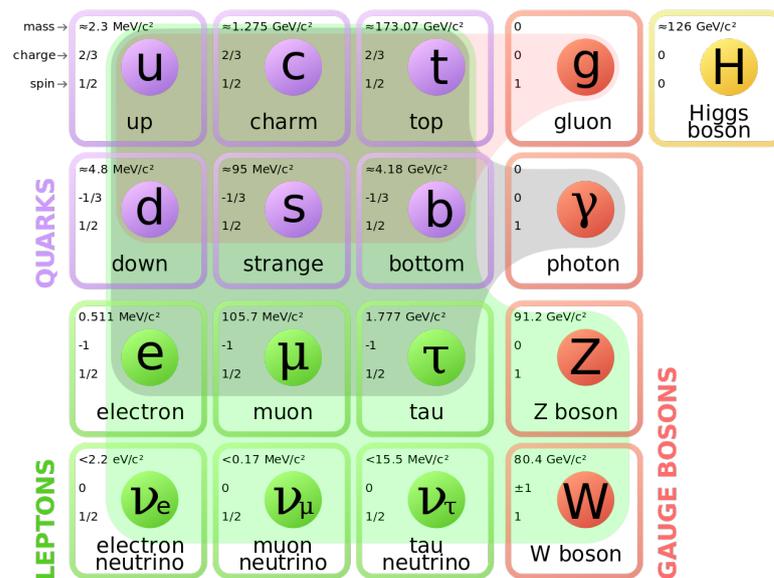


Abbildung 2.1.: Übersicht der Teilchen des SM. Die farblich unterlegten Bereiche kennzeichnen die an den WW beteiligten Teilchen, wobei rot für die starke, grau für die elektromagnetische und grün für die schwache WW steht [29].

- Das Higgs-Boson (H):** Dieses Spin null Teilchen nimmt eine Sonderstellung im SM ein, da es weder eine Kraft vermittelt noch zu den Materieteilchen gehört. Seine Existenz ist als Anregungszustand des Higgs-Feldes zu deuten. Während die WW der Materie- und Wechselwirkungsteilchen mit eben jenem Feld deren Massen begründet, kann es nicht die Masse des Higgs-Bosons mit $125,4 \text{ GeV}$ selbst erklären. Diese bleibt gegeben und muss anhand weiterer Forschung ergründet werden. Zudem ist noch ungeklärt, ob es nicht weitere Typen dieses Teilchens gibt [26].

Diese Elementarteilchen stellen den derzeitigen Bestand des SM dar. Sie sind in Abbildung 2.1 noch einmal übersichtlich dargestellt, hierbei markieren die farblich unterlegten Bereiche die der jeweiligen WW zugehörigen Eichbosonen und die daran teilnehmenden Materieteilchen.

2.2. Benötigte Begriffe

Für ein besseres Verständnis sollen einige Begriffe hier kurz erläutert werden.

Schwerpunktsenergie

Die Schwerpunktsenergie \sqrt{s} ist die maximal zur Verfügung stehende Energie (meist zweier) kollidierender Teilchen. Dies lässt sich anhand der Gleichung 2.1 erkennen, wobei s eine der drei Mandelstam-Variablen⁴ und p_i die Viererimpulse der einlaufenden bzw. p_f die der

⁴ Nützliche Lorentz-invariante Skalare zur Berechnung von Streuprozessen. Für ein detaillierteres Verständnis sei auf [33] verwiesen.

auslaufenden Teilchen sind.

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^2 p_i\right)^2} = \sqrt{\left(\sum_{f=1}^2 p_f\right)^2} \quad (2.1)$$

Es gilt zu beachten, dass bei hochenergetischen Kollisionen nicht die gesamte Schwerpunktsenergie in die WW eingeht. Viel mehr kollidieren zum Beispiel bei den pp -Kollisionen die einzelnen Partonen⁵, welche nur einen Bruchteil der Impulse der Protonen tragen.

Pseudorapidität

Die Rapidität y ist über

$$y := \frac{1}{2} \log \left(\frac{E + p_L}{E - p_L} \right) , \quad (2.2)$$

wobei E die Energie und p_L der longitudinale Impuls des Teilchens ist, definiert. Sie wird bei Teilchenkollisionsexperimenten, speziell beim LHC, genutzt, da das pp -Schwerpunktsystem in guter Näherung parallel zur Strahlachse ist und Änderungen der Rapidität in dieser Richtung unter Lorentz-Transformationen invariant sind.

Unter der Annahme masseloser Teilchen, wie es für das SM gefordert wird, bzw., wenn der Impuls sehr viel größer als die Masse ist, trifft diese Invarianz auch für die Pseudorapidität η zu, welche über

$$\eta := -\log \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2.3)$$

definiert ist. Hierbei ist θ der Streuwinkel, wodurch η für einen Winkel von 90° bis 0° von null bis unendlich verläuft.

Fehlende Transversalenergie

In Teilchenkollisionsexperimenten wird zur Bestimmung der Energie der Teilchen nach der Kollision ausschließlich der Transversalanteil E_T genutzt. Dieser wird über die Masse und den transversal zur Strahlachse liegenden Impulsanteil p_T des Teilchens bestimmt. Es wird nur dieser Anteil benutzt, da wie bereits erwähnt nicht die Protonen aneinander inelastisch gestreut werden, sondern die Partonen, deren Impulse bzw. Energien in Strahlrichtung allerdings nicht bekannt sind.

Da die Summe der Transversalimpulse aller Teilchen eines Ereignisses näherungsweise null ergeben muss, stellt der fehlende Transversalimpuls eine Linearkombination der Transversalimpulse aller Teilchen dar, welche den Detektor entweder ohne jede WW verlassen oder nur einen geringen Teil ihrer Energie deponiert haben. Von diesem fehlenden Transversalimpuls leitet sich die fehlende Transversalenergie ab.

⁵ Dazu zählen die Quarks und Gluonen eines Protons.

Luminosität

Die Luminosität \mathcal{L} ist ein Leistungsmerkmal von Teilchenkollisionsexperimenten. Sie gibt an wie viele Teilchen je Zeiteinheit und Fläche kollidieren und ist über die Ereignisrate⁶ \dot{N} und den Wirkungsquerschnitt σ definiert (s.Gl. 2.4).

$$\mathcal{L} := \frac{\dot{N}}{\sigma} \quad (2.4)$$

Integriert man \mathcal{L} über die Zeit, erhält man die integrierte Luminosität L . Sie kann ebenfalls zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit herangezogen werden, da ein Speicherring während eines Kollisionsdurchlaufs nur eine gewisse Anzahl Teilchenbündel (Bunches) halten kann und damit die Luminosität \mathcal{L} mit den auftretenden Kollisionen stetig abnimmt.

Pileup

Darunter versteht man bei der Kreuzung zweier Teilchenbündel das Auftreten mehrerer Interaktionspunkte. Je dichter die Teilchen und je mehr davon in einem Bündel sind, desto wahrscheinlicher kollidieren mehrere Teilchen an unterschiedlichen Stellen. Dabei kann es vorkommen, dass die auslaufenden Teilchen verschiedener Kollisionen ihre Energie an den gleichen Stellen im Detektor deponieren, auch als 'in-time pileup' bezeichnet. Kommt es zu einer Überlagerung von Detektorsignalen aus unterschiedlichen Teilchenbündelkollisionen wird dies 'out-of-time pileup' genannt. In allen Fällen werden interessante Ereignisse in der Auslese überdeckt. Der Pileup entspricht damit auch einer Form des Rauschens.

2.3. Die Physik am LHC

Der LHC ist ein Teilchenkollisionsexperiment, das auf zwei entgegengesetzten Ringbeschleunigern basiert. Man erreicht dadurch wesentlich höhere Schwerpunktsenergien (s. Abschnitt 2.2) als bei 'Fixed Target' Experimenten, wo zumeist ein Linearbeschleuniger Teilchen an einem feststehenden Ziel zur Kollision bringt.

Das Arbeitsprinzip lässt sich grob in vier Phasen unterteilen. Zunächst wird je nach Operationsmodus durch eine Duoplasmatronquelle mittels beschleunigter Elektronen Wasserstoff ionisiert oder durch eine Electron Cyclotron Resonance Ion Source (ECRIS) hochreines Blei erhitzt bis sich Bleidampf bildet. Dieser wird ebenfalls mittels beschleunigter Elektronen ionisiert, wodurch im Anschluss durch eine Hochspannung Bleikerne abgesondert und gebündelt werden können [30]. Diese Bündel werden im nächsten Schritt in die Ringbeschleuniger überführt. Die Beschleuniger werden dabei je nach Modus mit circa 2800 Paketen aus Protonen oder 600 aus Bleiionen gefüllt. Ist dies erreicht, werden die Teilchenbündel beschleunigt, fokussiert und an den Stellen der Detektoren zur Kollision gebracht. Damit die gegenläufigen Teilchenbündel auch am dafür vorgesehenen Kollisionspunkt der Detektoren aufeinander treffen, müssen nicht nur die Strahlen überlappen, sondern auch zeitlich gut abgestimmt sein. Das Aufeinandertreffen zweier Teilchenbündel wird auch als Bunch Crossing (BC) bezeichnet.

⁶ Damit sind Teilchenbegegnungen pro Zeiteinheit in infinitesimalem Maßstab gemeint.

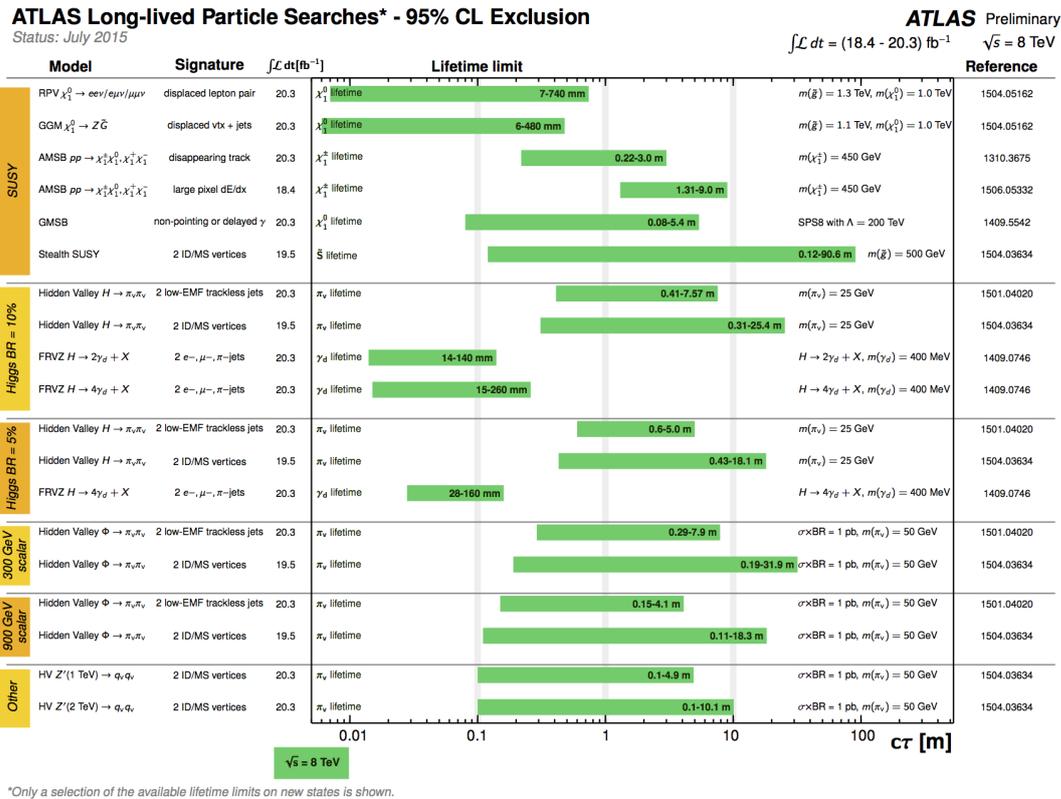


Abbildung 2.2.: Kurzübersicht der untersuchten Bereiche neuer Physik im Rahmen der Theorie der supersymmetrischen Teilchen, der Higgs-Parameter und weiterer Modelle [31].

Wird im Kontrollzentrum ein stabiler Zustand beider Strahlen (Stable Beams) registriert, haben die Detektoren die Freigabe zur Aufzeichnung der Daten.

Diese Daten helfen nicht nur die letzten Unbekannten des SM aufzuklären wie die bereits in Kapitel 1 erwähnte Entdeckung des Higgs-Bosons oder die vorläufige Bestätigung der Tetraquark- und Pentaquarkzustände, sie dienen auch der Untersuchung überprüfbarer Größen von Theorien, welche gegen das SM argumentieren. Hieran lässt sich gut erkennen, dass etwas nicht zu finden auch eine Bestätigung für das sein kann, was bereits erforscht wurde. Einige ausgewählte Ergebnisse dazu sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

Um im Weiteren Parameter wie Masse, Wirkungsquerschnitte oder die bloße Existenz von Teilchen des SM, zu ihrer konträrer Theorien oder Theorien zur Erweiterung dieser (präziser) bestimmen zu können, ist es notwendig seltene Prozesse durch eine höhere Statistik aufzulösen und bisher unerreichte Energiebereiche zu untersuchen. Die damit verbundene Notwendigkeit der Upgrades des LHC und der Detektoren soll beispielhaft an einem Zerfallsprozess, welchen der ATLAS Detektor nachweisen könnte, erläutert werden.

Der ATLAS Detektor verwendet ein komplexes Triggersystem zur Identifizierung gesuchter Ereignisse, welches schnell und effizient entscheiden muss, ob ein Ereignis gespeichert wird oder nicht. Dazu benötigt es gesammelte Informationen aus allen Komponenten des Detektors. Jede Komponente hat zur Verarbeitung eine definierte Bandbreite, die nicht überschritten

werden darf. Dieser limitierende Faktor lässt angesichts steigender Energie und Ereignisrate nur zwei Möglichkeiten zu. Entweder es wird die Triggerschwelle, welche die Indikation eines interessanten Ereignisses darstellt, einfach erhöht oder das Triggersystem muss fundierter entscheiden können. Erstere Version ist nicht wünschenswert, da dabei nicht nur gesuchte Ereignisse nicht erkannt werden würden, sondern auch die Statistik, welche für die Präzisionsmessung entscheidend ist, darunter leiden würde.

Die Vorteile letzterer Version lassen sich anhand zweier Simulationen des Flüssigargonkalorimeters, welches als elektromagnetisches Kalorimeter eine Schicht des ATLAS Detektors ist, darstellen. In der ersten (s. Abbildung 2.3) sind die Ereignisraten einer Komponente des Triggersystems, genauer des Level-1 Triggers, dieses Kalorimeters für das bisherige (blau) und das verbesserte (grün, schwarz) gegenüber der Transversalenergie aufgetragen. In der zweiten (s. Abbildung 2.4) sind die Spektren der leptonischen Endzustände des beispielhaften Zerfallsprozesses $ZH \rightarrow WW \rightarrow 2l 2\nu$ dargestellt, wobei die Leptonen l für Elektronen e , Myonen μ oder Tauonen τ stehen können und die Neutrinos ν die korrespondierende Generation annehmen. Hierbei wird die relative Häufigkeit über den transversalen Impuls aufgetragen. Da die Ruhemasse der Elektronen im GeV-Bereich vernachlässigt werden kann, entspricht der transversale Impuls der Transversalenergie. Setzt man in Abbildung 2.3 eine Horizontale auf 20 kHz, welche dem Limit des Level-1 Triggers entspricht, lässt sich eine Reduzierung der Transversalenergie von circa 28 GeV auf circa 22 GeV erkennen. Überträgt man diese Werte auf Abbildung 2.4, wird der detektierbare niederenergetische Bereich im Energiespektrum erweitert. Damit können die Verläufe bzw. die Maxima der Spektren besser abgeschätzt und separiert werden, wodurch diese zur Identifizierung dieses Prozesses einen erheblichen Beitrag leisten.

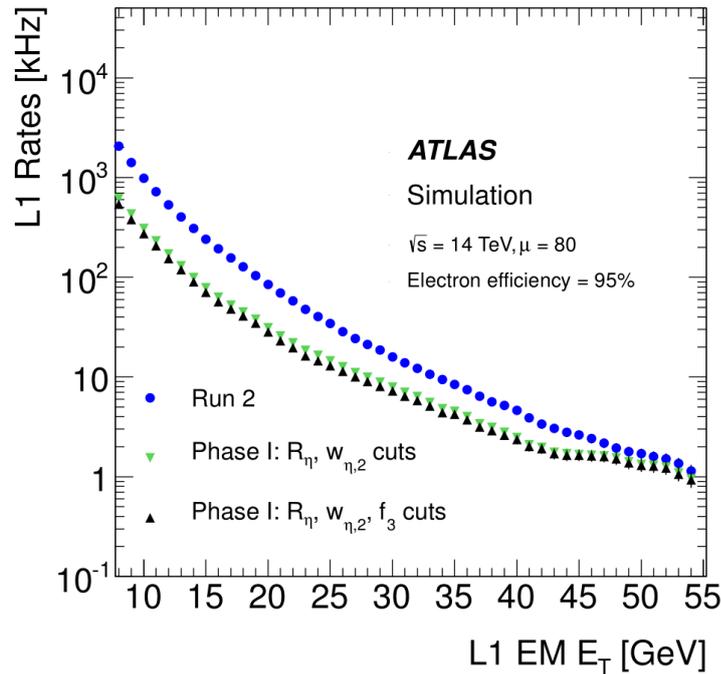


Abbildung 2.3.: Simulation der Ereignisrate des Level-1 Triggers des Flüssigargonkalorimeters des ATLAS Detektors bei einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV und einer Anzahl der Teilchenkollisionen pro BC von 80. In blau sind die Werte für den aktuellen Lauf (Run 2) dargestellt. Grün und schwarz stellen die zu erwartenden Verbesserungen in der Triggerrate durch die Anwendung optimierter Triggeralgorithmen dar [32].

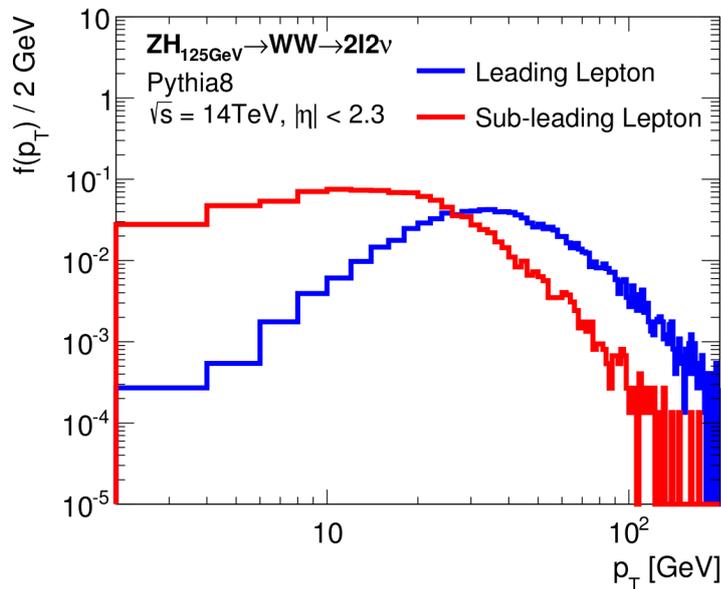


Abbildung 2.4.: Darstellung eines mit Pythia8 simulierten Zerfallsspektrums eines $ZH \rightarrow WW \rightarrow 2l 2\nu$ Prozesses mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV und einer Pseudorapidität von $|\eta| < 2,3$. 'Leading' und 'Sub-leading Lepton' sortiert dabei die auftretenden leptonic Endzustände nach ihrer Transversalenergie.

3. Der Large Hadron Collider

Auf der Grundlage des im Jahr 2000 eingestellten Vorgängerexperiments LEP [17] konnte nach einigen Umbaumaßnahmen der knapp 27 km lange Tunnel für den LHC weiterverwendet werden. Dieser befindet sich in einer Tiefe von 50 bis 175 m und verläuft entlang der schweizerisch-französischen Grenze. Der darin verbaute Ringbeschleuniger besteht aus zwei gegenläufigen, nebeneinander verlaufenden Strahlröhren, welche in einem ständigen Hochvakuum gehalten werden und aus Platzgründen in einer sie umschließenden Röhre untergebracht sind. Die technischen Anforderungen umfassen zudem supraleitende Magnetelemente, welche den Teilchenstrahl auf seiner Bahn halten und dabei aufgrund der gleich geladenen Teilchen von einer Strahlröhre zur anderen entgegengesetzt gerichtet sein müssen. Des Weiteren wird ein Kryostat benötigt, welcher die Magnete auf einer Arbeitstemperatur von 1,9 K kühlt. Allein das Ausmaß der Beschleunigerringe sorgt für weitere Hürden. So muss neben dem Einfluss kosmischer Strahlung die Teilchenbahn aufgrund von Gezeitenkräften korrigiert werden.

Es werden sowohl pp - als auch $PbPb$ -Kollisionen am LHC vorgenommen.

Als Folge einer Panne kurz nach dem Einschalten im Jahr 2008 wurde nach Beendigung der Reparaturen ein Jahr später der Beschleuniger im offiziellen ersten Lauf (Run 1) nicht mit der angestrebten Schwerpunktsenergie von 14 TeV betrieben, sondern zunächst mit 7–8 TeV. Dies allein hat jedoch ausgereicht, dass er zum fortschrittlichsten Teilchenbeschleuniger der Welt wurde. Ein schematischer Überblick ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Die an den vier Strahlkreuzungspunkten (gelbe Punkte s. Abbildung 3.1) aufgestellten Detektoren, der LHCb [18], das ALICE [19], das CMS [20] und der ATLAS Detektor [21], sind im Folgenden kurz dargestellt.

1. Large Hadron Collider beauty (LHCb):

Dieser Detektor ist im Gegensatz zu den anderen erwähnten nicht symmetrisch um den Punkt der Strahlkreuzung aufgebaut, stattdessen ist er von diesem Punkt aus halbseitig entlang der Strahlachse konstruiert worden. Er entspricht damit einem Vorwärtsspektrometer. Sein Aufbau begründet sich darin, dass dieses Experiment darauf ausgelegt ist B-Mesonen¹, die nahe der Strahlachse propagieren, zu detektieren. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass bei der Produktion eines $b\bar{b}$ Quarkpaares die daraus resultierenden B-Mesonen beide in dieselbe Richtung (mit oder entgegen der Strahlachse) fliegen. Die Detektion beider ist für den Rückschluss zu deren Entstehung entscheidend. Das LHCb untersucht auf diesem Wege seltene Zerfallskanäle der B-Mesonen sowie etwaige CP-Verletzungen. Darunter ist die Veränderung eines Zerfallsprozess unter gleichzeitiger Vertauschung der Chiralität (C) und der Parität (P) des Ausgangsteilchens zu verstehen.

¹ Das sind Mesonen, die ein b Quark enthalten.

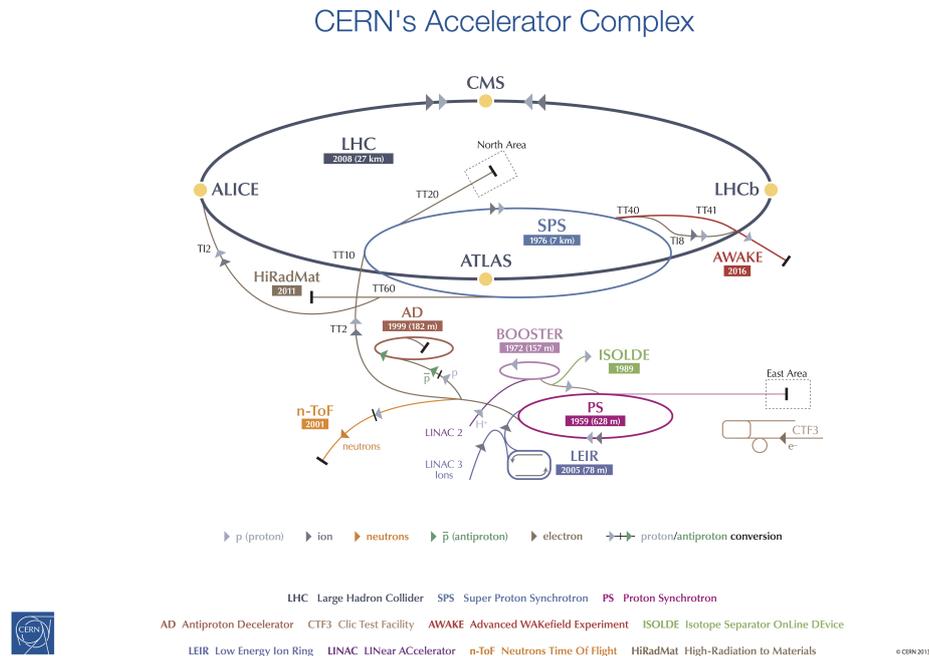


Abbildung 3.1.: Übersicht des LHC Ringbeschleunigers mit den damit verbundenen Detektoren, Vorbeschleunigern und weiteren Testbereichen [34].

2. A Large Ion Collider Experiment (ALICE):

Der ALICE Detektor hat u.a. zum Ziel das Quark-Gluon-Plasma zu untersuchen, ein Zustand von hoher Dichte und Temperatur wie er Bruchteile nach dem Urknall vorherrscht haben soll. Man erwartet bei diesen Bedingungen, dass die Quarks und Gluonen nicht mehr an das Confinement gebunden sind und frei propagieren können. Um dies zu erreichen werden Bleikerne zur Kollision gebracht.

3. Compact Muon Solenoid (CMS):

Am CMS verfolgt man neben der Vermessung der Higgs-Parameter auch die Suche nach neuen Teilchen außerhalb des SM, welche Aufschluss darüber geben könnten, dass diese Teil einer übergeordneten Theorie ist. Der Detektor ist aus speziellen Schichten aufgebaut, die es erlauben die meisten wechselwirkenden Teilchen nachzuweisen.

4. A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS):

Der ATLAS Detektor ist ähnlich wie das CMS aufgebaut und ebenfalls in der Lage die meisten Teilchen nachzuweisen. Seine Aufgaben sind nach dem Higgs-Fund die Vermessung von dessen Eigenschaften, die Suche nach Teilchen außerhalb des SM und die Untersuchung, ob Materieteilchen aus Substrukturen aufgebaut sind. Unterstützend zum LHCb werden B-Mesonzerfälle auf etwaige CP-Verletzungen überprüft, welche einen Hinweis auf die Baryonenasymmetrie geben könnten. Dabei handelt es sich um das Materie-Antimaterie-Ungleichgewicht des beobachtbaren Universums.

4. Der ATLAS Detektor

In circa 100 m Tiefe gelegen und mit Maßen von 44 m Länge zu 25 m Durchmesser ist dies mit der größte Teilchendetektor, der je gebaut wurde. Er ist zylindrisch in Schichten aufgebaut (s. Abbildung 4.1), wobei der innere Detektor [35] die erste Schicht von der Strahlachse ausgehend bildet. Dieser besteht aus drei Komponenten, welche ebenfalls von der Strahlachse ausgehend sortiert kurz beschrieben werden.

1. Der Spurdetektor

Mit einem Abstand von 50,5 mm und 80 Millionen Siliziumhalbleiterdetektorzellen eingebettet in einem rund 7 cm dicken Zylinder lassen sich damit Teilchenspuren im Mikrometerbereich unterscheiden.

Im Zuge des Phase-0 Upgrades wurde der Spurdetektor um den Insertable B-Layer (IBL) erweitert, welcher zwischen dem originalen Spurdetektor und der Strahlröhre installiert wurde. Der Abstand zur Strahlröhre beträgt damit lediglich 33 mm.

2. Der Siliziumstreifendetektor

Dieser Detektor hat eine geringere Granularität¹ gegenüber dem Spurdetektor, er ist jedoch auch in der Lage die Spur eines Teilchens hoch präzise aufzulösen. Seine Aufgaben sind neben der Spurerkennung auch eine erste Bestimmung des Impulses, des Stoßparameters und der Position des Interaktionspunktes. Unter dem im Allgemeinen mit b bezeichneten Stoßparameter ist die Parallelverschiebung der Stoßpartner auf der gemeinsamen Flugachse gemeint. Der Siliziumstreifendetektor befindet sich in einem Abstand von circa 30–51 cm zur Strahlachse.

3. Der Übergangsstrahlungsspurdetektor

Hierbei wird eine Kombination aus mit Xenongas gefüllten Röhrendetektoren und einem dazwischen liegenden Polymer zur Spurendetektion verwendet. Die Röhrendetektoren sind Driftkammern, welche über die Laufzeitsignale an den Enden der Röhre Informationen über die Position des Ereignisses liefern. Durchdringt ein geladenes Teilchen den Detektor wird Übergangsstrahlung an den Übergängen zwischen dem Polymer und den Röhrendetektoren emittiert. Zusätzlich deponiert das Teilchen durch Ionisationsverluste in den Röhrendetektoren Energie. Anhand all dieser Informationen können bereits Elektronen von anderen geladenen Teilchen zum Beispiel Pionen unterschieden werden.

Der innere Detektor ist von einer Zylinderspule umgeben, welche ein Magnetfeld von 2 T erzeugt. Damit ist es möglich die Flugbahn von elektrisch geladenen Teilchen mit einem hohen Impuls auf eine erkennbare Krümmung zu bringen. Sind die Krümmung und die magnetische Flussdichte bekannt, können der Impuls und durch die Information vieler Flugbahnen auch der Interaktionspunkt bestimmt werden.

¹ Die Segmentierung der Schichten des Detektors.

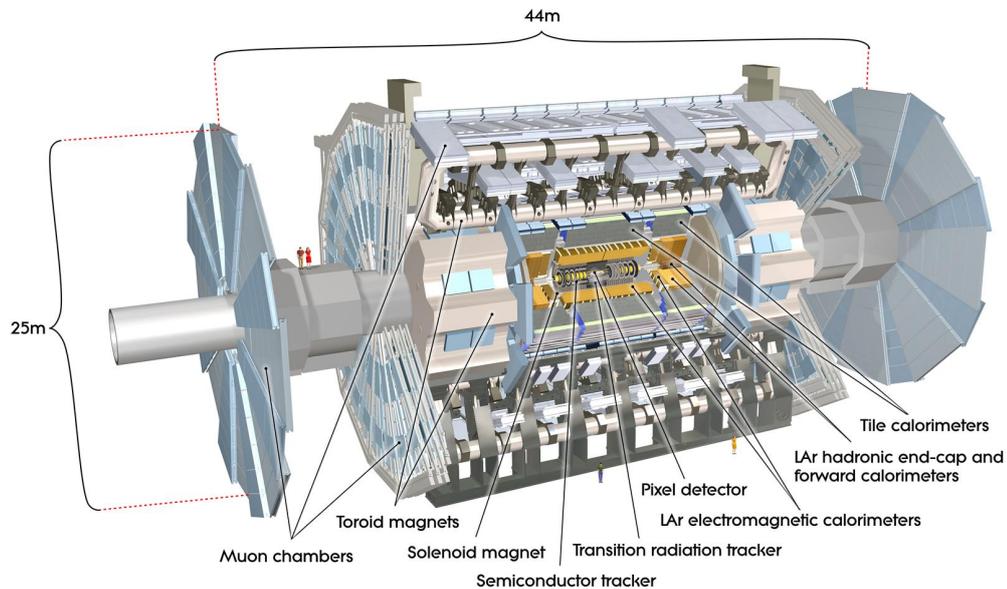


Abbildung 4.1.: Computergenerierte Darstellung des ATLAS Detektors mit einem Schnitt durch die einzelnen Schichten [36].

Die nächste Schicht bilden in aufsteigender Reihenfolge das elektromagnetische und das hadronische Kalorimeter. Ersteres wird in Abschnitt 4.1 beschrieben.

Das hadronische Kalorimeter dient dem Nachweis von Jets und Hadronen. Jets sind keine Teilchen, sondern stellen Konstrukte dar. Ein Jet besteht aus den infolge der Hadronisierung eines Quarks entstehenden Teilchen, welche konisch auseinander streben. Das hadronische Kalorimeter unterstützt zudem die genaue Bestimmung des fehlenden Transversalimpulses p_T^{miss} bzw. die daraus resultierende fehlende Transversalenergie E_T^{miss} . Dafür ist es notwendig, dass die Hadronen und die Teilchen eines Jets ihre gesamte kinetische Energie im Detektor deponieren und damit gestoppt werden. Der Prozess der Energieabgabe von Hadronen in Materialien ist sehr komplex [37]. Ein sehr großer Anteil geht durch Spallation von Protonen am Material verloren. Unter Spallation ist der Beschuss eines Atomkerns mit einem Projektil, hier dem Proton, zu verstehen. Der Atomkern verliert im Zuge dieses Prozesses einige Fragmente, zumeist Neutronen. Übrig bleibt ein instabiler Restkern. Wichtig für das Stoppen der Hadronen ist daher lediglich der Zusammenhang, dass ein hohes Verhältnis zwischen der Protonenzahl über der Massenzahl die Energieabgabe unterstützt. Hat das Material zusätzlich eine hohe Dichte, wird der Effekt weiter verstärkt. Da das Detektormaterial, die Plastikszintillatoren, aus Molekülen besteht deren Atome ein geringes Protonen-Massenzahl-Verhältnis und eine geringe Dichte haben, werden Absorberschichten, in diesem Fall aus Stahl, zum Stoppen der Hadronen benutzt [38]. Diese beiden Schichten (Detektor- und Absorberschicht) werden im Wechsel angeordnet, weshalb das hadronische Kalorimeter genau wie das elektromagnetische ein Sampling-Kalorimeter ist (s. Abschnitt 4.1).

Die letzte Schicht bildet das Myonenspektrometer [39]. Da die Kalorimeter bereits die meisten elektrisch geladenen Teilchen sowie Photonen und Hadronen absorbiert haben, kommen bis zu diesem Punkt hauptsächlich Neutrinos, hochenergetische Photonen und Myonen. Im

Gegensatz zu Photonen und Neutrinos lassen sich die Myonen aufgrund ihrer elektrischen Ladung bei der Durchquerung eines Magnetfeldes auf eine gekrümmte Bahn bringen. Dazu sind zwischen den Kalorimetern und dem Myonenspektrometer Ringspulen installiert, welche ein Magnetfeld von 3–8 T erzeugen. Mit der Information der Krümmung und der magnetischen Flussdichte kann der Transversalimpuls der Myonen, analog dem Verfahren im inneren Detektor, berechnet werden.

Alle genannten Detektorlagen und Magnetsysteme sind in der gleichen Reihenfolge entlang der Strahlachse als Endkappen verbaut. Hierbei variieren die Konstruktionen aus technischen Gründen, jedoch bleiben die Funktionsweisen bzw. Messprinzipien die gleichen.

4.1. Das elektromagnetische Kalorimeter

Dieses Kalorimeter ist speziell für die Detektion von Elektronen bzw. Positronen und Photonen konzipiert, wobei im Folgenden bei dem Begriff Elektronen auch Positronen gemeint sind. Andere Teilchen wie Hadronen oder Myonen sind prinzipiell in der Lage in diesem Bereich auch Energie abzugeben, deren Beiträge sind allerdings vernachlässigbar.

Die Photonen und Elektronen tragen meist einen Impuls, mehrere Größenordnungen über der doppelten Ruhemasse eines Elektrons (511 keV [26]). Damit sind die Photonen in der Lage Paarbildung

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+, \quad (4.1)$$

zu betreiben. Hierbei tritt das Photon mit dem elektrischen Feld eines Atomkerns in WW. Elektronen hoher Energie sondern dagegen bei der WW mit Materie Bremsstrahlung ab. Diese entsteht bei jeder Geschwindigkeitsänderung des hochenergetischen Elektrons, wobei gemäß der Energieerhaltung ein Photon im Äquivalent des Energieverlustes des Elektrons abgestrahlt wird. Die Bremsstrahlung wird über

$$e^\pm \rightarrow \gamma + e'^\pm, \quad (4.2)$$

wobei e'^\pm das Ausgangsteilchen mit geringer Energie darstellt, berechnet.

In beiden Fällen werden Sekundärteilchen gebildet, die ihrerseits genug Energie tragen, um diese Prozesse zu wiederholen. Es bilden sich elektromagnetische Schauer aus, deren Länge X (s. Gl. 4.3) mit Hilfe der Strahlungslänge X_0 charakterisiert wird. Die Strahlungslänge wird über die Strecke, auf der die Energie eines Teilchens um $1/e$ abnimmt, beschrieben und kann mit Gleichung 4.3 ermittelt werden.

$$X = X_0 \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2} \quad (4.3)$$

Hierbei ist E_0 die Energie zu Beginn des Schauers und E_c die kritische Energie. Diese ist erreicht, wenn es für das Elektron gleichwahrscheinlich ist entweder Bremsstrahlung zu erzeugen oder das durchdrungene Material zu ionisieren. Es setzt sich der Prozess der Erzeugung von Bremsstrahlung mit fallender Energie der Elektronen fort, wobei der Energieverlust der Elektronen beim Unterschreiten der kritischen Energie von Ionisationsverlusten dominiert

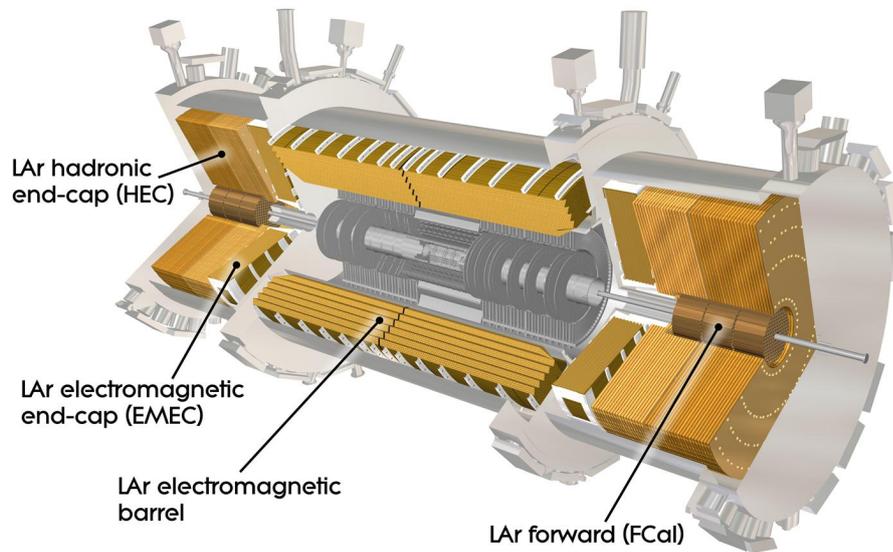


Abbildung 4.2.: Computergenerierte Darstellung des elektromagnetischen Kalorimeters mit den zwei Zylindersegmenten und den Komponenten der Endkappen [40].

wird. Für Photonen endet die Paarbildung, wenn deren Energie das Doppelte der Elektronenruhemasse unterschreitet.

Das elektromagnetische Kalorimeter ist symmetrisch um den Kollisionspunkt je in zwei Zylindersegmente, Endkappen und Vorwärtskalorimeter unterteilt (s. Abbildung 4.2). Am Beispiel der Zylindersegmente soll der Aufbau kurz beschrieben werden. Von der Strahlachse aus nach außen laufend ist das Kalorimeter der Reihe nach in vier Schichten eingeteilt. Diese sind das Presampler (PS), das Front Layer (FL), das Middle Layer (ML) und das Back Layer (BL). Hierbei dient das PS lediglich zur Abschätzung des Energieverlustes der Teilchen vor Erreichen des Kalorimeters und ist zudem einzig bei den Zylindersegmenten verbaut. Anhand der Pseudorapidität η und dem Azimut ϕ , wobei sich beide auf die Strahlachse beziehen, werden diese Schichten in Zellen eingeteilt. Die Granularität und die abgedeckten Bereiche der einzelnen Schichten ist in Tabelle 4.1 zu finden.

Das FL ist entlang der Pseudorapidität sehr fein segmentiert, was es bereits ermöglicht zu unterscheiden, ob ein Teilchen direkt aus der pp -Kollision stammt oder ein Zerfallsprodukt ist. Im ML wird der Großteil der Energie der Teilchen deponiert bzw. werden diese dort gestoppt. Das BL vermisst die Enden der Schauer des ML.

Jede Schicht ist dabei in einer Akkordiongeometrie aufgebaut, d.h. das Detektor- und Absorberschicht aufeinander mit dem Azimut folgen und gezackt nach außen laufen. Auf diese Weise durchdringen die Teilchen beide Schichten so oft wie möglich, wobei entlang des Azimuts der gesamte Bereich lückenlos abgedeckt ist. Eine technische Darstellung des Aufbaus ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Die längliche Struktur und die Anordnung der Zellen, die sich stark nach der Pseudorapidität richtet, ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.1.: Übersicht des abgedeckten η -Bereiches und der Granularität der drei Schichten des elektromagnetischen Kalorimeters sowie des PS der Zylindersegmente [21].

Schicht	η -Bereich	Segmentierung ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)
PS	$0 < \eta < 1,52$	$0,025 \times 0,1$
FL	$0 < \eta < 1,40$	$0,025/8 \times 0,1$
	$1,40 < \eta < 1,475$	$0,025 \times 0,025$
ML	$0 < \eta < 1,40$	$0,025 \times 0,025$
	$1,40 < \eta < 1,475$	$0,075 \times 0,025$
BL	$0 < \eta < 1,35$	$0,050 \times 0,025$

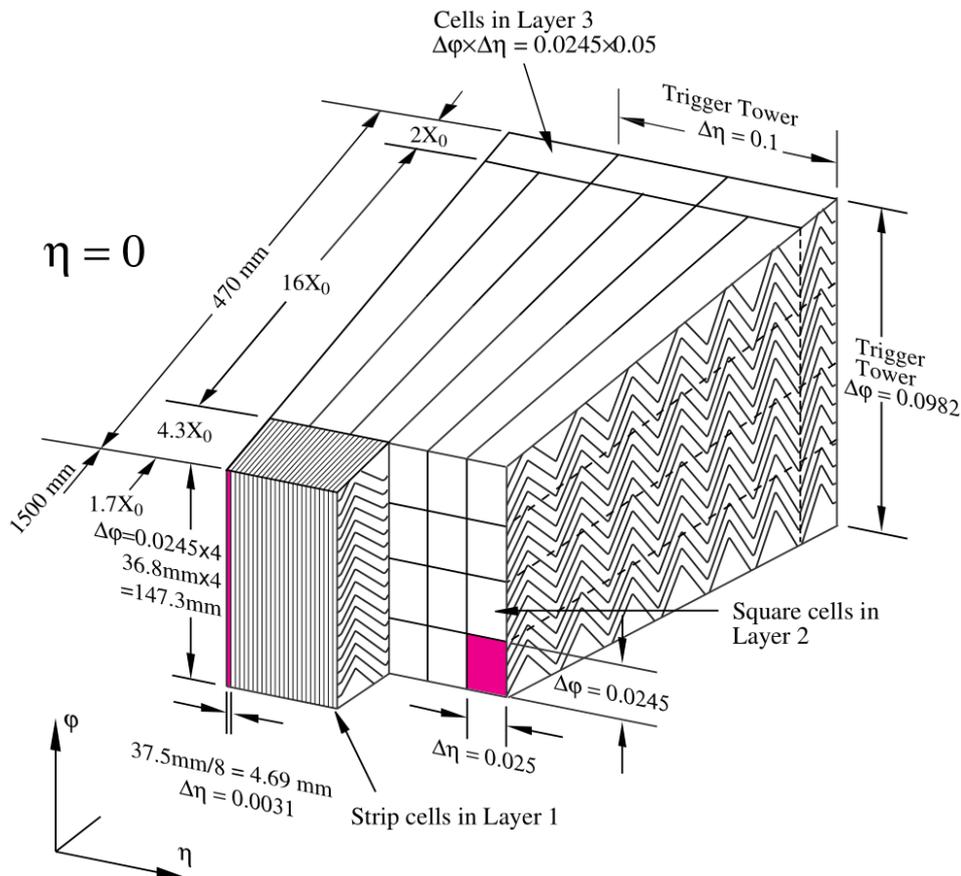


Abbildung 4.3.: Technische Darstellung der drei Schichten des elektromagnetischen Kalorimeters mit Angaben zur Größe der einzelnen Zellen repräsentiert durch einen Ausschnitt eines Zylindersegments bei $\eta = 0$ [21].

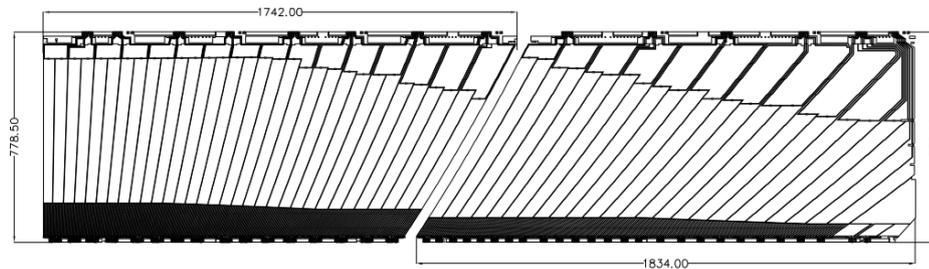


Abbildung 4.4.: Aufriß der Anordnung der drei Schichten des elektromagnetischen Kalorimeters an einem Zylindersegment von $\eta = 0$ (links) bis $\eta = 1,475$ (rechts) [21].

Wie bereits erwähnt, werden Detektor- und Absorberschicht in einem Sampling-Kalorimeter im Wechsel angeordnet. Die Absorberschicht besteht hierbei hauptsächlich aus Bleiplatten, welche beidseitig durch eine dünne Stahlschicht verstärkt werden. Die Detektorschicht nutzt als Nachweismedium flüssiges Argon. Darin verlaufen drei eng aneinanderliegende Kupferschichten, die jeweils durch eine Kaptonschicht, ein Polyimid, separiert sind. Das Polyimid zeichnet sich durch seine elektrische Isolierfähigkeit und Strahlungsresistenz aus. An den äußeren Kupferschichten liegt Hochspannung an, während die innere Schicht für die Auslese genutzt wird.

Da Argon lediglich in einem Temperaturbereich von circa 84–87 K flüssig ist, werden alle Teile des elektromagnetischen Kalorimeters von Kryostaten auf ihre Arbeitstemperatur gekühlt.

4.2. Das Triggersystem

Bei einer Kollisionsrate von 40 MHz ist es technisch nicht sinnvoll alle Signale des ATLAS Detektors aufzuzeichnen, zumal nur ein kleiner Teil der produzierten physikalischen Ereignisse von Interesse sind. Um eben diese herauszufiltern und damit auch die Datenlast der Auslesetechnik zu mindern, wird ein dreistufiges Triggersystem verwendet, bestehend aus dem Level-1 Trigger (L1), dem Level-2 Trigger (L2) und dem Event Filter (EF) [21]. Jede Stufe ist mit verschiedenen Algorithmen ausgestattet, um ein möglicherweise interessantes Ereignis zu erkennen und an die nächst höhere Stufe weiterzuleiten. Dabei werden die Berechnungen mit jeder Stufe komplexer und erfordern mehr Zeit. Durchläuft ein Ereignis alle Stufen, wird es aufgezeichnet.

Der L1 ist darauf ausgelegt Teilchen mit einem hohen Transversalimpuls, Ereignisse mit einer hohen fehlenden Transversalenergie sowie mit einer hohen totalen Transversalenergie zu erkennen. Dabei werden Regions-of-Interest (RoIs) definiert, die die interessanten Bereiche in einem Ereignis markieren. Die Daten müssen innerhalb von $2,5\mu\text{s}$ an den L2 weitergegeben werden. Aufgrund der kurzen Übertragungszeit operiert der L1 mit einer verminderten Granularität und Präzision und nutzt lediglich die Daten der Kalorimeter und die des Myonenspektrometers. Er reduziert dabei die Ereignisrate auf 75 kHz.

Der L2 bildet mit dem EF den High-Level Trigger (HLT) und nutzt für seine Berechnungen die volle Granularität und Präzision sowie die Daten aus dem inneren Detektor. Unter Einbeziehung der vollen Information verringert der L2 mit circa 40 ms Rechenzeit die Ereignisrate

weiter auf unter 3,5 kHz. Der EF rekonstruiert und analysiert das gesamte Ereignis und benötigt dafür im Schnitt vier Sekunden. Die Aufzeichnung erfolgt mit einer maximalen Ereignisrate von 200 Hz.

5. Die Upgradepläne des ATLAS Detektors

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erwähnt, konnte die Existenz des lange gesuchten Higgs-Bosons schon mit einer maximalen Schwerpunktsenergie von 8 TeV am LHC während des ersten Laufs, dem Run 1, nachgewiesen werden. Jedoch gibt es viele weitere physikalische Aspekte, die genauer untersucht werden müssen, denn das Higgs-Boson zerfällt über verschiedene Kanäle mit unterschiedlichen Endzuständen. Die Eigenschaften dieser Endzustände und die Häufigkeit ihres Auftretens zu kennen sind wichtige Bausteine, um derlei seltene Teilchen zu identifizieren und deren Eigenschaften genauer zu vermessen. In ähnlicher Weise verhält es sich mit theoretischen Vorhersagen zu seltenen Zerfallsprozessen aus physikalischen Ansätzen außerhalb des SM. Um diese seltenen Prozesse, sofern sie existieren, auflösen zu können, ist es wichtig genügend Statistik zu erzeugen. Diese kann durch eine höhere Luminosität erreicht werden. Gleichzeitig ist das Auftreten einiger Prozesse erst ab einer gewissen Schwerpunktsenergie möglich, weshalb auch diese erhöht werden soll.

All dies wird mit den Upgrades des LHC beabsichtigt. Diese sollen in einer Reihe von Läufen (Run X) und Abschaltphasen (Long Shutdown X) realisiert werden. Wie in Abbildung 5.1 zu erkennen ist, sind Run 1 und Long Shutdown 1 bereits abgeschlossen. Die Luminosität wurde für Run 2 auf $1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erhöht, während die Schwerpunktsenergie zunächst auf 13 TeV eingestellt wurde. Sie wird im Verlauf des Run 2 auf 14 TeV erhöht und erreicht damit ihr technisches Maximum.

Es folgen weitere Abschaltphasen, in denen neue Upgrades installiert werden. Mit jedem Lauf wird die Luminosität weiter erhöht bis in die Phase des High Luminosity LHC (HL-LHC) hinein.

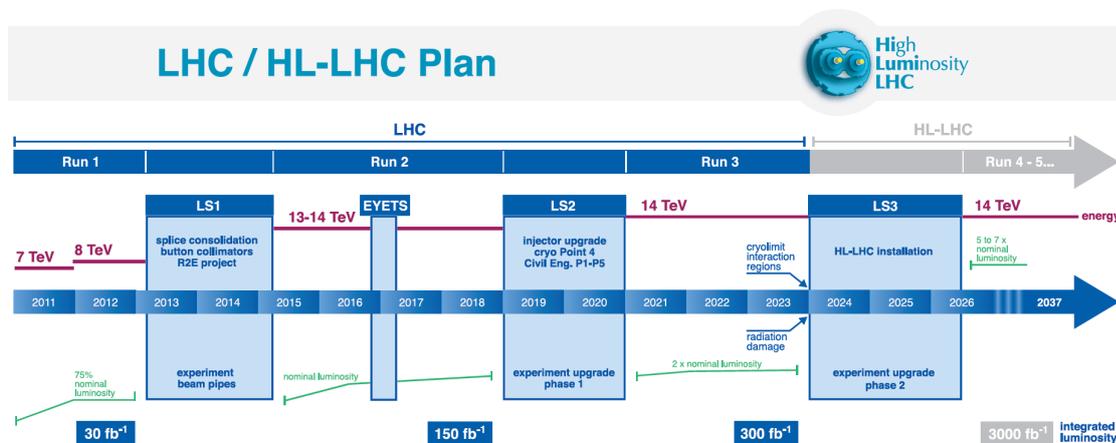


Abbildung 5.1.: Übersicht der geplanten Upgrades des LHC bis zum HL-LHC [41].

Im Zuge dieser Upgrades wird auch der ATLAS Detektor einigen Verbesserungen unterzogen. Diese obliegen jedoch allein dem ATLAS Experiment und sind lediglich durch die Designparameter des LHC mit diesem verknüpft. Sie erfolgen zeitgleich zu den geplanten Abschaltphasen des LHC und sollen hier kurz beschrieben werden. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf das Flüssigargonkalorimeter und dessen Ausleseelektronik gelegt. Es werden außerdem lediglich die Upgrades vorgestellt, welche für diese Masterarbeit von Bedeutung sind.

5.1. Phase-0

Das Phase-0 Upgrade wurde während des Long Shutdown 1 installiert und umfasst nur wenige Veränderungen. Darunter ist die bereits in Kapitel 4 erwähnte Erweiterung des Spurdetektors. Zudem wurde in Vorbereitung des Phase-I Upgrades ein Demonstrationssystem an einem der Zylindersegmente des elektromagnetischen Kalorimeters installiert. Dieser umfasst neue selbst konzipierte Hardware der Front-End (FE) sowie Back-End (BE) Elektronik, wie in Abschnitt 5.2 näher beschrieben.

Zur Orientierung ist in Abbildung 5.2 ein Überblick der bisherigen Ausleseelektronik zu sehen. Die FE Elektronik ist direkt am Detektor installiert worden und muss daher aus strahlungsresistenter Hardware aufgebaut sein. Die BE Elektronik befindet sich in einem separaten und durch dicke Wände vor Strahlung abgeschirmten Raum neben dem Detektor, dem USA15.

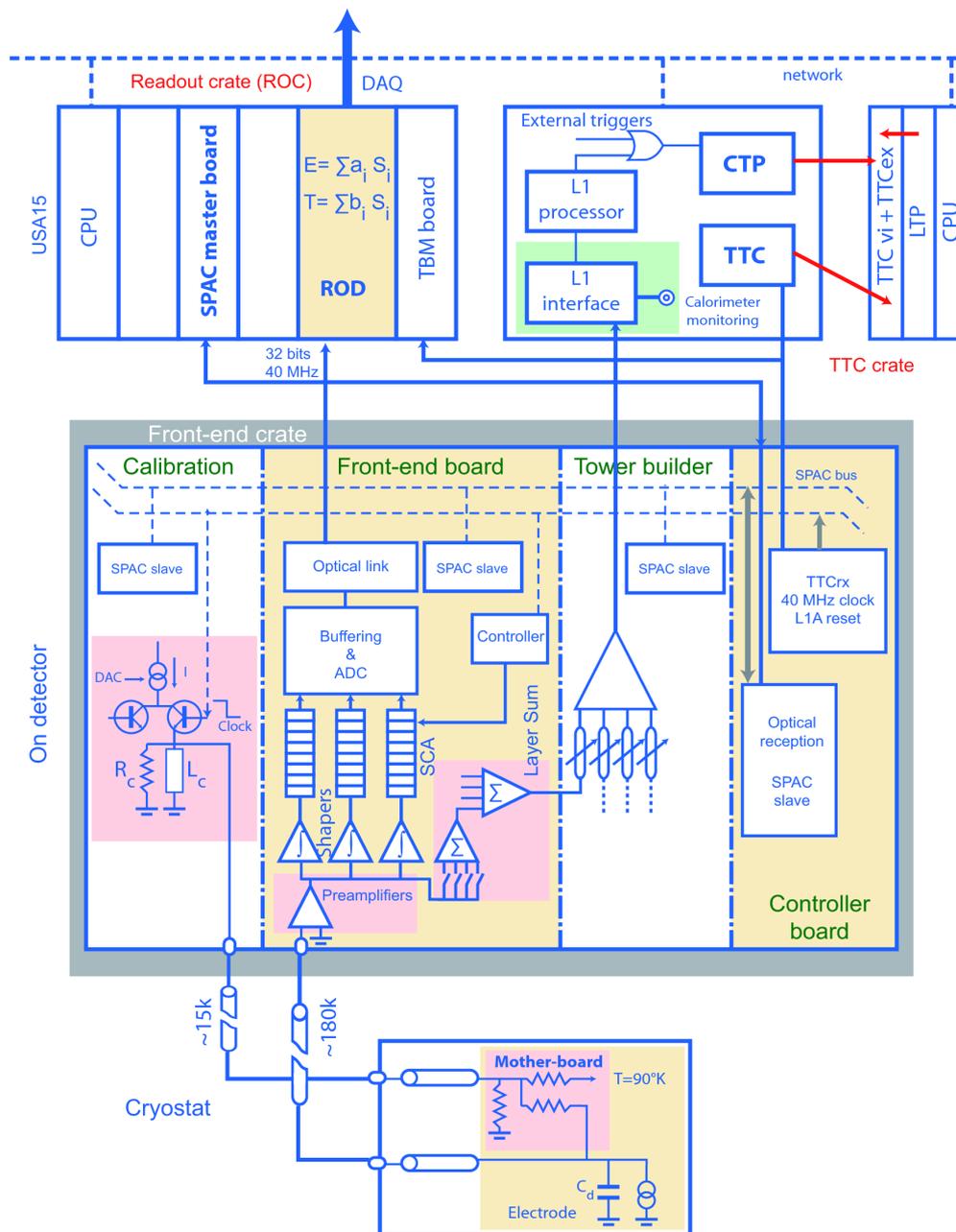


Abbildung 5.2.: Schematische Darstellung der Ausleselektronik des elektromagnetischen Flüssigargonkalorimeters [32]. Die Signale laufen vom Kryostaten in den Raum USA15.

5.2. Phase-I

Unter der technischen Herausforderung, dass trotz einer geplanten Verdopplung der Luminosität für Run 3 die Ereignisrate die Bandbreite des L1 nicht überschreiten darf, sind die Ziele dieses Upgrades insbesondere die Effizienz einzelner Abschnitte des Detektors zu verbessern. Zu diesem Zweck wird der L2 für eine präzisere Ereigniserkennung mit Informationen aus dem eigens dafür entwickelten Fast Tracker (FTK) versorgt [42]. Dieser läuft parallel zum L1 und nutzt einen Teil der ausgelesenen Daten des inneren Detektors zur Mustererkennung. Er filtert in diesem Sinne die aus Zeitgründen für den L2 nicht zu bewältigenden kompletten Spurinformatoren des inneren Detektors.

Des Weiteren sollen die Endkappen des Myonenspektrometers modifiziert werden. Diese bestehen aus einem äußeren, einem mittleren und einem inneren Rad, wobei letzteres durch das New Small Wheel (NSW) ersetzt wird [43]. Es soll eine größere Untergrundreduzierung und damit bessere Falscherkennungsrate aufweisen.

Die Granularität des elektromagnetischen Kalorimeters soll durch die Einführung von Superzellen verzehnfacht werden [32]. Die bisherige Struktur der Auslese wurde durch Trigger Tower (TT) realisiert. Diese summieren die Signale aus den vier Schichten (PS, FL, ML, BL) in einem Bereich von $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,1 \times 0,1$ eines Zylindersegments auf (s. Abbildung 5.3a). Mit den Superzellen sollen diese TTs in einer '1-4-4-1' Struktur aufgeschlüsselt werden (s. Abbildung 5.3b). Anhand dieser Informationen sollen die Energie- und die Ortsauflösung verbessert werden. Jede Superzelle besteht dabei je nach Schicht aus mehreren Elementarzellen, welche sich aus der Granularität des Detektors ergeben. In Tabelle 5.1 ist die Übersetzung der Elementarzellen in Superzellen angegeben.

Aufgrund der erhöhten Granularität des elektromagnetischen Kalorimeters soll der L1 um den electron Feature Extractor (eFEX) und den jet Feature Extractor (jFEX) erweitert werden, welche die gesteigerte Datenmenge effizient verarbeiten sollen [44]. Der eFEX soll anhand isolierter Energiedepositionen Elektronen, Photonen und Tauonen erkennen. Der jFEX dient vor allem der Identifizierung von Jets.

Alle Erweiterungen am Flüssigargonkalorimeter wurden so angelegt, dass sie mit den Plänen des Phase-II Upgrades kompatibel sind. Die Installation dieser ist für 2018 während der nächsten Abschaltphase (Long Shutdown 2) vorgesehen (s. Abbildung 5.1).

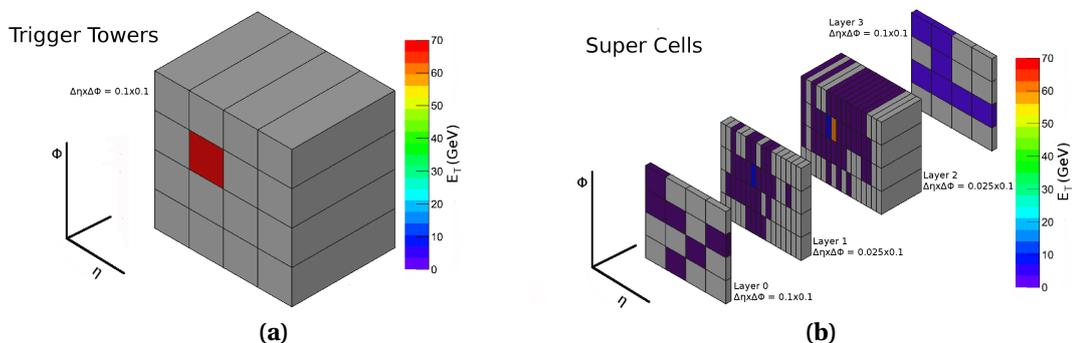


Abbildung 5.3.: Darstellung eines Elektronenerignisses ($E_T = 70$ GeV) wie es durch die bestehende TT-Auslese (a) und durch die neue Superzellauslese (b) erfasst werden würde [32].

Tabelle 5.1.: Übersetzung der Elementarzellen der drei Schichten des elektromagnetischen Kalorimeters sowie des PS der Zylindersegmente in Superzellen [21].

Schicht	η -Bereich	Segmentierung ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)		Elementarzellen in Superzelle
		Elementarzellen	Superzellen	
PS	$0 < \eta < 1,52$	$0,025 \times 0,1$	$0,1 \times 0,1$	4
FL	$0 < \eta < 1,40$	$0,025/8 \times 0,1$	$0,025 \times 0,1$	8
	$1,40 < \eta < 1,475$	$0,025 \times 0,025$	$0,025 \times 0,1$	4
ML	$0 < \eta < 1,40$	$0,025 \times 0,025$	$0,025 \times 0,1$	4
	$1,40 < \eta < 1,475$	$0,075 \times 0,025$	$0,075 \times 0,1$	4
BL	$0 < \eta < 1,35$	$0,050 \times 0,025$	$0,1 \times 0,1$	8

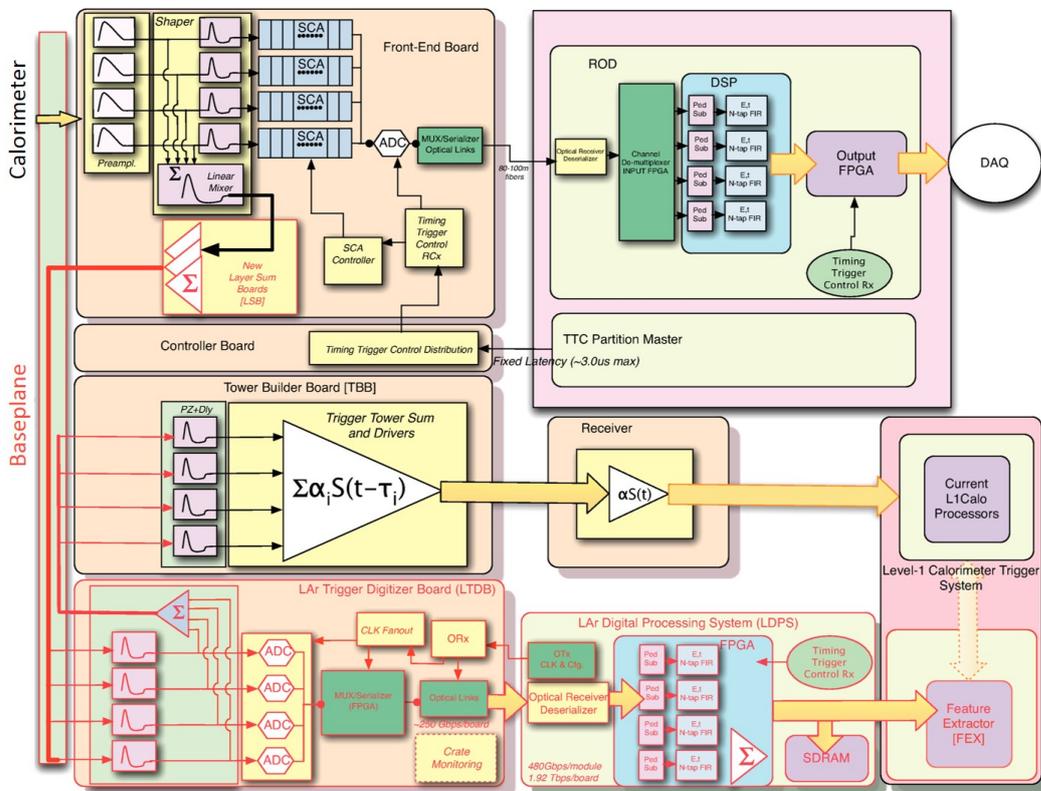


Abbildung 5.4.: Schematische Darstellung der Ausleseelektronik des Phase-I Upgrades [32]. Die rot markierten Anteile umfassen die zu dem bestehenden System hinzugefügten Erweiterungen.

Ausleseelektronik

Als Teil des Phase-I Upgrades wird die Ausleseelektronik des elektromagnetischen Kalorimeters erweitert. Die neue Hardware bildet einen eigenen Triggersignalfeld und soll dabei parallel zum bestehenden Signalverlauf arbeiten und kann auf diese Weise getestet werden. In Abbildung 5.4 sind die geplante (rot) und die bestehende Hardware dargestellt.

Anhand der bisherigen Signalverarbeitung werden zunächst an das Front-End Board (FEB) die Dreieckspulse aus dem elektromagnetischen Kalorimeter übertragen. Diese werden verstärkt, in eine bipolare Form gebracht und dabei für den Trigger dupliziert. Anschließend werden die Signale, die nicht an den Trigger weitergeleitet werden, abgetastet und für eine mögliche Datenaufzeichnung in Switched Capacitor Arrays (SCAs) zwischengespeichert bis der Trigger das Signal zum Herausschreiben der Daten gibt oder diese durch die nachfolgenden Daten überschrieben werden.

Die Umformung ist notwendig, da die steigende Flanke des ursprünglichen Signals, des Dreieckspulses, im Nanosekundenbereich liegt und einen steilen Anstieg hat. Beim Abtasten dieses kurzen Signals könnten wichtige Informationen wie die maximale Pulshöhe nicht mit Sicherheit ermittelt werden, es würden Informationen verloren gehen. Zudem ist in der bipolaren Form das Integral des Pulses gleich null. Zwei leicht verschobene übereinander liegende Pulse wie sie beim Pileup entstehen verändern somit beide Anteile in der bipolaren Form auf charakteristische Weise, wodurch es möglich ist auch diesen Effekt zu erkennen.

Die für den Trigger duplizierten Signale werden von dem Tower Builder Board (TBB) zu den bereits erwähnten TTs zusammengefasst und an den Level-1 Kalorimetertrigger weitergeleitet.

Mit der Erweiterung der Ausleseelektronik werden die Signale für den Trigger als erstes über das Layer Sum Board (LSB) in der Form der Superzellen den einzelnen Schichten entsprechend zusammengefasst und an das LAr Trigger Digitizer Board (LTDB) übergeben. Dieses dupliziert die Superzellensignale und sendet diese an den ursprünglichen Signalpfad, d.h. an das TBB, und an die internen Analog-to-Digital Converters (ADCs). Hierbei handelt es sich um einen grundlegenden Aspekt der neuen Hardware. Mit Hilfe der ADCs sollen die Signale so früh wie möglich digitalisiert werden. Auf diese Weise kommt es auf den bis zu 70 m langen Leitungen bis zur strahlungsempfindlichen BE Elektronik nicht zu Verlusten in der Signalqualität. Für das LTDB werden derzeit zwei Boards entwickelt. Ihre Bezeichnungen leiten sich von der jeweiligen Forschungseinrichtung ab. Es gibt das Brookhaven National Laboratory (BNL) LTDB und das Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL) LTDB.

Die digitalen Signale werden anschließend an das LAr Digital Processing System (LDPS) geschickt, welches mit einer zweiten wichtigen Neuerung verbunden ist. Die Signale sollen für eine erste Energie- und Zeitrekonstruktion genutzt werden, wobei die berechneten Werte den bereits erwähnten Feature Extractors (FEXs) als Eingangsdaten dienen. Die FEXs sind Teil des Level-1 Kalorimetertriggers, womit die rekonstruierten Informationen den Trigger bei der Entscheidung unterstützen.

6. Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die im Folgenden benötigten technischen Kenntnisse erläutert. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich lediglich um Ausschnitte aus den jeweiligen Gebieten handelt.

6.1. FPGA

Ein Field Programmable Gate Array (FPGA) besteht aus einem integrierten Schaltkreis oder auch Integrated Circuit (engl.) und zeichnet sich durch seine (Re-)Konfigurierbarkeit aus. Da es hauptsächlich aus einer programmierbaren Verschaltung (Interconnects) von Logikblöcken besteht, können hochkomplexe Schaltungen darin konfiguriert werden (s. Abbildung 6.1). Dies bietet den enormen Vorteil Schaltungen im Vorfeld zu testen und im Anwendungsfall sowie bei sich ändernden Aufgaben anzupassen.

Sie unterscheiden sich damit grundlegend von Application-Specific Integrated Circuits (ASICs) und Central Processing Units (CPUs), da deren Schaltkreise fest verdrahtet sind. Zudem erlaubt eine CPU lediglich die Verarbeitung eines Prozesses zur selben Zeit und kann verschiedenen Prozessanfragen eigene Prioritäten zuweisen und wenn nötig anderen den Vorrang geben. Damit ist nicht mehr sichergestellt, dass ein Prozess nach einer vordefinierten Anzahl von Takten abgearbeitet wird. In einem FPGA werden Prozesse nicht umsortiert, da diese strikt an die programmierte Schaltung gebunden sind, womit der Signallauf berechenbar wird. Auch können mehrere Prozesse gleichzeitig ablaufen. Nachteilig gegenüber CPUs ist die geringere Taktfrequenz und der Bootvorgang. Die Logik eines FPGA wird meist auf internen Static Random Access Memory (SRAM) Blöcken gespeichert, welche bei Spannungsverlust ihre Speicherfunktion verlieren. Die zu realisierende Schaltung muss damit bei jedem Einschalten neu geladen werden.

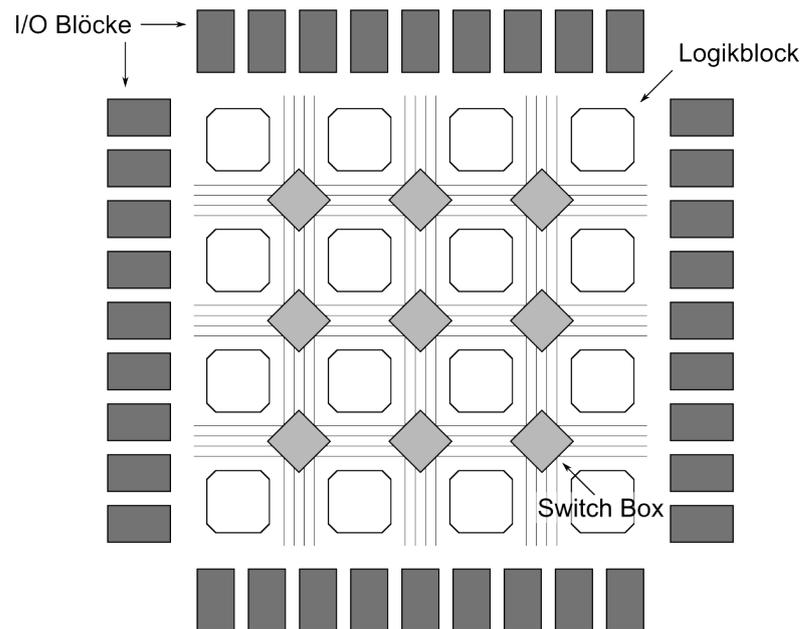


Abbildung 6.1.: Vereinfachte schematische Darstellung des Aufbaus eines FPGA. Die Logik- und I/O-Blöcke können über die Leitungen und Switchboxen individuell verknüpft werden.

6.2. VHDL

Als Beschreibungssprache von Hardwareelementen ist Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language (VHDL) nicht als klassische Programmiersprache zu behandeln. Während bei Software der Code Zeile für Zeile registriert und verstanden wird, dient das Skript in VHDL zur Beschreibung der Abläufe aller darin vorkommenden Elemente mit dem Zusatz, dass der Zustand jedes Elementes gleichzeitig betrachtet wird. Für eine reibungslose Funktionalität des zu beschreibenden Systems müssen alle möglichen Zustände eindeutig festgelegt sein. Es wird in diesem Sinne auch keine Programmroutine gestartet, viel mehr operiert das System ununterbrochen auf der Grundlage der im Skript beschriebenen Verhaltensmuster. Der Takt der Operationen und der damit möglichen Signaländerungen wird i.d.R. durch eine oder mehrere Clocks¹ gesteuert. Durch sie kann gewährleistet werden, dass die elektronischen Abläufe synchron bleiben. Es gibt auch die Möglichkeit Abläufe durch die Signaländerung spezifischer Eingänge auszulösen. Diese führen jedoch meist zu asynchronem Verhalten und sind Spezialfälle.

In dem Codeabschnitt 6.1 ist ein Minimalbeispiel für einen VHDL-Code zu sehen. Die verschiedenen Argumente in den dargestellten Prozessen und deren Kommentare zeigen die enormen Unterschiede Clock geführter und Signal gesteuerter Abläufe auf. Was aus dem Beispiel nicht ohne Testumgebung hervorgeht ist der Zeitpunkt, wann die entsprechenden Werte an den Ausgängen anliegen. So übernimmt `s_clk` im aktuellen Clock-Zyklus den Wert eins nur von `a` oder `b`, wenn dieser im vorherigen bereits anlag. Alle anderen Prozesse laufen unabhängig zur Clock und reagieren lediglich auf ihr Prozessargument und damit asynchron.

¹ Als Taktgeber einer Elektronik sind diese meist durch Schwingquarze realisiert und generiert Frequenzen im MHz-Bereich.

```

1  library ieee;
2  use ieee.std_logic_1164.all;
3
4  entity syntax is
5  port (
6      signal clk      : in  std_logic := '0'; -- binäres Clocksignal
7      signal a        : in  std_logic := '0'; -- binäres Eingangssignal
8      signal b        : in  std_logic := '0'; -- binäres Eingangssignal
9
10     signal s_clk     : out std_logic := '0'; --
11     signal s_a       : out std_logic := '0'; -- zu den Prozessen zugehörige
12     signal s_b       : out std_logic := '0'; -- Ausgangssignale
13     signal s_ab      : out std_logic := '0'; --
14 );
15 end syntax;
16
17 architecture syntax_arch of syntax is
18 begin
19     sum_clk : process (clk)           -- Clock-geführter Prozess
20     begin
21         if rising_edge (clk) then   -- wenn steigende Flanke der Clock, dann...
22             s_clk <= a or b;        -- wird s_clk = 1 sofern a oder b = 1
23         end if;
24     end process;
25
26     sum_a : process (a)              -- Signal-gesteuerter Prozess
27     begin
28         s_a <= a or b;              -- s_a nimmt nur 0 oder 1 an, wenn sich a
29                                     -- auf 0 oder 1 setzt unabhängig von b
30     end process;
31
32     sum_b : process (b)              -- Signal-gesteuerter Prozess
33     begin
34         s_b <= a or b;              -- s_b nimmt nur 0 oder 1 an, wenn sich b
35                                     -- auf 0 oder 1 setzt unabhängig von a
36     end process;
37
38     sum_ab : process (a, b)          -- Signal-gesteuerter Prozess
39     begin
40         s_ab <= a or b;             -- s_ab nimmt 1 an, wenn a oder b gleich 1
41     end process;
42 end syntax_arch;
43

```

Codeabschnitt 6.1: VHDL Beispiel zu Prozessargumenten

Die **entity** stellt den Kopf des Skriptes dar und enthält alle Ein- und Ausgänge aller verwendeten Elemente. Es lassen sich hier bereits Standardwerte definieren, welche vom im Weiteren beschriebenen System angenommen werden solange keine Signaländerung vorliegt. Dies ist vor allem für die ersten Takte nach dem Einschalten nützlich.

Die **architecture** ist der Körper. In ihr werden alle internen Abläufe und Verschaltungen der Ein- und Ausgänge beschrieben. Zudem lassen sich interne Signale definieren, welche mit steigender Komplexität unabdingbar werden.

Bei der Gestaltung Hardware beschreibender Skripte gibt es zwei Sorten von Code zu un-

terscheiden, synthesefähigen und funktionalen. Ersterer dient der Beschreibung von hochkomplexen Schaltungen in realen Schaltkreisen. Um dies zu erreichen, muss bei der Syntax allerdings auf einen erheblichen Teil der möglichen Signalwörter verzichtet werden, da diese oder die Möglichkeiten diese logisch zu verknüpfen schlicht nicht in expliziten Schaltungen aufgebaut werden können. Die zweite Sorte bedarf keiner Einschränkung und dient damit hauptsächlich dem Aufbau von Testumgebungen und zur Simulation ersterer.

Ist ein System, dass mit unter aus vielen untereinander verzweigten Skripten bestehen kann, fertig gestaltet und getestet, wird es in eine Binärdatei konvertiert und kann im Anschluss auf einen FPGA gebrannt² werden.

6.3. Transportprotokolle

Für ein Grundverständnis der verschiedenen Transportprotokolle (TPs) eines Netzwerks lässt sich das OSI-Modell (Open System Interconnect) [45] der International Telecommunication Union (ITU) und der International Organization for Standardization (ISO) heranziehen (s. Abbildung 6.2). Hierbei werden die einzelnen Aufgaben der Kommunikation und Abwicklung zwischen zwei Punkten in Schichten unterteilt. Diese bauen je nach Notwendigkeit aufeinander auf und räumen der jeweils nächst höheren Schicht das übrige Bitvolumen zur Nutzung ein. Auf diese Weise wird ein zusendendes Datenpaket in die verschiedenen Rahmen der einzelnen TPs in einer hierarchischen Struktur eingepackt und am Zielpunkt ausgepackt. In Abbildung 6.3 ist der Byte-weise Aufbau eines Ethernetpaketes dargestellt.

Es folgt ein kurzer Überblick über die für diese Arbeit benötigten Protokolle und Mechanismen in einem Netzwerk. Alle dargestellten Protokolle sind laut OSI-Modell transportorientiert, d.h. dass sie ausschließlich dem Zweck der Übertragung eines Datenpaketes dienen. Sie sorgen weder für die aktive Kommunikation zwischen Programmen bzw. Anwendungen noch für die Interpretation der Datenpakete.

Byte-Reihenfolge

Die Byte-Reihenfolge stellt die zunächst trivial wirkende Byte-weise Anordnung von Daten dar, welche aus mehreren Bytes bestehen. In einem System muss diesbezüglich Konsistenz herrschen, da ansonsten zum Beispiel beim Schreiben oder Lesen von Daten auf der Byteebene nicht klar ist wie diese zusammenhängen. Es gibt zwei gängige Methoden. Erstens das 'little endian', welches das kleinste Byte einer Information an den Anfang stellt. Die Hexadezimalzahl 'abcd', welche der Zahl 43981 entspricht, würde nach diesem Format mit von links nach rechts steigender Speicheradresse als 'cd-ab' gespeichert. Zweitens gibt es das 'big endian', welches genau umgekehrt zum 'little endian' funktioniert.

Die Byte-Reihenfolge findet auch bei der Übertragung von Daten Anwendung.

Ethernet - Bitübertragung & Sicherung

Diese Schicht umfasst gleich zwei Aspekte einer Verbindung im Netzwerk. Zum einen stellt sie die Übertragung der einzelnen Bits auf der Hardwareebene sicher, welche von der Wahl

² Bezeichnendes Synonym zur (Re-)Konfigurierung eines programmierbaren Chips.

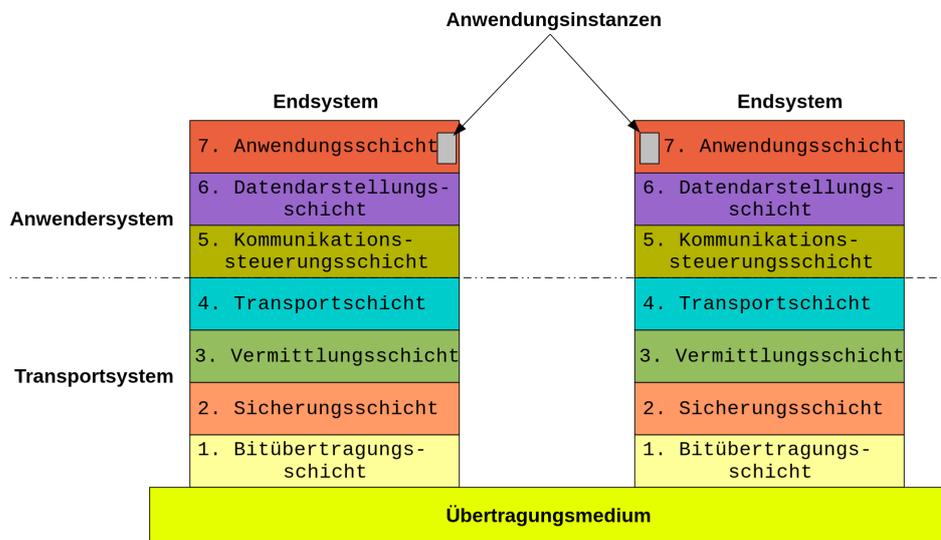


Abbildung 6.2.: Übersicht der sieben Schichten des OSI-Modells [46]. Dargestellt ist der Kommunikationspfad von der Anwendung eines Endsystems zur Anwendung eines anderen. Es wird zwischen Anwendungs- und Transportschichten unterschieden.

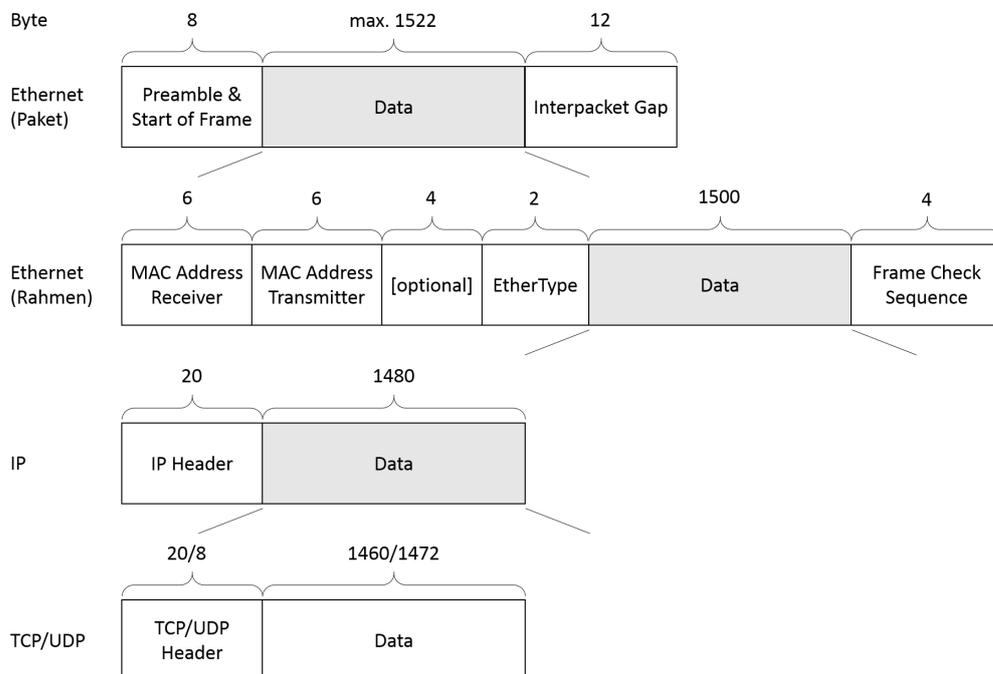


Abbildung 6.3.: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Ethernetpaketes unter der Annahme ungenutzter optionaler Bytes in den IP und TCP Headern. Data stellt das Nutzlastdatenvolumen des Paketes dar.

des Übertragungsmediums (Elektronen im Kabel, Photonen im Lichtleiter, etc.) abhängig ist. Und zum anderen verwaltet sie die korrekte Übertragung der Bits über das gewählte Medium. Damit einher geht die Unterteilung der zusendenden Bits in Blöcke, welche in dem äußersten Rahmen, dem des Ethernetprotokolls, eingehüllt werden. Ein Block beginnt demnach mit einer Präambel (7 Byte) und dem 'Start of Frame' Byte, welche den Kopf oder Header (engl.) des Rahmens ausmachen, und endet mit dem 'Interpacket Gap' (12 Byte) als Nachlauf oder Trailer (engl.). Diese stellen die Abgrenzung eines Paketes dar. In einem nächsten Schritt wird ein weiterer Header, welcher neben optionalen Inhalten die MAC-Adresse (6 Byte) des Absenders und des Empfängers sowie das 'EtherType' Feld (2 Byte) enthält, hinter dem bestehenden eingefügt. Das 'EtherType' vermittelt welches Protokoll auf der nächst höheren Ebene verwendet wird. Es folgt ein Trailer mit der 'Frame Check Sequence' oder Prüfsumme (4 Byte), welche es erlaubt fehlerhafte Pakete festzustellen.

Als Teil der Media Access Control (MAC) lässt sich anhand der MAC-Adresse jedes einzelne Netzwerkadapter in einem Local Area Network (LAN) identifizieren. Bei Paketen, die von einem LAN in ein anderes übertragen werden sollen, wird jeweils die MAC-Adresse des Empfängers bzw. die des Absenders durch die des Übermittlers (z.B. einem Router) ersetzt. Neben dem werden Teile der MAC-Adresse mit einer bestimmten Maske als Kennung für bestimmte Firmen gehalten. Außerdem erlaubt die Adresse 'ff-ff-ff-ff-ff-ff' das Senden an alle Teilnehmer eines LAN, dies wird auch als Broadcast bezeichnet.

IP - Vermittlung

Da über das Ethernet die physikalische Übertragung und Identifizierung bereits gesichert ist, kann das Internet Protocol (IP) unabhängig vom Übertragungsmedium dazu benutzt werden Pakete innerhalb sehr großer Rechnernetzwerke zu versenden. Dazu wird an den Ethernet Header anschließend der IP Header eingefügt. Dieser ist i.d.R. für die Version IPv4 20 und für IPv6 40 Byte lang und kann durch optionale Einträge erweitert werden, er darf jedoch 60 Byte nicht überschreiten. Diese und alle höheren Schichten sind nicht mehr auf einen Trailer angewiesen, da der Ethernetrahmen das Paket bereits begrenzt. Das IP operiert verbindungslos, d.h. dass nicht auf eine Antwort des Empfängers über den Status des Paketes gewartet wird.

Unter anderem sind im IP Header die Version (IPv4, IPv6), die 'Time to Live', die IP Sender- und Empfängeradresse und das 'Protocol', d.h. das verwendete Protokoll der nächst höheren Schicht, zu finden. Die 'Time to Live' stellt die 'Lebenszeit' eines Paketes mit einem Startwert von 255 dar. Bei jeder Weiterleitung zum Beispiel über einen Router wird diese reduziert, wodurch auch die Prüfsumme dieses Headers neu berechnet werden muss.

TCP/UDP - Transport

Das Transmission Control Protocol (TCP) und das User Datagram Protocol (UDP) dienen nach dem IP Header dazu die Art der Verbindung und den Kommunikationsverlauf zu strukturieren.

Das TCP gilt dabei als sicheres wenn dadurch auch etwas langsames Protokoll. Es stellt eine Verbindung von einem Rechner zum Anderen her, was auch als 'End-to-End' Verbindung bezeichnet wird. Hierbei werden die IP Adresse des Servers (Empfänger) und des Clients (Sender) sowie die Ports beider, welche im Zuge des TCP vergeben werden, benötigt. Die IP Adresse und der Port bilden einen Socket, welcher den Verknüpfungspunkt von einer Anwendung

zum Socket einer anderen darstellt. Die Ports werden beim Aufbau der Verbindung von der jeweiligen Seite auf Verfügbarkeit geprüft, welche damit einen eindeutigen und sicheren Kommunikationskanal schaffen. Der Verbindungsaufbau folgt dabei vereinfacht in drei Schritten. Als erstes wird eine Anfrage vom Client an den Server versendet. Bei Erhalt, sendet dieser eine Bestätigung plus eine eigene Anfrage. Erwidert der Client die Anfrage des Servers ist die Verbindung aufgebaut. Im Anschluss können die Daten übertragen werden, wobei der Server regelmäßig über deren erhalten Rückmeldungen versendet. Der Client gibt das Ende der Übertragung an, welches vom Server bestätigt werden muss.

Es gilt zu beachten, dass eine TCP Verbindung von beiden Seiten aus geführt werden kann. Es gibt daher keinen eindeutigen Server oder Client. Die Begriffe wurden lediglich zur Veranschaulichung gewählt. Im Header des TCP befindet sich u.a. der 'Source Port' und der 'Destination Port', die Prüfsumme sowie 'Sequence Number' und 'Acknowledge Number', welche für die Synchronisation und Reihenfolge der Pakete nötig sind.

Auch beim UDP werden Sockets zur Datenübertragung verwendet, allerdings handelt es sich hierbei um ein verbindungsloses Protokoll. Es wird keine Verbindung mittels Anfrage und Bestätigung aufgebaut. Auch wird der Erhalt von Paketen nicht bestätigt. Damit wird Zeit gespart und die Netzlast gering gehalten. Der Nachteil ist, dass auf diese Weise nicht garantiert werden kann, dass alle Pakete fehlerfrei, in richtiger Reihenfolge, einzeln oder überhaupt ankommen. Wird ein fehlerhaftes Paket erkannt, obliegt es der nächst höheren Schicht eine Anfrage auf nochmaliges Senden zu schicken oder nicht.

Der Header des UDP ist sehr einfach strukturiert. Er enthält nur den 'Source Port' und den 'Destination Port', die Länge des Pakets sowie die Prüfsumme.

7. IPbus

Die IPbus Firmware entstammt dem CACTUS Projekt (Code Archive for CMS Trigger UpgradeS) [47] der CMS Kollaboration und soll als Kontrollelement für die auf dem LDPS installierten FPGAs, genauer dem darauf konfigurierten modularen System, der BE Elektronik, dienen. Die IPbus Firmware basiert dabei auf einem Master-Slave-Prinzip, d.h. dass ausschließlich auf Anfrage Informationen über dessen Zustand erhalten werden können. Um die Slaves anzusprechen, wird ein paralleles Bussystem genutzt (s. Abschnitt 7.4.2).

Es wird zunächst das Demonstrationssystem vorgestellt, auf welchem die IPbus Firmware zum Einsatz kommen soll. Um seine Funktionalität garantieren zu können, sollte es auf einem Testboard nachvollzogen, nach Designkriterien der LAr Firmware Working Group modifiziert und getestet werden. Für einen vollständigen Test via Ethernet wird jedoch nicht nur die IPbus Firmware benötigt, sondern auch die ebenfalls vom CACTUS Projekt zu Verfügung gestellte softwareseitige Ansteuerung namens μ HAL.

Gleich vorab sei erwähnt, dass im Zuge der Testphase auf dem Testboard keine arbeitsfähige Verbindung zwischen dem Ethernetport und dem FPGA aufgebaut werden konnte, weshalb Firm- und Software einzeln getestet wurden.

7.1. Das LAr Digital Processing System

Wie in Kapitel 5 beschrieben, wurde während des Phase-0 Upgrades ein Demonstrationssystem am Detektor installiert, welches zur Erprobung der neuen Ausleseelektronik des für 2018 bevorstehenden Phase-I Upgrades gedacht ist. Die durch rot gekennzeichneten Verbesserungen aus Abbildung 5.4 enthalten u.a. auf Seiten der BE Elektronik das LDPS, auf welchem die FPGAs für die Verarbeitung der in Superzellen strukturierten Daten untergebracht sind. In Abbildung 7.1 ist die aktuelle Repräsentation des ATCA test board for baseline aquisition (ABBA), welches im Folgenden mit LDPS bezeichnet wird, dargestellt.

Es handelt sich dabei um den Vorläufer des Prototypen. In dieser Version sind drei ALTERA® Stratix® IV FPGAs verbaut worden. Die zukünftige Version soll jedoch fünf ALTERA® Arria® 10 FPGAs fassen. Vier davon als Front-FPGAs für die Aufbereitung der Daten und den letzten als Back-FPGA, welcher die computergesteuerten Anfragen an den jeweiligen Front-FPGA weiterleitet. Die Front-FPGAs sollen zur Verarbeitung der Daten das in Abbildung 7.2 dargestellte modulare System mit der Bezeichnung ABBA Firmware nutzen.

Der orangene Rahmen wird als Low Level Interface bezeichnet, welches lediglich die Verknüpfung der ein- und ausgehenden Ports mit den Modulen und deren spezifischen Signalstrukturen bereitstellt. Prinzipiell sind zwei Arten zu unterscheiden, das Streaming Interface und das Memory-Mapped Interface. Ersteres ist sehr einfach konzipiert, da es allein dazu dient Daten

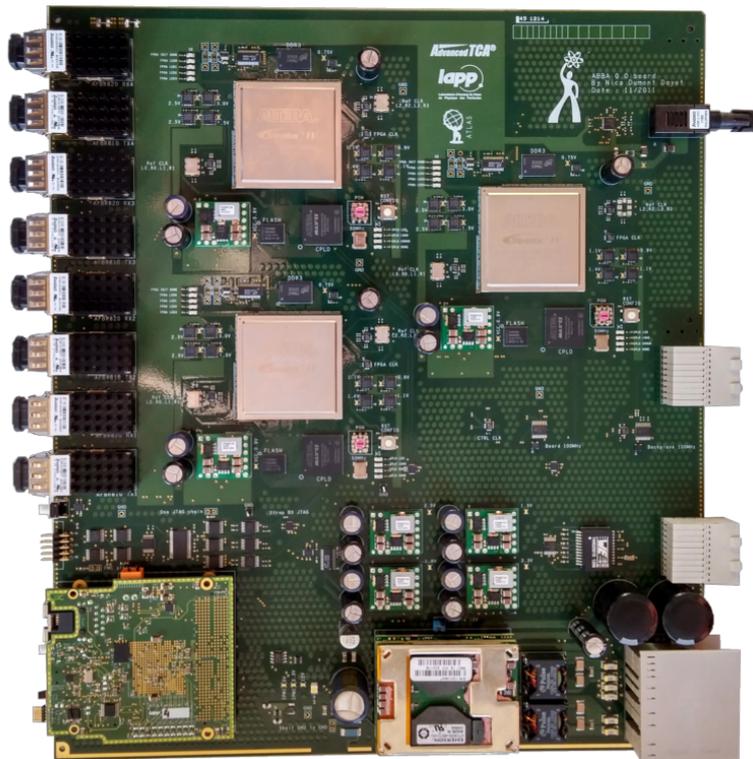


Abbildung 7.1.: Vorläufer des ABBA Prototyps repräsentativ für das LDPS [48]. Die drei kupferfarbenen Chips sind ALTERA® Stratix® IV FPGAs, wobei die linksseitigen als Front-FPGAs zur Datenaufbereitung und Erstellung der IPbus-Pakete dienen. Der dritte, auch als Back-FPGA bezeichnet, verwaltet zwischen computergesteuerten Anfragen und den Front-FPGA.

weiterzureichen. Es bedarf somit nur weniger Statussignale, um eine Übertragung zu starten, und ist für hohe Bandbreiten geeignet. Das zweite Interface ist für die Speicherung von Daten ausgelegt, wobei Speicherplatzzuweisung und Integritätsabfrage der Daten beispielhaft die Zugriffszeiten verlängern.

In Abbildung 7.2 stellen die horizontalen roten Pfeile das Streaming der Superzellendaten dar. Die blauen entsprechen dem Memory-Mapped Interface.

Der Zugriff auf die Module mittels IPbus-Protokoll erfolgt über die 1,25 GB/s Ethernetschnittstelle¹, welche direkt mit dem IPbus controller verbunden ist. Dieser entnimmt eingehenden Ethernetpaketen wichtige Daten wie die MAC Adresse des Absenders und streift die äußeren Rahmen ab bis lediglich das IPbus-Paket übrig ist. Im Anschluss bekommt das adressierte Modul unter Verwendung eines Memory-Mapped Interfaces die Informationen aus dem IPbus-Paket. Im Sinne der Schichten des OSI-Modells aus Kapitel 6 stellt das IPbus-Protokoll kein transportorientiertes Protokoll dar, denn es beinhaltet die anwendungsorientierte Anfrage eines Computers, welcher diese ebenfalls über eine Software generiert.

¹ Die 1,25 GB/s sind vorläufig und sollen auf 10 GB/s erweitert werden.

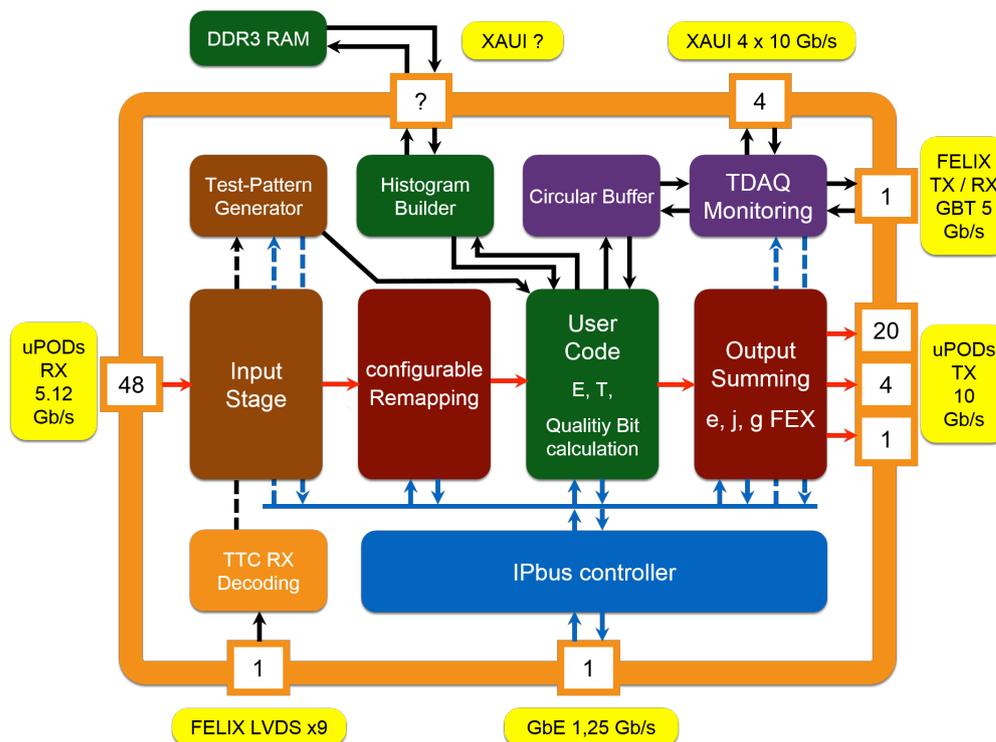


Abbildung 7.2.: Schematische Darstellung der modularen Struktur zur Verarbeitung der Superzellendaten (rote Pfeile) und Kontrolle des Systemstatus eines Front-FPGA (blaue Pfeile). Über die restlichen Kommunikationspfade (schwarze Pfeile) werden Stellsignale und Daten interner Strukturen bzw. des Triggersignalpfades ausgetauscht. Es ist zu beachten, dass die ABBA Firmware an einigen Stellen noch nicht vollends definiert und dadurch als vorläufig zu betrachten ist.

7.2. Das Testboard

Als Testboard wurde das SoCKit Development Kit der Firma Arrow Electronics Incorporated bereitgestellt. Der Aufbau mit dem Fokus auf einer Ethernetschnittstelle und einem FPGA mit integriertem Hard Processor System (HPS) stellte die Voraussetzungen die IPbus Firmware an einem laufenden System testen zu können. Der FPGA Chip ist somit aus dem HPS und dem FPGA fabric aufgebaut, welches den eigentlichen FPGA darstellt. Das HPS besteht im Kern aus einem Mikroprozessor, der wie eine CPU zu einem FPGA gegenläufige Eigenschaften besitzt (s. Abschnitt 6.1).

Das Board umfasst neben dem Triple-Speed-Ethernet Port² und dem Cyclone[®] V FPGA mehrere USB Schnittstellen, welche u.a. für das Brennen des FPGA fabric genutzt werden können. Des Weiteren verfügt es über einen rückwärtigen MicroSD Karteneinschub, über welchen Linux basierte Systeme gebootet werden können. Das Testboard ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

Die Wahl des Cyclone[®] V FPGA fundierte dabei auf zwei Überlegungen. Zum Ersten war die IPbus Firmware bis dahin auf FPGAs der Firma Xilinx[®] gelaufen. Mit dem neuen LDPS sollten die Arria[®] 10 FPGAs der Firma ALTERA[®] genutzt werden, weshalb damit die Frage der

² Unterstützt 10/100/1000 MB/s Übertragungsgeschwindigkeit.

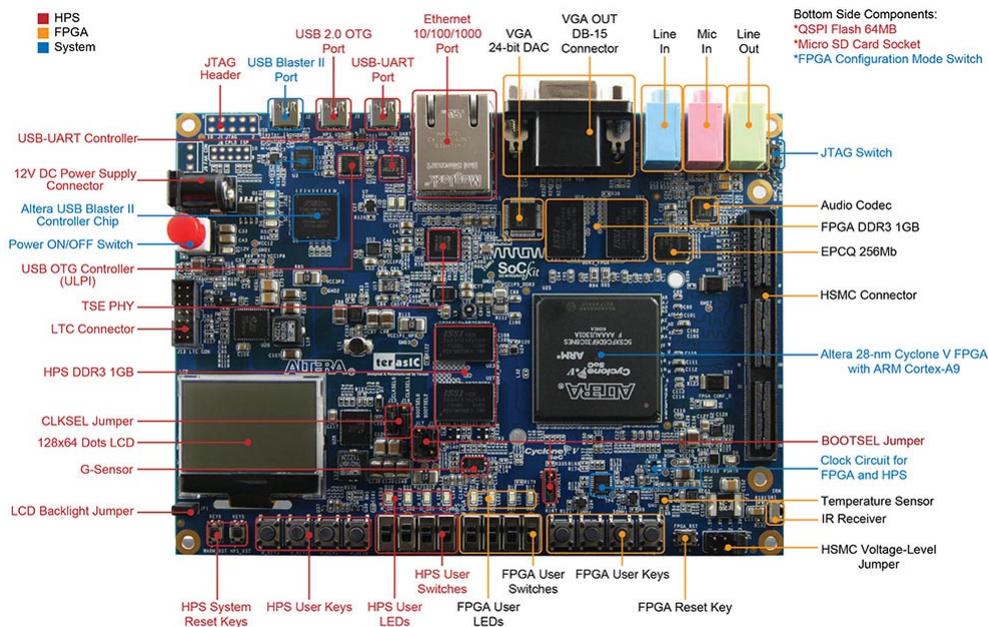


Abbildung 7.3.: Übersicht der wichtigsten Komponenten des SoCKit Development Kit [49]

Tabelle 7.1.: Kurzübersicht der Eigenschaften eines Cyclone® V [50] und eines Arria® 10 [51] FPGA.

Eigenschaft	Cyclone® V	Arria® 10
Prozessor	Dual-core ARM® Cortex® -A9 MPCore™	Dual-core ARM® Cortex® -A9 MPCore™
Geschwindigkeit	925 MHz	1,05–1,50 GHz
Logikelementdichte	25–110 k	160–660 k
Integrierter Speicher	5,6 MB	23,0–39,0 MB

Kompatibilität geklärt werden musste. Zum Zweiten waren die Arria® 10 FPGAs zu diesem Zeitpunkt noch nicht erhältlich, womit die Wahl auf einen FPGA des selben Anbieters und mit ähnlicher Struktur fiel. Eine kurze Gegenüberstellung der Eigenschaften beider ALTERA® FPGAs ist in Tabelle 7.1 zu finden.

Wie bereits erwähnt besteht der Cyclone® V FPGA aus einem FPGA fabric und einem HPS. In Abbildung 7.4 sind die an diese beiden Komponenten angeschlossenen Module des Testboards zu sehen. Problematisch ist dabei, dass die Ethernetschnittstelle nicht direkt an den FPGA angeschlossen ist. Die Signale müssen damit durch den HPS geleitet werden. Während der Bearbeitungszeit konnte jedoch keine funktionierende Verbindung zwischen dem FPGA fabric und der Ethernetschnittstelle aufgebaut werden.

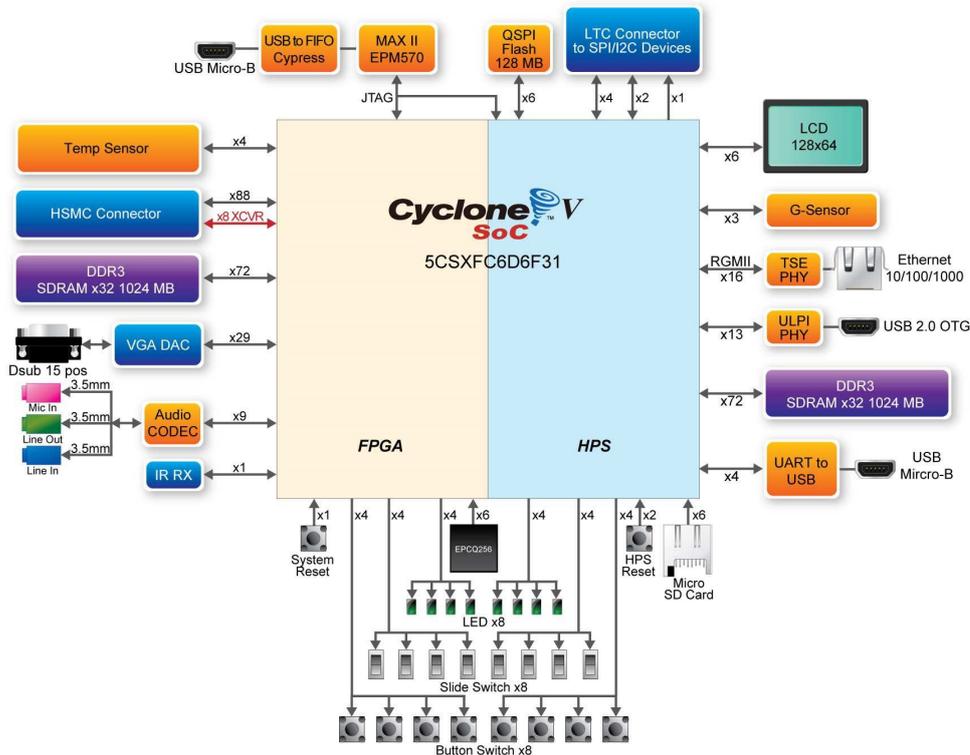


Abbildung 7.4.: Schematische Darstellung der Systeme des Cyclone[®] V FPGA, dem HPS und dem FPGA fabric [52]. Die Position der Anschlüsse stellt die tatsächliche Konnektivität zu den Systemen dar.

7.3. Die μ HAL Software

Die μ HAL Software stellt als Hardware Access Library (HAL) ein Endbenutzer Application Programming Interface (API) dar. Mittels C++- oder Python-Skripten werden Schreib-, Lese- und Read-Modify-Write (RMW)-Befehle anhand des IPbus-Protokolls an die entsprechenden Module oder auch Slaves wie beispielsweise die aus Abbildung 7.2 geschickt. Slaves stellen dabei alle Module dar, welche an den IPbus controller angeschlossen sind. Jedes Modul wird über seine Speicheradresse angesteuert. Diese werden in einer XML (Extensible Markup Language)-Datei hinterlegt. Ein Minimalbeispiel von drei Modulen ist in Codeabschnitt 7.1 dargestellt.

```

1 <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
2
3 <node id="TOP">
4   <node id="Modul1" address="0x0000" permission="rw" />
5   <node id="System1" address="0x2000">
6     <node id="Modul2" address="0x0001" permission="rw" />
7     <node id="Modul3" address="0x1000" permission="rw" />
8   </node>
9 </node>

```

Codeabschnitt 7.1: Beispiel einer XML-Datei der μ HAL Software zur Beschreibung eines Systems aus drei Modulen.

In der XML-Datei besteht jedes Element (node) aus einer Bezeichnung (id), einer Adresse und den Zugriffsrechten (permission). Die Speicheradresse der Module ergibt sich wie folgt. In der Datei werden die Speichervolumen aller Module aneinandergereiht. Eine Speicherstelle in einem Speichervolumen ist dabei per Konvention 32 bit breit, was mit der Breite zu übertragender Daten im IPbus-Protokoll zusammenhängt (s. Abschnitt 7.4.1). Alle Speicherstellen werden fortlaufend nummeriert, womit nach Codeabschnitt 7.1 das 'Modul1' theoretisch 8192 Speicherstellen bis zum nächsten Element 'System1' zur Verfügung hat.

Die Startadresse für 'Modul2' ergibt sich, indem zu der Startadresse des 'System1' die Adresse von 'Modul2' dazu addiert wird, zu $0x2000 + 0x001 = 0x2001$ und die für 'Modul3' analog.

Um die μ HAL Software nachzuvollziehen, wurde eine einfache Teststruktur von drei Registern angelegt (s. Codeabschnitt 7.2). Ein Register ist ein elektronisches Bauelement zur Speicherung digitaler Informationen. Diese sind i.d.R. als schnelle Zwischenspeicher konzipiert und tragen meist nur wenige Bits Speichervolumen.

```

1 <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
2
3 <node id="TOP">
4   <node id="REG" address="0x0001" permission="rw" />
5   <node id="SUBSYSTEM1" address="0x200000" module="file://level2_address.xml" />
6   <node id="SUBSYSTEM2" address="0x300000" module="file://level3_address.xml" />
7 </node>
8
9 === file://level2_address.xml ===
10 <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
11
12 <node id="SUBSYSTEM1">
13   <node id="REG" address="0x0001" permission="rw" />
14 </node>
15
16 === file://level3_address.xml ===
17 <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
18
19 <node id="SUBSYSTEM2">
20   <node id="REG" address="0x0001" permission="rw" />
21 </node>

```

Codeabschnitt 7.2: XML-Datei für die μ HAL Software zur Beschreibung eines Testsystems aus drei Registern (REG).

In dieser Teststruktur wurde ein weiteres Merkmal zur Strukturierung der Module verwendet. Anstatt eines Elements können auch Subsysteme mit weiteren Modulen eingebunden werden. Dies wird durch die Option 'module' realisiert, dazu wird der Pfad zu einer weiteren XML-Datei hinterlegt. Auf diese Weise lässt sich der Speicheradressraum übersichtlich und hierarchisch verwalten. Der Inhalt aller drei Dateien ist in Codeabschnitt 7.2 zusammengefasst. Alle drei Register tragen in diesem Beispiel die Bezeichnung 'REG', wobei zwei davon in Subsystemen untergebracht sind und somit auch kein Namenskonflikt entsteht.

Mit Hilfe von μ HAL wird im Anschluss ein Test in C++ geschrieben, in welchem den drei Registern je ein Wert übergeben werden soll. Ein minimalistischer Ausschnitt ist in Codeabschnitt 7.3 zu sehen.

```

1 void send_pkt ( const std::string& connection, const std::string& id ){
2     //open & manage XML connection files and wrap up the interfaces to NodeTreeBuilder
3     //and ClientFactory
4     ConnectionManager manager(connection);
5     HwInterface hw = manager.getDevice(id);
6
7     //set constants for packet test
8     uint32_t v0 = 255;
9     uint32_t v1 = 171;
10    uint32_t v2 = 186;
11
12    hw.getNode("REG").write(v0);
13    hw.getNode("SUBSYSTEM1.REG").write(v1);
14    hw.getNode("SUBSYSTEM2.REG").write(v2);
15
16    ...
17
18    //dispatch packet:
19
20    //tests that the expression is executed without exceptions and measures the
21    //execution time
22    CACTUS_TEST(hw.dispatch());
23
24    ...
25
26    }

```

Codeabschnitt 7.3: C++-Skript zur Anwendung der μ HAL Software

Bevor der Test ausgeführt wird, muss zunächst ein Dummy gestartet werden. Der Dummy stellt eine Anwendung dar, welche die Stelle der IPbus Firmware einnimmt. Dazu vergibt es sich einen Port und bildet somit einen Socket. Über diese Sockets können Anwendungen untereinander Daten austauschen, wobei es keine Rolle spielt, ob die Zielanwendung auf dem selben Computer läuft oder über das Netzwerk vermittelt wird. Durch den Socket wird die Anwendung eindeutig adressiert. Die Testroutine aus Codeabschnitt 7.3 öffnet über den 'ConnectionManager' ebenfalls einen Socket, vergibt die drei Werte der Variablen `v0`, `v1`, `v2` an die Adressen der Register und schickt das Paket mit dem Befehl 'dispatch()' ab. Die Information wird in das IPbus-Protokoll konvertiert und mit der Adresse des Dummysockets in einem Ethernetpaket über das Netzwerk verschickt. Da sich der Dummy auf dem gleichen Computer befindet, empfängt die Netzwerkschnittstelle das Paket, streift die äußeren Protokolle ab und prüft das IPbus-Paket auf seine Integrität.

7.4. Die IPbus Firmware

Die IPbus Firmware [53] ist ein mittels VHDL konstruiertes modulares System zur Interpretation von IPbus-Paketen. Es wurde für den Betrieb auf FPGAs konzipiert, wobei ausschließlich deren Ressourcen genutzt werden sollen. Sein Zweck ist es als Kontrollsystem einen Zugriff auf die Hauptanwendung des FPGA zu ermöglichen bzw. dessen Status überwachen zu können.

7.4.1. Das IPbus-Protokoll

Das IPbus-Protokoll [54] liegt derzeit in Version 2.0 vor. In dieser Fassung besteht ein IPbus-Paket im Wesentlichen aus zwei Bestandteilen, dem IPbus Packet Header gefolgt von einer oder mehreren IPbus Transaction Requests (s. Abbildung 7.5) und ist in Bit-Wörtern organisiert, deren Länge im Rahmen des CACTUS Projekts auf 32 bit festgelegt wurde.

Der IPbus Packet Header stellt das erste Wort einer Übertragung dar und wurde im Zuge der Version 2.0 zum Protokoll hinzugefügt. Drei Aufgaben werden mit dieser Instanz bewältigt. Zunächst wird anhand der ersten vier Bit einer von drei Pakettypen ermittelt. Der Standard hierfür wäre ein Control packet, welches die IPbus Requests beinhaltet und nach der Byte-Reihenfolge 'little endian' sortiert wird. Die beiden anderen Typen sind das Status packet und das Re-send request packet in 'big endian'. Sie sind Teil des Reliability Mechanism, welcher eingeführt wurde, um einerseits fehlerhafte Pakete zu erkennen und andererseits fehlende Pakete erneut anzufordern. Hierbei ist die im IPbus Packet Header enthaltene Packet ID von 16 Bit Länge wichtig. Durch diese i.d.R fortlaufende Nummerierung können Lücken in der Kommunikation erkannt werden. Anhand des Reliability Mechanism ist der Datenaustausch unter Verwendung des UDP Protokolls garantiert. Es wurde dabei absichtlich auf das TCP Protokoll verzichtet und ein eigenes simples System zum Senden verloren gegangener Pakete entwickelt, um die Ressourcen des FPGA zu schonen und die Geschwindigkeitsvorteile des

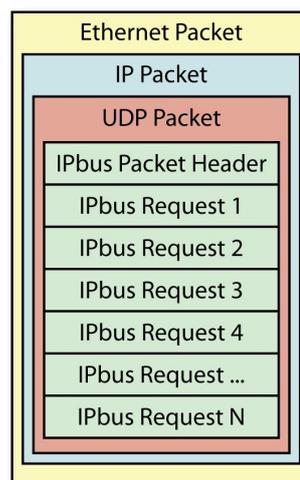


Abbildung 7.5.: Schematische Darstellung eines Ethernetpaketes mit einem IPbus-Paket als Nutzlastdaten [54].

UDP, wenn auch in abgeschwächter Form, nutzen zu können. In den letzten vier Bit steckt die verwendete Protokollversion.

Für den Standardfall eines Control packet folgt nach dem IPbus Packet Header der IPbus Transaction Header. Darin sind u.a. die Transaction ID und die Type ID enthalten. Ersteres dient der Identifikation der gestellten Anfrage, da in einem IPbus-Paket gleich mehrere IPbus Requests verschickt werden können. Letzteres unterscheidet die Art der Anfrage in Lesen, Schreiben oder RMW. Im Falle einer Leseanfrage folgt lediglich die Speicheradresse des erwünschten Moduls. Für eine Schreibanfrage folgen der Speicheradresse die zu übermittelnden Daten unter Berücksichtigung des maximalen Speichers des Moduls. Das RMW kann ausschließlich für einzelne Wörter verwendet werden. Mit dieser Anfrage lassen sich gezielt Bits einer Speicherstelle setzen oder eine Zahl zu der bereits gespeicherten addieren.

Mittels des Programms Wireshark konnte das aus Abschnitt 7.3 gesendete Paket abgehört werden und dient hier als realistisches Beispiel zu Abbildung 7.5. Seine Struktur ist in Codeabschnitt 7.4 abgebildet.

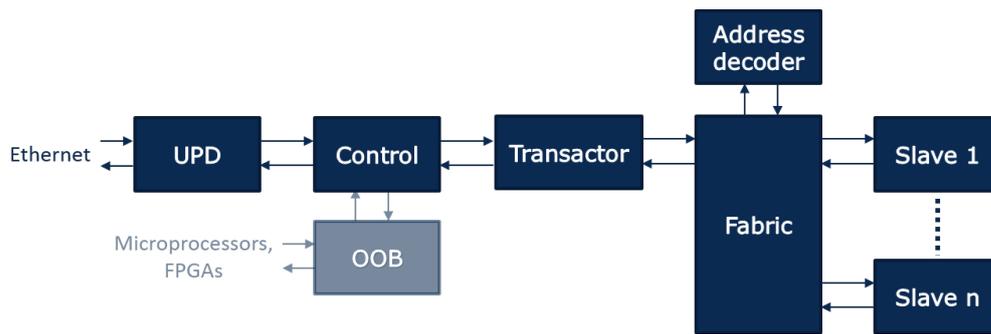


Abbildung 7.6.: Signallaufpfad der IPbus Firmware eines Ethernetpaketes bis zu den Slaves. Diese werden über den Fabric mittels eines parallelen Bussystems angesprochen. Die blauen Anteile stellen einen zweiten Kommunikationspfad dar, welcher für Mikroprozessoren oder andere FPGA-Systeme gedacht ist.

kommunizieren. Dabei wird ähnlich einer Ampel der Zugriff eines Masters gewährt, während die Anfragen des oder der anderen vorgehalten werden.

Zu den weiteren Einstellungen des Control-Moduls gehören auch die MAC-Adresse, die IP-Adresse und der Port der Firmware als Anwendung im Sinne des OSI-Modells.

Das UDP-Modul ist an die Vorgaben des UDP-Protokolls gerichtet und verarbeitet lediglich die Daten aus dem UDP Header. Im Anschluss werden die Nutzlastdaten an das Transactor-Modul weitergegeben. Dieses erfüllt drei wesentliche Aufgaben. Zum Ersten verwaltet es mittels einer State Machine die Kommunikation auf der Ebene des IPbus-Protokolls, d.h. dass hiermit einem Master beim Senden einer Anfrage über Fehlermeldungen mitgeteilt wird, wenn gerade eine andere Anfrage noch bearbeitet wird. Zum Zweiten wird das bis dahin serielle IPbus-Paket in ein paralleles konvertiert. Darunter ist zu verstehen, dass ein IPbus-Paket nicht länger durch Bits in einer Sequenz übertragen werden, sondern jedes Bit durch eine eigene Leitung dargestellt und durch ein Memory-Mapped Interface beschrieben wird. In diesem Fall handelt es sich um eine abgewandelte Version des Wishbone Interfaces [55], welches in Abschnitt 7.4.3 näher erläutert wird. Zum Dritten interpretiert es das IPbus-Paket u.a. auch die Transaction Header. Damit werden die in der IPbus-Anfrage enthaltene Adresse des Slaves, evtl. zu schreibende Daten und dementsprechend die Signale für Lesen, Schreiben oder RMW in der parallelen Form gesetzt.

Das Fabric-Modul erhält die IPbus-Anfrage vom Transactor-Modul und übergibt zunächst die darin enthaltene Adresse an das Address decoder-Modul. Dieses zieht daraus die Information, an welchen Slave die Anfrage gerichtet ist. Die Adresse der IPbus-Anfrage wird in dem Dekodierer nicht komplett entschlüsselt, da dies zu viele Ressourcen benötigen würde. Stattdessen wird eine Bitmaske auf die höchsten Bits angewendet, um den adressierten Slave zu identifizieren.

Der VHDL-Code dieses Moduls kann über zwei Wege generiert werden. In den Quellcodeordnern der Firmware kann mittels eines Python-Skriptes aus einer einfachen Datei der VHDL-Code erstellt werden. In der Datei werden die Slaves zeilenweise durch ihre Nummer, ihren Namen, die Basisadresse und der Breite charakterisiert. Die Basisadresse ist die erste Speicherstelle im Speichervolumen eines Moduls. Mit der Breite ist die Anzahl der Speicherstellen, d.h. 32 bit Wörter, gemeint.

Wesentlich komfortabler ist die zweite Möglichkeit. Dabei wird die in Abschnitt 7.3 erwähnte

XML-Datei, welche bereits die Struktur der Speichervolumen der Slaves enthält, dazu verwendet den VHDL-Code zu generieren. Wichtig bei der Struktur der XML-Datei ist, dass die Basisadresse des jeweiligen Slaves nur in Schrittweiten von zwei hoch der jeweiligen Breite angelegt werden kann.

Das Fabric-Modul leitet entsprechend des Address decoder-Moduls die Anfrage an den Slave weiter. Da das Fabric-Modul jedoch mit allen Slaves über das Wishbone Interface verbunden ist, liegen die Informationen demnach bei allen Slaves an. Ein entscheidendes Stellsignal im Wishbone Interface vermittelt, welcher Slave die Informationen annehmen darf. Dieser verarbeitet im Anschluss die Informationen und sendet eine Antwort an das Fabric-Modul. Tatsächlich handelt es sich bei dieser Art der Informationsverwaltung nicht exakt um ein paralleles Bussystem, da die Daten nicht auf einer von allen Slaves gemeinsam genutzten Leitung zwischen dem Fabric-Modul und dem Slave ausgetauscht werden. Das Arbeitsprinzip bleibt jedoch ähnlich, weshalb die Bezeichnung beibehalten wird.

7.4.3. Slaves

Es sei nochmals erwähnt, dass die Slaves aus Abbildung 7.6 allen Modulen entsprechen können, welche in Abbildung 7.2 mit dem IPbus controller verbunden sind. Im Rahmen dieser Masterarbeit war es die Aufgabe von der LAr Firmware Working Group vorgeschlagene Module zu konstruieren. Der Reset manager und ein Interfacekonverter sollen hier vorgestellt werden. Zur Verifikation der Module wurde zu jedem eine VHDL-Testumgebung erstellt. Der VHDL-Code der Module kann in Anlage A nachgeschlagen werden.

Reset manager:

Die Hauptfunktion des Reset managers liegt darin mittels eines IPbus-Paketes als Schreibanfrage gezielt einen oder mehrere Slaves zurücksetzen zu können. Dazu ist dieser mit allen Slaves über eine eigene 1 bit-Leitung verbunden, welche durch eine Bitzahl angesteuert werden können. Wird in einem IPbus-Paket an den Reset manager zum Beispiel die Bitzahl '0101' bei vier angeschlossenen Slaves übermittelt, werden die Slaves eins und drei zurückgesetzt. In der vorgestellten Version lassen sich maximal 32 Slaves, das entspricht in einem IPbus-Paket einem Wort Datenvolumen, verwalten. Mittels geringfügiger Veränderungen des internen Speichers lässt sich dieses Prinzip auf so viele Slaves hochskalieren, wie es das Nutzdatenvolumen in einem IPbus-Paket zulässt.

Das Global reset steht als zusätzliches Signal zur Verfügung. Sein Zweck war es alle Slaves zurückzusetzen und dabei nicht auf die parallele Form einer IPbus-Anfrage zurückzugreifen für den Fall, dass auch das Fabric-Modul auf Anfragen nicht mehr reagiert, da es i.d.R. eine gewisse Zeit auf die Antwort eines Slaves wartet. Ein zusätzlicher Effekt dieser Umgehung ist eine geringere Verzögerung der Auslösung des Resets, da nicht erst die Bitzahl in einer IPbus-Anfrage interpretiert werden muss. Das Global reset könnte an die Fehlererkennung in dem Control-Modul oder dem Transactor-Modul angeknüpft werden. Auf diese Weise könnte sogar eine automatische Wartung der Kommunikation mit den Slaves aufgebaut werden. Eine mögliche Implementation in die IPbus Firmware ist in Abbildung 7.7 zu sehen.

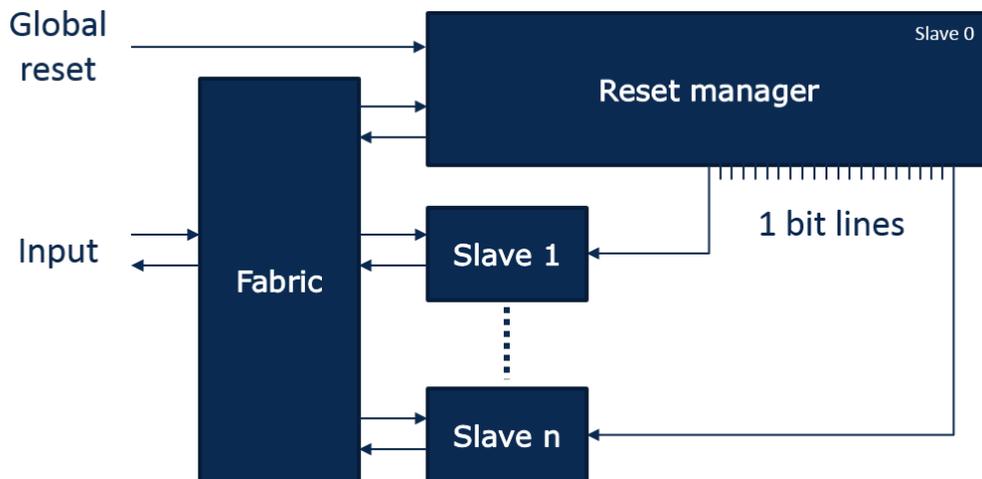


Abbildung 7.7.: Darstellung des zu implementierenden Reset managers. Das Zurücksetzen einzelner oder mehrerer Slaves erfolgt über das Fabric-Modul als IPbus-Paket. Das globale Zurücksetzen kann über ein eigenes Signal ausgelöst werden, welches schneller umgesetzt wird als über das Fabric-Modul.

Wishbone-zu-AMM Konverter:

Ein weiterer Beschluss der LAr Firmware Working Group war es statt des von dem CACTUS Projekt vorgegebenen Wishbone Interfaces das Avalon Memory-Mapped (AMM) Interface für die Kommunikation der Module der Front-FPGAs des LDPS (s. Abbildung 7.2) untereinander zu verwenden. Es musste somit eine Verbindungen der Slaves im AMM Interface mit der IPbus Firmware im Wishbone Interface gestaltet werden. Da die IPbus Firmware noch immer vom CACTUS Projekt weiterentwickelt und gepflegt wird, war es wichtig diese möglichst nicht zu manipulieren oder ganze Module umzuschreiben. Um diese Punkte zu erfüllen, wurde ein eigenständiges Modul mit der Bezeichnung 'wb2amm' der IPbus Firmware hinzugefügt, welches zwischen dem Fabric-Modul und den Slaves die genannten Interfaces ineinander konvertiert (s. Abbildung 7.8).

Um beide Interfaces zu verbinden, mussten zunächst die zueinander kompatiblen Signale identifiziert werden (s. Tabelle 7.2). Dabei ist genau darauf zu achten, ob ein Signal high-aktiv oder low-aktiv ist. Dafür ist es notwendig zu wissen, dass ein Signal zwei Pegel annehmen kann, den High- und den Low-Pegel. In den meisten Fällen wird der Low-Pegel, bei welchem die Spannung unter einem bestimmten Wert liegen muss, als null und der High-Pegel, dessen Spannung über einem gewissen Wert liegen muss, als eins interpretiert³. In diesem Fall wäre das Signal high-aktiv. Werden Low- und High-Pegel umgekehrt interpretiert wäre das Signal low-aktiv. Für beide Interfaces stellte sich der Normalfall heraus, dass alle Signale high-aktiv sind.

Als nächstes muss eine Logik die verschiedenen Zustände der Signale in das jeweilige Interfaces übersetzen. In diesem Fall bezog sich dies auf die Eingänge 'Write' und 'Strobe' des Wishbone Interfaces und 'Write' und 'Read' des AMM Interfaces. In Ersterem bedeutet ein aktives 'Strobe', dass ein Paket übermittelt wird. Das 'Write' ist aktiv für eine Schreibanfrage und inaktiv für eine Leseanfrage. Die RMW-Anfrage besteht aus mehreren Zugriffen auf den Slave und ist

³ Je nach verwendeter Technologie (TTL, CMOS, etc.) sind unterschiedliche Schwellwerte für die Spannung definiert.

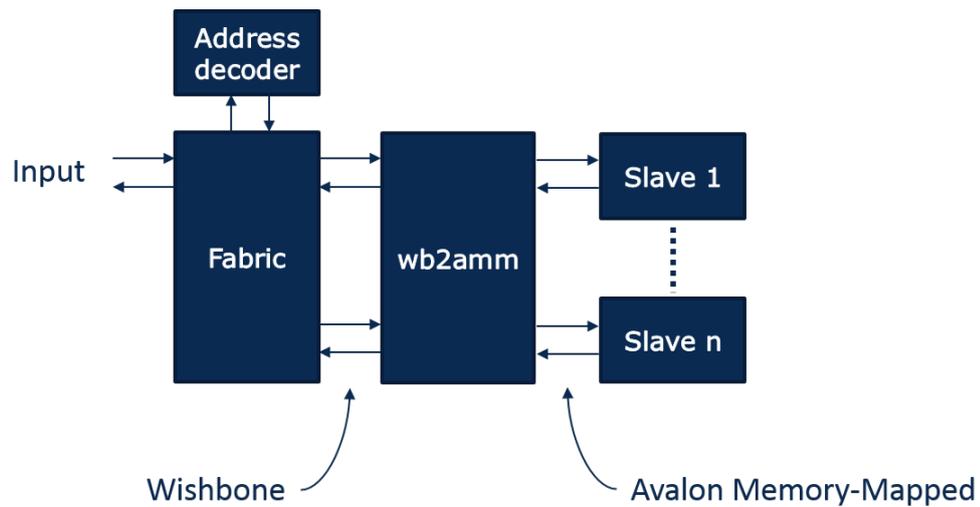


Abbildung 7.8.: Darstellung des in die IPbus Firmware implementierten wb2amm Interface-konverters.

Tabelle 7.2.: Gegenüberstellung der zueinander kompatiblen Signale des Wishbone Interfaces und des Avalon Memory-Mapped Interfaces. Die Signalrichtung der Spalte 'Verknüpfung' bezieht sich auf den Slave.

Verknüpfung	Wishbone Signal	Bits	Avalon Memory-Mapped Signal	Bits
Eingänge	Base Address	32	Base Address	32
	Data	32	Writedata	32
	Write	1	Write	1
	Strobe	1	Read	1
Ausgänge	Data	32	Readdata	32
	Ack	1	Readdatavalid	1
	Err	1	–	–

somit eine Kombination aus Lese- und Schreibanfragen. Im zweiten Interface stehen beide Signale entsprechend ihrer Bezeichnung für die jeweilige Anfrage, wobei sich die Ankündigung eines Paketes bereits im Zustand des Signals verbirgt. Ist das 'Read' aktiv, bedeutet das, dass eine Leseanfrage vorliegt. Diese Logik beinhaltet allerdings auch die Maßgabe, dass 'Read' und 'Write' nie gleichzeitig aktiv sein dürfen.

Das 'Write' des AMM Interfaces ist somit immer dann gleich eins, wenn das 'Strobe' und das 'Write' des Wishbone Interfaces gleich eins sind. Entsprechend ist das 'Read' des AMM Interfaces immer gleich eins, wenn das 'Strobe' gleich eins und das 'Write' gleich null ist. Es sei noch erwähnt, dass die im Folgenden dargestellten Interfaces Abwandlungen der originalen Spezifikationen sind.

8. Analyse des Rauschens des Demonstrationssystems

Wie in Abschnitt 5.2 erwähnt, kommt es für ein analoges Signal bei der bisherigen Struktur der Signalverarbeitung und damit bis zu 70 m langen Leitungen zu Verlusten in der Signalqualität. Dies kann verhindert werden, indem die vom Detektor aufgenommenen Signale bereits durch die Ausleseelektronik digitalisiert werden. Die Digitalisierung wird durch die ADCs des LTDB realisiert (s. Abbildung 5.4).

Neben der Elektronik der Detektorelemente erzeugt auch die Digitalisierung ein gewisses elektronisches Rauschen. Dieses muss möglichst genau bekannt sein, um den tatsächlichen Informationsgehalt der Detektorsignale herauszubekommen. Dafür wurden bei eingeschaltetem Detektor, eingeschalteter Ausleseelektronik, jedoch mit abgeschaltetem Teilchenbeschleuniger, d.h. noch vor dem Run 2, das elektronische Rauschen mit dem Demonstrationssystem (BNL LTDB) aufgezeichnet.

Um das Rauschen des Demonstrationssystems zu analysieren, sind drei Aspekte zu untersuchen. Als erstes wird das elektronische Rauschen betrachtet (s. Abschnitt 8.1), welches im Wesentlichen mit der Digitalisierungselektronik zusammenhängt. Darauf folgt eine Überprüfung der Autokorrelation der Daten (s. Abschnitt 8.2), womit die zeitliche Selbstabhängigkeit der digitalisierten Signale einzelner Kanäle gemeint ist. Zum Schluss wird über zwei Methoden das kohärente Rauschen betrachtet (s. Abschnitt 8.3), welches einen Hinweis auf einen alle Kanäle betreffenden Anteil des elektronischen Rauschens gibt.

8.1. Elektronisches Rauschen

Um ein analoges Signal zu digitalisieren, quantisiert der ADC das eingehende kontinuierliche Signal. Dazu rastert der ADC das Signal mit einer Abtastrate von 40 MHz ab [56]. Zu jedem Abtasten wird dem gerade anliegenden Signalpegel ein Wert zugeordnet. Dieser liegt idealerweise innerhalb des dynamischen Wertebereichs d des ADC. Der Wertebereich bestimmt sich über die Differenz aus dem höchsten und niedrigsten zu erwartenden Wert des Signals, $d = x_{\max} - x_{\min}$ [57].

Die Präzision eines ADC wird durch den eben erwähnten Wertebereich d und seine Bitbreite b bestimmt. Je größer die Bitbreite ist, desto feiner kann das analoge Signal abgebildet werden. Im Falle der ADCs des LTDB ist $b = 12$ bit [58], womit d in 2^{12} Stufen unterteilt werden kann. Ein Signalpegel, der innerhalb von d liegt, wird durch die nächstgelegene Stufe repräsentiert. Ein Pegel wird somit einer Stufe zugeordnet, wenn er sich innerhalb des halben Abstandes ober- oder unterhalb zur nächsten Stufe befindet. Der wahre Signalpegel wird somit lediglich angenähert, es kommt zu einer Digitalisierungsabweichung $\alpha = y_q - y$ mit dem Signalpegel y und dem quantisierten Wert y_q .

Die kleinste Stufe in d wird durch das geringste Bit oder Least Signifikant Bit (LSBit)¹ dargestellt, was zugleich die Schrittweite in d darstellt. Das LSBit ist über

$$\Delta := \frac{d}{2^b} \quad (8.1)$$

definiert. Jedes Signal, welches geringer als die Hälfte der Stufe des LSBit ist, wird zu null interpretiert.

Zusätzlich zur erwähnten Digitalisierungsabweichung gibt es einen weiteren Effekt, der die Präzision des ADC betrifft. Intern verringert das Rauschverhalten des ADC die ideale Bitbreite b . Die Auflösung sinkt und das verringerte b wird durch eine effektive Bitbreite b_{eff} angegeben. Aus der Standardabweichung $\sigma(\alpha_{\text{eff}})$ bezogen auf b_{eff} , welche sich wie folgt ergibt

$$\sigma(\alpha_{\text{eff}}) = \frac{d}{\sqrt{12} 2^{b_{\text{eff}}}} \quad , \quad (8.2)$$

lässt sich durch die Normierung auf das LSBit über

$$\sigma(\alpha_{\text{eff}}) = \frac{d}{\sqrt{12} 2^{b_{\text{eff}}}} \quad , \quad (8.3)$$

$$= \frac{d 2^b}{\sqrt{12} 2^{b_{\text{eff}}} 2^b} \quad , \quad (8.4)$$

$$= \frac{d}{2^b} \frac{2^{b-b_{\text{eff}}}}{\sqrt{12}} \quad , \quad (8.5)$$

$$\sigma(\alpha_{\text{eff}}) = \Delta \frac{2^{b-b_{\text{eff}}}}{\sqrt{12}} \quad (8.6)$$

und

$$\frac{\sigma(\alpha_{\text{eff}})}{\Delta} = \frac{2^{b-b_{\text{eff}}}}{\sqrt{12}} \quad (8.7)$$

das zu erwartende elektronische Rauschen des ADC berechnen. In Abbildung 8.1 ist der Verlauf des Rauschens eines ADC abhängig von seiner Bitbreite dargestellt. Es wurde dabei die Beziehung $b_{\text{noisy}} = b - b_{\text{eff}}$ eingeführt.

Die effektive Bitbreite der ADCs des LTDB beträgt laut Herstellerangaben $b_{\text{eff}} = 11,5\text{bit}$ [58]. Damit ergibt sich das zu erwartende elektronische Rauschen zu

¹ Um eine Verwechslung mit dem Layer Sum Board zu vermeiden wird das Least Signifikant Bit hier mit LSBit abgekürzt.

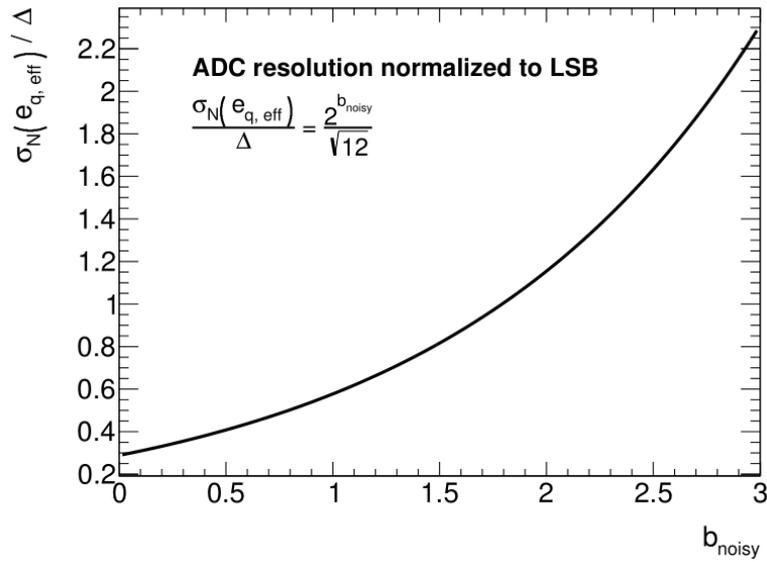


Abbildung 8.1.: Abhängigkeit des technisch bedingten ADC-Rauschens von der effektiven Bitbreite, welche in $b_{\text{noisy}} = b - b_{\text{eff}}$ zusammengefasst wurde. Das zu erwartende elektronische Rauschen wurde auf das Least Signifikant Bit Δ normiert.

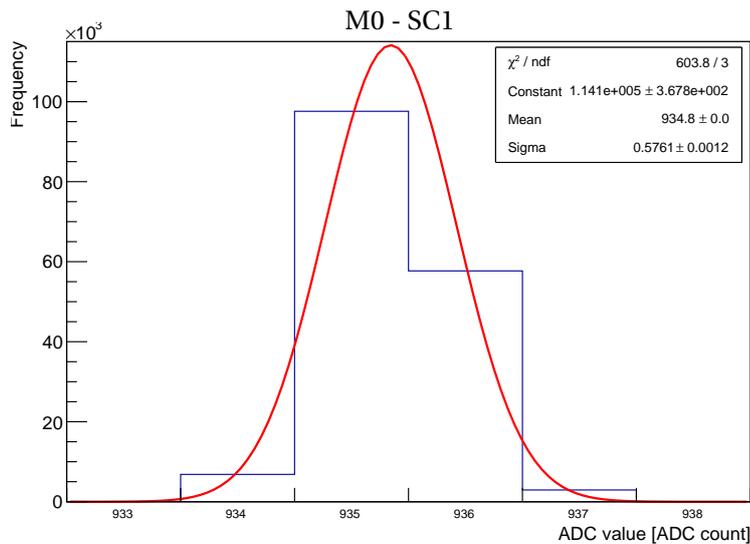


Abbildung 8.2.: Darstellung der gaußschen Verteilung der ADC-Werte am Beispiel der Superzelle SC1 des ML.

$$\frac{\sigma(\alpha_{\text{eff}})}{\Delta} \approx 0,408 \quad . \quad (8.8)$$

Die Daten der ADCs des Demonstrationssystems liegen in 'ADC counts' vor und sind in Abbildung 8.2 beispielhaft für die erste Superzelle SC1 des FEB M0 dargestellt.

Für eine einfachere Handhabung wurde von diesen Daten der Mittelwert abgezogen, womit

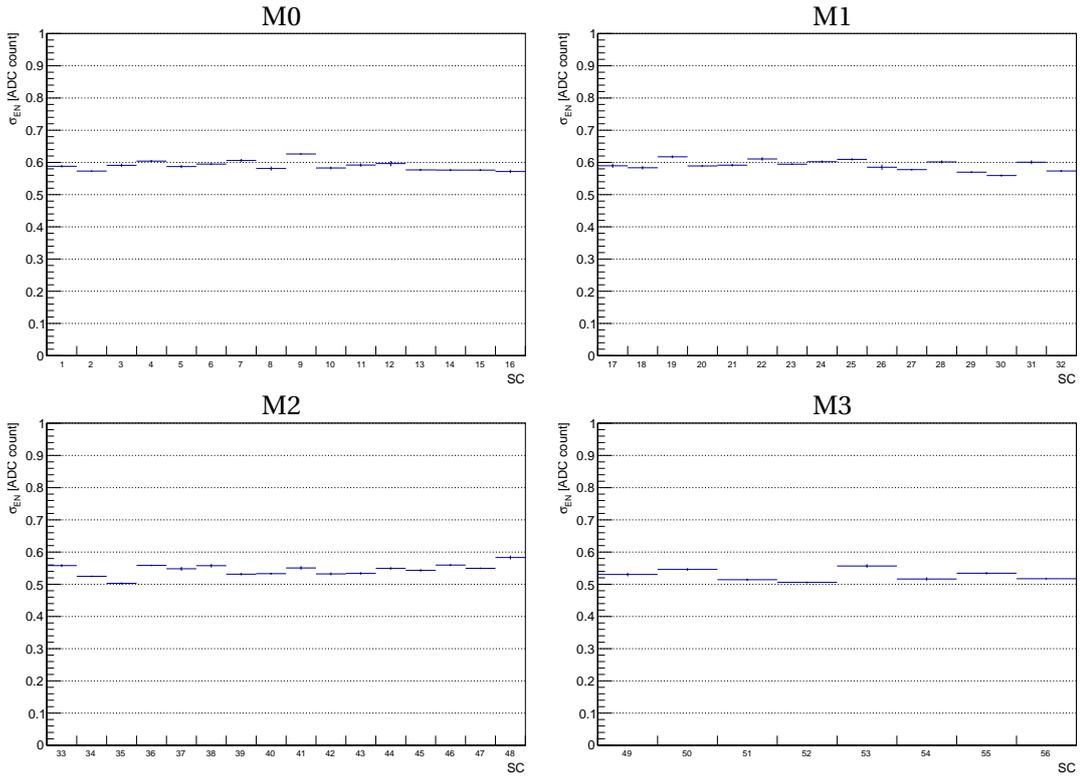


Abbildung 8.3.: Das elektronische Rauschen der vier FEBs über alle Superzellen des ML.

die Daten von einer unterliegenden Schwelle oder auch Pedestal (engl.) bereinigt wurden. Die Standardabweichung 'Sigma' in Abbildung 8.2 stammt aus dem Algorithmus zur Berechnung der Gaußapproximation an die Daten und stellt nicht die via C++-Code berechnete Standardabweichung dar.

Im nächsten Schritt werden die Daten der ADCs des LTDB mit dem erwarteten Wert von 0,408 verglichen. Dazu wird zunächst die Standardabweichung σ_{EN} über

$$\sigma_{EN} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (8.9)$$

berechnet. Dabei ist x_i der i -te ADC-Wert und N die Gesamtanzahl der ADC-Werte der Messreihe. In Abbildung 8.3 ist das gemessene elektronische Rauschen für die vier FEBs des ML dargestellt. Jedes FEB verwaltet einen Teil der Superzellensignale einer Schicht. Im Falle des ML sind 56 Superzellen für den η -Bereich $0 < \eta < 1,4$ für ein ϕ -Segment (s. Tabelle 5.1) von den FEBs auszulesen. Dabei genügt es aufgrund des in ϕ symmetrischen Aufbaus ein ϕ -Segment zu betrachten.

Da im ML die höchste Energiedeposition gegenüber den anderen Schichten zu erwarten ist, sind diese Ergebnisse von vorrangiger Bedeutung und werden hier präsentiert. Das elektronische Rauschen der anderen Schichten kann in Anlage B nachgeschlagen werden.

Der Vergleich zwischen dem berechneten Rauschen von 0,408 aus Gleichung 8.8 und den Ergebnissen aus Abbildung 8.3 führt auf ein im Schnitt um 0,1 bis 0,2 höheres Rauschen als erwartet.

Im Anschluss an das erwartete Rauschen der ADCs soll untersucht werden, welchen Einfluss das elektronische Rauschen der Detektorelektronik vor dem LTDB auf die Rauschsignale der ADCs hat. Dazu sind in Abbildung 8.4 die Daten aus den ADCs (rechts) mit dem Rauschen des Hauptauslesepfades des Detektors (links) gegenübergestellt. Der Hauptauslesepfad des Detektors entspricht in Abbildung 5.4 dem Signalverlauf über die SCAs. Das dargestellte elektronische Rauschen des Detektors stellt dabei lediglich eine Erwartung an das Rauschen der Superzellen dar. Es wurden dabei die Signale der Elementarzellen quadratisch mit sich selbst um die Anzahl der eine Superzelle enthaltenden Elementarzellen addiert. Anhand der Abbildung 8.4 erklärt sich dies wie folgt. Die Superzellen des PS und des ML enthalten je vier Elementarzellen, die des FL und des BL enthalten je acht (s. Tabelle 5.1). Anstatt die Signale direkt quadratisch aufzuaddieren, wurde jedes Signal einer Elementarzelle mit dem zugehörigen 'Superzellefaktor' ($\sqrt{4}$ bzw. $\sqrt{8}$) multipliziert. In Abbildung 8.4 wird das elektronische Rauschen in MeV über η aufgetragen. Die Übersetzung des Rauschens von 'ADC counts' in MeV erfolgt durch ein Schema, welches den Stufen im dynamischen Wertebereich des ADC den entsprechenden Energiewert vermittelt.

Für die ADCs des LTDB sind zwei Schemen bekannt, das 'Et'- und das 'mV'-Schema. Jedes stellt das LSBit nach anderen Kriterien ein. Bei Ersterem wird dem LSBit ein repräsentativer Wert für ein E_T zugewiesen. Dieser ist für jede Schicht des elektromagnetischen Kalorimeters unterschiedlich. Das 'Et'-Schema bildet somit für jede Schicht einen spezifischen E_T -Bereich ab. Dadurch kann es jedoch dazu kommen, dass Signale, die höher als das maximale Bit des ADC liegen, abgeschnitten werden. In der Elektronik des Detektors kann es zudem bereits zu einem ähnlichen Effekt kommen, indem dort erfasste Signale ab einer gewissen Pulshöhe nicht weiter verstärkt werden können. Es kommt zu einer Saturierung, womit die wahre Höhe des Pulses nicht erreicht wird. Durch das 'Et'-Schema wird in so einem Fall das bereits gekürzte Signal nochmals abgeschnitten, was eine Energierekonstruktion um so schwieriger gestaltet. Dieses Problem kann durch das 'mV'-Schema gelöst werden. Hierbei wird der abzubildende E_T -Bereich auf die maximale Pulshöhe der Detektorelektronik skaliert, womit auch der Wert des LSBit steigt und die Sensibilität für niederenergetische Ereignisse sinkt. Zusätzlich ist der Wertebereich von E_T in diesem Schema nicht mehr an die einzelnen Schichten gebunden, sondern wird für jede Superzelle individuell festgelegt.

Da es sich bei der Bestimmung des Rauschens ausschließlich um geringe Signalpegel handelt, wurde hierfür das 'Et'-Schema verwendet.

In Abbildung 8.4 lässt sich erkennen, dass das elektronische Rauschen des Detektors bis zu einer Pseudorapidität von $\eta = 1,3$ vernachlässigbar klein gegenüber dem der ADCs ist. In den Ausläufen nähern sich die Werte des FL und des ML dem Rauschen des Detektors an. Von allen Schichten weicht lediglich das PS stark von der Tendenz des Verlaufs der Abschätzung durch das Detektorrauschen ab.

Anhand des höheren Rauschens der ADCs gilt es die Diskrepanz von 0,1 bis 0,2 zwischen dem eingangs berechneten ADC-Rauschen und dem gemessenen zu untersuchen. Hierfür kommen zwei Quellen infrage. Es könnte die effektive Bitbreite der ADCs geringer sein als die vom Hersteller angegeben 11,5 bit. In diesem Fall würde eine neue effektive Bitbreite von $b_{\text{eff}} \approx 11$ bit das erwartete Rauschen auf $\frac{\sigma(\alpha_{\text{eff}})}{\Delta} = 0,577$ anheben, was dem gemessenen

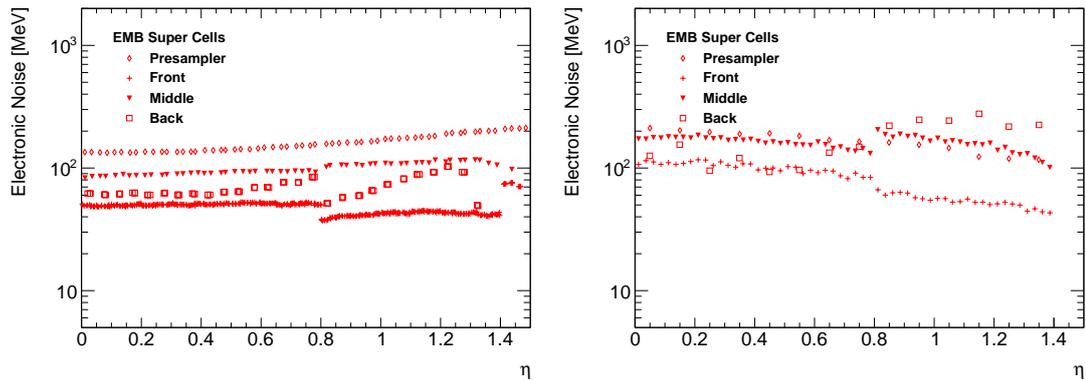


Abbildung 8.4.: Gegenüberstellung des elektronischen Rauschens des Detektors ohne Upgrades [57] (links) und der ADCs des LTDB (rechts). Dabei wird das in MeV übersetzte Rauschsignal über der Pseudorapidität η aufgetragen. Der Plot des Detektorrauschens stammt aus einer früheren Datennahme und spiegelt das zu erwartende Rauschen der Elementarzellen als Superzellen wider.

Bereich entspricht. Eine weitere Erklärung wäre ein möglicher Einfluss des Triggersignalpfades auf das elektronische Rauschen. Nach Abbildung 5.4 werden die Superzellensignale im LTDB durch eine eigene Signalformung, welche verschieden zur auf Elementarzellen basierenden Signalformung des FEB funktioniert, in die bipolare Form gebracht. Beide Effekte könnten einen Anteil an dem letztlich erhöhten elektronischen Rauschen der ADCs haben.

8.2. Autokorrelation

Zur Verdeutlichung der Korrelation: Eine Variable a ist korreliert zu b , falls zwischen ihnen ein starker Zusammenhang besteht (steigt b , steigt auch a). Es ist damit allerdings nicht darauf zu schließen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen beiden Variablen besteht. Oft begünstigt eine dritte oder mehrere weitere Variablen a und b .

Unter der Antikorrelation ist der nach obigem Beispiel gegenläufige Zusammenhang zu verstehen (steigt b , fällt a).

Die Autokorrelation $R_{xx}(\tau)$ dient der Bestimmung der Selbstabhängigkeit eines Signals, d.h. inwieweit ein Signal $x(t)$ zur Zeit t mit seinem früheren Signal $x(t - \tau)$ mit dem Versatz τ in Beziehung steht. Die zeitversetzten Signale können unkorreliert ($R_{xx} = 0$), absolut korreliert ($R_{xx} = 1$) und absolut antikorreliert ($R_{xx} = -1$) sein. Die Autokorrelation schwankt somit i.d.R. um null und weicht allein im Falle nicht-zufälliger Muster davon ab.

In diesem Fall handelt es sich um eine nicht-kontinuierliche Zeitreihe der Werte, weshalb das Signal umgeschrieben wird als Wert $x(k - n)$ zum Index k mit dem Versatz n . Die Autokorrelation wird somit über

$$R_{xx}(n) = \frac{1}{N} \frac{\sum_{k=1}^N x(k) x(k-n)}{\sum_{k=1}^N x(k)^2} , \quad (8.10)$$

wobei N die Anzahl der Wertepaare ist, berechnet. Der Versatz n wird auch als 'Lag' (engl.) bezeichnet. Die Summe im Nenner der Gleichung 8.10 entspricht der Summe im Zähler für den Fall $n = 0$ und dient als Normierung.

Die Ergebnisse der Autokorrelation sind in Abbildung 8.5 dargestellt. Dabei wurde die Autokorrelation für die ADCs des LTDB (links) auf der Grundlage der Werte des elektronischen Rauschens aus Abschnitt 8.1 errechnet. Die Werte der Detektorauslese (rechts) entstammen einer Datenbank und wurden bereits in der entsprechenden Datei hinterlegt. In allen Plots wird der Versatz über die einzelnen Superzellen aufgetragen. Die Farbskala stellt den Autokorrelationsgrad dar. Das dargestellte Beispiel steht für das ML.

In Abbildung 8.5 ist deutlich zu erkennen, dass die Abweichungen von null in der Detektorauslese nicht in den Werten der ADCs wiederzufinden ist. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen aus Abschnitt 8.1, wonach das elektronische Rauschen des Detektors keinen nennenswerten Einfluss auf das Rauschen der ADCs ausübt. Die Signalpegel reichen nicht an das LSBit heran und werden somit bei der Konvertierung abgeschnitten.

Die fehlende Autokorrelation zieht sich entsprechend der Daten des elektronischen Rauschens der ADCs durch alle Schichten, weshalb die übrigen Werte hier nicht weiter dargestellt werden. Die weißen Streifen in der Darstellung ergeben sich aufgrund von Lücken im Datensatz der Detektorauslese.

8. Analyse des Rauschens des Demonstrationssystems

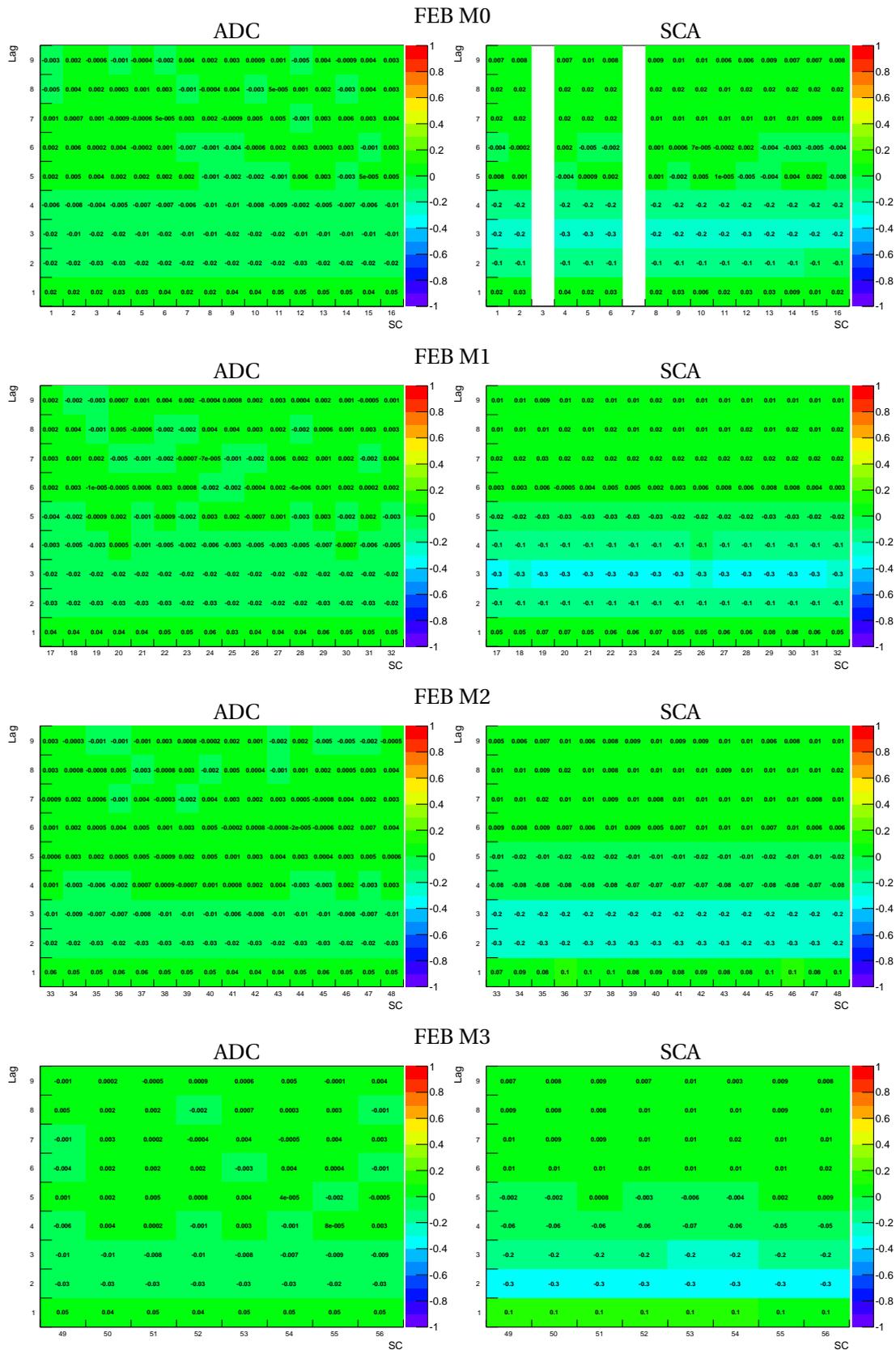


Abbildung 8.5.: Gegenüberstellung der Autokorrelationsdaten der Detektorauslese (SCA) und des LTDB (ADC) über alle Superzellen des ML.

8.3. Kohärentes Rauschen

In diesem Abschnitt soll das kohärente Rauschen aus den ADC-Werten der FEBs der verschiedenen Schichten untersucht werden. Das kohärente Rauschen beschreibt inwieweit alle Kanäle eines FEB korreliert sind und stellt damit einen Anteil des korrelierten Rauschens dar. Die Korrelation eines Kanals zu einem anderen wird als Kreuzkorrelation bezeichnet und ist ebenfalls Teil des korrelierten Rauschens. Dabei wird hier lediglich die Kreuzkorrelation ohne zeitlichen Versatz betrachtet. Die Korrelationen der Kanäle eines FEB wird durch die Matrix der Korrelationskoeffizienten ρ_{xy} dargestellt. Diese werden über

$$\rho_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (8.11)$$

berechnet, wobei N die Anzahl der Kanäle eines FEB ist und σ_x und σ_y nach Gleichung 8.9 bezogen auf den jeweiligen Kanal bestimmt werden. Dabei stellt ein Kanal ein Superzellsignal dar.

Es werden zwei Methoden für die Berechnung des kohärenten Rauschens vorgestellt. Beide basieren auf der Annahme, dass keine Kreuzkorrelation vorhanden ist. Da ein geringer Beitrag der Kreuzkorrelation jedoch nicht zu vermeiden ist, stellen beide Methoden somit eine Abschätzung dar.

Die genannten Anteile des korrelierten Rauschens spiegeln sich in den Korrelationskoeffizienten auf unterschiedliche Weise wider. Während das kohärente Rauschen alle Kanäle gleichermaßen betrifft, stellt die Kreuzkorrelation lediglich den Bezug zwischen zwei Kanälen her. Es ist somit zu erwarten, dass bei geringen Werten für die Korrelationskoeffizienten aller Kanäle die Kreuzkorrelation relativ gering und die Annahme für die Abschätzung des kohärenten Rauschens somit erfüllt ist.

In Abbildung 8.6 sind die Ergebnisse für die vier FEBs des ML dargestellt. Die restlichen Werte befinden sich in Anlage C.

Alle dargestellten FEBs zeigen keine extremen Schwankungen von null an, wobei die rote Diagonale die absolute Korrelation des Kanals x mit sich selbst darstellt. Lediglich folgende Bereiche weisen eine gehäufte bis zu zehnpromzentige Korrelation auf.

1. **FEB M0:** Kanäle 1–8 zu 1–8
2. **FEB M1:** Kanäle 9–16 zu 9–16
3. **FEB M2:** Kanäle 9–16 zu 9–16

Die Auffälligkeit, dass sich die FEBs in die Regionen 1–8 und 9–16 aufteilen liegt an den Spezifikationen der ADCs. Diese können lediglich acht Kanäle gleichzeitig bearbeiten [58]. Die geringen Werte der Korrelationskoeffizienten erfüllen somit die Annahme einer geringen Kreuzkorrelation.

Die erste Methode benötigt eine weitere Annahme, welche sich auf das Niveau des kohärenten Rauschens je Kanal bezieht. Ist dieses Niveaus über alle Kanäle annähernd gleich, könnte

8. Analyse des Rauschens des Demonstrationssystems

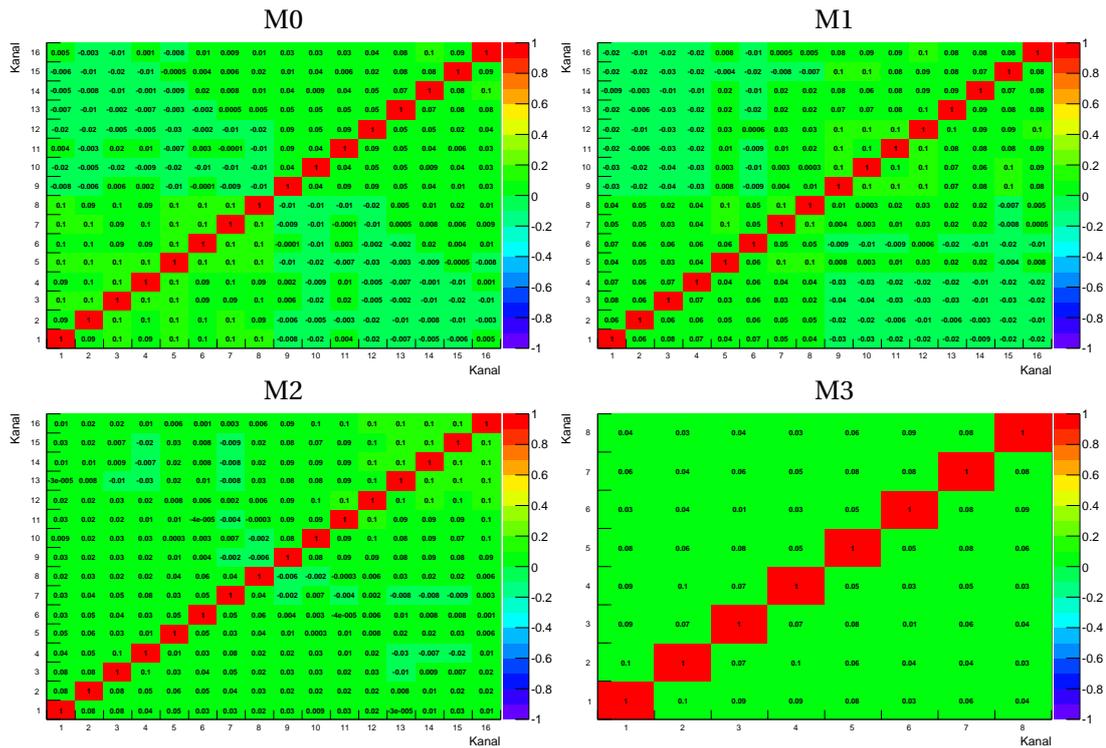


Abbildung 8.6.: Die Korrelationskoeffizienten der vier FEBs aufgetragen über alle Superzellen des ML. Jedes Superzellensignal wird durch einen Kanal repräsentiert.

dieser Anteil im korrelierten Rauschen durch die Differenz zweier Kanäle herausgefiltert werden. Es ist jedoch auch möglich, dass die Kanäle in dem Anteil des kohärenten Rauschens zueinander überproportional reagieren, womit die Niveaus zu verschiedenen wären. Dies wird anhand der mittleren relativen Korrelation ρ_x eines Kanals x zu allen anderen überprüft. Dazu wird der Mittelwert über die Korrelationskoeffizienten eines Kanals gebildet, wobei der betragsmäßig ausgedr. abgespart wird (s. Gleichung 8.12). Damit auftretende Antikorrelationen nicht verfälschend auf den Mittelwert einwirken, wird der Betrag der Werte genommen.

$$\rho_x = \frac{1}{N_{\text{Ch}}} \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}}^{N_{\text{Ch}}} |\rho_{xy}| \quad (8.12)$$

Hierbei ist N_{Ch} die Anzahl aller Kanäle eines FEB vermindert um eins. Repräsentativ sind in Abbildung 8.7 die Werte für ρ_x der ADCs des LTDB für den ML dargestellt. Die Werte der übrigen Schichten können in Anlage C nachgeschlagen werden.

Entsprechend den größeren Korrelationskoeffizienten aus den vormalig genannten Bereichen von den Kanälen der drei FEBs M0, M1 und M2 macht sich das Schema der zwei Regionen 1–8 und 9–16 auch hier bemerkbar. Theoretisch wäre nach Gleichung 8.12 ein Wertebereich von $0 \leq \rho_x \leq 1$ möglich. Da die Werte jedoch kaum über zwei Prozent reichen, wurde der dargestellte Bereich verkürzt. In den vier FEBs des ML kommt es zu keinen anomalen Verhältnissen. Lediglich in den Bereichen FEB M0 9–16 und FEB M2 1–8 erscheint die mittlere

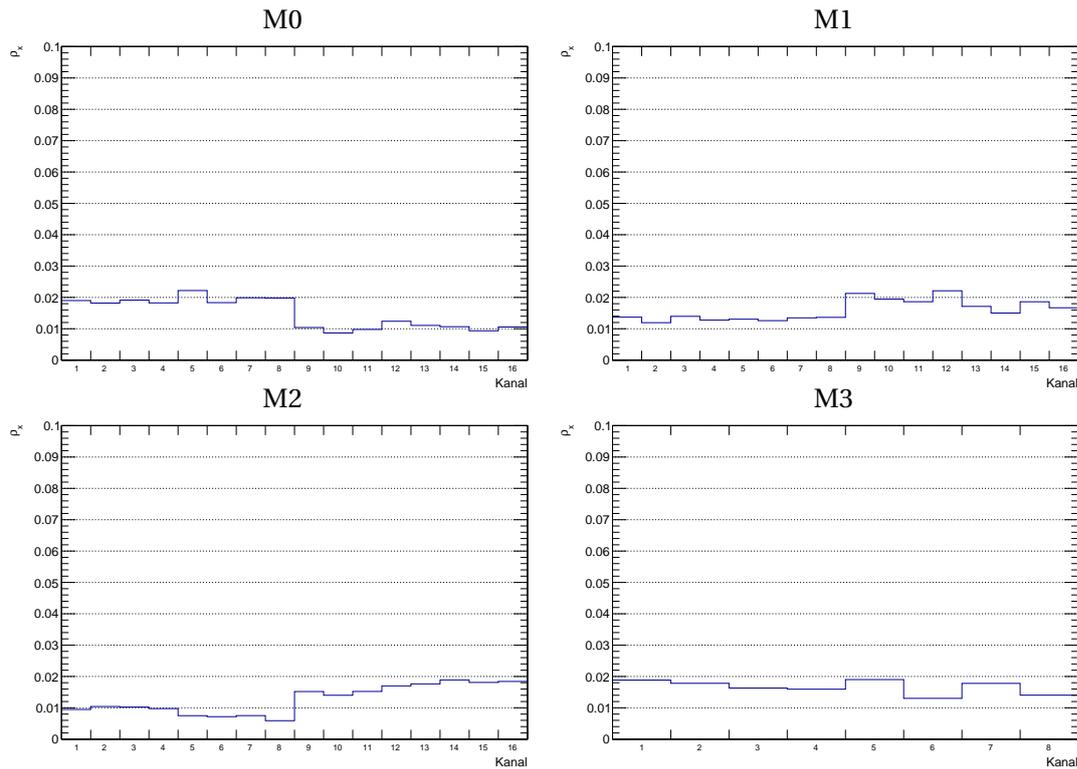


Abbildung 8.7.: Die mittlere relative Korrelation ρ_x der vier FEBs aufgetragen über alle Superzellen des ML. Die ermittelten Abweichungen liegen unterhalb der Darstellungsgrenze.

relative Korrelation gegenüber den restlichen Kanälen des jeweiligen FEB um die Hälfte vermindert. Da sich dieser Effekt auf die Kanäle des jeweiligen ADC beschränken, bezieht sich die eingangs erwähnte Differenz zwischen zwei Kanälen ausschließlich auf Werte für ρ_x des gleichen Niveaus. Somit kann die zweite Annahme bei den entsprechenden Bereichen eines FEB als erfüllt angesehen werden.

Für die Bestimmung des kohärenten Rauschens $\rho_{\text{Alt}}^{\text{CNF}}$ nach der ersten Methode werden zunächst die ADC-Werte x_i der einzelnen Kanäle jedes Zeitpunkts auf zwei verschiedene Weisen zusammengefasst (s. Gleichung 8.13 und 8.14).

$$x_{\text{ord}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{Ch}}} x_i \quad (8.13)$$

$$x_{\text{alt}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{Ch}}} (-1)^i x_i \quad (8.14)$$

Im Anschluss werden die Varianzen σ_{ord}^2 und σ_{alt}^2 über diese Werte aus dem Quadrat der Standardabweichung nach Gleichung 8.9 ermittelt. Dabei enthält die Varianz σ_{ord}^2 das kohärente und das inkohärente Rauschen. Mit der alternierenden Summe in Gleichung 8.14 über alle Kanäle wird nach der Annahme äquivalenter Anteile des kohärenten Rauschens je Kanal der kohärente Anteil aus den ADC-Werten abgezogen. Die Varianz σ_{alt}^2 enthält somit einzig den inkohärenten Anteil des Rauschens des FEB. Dieser kann somit über Gleichung 8.15

bestimmt werden. Das kohärente Rauschen resultiert aus der Differenz von σ_{ord}^2 und σ_{alt}^2 nach Gleichung 8.16.

$$\sigma_{\text{inc}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{alt}}^2}{N_{\text{Ch}}}} \quad (8.15)$$

$$\sigma_{\text{coh}} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{ord}}^2 - \sigma_{\text{alt}}^2}}{N_{\text{Ch}}} \quad (8.16)$$

Das kohärente Rauschen wird i.A. als Bruchteil mit Bezug auf das gesamte Rauschen bzw. als Coherent Noise Fraction (CNF) angegeben. Das inkohärente und kohärente Rauschen wurden auf die Zahl der Kanäle N_{Ch} normiert, womit das CNF $\rho_{\text{Alt}}^{\text{CNF}}$ aus Gleichung 8.17 einem mittleren kohärenten Anteil des Rauschens pro Kanal entspricht.

$$\rho_{\text{Alt}}^{\text{CNF}} = \frac{\sigma_{\text{coh}}}{\sqrt{\sigma_{\text{inc}}^2 + \sigma_{\text{coh}}^2}} \quad (8.17)$$

Die zweite Methode zur Berechnung des kohärenten Rauschens stützt sich allein auf die Annahme, dass es keine Kreuzkorrelation zwischen den Kanälen eines FEB gibt. Um dieses kohärente Rauschen $\rho_{\text{Mean}}^{\text{CNF}}$ zu ermitteln wird ähnlich der ersten Methode von dem gesamten Rauschen σ_{ord}^2 der betrachtete inkohärente Anteil $\langle \sigma^2 \rangle_{\text{Ch}}$ abgezogen (s. Gleichung 8.18). Dabei stellt N_{Ch} wie vormals die Anzahl der Kanäle eines FEB dar. Es ergibt sich analog zur ersten Methode ein mittlerer kohärenter Anteil des Rauschens pro Kanal.

$$\rho_{\text{Mean}}^{\text{CNF}} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{ord}}^2 - N_{\text{Ch}} \langle \sigma^2 \rangle_{\text{Ch}}}}{N_{\text{Ch}} \langle \sigma^2 \rangle_{\text{Ch}}} \quad (8.18)$$

Der Term $\langle \sigma^2 \rangle_{\text{Ch}}$ ist der Mittelwert über die Varianzen der Kanäle eines FEB und wird nach Gleichung 8.19 berechnet. Damit repräsentiert er das mittlere inkohärente Rauschen des FEB pro Kanal. Da in σ_{ord}^2 die ADC-Werte aller Kanäle parallel zusammengefasst wurden, muss $\langle \sigma^2 \rangle_{\text{Ch}}$ mit N_{Ch} skaliert werden.

$$\langle \sigma^2 \rangle_{\text{Ch}} = \frac{1}{N_{\text{Ch}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Ch}}} \sigma_i^2 \quad (8.19)$$

Der Nenner aus Gleichung 8.18 wird über den Mittelwert der Standardabweichungen aller Kanäle eines FEB berechnet (s. Gleichung 8.20) und normiert das kohärente Rauschen auf das mittlere Rauschen des FEB.

$$\langle \sigma \rangle_{\text{Ch}} = \frac{1}{N_{\text{Ch}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Ch}}} \sigma_i \quad (8.20)$$

Bei dieser Methode ist es nicht gesichert, dass aufgrund der Schwankungen von σ_{ord}^2 und $\langle \sigma^2 \rangle_{\text{Ch}}$ der Zähler immer reell ist. Für den Fall imaginärer Werte ist entweder die Fluktuation beider Terme die Ursache oder der Anteil des kohärenten Rauschens ist sehr gering bzw. gar nicht vorhanden. Der Effekt der Fluktuationen, welcher auf einer zu großen statistischen Messunsicherheit basiert, kann mittels einer höheren Statistik ausgeglichen werden.

Anhand beider Methoden zeigt sich, dass das kohärente Rauschen nur schwer erfasst werden kann. Die Ursache dieses Rauschens kann in sämtlichen spannungs- und strommanipulierenden Elementen, welche einen systemweiten bzw. das ganze Board betreffenden Einfluss ausüben, liegen. Der Fokus liegt daher lediglich darin diesen Anteil zu kennen. Dazu geben die Werte aus beiden Methoden einen Hinweis auf den wahren Anteil des kohärenten Rauschens. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.8 gegenübergestellt.

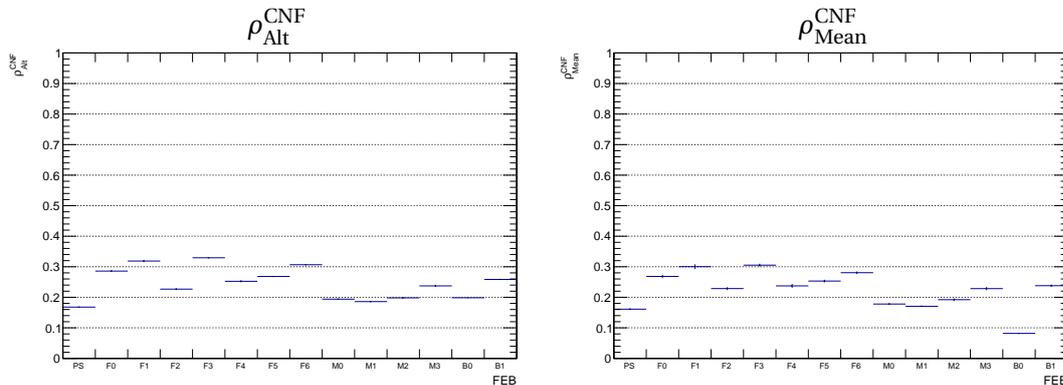


Abbildung 8.8.: Gegenüberstellung der nach verschiedenen Methoden berechneten Anteile des kohärenten Rauschens der FEBs.

Den Erwartungen entsprechend ergeben beide Methoden ähnliche Werte. Die Werte für das FEB B0 sind dabei nicht zu berücksichtigen, da es bei der Datennahme in diesem Fall zu einer unbekanntem Störung gekommen ist.

Mit Schwankungen um 20 bis 30 Prozent ist der ermittelte Anteil des kohärenten Rauschens ungewöhnlich hoch. Auffällig sind außerdem die zum Teil hohen Kontraste zwischen dem kohärenten Rauschen der FEBs des FL. Eventuell könnten die Daten, da es bereits zu Störungen für das FEB B0 gekommen ist, fehlerhaft sein. Eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse könnte durch eine erneute Datennahme und eine Überprüfung der Elektronik des LTDB erreicht werden.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Phase-I Upgrade des ATLAS Detektors und der damit verbundenen Erhöhung der Granularität des elektromagnetischen Kalorimeters waren u.a. zwei Aspekte von Bedeutung. Diese waren die Digitalisierung der Detektorpulse noch an der FE Elektronik und die Energie-rekonstruktion anhand der digitalisierten Pulse mithilfe eines modularen Systems, welches auch über das Ethernet gewartet werden soll.

Die Ziele dieser Masterarbeit basieren auf eben jenen beiden Aspekten. Zunächst sollte untersucht werden wie die IPbus Firmware und die dazugehörige softwareseitige Ansprechung μ HAL konstruiert ist. Im Zuge dessen sollte die Kompatibilität dieser mit der neuartigen Hardware überprüft werden. Darüber hinaus wurden Modifikationen in Form von eigenen Modulen und die dazugehörigen Testumgebungen erstellt.

Anhand der Daten mehrerer kollaborierender Gruppen sollte das Rauschen der ADCs des neuen Triggerdatenpfades analysiert werden. Es wurden umfangreiche C++-Codes erstellt, um die Daten zu extrahieren, zu verarbeiten und darzustellen.

Für die Untersuchung der IPbus Firmware und der μ HAL Software wurden zunächst die benötigten technischen Vorkenntnisse erarbeitet und erläutert wie der Aufbau eines seriellen Ethernetpaketes, eines FPGA Chips sowie des Testboards. Es wurde ein Einblick in die Anwendung der μ HAL Software gegeben und gezeigt wie ein Testpaket versendet und abgefangen wurde. Anhand dieses Paketes konnte die Struktur des IPbus-Protokolls nebst seinen Spezifikationen verdeutlicht werden. Im Anschluss wurden zwei Module vorgestellt, der Reset manager und der Wishbone-zu-AMM Konverter, welche im Zuge der Anknüpfung des IPbus controllers mit dem modularen System des FPGA, der ABBA Firmware, erstellt werden sollten.

Im Zuge der Analyse der elektronischen Rauschens des Demonstrationssystems wurde anhand der Werte des elektronischen Rauschens der ADCs des LTDB gezeigt, dass das gemessene Rauschen einerseits nicht und in einigen η -Bereichen nur marginal vom elektronischen Rauschen der Detektorelektronik beeinflusst wird. Andererseits konnte geschlussfolgert werden, dass das ADC-Rauschen nach Einbezug technischer Fehler dem zu erwartenden Niveau des elektronischen Rauschens entspricht.

Diese Ergebnisse hatten zur Folge, dass die Autokorrelation der Superzellsignale des Detektors nicht in den Daten der ADCs wiederzufinden war und sich mit der Erwartung deckte.

Schließlich konnte über die Korrelationskoeffizienten gezeigt werden, dass der Anteil der Kreuzkorrelation im korrelierten Rauschen relativ gering ist. Die aus den Korrelationskoeffizienten ermittelte mittlere relative Korrelation erwies ein innerhalb der Kanäle eines ADC gleichbleibendes Niveau des kohärenten Rauschens. Mit diesen Vorbetrachtungen waren die Voraussetzungen gegeben über zwei verschiedene Methoden den Anteil des kohärenten Rauschens abzuschätzen. Beide Methoden kamen zu ähnlichen Ergebnissen, wonach das kohärente Rauschen mit 20 bis 30 Prozent einen ungewöhnlich hohen Anteil des korrelierten Rauschens einnimmt. Eine sichere Interpretation ist lediglich mit weiteren Untersuchungen möglich.

Die weiteren Aufgaben liegen darin die IPbus Firmware und die μ HAL Software bei bestehender Ethernetverbindung ausgiebig zu testen und im nächsten Schritt die mit dem IPbus controller verbundenen Module anzusprechen.

Es gilt weitere Untersuchungen zur Datennahme des neuen Triggerdatenpfades anzustellen, da im Juni diesen Jahres bereits der Run 2 und damit die Erprobung des Demonstrationsystems angelaufen ist. Diese Daten können vergleichend mit dem bestehenden analogen Datenpfad genutzt werden, um zu erkennen, ob die neue Elektronik fehlerfrei und mit allen Verbesserungen funktioniert.

A. VHDL-Code der konstruierten Module

Dargestellt sind die in Abschnitt 7.4.3 diskutierten Module sowie benötigte nicht-allgemeine VHDL-Bibliotheken.

```
1  library IEEE;
2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
3
4  package ipbus is
5
6  -- The signals going from master to slaves
7  type ipb_wbus is
8  record
9  ipb_addr  : std_logic_vector(31 downto 0);
10 ipb_wdata : std_logic_vector(31 downto 0);
11 ipb_strobe: std_logic;
12 ipb_write : std_logic;
13 end record;
14
15 type ipb_wbus_array is array(natural range <>) of ipb_wbus;
16
17 -- The signals going from slaves to master
18 type ipb_rbus is
19 record
20 ipb_rdata : std_logic_vector(31 downto 0);
21 ipb_ack   : std_logic;
22 ipb_err   : std_logic;
23 end record;
24
25 type ipb_rbus_array is array(natural range <>) of ipb_rbus;
26
27 constant IPB_RBUS_NULL: ipb_rbus := ((others => '0'), '0', '0');
28 constant IPB_WBUS_NULL: ipb_wbus := ((others => '0'), (others => '0'), '0', '0');
29
30 -- For top-level generics
31
32 type ipb_mac_cfg is (EXTERNAL, INTERNAL);
33 type ipb_ip_cfg is (EXTERNAL, INTERNAL);
34
35 end ipbus;
36
```

Codeabschnitt A.1: VHDL-Code der parallelen Form eines IPbus-Paketes im Wishbone Interface

Das Code-Paket 'ipbus' (s. Codeabschnitt A.1) entstammt der IPbus Firmware.

Der Codeabschnitt A.1 wird mit Zeile 5 'use work.ipbus.all;' aus Codeabschnitt A.2 geladen.

```
1  library ieee;
2  use ieee.std_logic_1164.all;
3  use ieee.numeric_std.all;
4
5  use work.ipbus.all;
6
7  entity ipbus_reset_manager is
8      generic(
9          NSLV: natural := 0
10     );
11     port(
12         clk      : in  std_logic;
13         reset    : in  std_logic;
14         ipbus_in : in  ipb_wbus;
15         ipbus_out : out ipb_rbus;
16         rst_array : out std_logic_vector(NSLV - 1 downto 1)
17     );
18
19 end ipbus_reset_manager;
20
21 architecture rtl of ipbus_reset_manager is
22
23     signal sel : integer := 0;
24     signal ack : std_logic := '0';
25     signal buff : std_logic_vector(32 downto 1) := (others => '0');
26
27 begin
28
29     process(clk)
30     begin
31         if to_integer(unsigned(buff)) /= 0 then
32             buff <= (others => '0');
33         else
34             if reset = '1' then
35                 buff <= (others => '1');
36             elsif ipbus_in.ipb_strobe = '1' and ipbus_in.ipb_write = '1' then
37                 buff <= ipbus_in.ipb_wdata;
38             end if;
39         end if;
40
41         ipbus_out.ipb_rdata <= buff;
42         ack <= ipbus_in.ipb_strobe and not ack;
43     end process;
44
45     ipbus_out.ipb_ack <= ack;
46     ipbus_out.ipb_err <= '0';
47
48     rst_array <= buff(NSLV - 1 downto 1);
49
50 end rtl;
51
```

Codeabschnitt A.2: VHDL-Code des Reset managers

```

1  library ieee;
2  use ieee.std_logic_1164.all;
3
4  package amm is
5
6  -- master to slaves
7  type amm_wbus is
8  record
9  address   : std_logic_vector(31 downto 0);
10 writedata : std_logic_vector(31 downto 0);
11 write     : std_logic;
12 read      : std_logic;
13 end record;
14
15 type amm_wbus_array is array(natural range <>) of amm_wbus;
16
17 -- slaves to master
18 type amm_rbus is
19 record
20 readdata   : std_logic_vector(31 downto 0);
21 readdatavalid : std_logic;
22 end record;
23
24 type amm_rbus_array is array(natural range <>) of amm_rbus;
25
26 constant AMM_RBUS_NULL: amm_rbus := ((others => '0'), '0');
27 constant AMM_WBUS_NULL: amm_wbus := ((others => '0'), (others => '0'), '0', '0');
28
29 end amm;
30

```

Codeabschnitt A.3: VHDL-Code der parallelen Form eines IPbus-Paketes im Avalon Memory-Mapped Interface

Der Codeabschnitt A.3 wird mit Zeile 5 'use work.amm.all;' aus Codeabschnitt A.4 geladen.

```

1  library ieee;
2  use ieee.std_logic_1164.all;
3
4  use work.ipbus.all;
5  use work.amm.all;
6
7  entity ipbus_wb_amm is
8      generic(
9          NSLV: positive
10     );
11     port(
12         -- fabric-sided
13         ipb_to_slaves : in  ipb_wbus_array(NSLV - 1 downto 0);
14         ipb_from_slaves : out ipb_rbus_array(NSLV - 1 downto 0);
15
16         -- slave-sided
17         amm_from_slaves : in  amm_rbus_array(NSLV - 1 downto 0);
18         amm_to_slaves : out amm_wbus_array(NSLV - 1 downto 0)
19     );
20
21 end ipbus_wb_amm;
22
23 architecture rtl of ipbus_wb_amm is
24 begin
25
26     con_gen: for i in NSLV-1 downto 0 generate
27     begin
28
29         amm_to_slaves(i).address    <= ipb_to_slaves(i).ipb_addr;
30         amm_to_slaves(i).writedata  <= ipb_to_slaves(i).ipb_wdata;
31         amm_to_slaves(i).write     <= ipb_to_slaves(i).ipb_strobe and
32                                     ipb_to_slaves(i).ipb_write;
33         amm_to_slaves(i).read      <= ipb_to_slaves(i).ipb_strobe and not
34                                     ipb_to_slaves(i).ipb_write;
35
36         ipb_from_slaves(i).ipb_rdata <= amm_from_slaves(i).readdata;
37         ipb_from_slaves(i).ipb_ack  <= amm_from_slaves(i).readdatavalid;
38         ipb_from_slaves(i).ipb_err  <= '0';
39
40     end generate;
41
42 end rtl;
43

```

Codeabschnitt A.4: VHDL-Code des Wishbone zu Avalon Memory-Mapped Interfacekonverters

B. Elektronisches Rauschen des Demonstrationssystems

Aufgrund einer unbekannten Störung in der Datennahme sind die Werte des elektronischen Rauschens für das FEB B0 nicht repräsentativ.

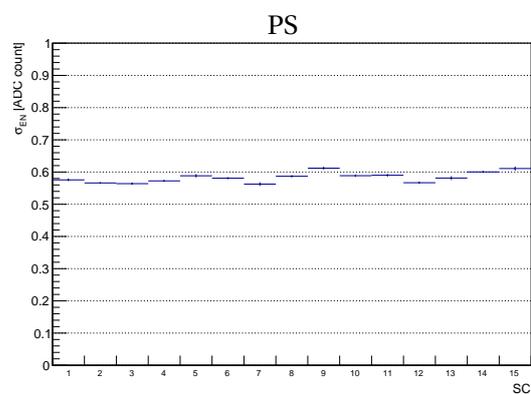


Abbildung B.1.: Das elektronische Rauschen über alle Superzellen des PS.

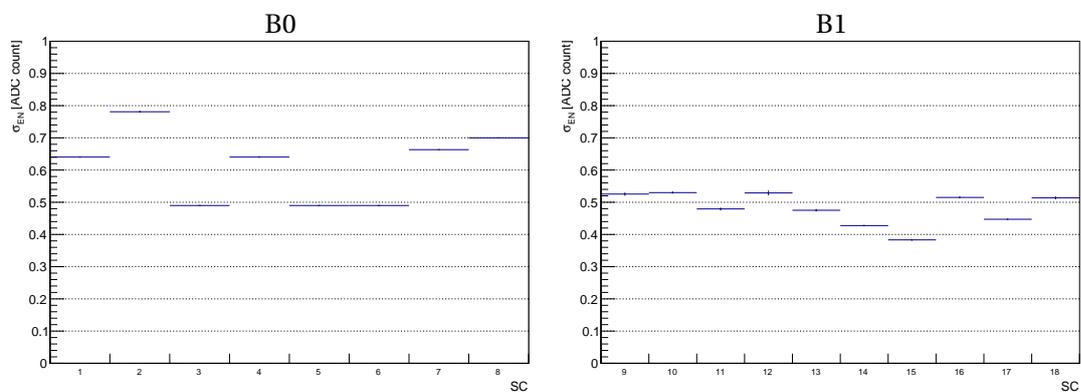


Abbildung B.2.: Das elektronische Rauschen der zwei FEBs über alle Superzellen des BL.

B. Elektronisches Rauschen des Demonstrationssystems

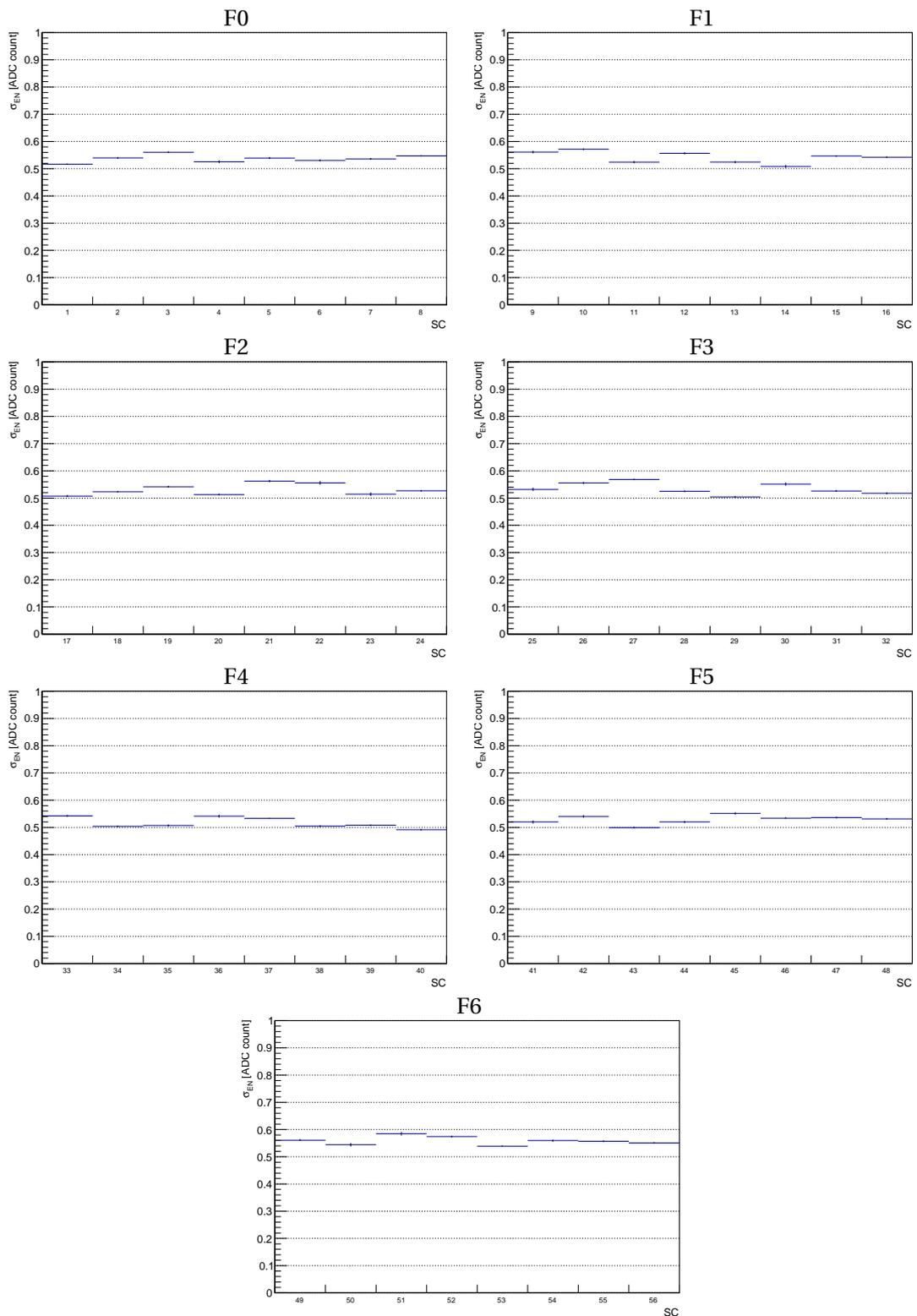


Abbildung B.3.: Das elektronische Rauschen der sieben FEBS über alle Superzellen des FL.

C. Kohärentes Rauschen des Demonstrationssystems

Da die Werte für die Korrelationskoeffizienten und das kohärente Rauschen aus den ADC-Werten berechnet werden, sind diese aufgrund einer technischen Störung in der Datennahme für das FEB B0 nicht repräsentativ.

Die in Abschnitt 8.3 erwähnten Bereiche von acht Kanälen pro ADC sind auf dem FEB B1 in die Kanäle 1–6 und 7–10 für je einen ADC unterteilt.

Korrelationskoeffizienten

Nachfolgend sind die Ergebnisse der berechneten Korrelationskoeffizienten der übrigen Schichten in der Reihenfolge PS, BL und FL dargestellt.

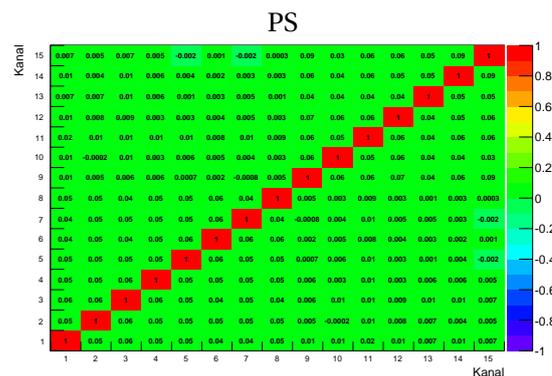


Abbildung C.1.: Die Korrelationskoeffizienten des FEB über alle Superzellen des PS. Jedes Superzellensignal wird durch einen Kanal repräsentiert.

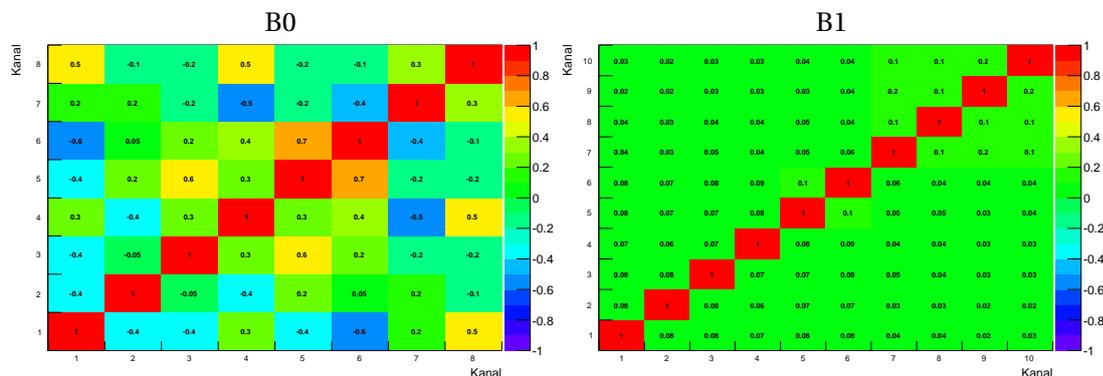


Abbildung C.2.: Die Korrelationskoeffizienten der zwei FEBs über alle Superzellen des BL. Jedes Superzellensignal wird durch einen Kanal repräsentiert.

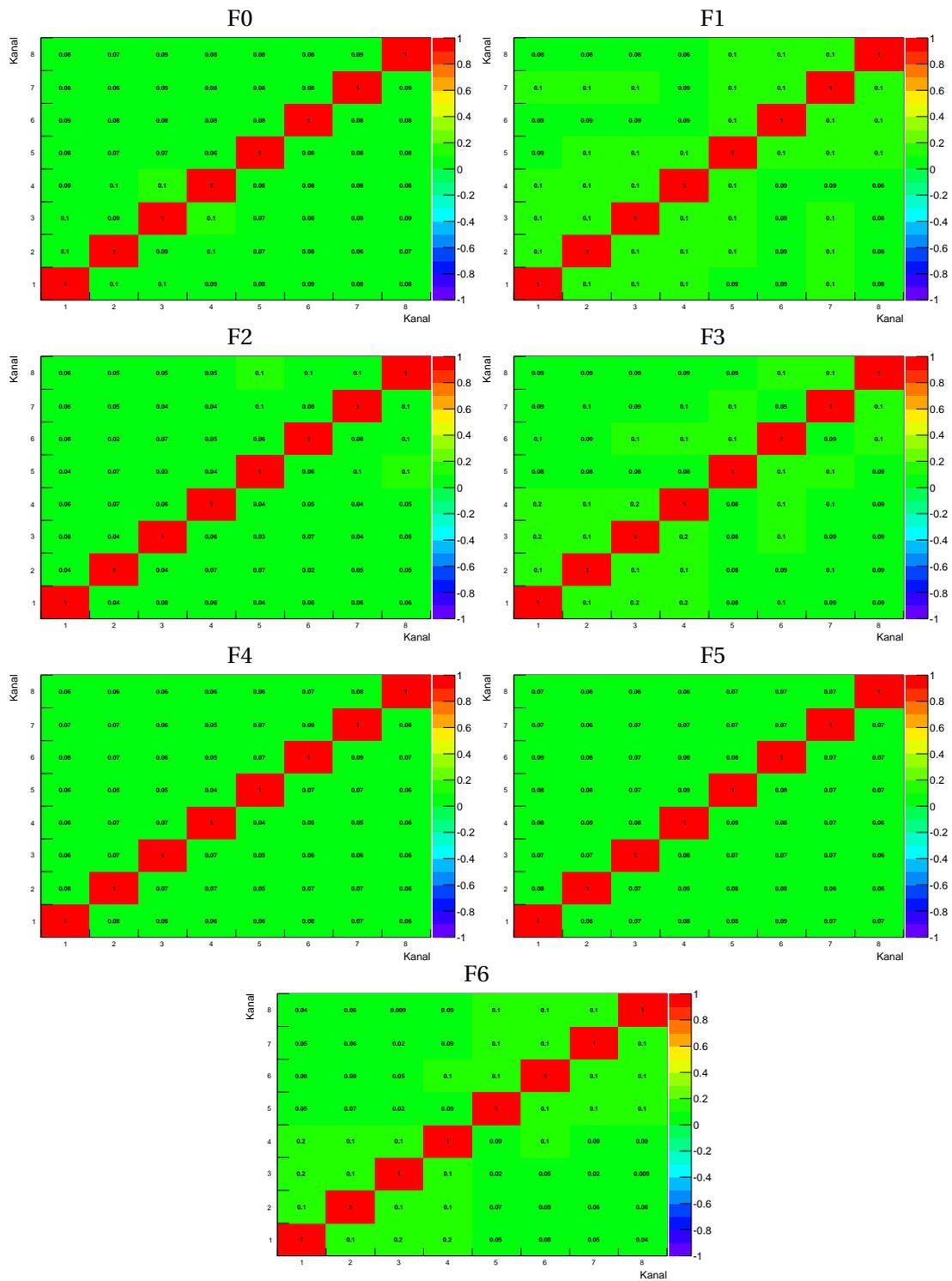


Abbildung C.3.: Die Korrelationskoeffizienten der sieben FEBs über alle Superzellen des FL. Jedes Superzellensignal wird durch einen Kanal repräsentiert.

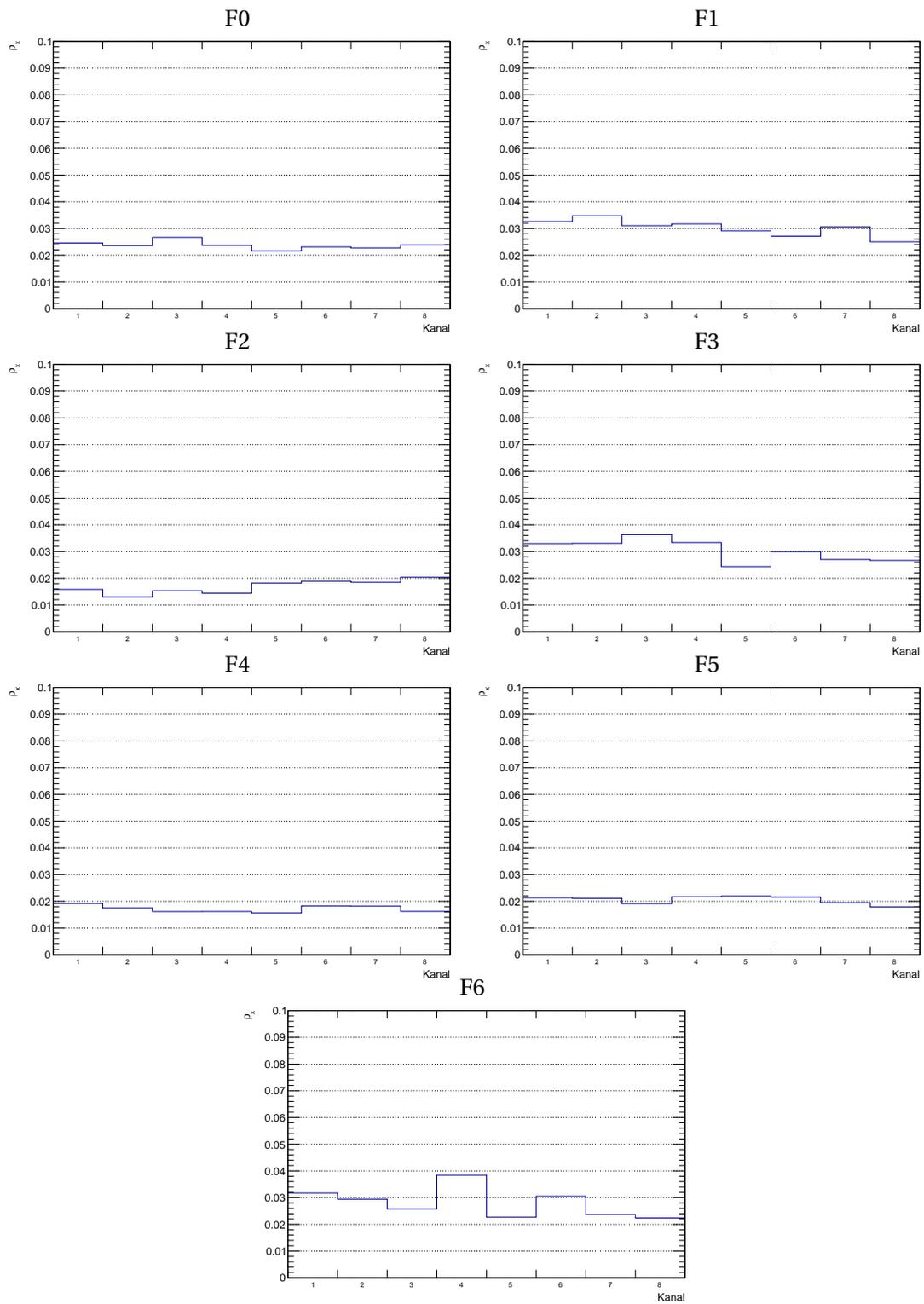


Abbildung C.6.: Die mittlere relative Korrelation ρ_x der sieben FEBS aufgetragen über alle Superzellen des FL. Die ermittelten Abweichungen liegen unterhalb der Darstellungsgrenze.

Glossar

ABBA ATCA test **B**oard for **B**aseline **A**quisition

ADC Analog-to-**D**igital **C**onverter

ALICE A **L**arge **I**on **C**ollider **E**xperiment

AMM Avalon **M**emory-**M**apped

API Application **P**rogramming **I**nterface

ASIC Application-Specific **I**ntegrated **C**ircuit

ATLAS A **T**oroidal **L**H**C** **A**pparatu**S**

BC **B**unch **C**rossing

BE **B**ack-**E**nd

BL **B**ack **L**ayer

BNL **B**rookhaven **N**ational **L**aboratory

CACTUS Projekt **C**ode **A**rchive for **C**MS **T**rigger **U**grade**S**

CERN **C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire, wobei die offizielle Bezeichnung 'Europäische Organisation für Kernforschung' lautet

CMS **C**ompact **M**uon **S**olenoid

CNF **C**oherent **N**oise **F**raction

CPU **C**entral **P**rocessing **U**nit

ECRIS **E**lectron **C**yclotron **R**esonance **I**on **S**ource

EF **E**vent **F**ilter

eFEX **e**lectron **F**eature **E**Xtractor

FE **F**ront-**E**nd

FEB **F**ront-**E**nd **B**oard

FEX **F**eature **E**Xtractor

FL **F**ront **L**ayer

FPGA Field Programmable Gate Array

FTK Fast Tracker

HAL Hardware Access Library

HL-LHC High Luminosity LHC

HLT High-Level Trigger

HPS Hard Processor System

IBL Insertable B-Layer

IP Internet Protocol

ISO International Standardization Organization, offiziell International Organization for Standardization

ITU International Telecommunication Union

jFEX jet Feature EXtractor

L1 Level-1 Trigger

L2 Level-2 Trigger

LAL Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

LAN Local Area Network

LAr Liquid Argon

LDPS LAr Digital Processing System

LEP Large Electron-Positron Collider

LHC Large Hadron Collider

LHCb Large Hadron Collider beauty

LSB Layer Sum Board

LSBit Least Signifikant Bit

LTDB LAr Trigger Digitizer Board

MAC Media Access Control

ML Middle Layer

MSSM Minimal Supersymmetric Standard Model

NSW New Small Wheel

OOB **O**ut-**O**f-**B**and

OSI-Modell **O**pen **S**ystem **I**nterconnect

PS **P**re**S**ampler

QCD **Q**uanten**C**hromo**D**ynamik

QED **Q**uanten**E**lektro**D**ynamik

RMW **R**ead-**M**odify-**W**rite

ROI **R**egion-**o**f-**I**nterest

SCA **S**witched **C**apacitor **A**rray

SM **S**tandard**M**odell, weltweit anerkanntes theoretisches Modell zur Beschreibung von Materie- und Wechselwirkungsteilchen

SRAM **S**tatic **R**andom **A**ccess **M**emory

TBB **T**ower **B**uilder **B**oard

TCP **T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol

TP **T**ransport**P**rotokoll

TT **T**rigger **T**ower

UDP **U**ser **D**atagram **P**rotocol

VHDL **V**ery **H**igh **S**peed **I**ntegrated **C**ircuit **H**ardware **D**escription **L**anguage

WW **W**echsel**W**irkung

XML **E**Xtensible **M**arkup **L**anguage

Abbildungsverzeichnis

2.1. Überblick des Standardmodells der Teilchenphysik	6
2.2. Übersicht der ATLAS Ergebnisse zu exotischer Physik im Rahmen der SUSY und der Higgs-Physik	9
2.3. Simulation zur Verbesserung des Level-1 Triggers des Flüssigargonkalorimeters des ATLAS Detektors	11
2.4. Simulation des Zerfallsspektrums eines $ZH \rightarrow WW \rightarrow 2l 2\nu$ Prozesses	11
3.1. Schematische Darstellung des CERN Beschleunigerkomplexes	14
4.1. Übersicht des ATLAS Detektors	16
4.2. Darstellung des elektromagnetischen Kalorimeters	18
4.3. Technische Darstellung der drei Schichten des elektromagnetischen Kalorimeters	19
4.4. Aufriss der drei Schichten des elektromagnetischen Kalorimeters	20
5.1. Upgradepläne des LHC	23
5.2. Schematische Darstellung der Ausleseelektronik des elektromagnetischen Flüssigargonkalorimeters	25
5.3. Schematische Darstellung der TT- und Superzellauslese	26
5.4. Schematische Darstellung der Ausleseelektronik des Phase-I Upgrades	27
6.1. Schematische Darstellung eines FPGA	30
6.2. ISO/OSI-Modell	33
6.3. Schematische Darstellung des Aufbaus eines Ethernetpaketes	33
7.1. Vorläufer des ABBA Prototyps	38
7.2. Schematische Darstellung der ABBA Firmware eines Front-FPGA	39
7.3. Übersicht des SoCKit Development Kit	40
7.4. Schematische Darstellung der Systeme des Cyclone [®] V FPGA	41
7.5. Schematische Darstellung eines Ethernetpaketes mit IPbus-Paket	44
7.6. Signallaufpfad der IPbus Firmware eines Ethernetpaketes bis zu den Slaves	47
7.7. Darstellung des zu implementierenden Reset managers	49
7.8. Darstellung des wb2amm Interfacekonverters	50
8.1. Abhängigkeit des ADC-Rauschens von der effektiven Bitbreite	53
8.2. Darstellung der gaußschen Verteilung der ADC-Werte	53
8.3. Elektronisches Rauschen der vier FEBs des ML	54
8.4. Gegenüberstellung des elektronischen Rauschens des Detektors ohne Upgrades (links) und der ADCs des LTDB (rechts)	56
8.5. Gegenüberstellung der Autokorrelationsdaten für das ML.	58
8.6. Die Korrelationskoeffizienten der vier FEBs des ML	60

8.7. Die mittlere relative Korrelation der vier FEBs des ML	61
8.8. Gegenüberstellung der nach verschiedenen Methoden berechneten Anteile des kohärenten Rauschens der FEBs	63
B.1. Elektronisches Rauschen des PS	71
B.2. Elektronisches Rauschen der zwei FEBs des BL	71
B.3. Elektronisches Rauschen der sieben FEBs des FL	72
C.1. Die Korrelationskoeffizienten des FEB des PS	73
C.2. Die Korrelationskoeffizienten der zwei FEBs des BL	73
C.3. Die Korrelationskoeffizienten der sieben FEBs des FL	74
C.4. Die mittlere relative Korrelation des PS	75
C.5. Die mittlere relative Korrelation der zwei FEBs des BL	75
C.6. Die mittlere relative Korrelation der sieben FEBs des FL	76

Tabellenverzeichnis

2.1. Übersicht der Quarkgenerationen	4
2.2. Übersicht der Leptonengenerationen	5
4.1. Granularität und η -Bereiche der drei Schichten des elektromagnetischen Kalorimeters	19
5.1. Übersetzung der Elementarzellen in Superzellen	27
7.1. Kurzübersicht der Eigenschaften eines Cyclone [®] V und eines Arria [®] 10 FPGA .	40
7.2. Gegenüberstellung der zueinander kompatiblen Signale des Wishbone Interfaces und des Avalon Memory-Mapped Interfaces	50

Codeverzeichnis

6.1. VHDL Beispiel zu Prozessargumenten	31
7.1. Beispiel einer XML-Datei der μ HAL Software zur Beschreibung eines Systems aus drei Modulen.	42
7.2. XML-Datei für die μ HAL Software zur Beschreibung eines Testsystems aus drei Registern (REG).	42
7.3. C++-Skript zur Anwendung der μ HAL Software	43
7.4. Aufschlüsselung eines Ethernetpaketes der μ HAL Software. Integer1-3 stellen die drei gesendeten Werte dar. Das IPbus-Paket wurde in der 'little endian'-Form übertragen.	46
A.1. VHDL-Code der parallelen Form eines IPbus-Paketes im Wishbone Interface	67
A.2. VHDL-Code des Reset managers	68
A.3. VHDL-Code der parallelen Form eines IPbus-Paketes im Avalon Memory-Mapped Interface	69
A.4. VHDL-Code des Wishbone zu Avalon Memory-Mapped Interfacekonverters	70

Literaturverzeichnis

- [1] S. L. Glashow, *Partial-symmetries of weak interactions*, Nuclear Physics **22** (1961) no. 4, 579 – 588.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029558261904692>.
- [2] S. Weinberg, *A Model of Leptons*, Phys. Rev. Lett. **19** (Nov, 1967) 1264–1266.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.19.1264>.
- [3] A. Salam, *Weak and Electromagnetic Interactions*, Conf. Proc. **C680519** (1968) 367–377.
- [4] G. 't Hooft, *Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields*, Nuclear Physics B **35** (1971) no. 1, 167 – 188.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321371901398>.
- [5] G. 't Hooft and M. Veltman, *Regularization and renormalization of gauge fields*, Nuclear Physics B **44** (1972) no. 1, 189 – 213.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321372902799>.
- [6] S. F. Novaes, *Standard model: An Introduction*, in *Particles and fields. Proceedings, 10th Jorge Andre Swieca Summer School, Sao Paulo, Brazil, February 6-12, 1999*. 1999.
arXiv:hep-ph/0001283 [hep-ph].
<http://alice.cern.ch/format/showfull?sysnb=2173689>.
- [7] W. Hollik, *Quantum field theory and the Standard Model, in High-energy physics. Proceedings, 17th European School, ESHEP 2009, Bautzen, Germany, June 14-27, 2009*. 2010. arXiv:1012.3883 [hep-ph].
<http://inspirehep.net/record/881968/files/arXiv:1012.3883.pdf>.
- [8] H. Fritzsch, M. Gell-Mann, and H. Leutwyler, *Advantages of the color octet gluon picture*, Physics Letters B **47** (1973) no. 4, 365 – 368.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269373906254>.
- [9] H. D. Politzer, *Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?*, Phys. Rev. Lett. **30** (Jun, 1973) 1346–1349. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.30.1346>.
- [10] D. J. Gross and F. Wilczek, *Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories*, Phys. Rev. Lett. **30** (Jun, 1973) 1343–1346.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.30.1343>.
- [11] S. Weinberg, *Non-Abelian Gauge Theories of the Strong Interactions*, Phys. Rev. Lett. **31** (Aug, 1973) 494–497. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.31.494>.
- [12] R. P. Feynman, *Mathematical Formulation of the Quantum Theory of Electromagnetic Interaction*, Phys. Rev. **80** (Nov, 1950) 440–457.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.80.440>.

- [13] S. Dawson, *The MSSM and why it works*, in *Supersymmetry, supergravity and supercolliders. Proceedings, Theoretical Advanced Study Institute in elementary particle physics, TASI'97, Boulder, USA, June 2-27, 1997*, pp. 261–339. 1997. arXiv:hep-ph/9712464 [hep-ph].
- [14] M. Drees, *An Introduction to supersymmetry*, in *Current topics in physics. Proceedings, Inauguration Conference of the Asia-Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP), Seoul, Korea, June 4-10, 1996. Vol. 1, 2*. 1996. arXiv:hep-ph/9611409 [hep-ph].
- [15] S. P. Martin, *A Supersymmetry primer*, arXiv:hep-ph/9709356 [hep-ph]. [Adv. Ser. Direct. High Energy Phys.18,1(1998)].
- [16] L. Evans and P. Bryant, *LHC Machine*, Journal of Instrumentation **3** (2008) no. 08, S08001. <http://stacks.iop.org/1748-0221/3/i=08/a=S08001>.
- [17] *LEP design report*. CERN, Geneva, 1984. <https://cds.cern.ch/record/102083>. Copies shelved as reports in LEP, PS and SPS libraries.
- [18] The LHCb Collaboration et al., *The LHCb Detector at the LHC*, Journal of Instrumentation **3** (2008) no. 08, S08005. <http://stacks.iop.org/1748-0221/3/i=08/a=S08005>.
- [19] The ALICE Collaboration et al., *The ALICE experiment at the CERN LHC*, Journal of Instrumentation **3** (2008) no. 08, S08002. <http://stacks.iop.org/1748-0221/3/i=08/a=S08002>.
- [20] The CMS Collaboration et al., *The CMS experiment at the CERN LHC*, Journal of Instrumentation **3** (2008) no. 08, S08004. <http://stacks.iop.org/1748-0221/3/i=08/a=S08004>.
- [21] The ATLAS Collaboration et al., *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, Journal of Instrumentation **3** (2008) no. 08, S08003. <http://stacks.iop.org/1748-0221/3/i=08/a=S08003>.
- [22] ATLAS, G. Aad et al., *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, Phys. Lett. **B716** (2012) 1–29, arXiv:1207.7214 [hep-ex].
- [23] C.-P. Shen and C.-Z. Yuan, *Observation of pentaquark states and perspectives of further studies*, arXiv:1508.06047 [hep-ex].
- [24] V. V. Anisovich, M. A. Matveev, A. V. Sarantsev, and A. N. Semenova, *Pentaquarks and strange tetraquark mesons*, arXiv:1509.03028 [hep-ph].
- [25] S. Stone, *Pentaquarks and Tetraquarks at LHCb*, 2015. arXiv:1509.04051 [hep-ex]. <https://inspirehep.net/record/1393270/files/arXiv:1509.04051.pdf>.
- [26] Particle Data Group, K. A. Olive et al., *Review of Particle Physics*, Chin. Phys. **C38** (2014) 090001.
- [27] D. J. Griffiths, *INTRODUCTION TO ELEMENTARY PARTICLES*. 1987.
- [28] F. Ynduráin, *Limits on the mass of the gluon*, Physics Letters B **345** (1995) no. 4, 524 – 526. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269394016775>.

- [29] Wikimedia Commons, *Standard Model of Elementary Particles modified version*, October, 2014. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles_modified_version.svg.
- [30] R. Scrivens, M. Kronberger, D. Kuchler, J. Lettry, C. Mastrostefano, O. Midttun, M. O’Neil, H. Pereira, and C. Schmitzer, *Overview of the status and developments on primary ion sources at CERN**, . <https://cds.cern.ch/record/1382102>.
- [31] ATLAS Collaboration, *Summary plots from the ATLAS Exotic physics group*, July, 2015. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CombinedSummaryPlots/EXOTICS/>.
- [32] M. C. Aleksa, W. P. Cleland, Y. T. Enari, M. V. Fincke-Keeler, L. C. Hervas, F. B. Lanni, S. O. Majewski, C. V. Marino, and I. L. Wingerter-Seez, *ATLAS Liquid Argon Calorimeter Phase-I Upgrade Technical Design Report*, Tech. Rep. CERN-LHCC-2013-017. ATLAS-TDR-022, CERN, Geneva, Sep, 2013. <https://cds.cern.ch/record/1602230>. Final version presented to December 2013 LHCC.
- [33] M. Pohl, *Teilchen, Kräfte und das Vakuum*. Vdf-Lehrbuch Physik. Vdf Hochschulverlag an der ETH, 1998. <https://books.google.de/books?id=PCRk4MjgfZgC>.
- [34] J. Haffner, *The CERN accelerator complex. Complexe des accélérateurs du CERN*, . <https://cds.cern.ch/record/1621894>. General Photo.
- [35] *Alignment of the ATLAS Inner Detector with the initial LHC data at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, Tech. Rep. ATL-PHYS-PUB-2015-031, CERN, Geneva, Jul, 2015. <https://cds.cern.ch/record/2038139>.
- [36] J. Pequeno, *Computer generated image of the whole ATLAS detector*, Mar, 2008.
- [37] C. Leroy and P. Rancoita, *Physics of cascading shower generation and propagation in matter: Principles of high-energy, ultrahigh-energy and compensating calorimetry*, Rept. Prog. Phys. **63** (2000) 505–606.
- [38] ATLAS Collaboration, *ATLAS tile calorimeter: Technical Design Report*. Technical Design Report ATLAS. CERN, Geneva, 1996. <https://cds.cern.ch/record/331062>.
- [39] ATLAS Collaboration, *ATLAS muon spectrometer: Technical Design Report*. Technical Design Report ATLAS. CERN, Geneva, 1997. <https://cds.cern.ch/record/331068>.
- [40] J. Pequeno, *Computer generated image of the ATLAS Liquid Argon*, Mar, 2008.
- [41] High Luminosity Large Hadron Collider, *LHC/ HL-LHC Plan*, August, 2015. http://hilumilhc.web.cern.ch/sites/hilumilhc.web.cern.ch/files/HL_LHC_PlanUpdateJuly2015.PNG.
- [42] M. Shochet, L. Tompkins, V. Cavaliere, P. Giannetti, A. Annovi, and G. Volpi, *Fast TracKer (FTK) Technical Design Report*, Tech. Rep. CERN-LHCC-2013-007. ATLAS-TDR-021, CERN, Geneva, Jun, 2013. <https://cds.cern.ch/record/1552953>. ATLAS Fast Tracker Technical Design Report.

- [43] T. Kawamoto, S. Vlachos, L. Pontecorvo, J. Dubbert, G. Mikenberg, P. Iengo, C. Dallapiccola, C. Amelung, L. Levinson, R. Richter, and D. Lellouch, *New Small Wheel Technical Design Report*, Tech. Rep. CERN-LHCC-2013-006. ATLAS-TDR-020, CERN, Geneva, Jun, 2013. <https://cds.cern.ch/record/1552862>. ATLAS New Small Wheel Technical Design Report.
- [44] R. S. Bartoldus, C. M. C. Bee, D. C. Francis, N. R. Gee, S. L. R. George, R. M. S. Hauser, R. R. Middleton, T. C. Pauly, O. K. Sasaki, D. O. Strom, R. R. I. Vari, and S. R. I. Veneziano, *Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System*, Tech. Rep. CERN-LHCC-2013-018. ATLAS-TDR-023, CERN, Geneva, Sep, 2013. <https://cds.cern.ch/record/1602235>. Final version presented to December 2013 LHCC.
- [45] K. Dembowski, *Computernetzwerke / der leichte Einstieg in Grundlagen und Praxis ; [mit Konfigurationsteil]*. Addison-Wesley, Addison-Wesley, 2012. http://slubdd.de/katalog?libero_mab215725090.
- [46] Wikimedia Commons, *ISO/OSI-Modell in Deutsch*, December, 2014. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ISO-OSI-7-Schichten-Modell%28in_Deutsch%29.svg.
- [47] CERN, *CACTUS*, May, 2015. <https://svnweb.cern.ch/trac/cactus>.
- [48] K. Chen, *Demonstrator System for the Phase-I Upgrade of the Trigger Readout Electronics of the ATLAS Liquid-Argon Calorimeters*, Tech. Rep. ATL-LARG-PROC-2014-009, CERN, Geneva, Dec, 2014. <https://cds.cern.ch/record/1976572>.
- [49] Terasic Inc., *SoCKit - the Development Kit for New SoC Device*, August, 2014. http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/816/image/image_8_thumb.jpg.
- [50] ALTERA[®], *Comparison of Cyclone V SoC Variants*, July, 2015. <https://www.altera.com/products/soc/portfolio/cyclone-v-soc/overview.html>.
- [51] ALTERA[®], *Arria SoC Feature Comparison*, July, 2015. <https://www.altera.com/products/soc/portfolio/arria-10-soc/overview.html>.
- [52] Terasic Inc., *Block Diagram of the SoCKit Board*, August, 2014. http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/816/image/image_21_thumb.jpg.
- [53] C. G. Larrea, K. Harder, D. Newbold, D. Sankey, A. Rose, A. Thea, and T. Williams, *IPbus: a flexible Ethernet-based control system for xTCA hardware*, *Journal of Instrumentation* **10** (2015) no. 02, C02019. <http://stacks.iop.org/1748-0221/10/i=02/a=C02019>.
- [54] CERN, *The IPbus Protocol*, December, 2013. https://svnweb.cern.ch/trac/cactus/browser/trunk/doc/ipbus_protocol_v2_0.pdf.
- [55] Silicore Corporation, *Wishbone B4*, June, 2010. http://cdn.opencores.org/downloads/wbspec_b4.pdf.
- [56] B. Deng, H. Chen, K. Chen, J. Chen, D. Gong, D. Guo, X. Hu, D. Huang, J. Kierstead, X. Li, C. Liu, T. Liu, A. Xiang, H. Xu, T. Xu, Y. You, and J. Ye, *The clock distribution system for the ATLAS Liquid Argon Calorimeter Phase-I Upgrade Demonstrator*, *Journal of*

Instrumentation **10** (2015) no. 01, C01004.

<http://stacks.iop.org/1748-0221/10/i=01/a=C01004>.

- [57] D.-P. J. P. Grohs, *Simulation of the future Phase-1 Trigger Readout Upgrade of the Liquid-Argon Calorimeter of the ATLAS Detector at the LHC*. PhD thesis, Technische Universität Dresden, 2015.
- [58] Texas Instruments Incorporated, *ADS5272 (ACTIVE) 8-Channel 65 MSPS Analog to Digital Converter*, July, 2015. <http://www.ti.com/product/ADS5272>.

Danksagung

Zu Beginn möchte ich allen danken, die mir über die Jahre Mut gemacht, mich unterstützt und motiviert haben mein Physikstudium zu absolvieren und mit dieser Masterarbeit erfolgreich abzuschließen.

Ich möchte vor allem Prof. Dr. Arno Straessner für seine Anregungen während der gesamten Bearbeitungszeit und kompetenten Hilfestellungen bei Problemen danken. Ich bin dankbar dafür, dass ich in dieser Zeit einen Einblick in das Forscherleben erhalten konnte und einen kleinen Teil zu einem der aktuellsten und größten Experimente unserer Zeit beitragen durfte.

Mein Dank gilt auch der Elektronikgruppe des IKTP. Es war eine sehr angenehme Arbeitszeit, auch wenn es das ein oder andere Kopfzerbrechen gab. Ich verdanke Euch viele technische Erkenntnisse, welche mich schon lange haben rätseln lassen. Ich bedanke mich bei Maximilian Hils, Philipp Horn, Lukas Schröder und Olga Novgorodova für ihre kritischen und hilfreichen Kommentare.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Mutter für ihre Geduld und jegliche Unterstützung während meines Masterstudiums. Ich hab Dich lieb!

Zuletzt möchte ich besonders meinem Bruder und seiner wachsenden Familie (alias die Herde) für die nötigen Zerstreuungen in einer fröhlichen und geborgenen Atmosphäre und den Halt in stressigen Zeiten danken.

Versicherung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der von mir angegebenen Quellen angefertigt zu haben. Alle aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet. Die Arbeit wurde noch keiner Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

Dresden, 04. November 2015

Rico Hübscher