

Kalibrierung und Qualitätskontrolle der Ausleseelektronik des ALICE TRD

Lukas Britt

Diplomarbeit

Institut für Kernphysik
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Februar 2013



Referent: Prof. Dr. Johannes P. Wessels
Koreferent: Prof. Dr. Christian Weinheimer

„Wer einen Fehler gemacht hat und ihn nicht korrigiert,
begeht einen zweiten.“
Konfuzius

Für meine Großeltern

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theorie	3
2.1. Das Standardmodell der Teilchenphysik	3
2.1.1. Elementarteilchen	3
2.1.2. Die Grundkräfte der Physik	4
2.2. Die Quantenchromodynamik	6
2.3. Das Quark-Gluon-Plasma	7
2.3.1. Nachweis eines Quark-Gluon-Plasmas	9
3. Der LHC und ALICE	13
3.1. Der Large Hadron Collider (LHC)	13
3.2. ALICE	15
4. Der Transition Radiation Detector (TRD)	19
4.1. Motivation für den TRD	19
4.2. Theorie des TRD	20
4.2.1. Die Bethe-Bloch-Formel	20
4.2.2. Übergangsstrahlung	22
4.3. Aufbau des TRD	22
4.3.1. Modulaufbau	23
4.3.2. Verstärkung	26
4.4. Ausleseelektronik	26
4.4.1. Readout Boards	26
4.4.2. Detektor-Kontrolle	28
4.4.3. Multi-Chip-Module	29
4.4.4. Global Tracking Unit	31
4.4.5. Der Weg der Daten	31
4.5. Signale und Interpretation	32
4.6. Doppelt ausgelesene Pads	34
5. Gain-Korrektur	37
5.1. Motivation	37
5.2. Vorgehensweise	37
5.3. Grundlinie	41
5.4. Bestimmung der relativen Verstärkung	45
6. Die Rohdaten des TRD	49
6.1. Supermodule Header	53
6.2. Stack Header #i	54
6.3. HC-Header	55
6.4. Raw Version Major Number (RVMN)	56

6.5. MCMHeader	58
6.6. ADC-Data-Word	60
6.7. Trailer	60
6.8. Ein Beispiel	62
7. Erklärung der möglichen Fehler	65
8. Analyse der Fehler	73
8.1. Untersuchte Daten	74
8.2. Finde den Fehler!	77
8.3. Weitere Fehler	79
9. Zusammenfassung und Ausblick	87
A. Anhang	89
Abkürzungsverzeichnis	103
Literatur	107
Danksagung	111

1. Einleitung

Die Frage nach den Bestandteilen der Materie geht bis in die Antike zurück und beschäftigt auch heute noch Wissenschaftler in aller Welt. Auf der Suche nach neuen Erkenntnissen hierüber wurden immer modernere Theorien und Experimente entwickelt und teilweise wieder verworfen, und durch solche ersetzt, die die Sachverhalte besser darlegen. Heute, mehr als 2000 Jahre nach der ersten Theorie über kleinste, nicht teilbare Teilchen weiß man, dass die mit bloßem Auge sichtbare Materie aus Atomen und Molekülen besteht, die wiederum aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut sind. Während letztere zu den Elementarteilchen gehören, bestehen Protonen und Neutronen wiederum aus weiteren Elementarteilchen, den Quarks und Gluonen. Diese Elementarteilchen sind nach heutigem Kenntnisstand punktförmig und nicht weiter teilbar. Sie bilden die Grundbausteine für sämtliche bekannte Materie und werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben (Kapitel 2). Quarks und Gluonen kommen unter normalen Umständen nicht als freie Teilchen vor, sondern ausschließlich in gebundenen Zuständen, den Mesonen (zwei Quarks) oder Baryonen (drei Quarks). Dabei kann die uns bekannte baryonische Materie in den üblichen Aggregatzuständen fest, flüssig, gasförmig und als Plasma vorkommen. In der bis heute allgemein anerkannten Theorie für die Entstehung des Universums, der Urknall-Theorie, ist allerdings von einem weiteren Aggregatzustand die Rede, der im frühen Universum, kurz nach dem Urknall existiert haben soll: das Quark-Gluon-Plasma (QGP). In einem solchen QGP befinden sich die Quarks und Gluonen nicht mehr in gebundenen Zuständen, sondern sind quasi-frei. Die Existenz eines QGP ist allerdings nur unter extremen Bedingungen möglich. Dazu gehören sehr hohe Dichten, wie sie heute vermutlich nur in Neutronensternen zu finden sind, oder extrem hohe Temperaturen, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben.

Mit Hilfe von großen Teilchenbeschleunigern wie dem *Relativistic Heavy Ion Collider* (RHIC) konnte auch im Labor ein QGP erzeugt werden. Eine Steigerung zum RHIC stellt seit seiner Inbetriebnahme 2008 das wohl größte Experiment der Kern- und Teilchenphysik dar: der *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN in der Nähe von Genf. In ihm werden Protonen und Schwerionen auf ultra-relativistische Energien beschleunigt und zur Kollision gebracht. Eine der Aufgaben der entlang der Bahn des LHC stationierten vier großen Experimente ist, neben der Suche nach dem letzten unbewiesenen Teilchen des Standardmodells, dem Higgs-Boson, die Untersuchung des QGP. Eines dieser vier Experimente ist *A Large Ion Collider Experiment* (ALICE), das speziell für diese Untersuchung entwickelt und gebaut wurde (Kapitel 3). ALICE ist unterteilt in einzelne Subdetektoren, mit deren Hilfe es möglich ist, anhand der Produkte der Teilchenkollisionen das QGP zu untersuchen und bis zu seiner Entstehung zurückzuverfolgen.

Der *Transition Radiation Detector* (TRD) ist einer dieser Subdetektoren. Er wurde entwickelt, um anhand von Übergangsstrahlung die Separation von Elektronen und Pionen auch bei hohen Energien (über 1 GeV) zu gewährleisten und die Spurrekonstruktion der Teilchen zu vervollständigen. Die Teilchenseparation ist dabei

1. Einleitung

besonders relevant, da viele der Signaturen eines QGP durch hochenergetische Elektronen identifiziert werden können, deren Signale aber durch die viel häufiger bei Teilchenkollisionen entstehenden Pionen überlagert sein können. Außerdem ist der TRD in der Lage als schneller Trigger zu fungieren, um physikalisch relevante Ereignisse zu markieren, so dass diese bevorzugt aufgezeichnet werden.

Der TRD ist unterteilt in 18 sogenannte Supermodule, die vor ihrem Einbau am CERN an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster zusammengebaut und getestet werden. Eine Beschreibung des TRD und seiner Arbeitsweise ist in Kapitel 4 gegeben, in dem unter anderem Auslese-Pads beschrieben werden, mit denen anhand einer induzierten Spiegelladung geladene Teilchen detektiert werden. Da nicht alle diese Pads zusammen, sondern in Gruppen von 18 Pads ausgelesen werden, kann es an den Grenzen zwischen solchen Pad-Gruppen zu unerwünschten Nebeneffekten kommen, die die Fähigkeit des TRD, als Trigger zu fungieren, beeinträchtigen können. Zur Vermeidung dieser Randeffekte werden Pads am Rand der Gruppen von jeweils zwei Analog-Digital-Wandlern (ADC) ausgelesen. ADCs müssen für die Datenauswertung aufgrund leichter, bauartbedingter Abweichung in der Verstärkung kalibriert werden. In der bisherigen Kalibration wurden die ADCs der doppelt ausgelesenen Pads allerdings nicht mit einbezogen. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, um die leicht voneinander abweichenden Verstärkungen dieser ADCs untereinander zu bestimmen (Kapitel 5). Bei der Untersuchung der Testdaten an der WWU Münster wird die Kalibration der ADCs der doppelt ausgelesenen Pads bereits berücksichtigt. In Zukunft sollen die relativen Verstärkungen auch bei der Online-Kalibration der Supermodule am CERN berücksichtigt werden, um die Funktion des TRD als Trigger zu verbessern.

Ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung der an der WWU Münster aufgenommenen TRD-Daten auf Fehler. Dazu wird eine in C++ implementierte Klasse namens *AliTRDrawStream* benutzt, die bisher die Möglichkeit bietet, Fehler im Datenstrom zu finden. Die genaue Kenntnis über die Art und den Entstehungsort solcher Fehler bietet die Möglichkeit, Hardwareprobleme wie *Bitflips* oder einen Fehler bei der Konstruktion der Supermodule direkt beim Zusammenbau in Münster zu erkennen und wenn möglich zu beheben. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit die in Münster aufgenommenen Testdaten erstmalig auf eben solche Fehler hin analysiert. Zum besseren Verständnis der Fehler wird in Kapitel 6 erläutert, wie die Rohdaten des TRD aussehen und wie man anhand dieser Daten Hinweise auf Fehlerursachen finden kann. Im Kapitel 7 werden dann schließlich die einzelnen, vom *AliTRDrawStream* erkannten Fehler erklärt und kurz erläutert, durch welche Abweichungen von den erwarteten Daten sie verursacht werden. In Kapitel 8 schließlich werden einige der in Münster aufgenommenen Testdaten auf Fehler hin analysiert und deren möglichen Ursachen untersucht. Dabei wird sich zeigen, dass eine direkte Analyse der Testdaten mit der im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelten Software zur Behebung der Fehler direkt vor Ort beitragen kann.

2. Theorie

2.1. Das Standardmodell der Teilchenphysik

2.1.1. Elementarteilchen

Der Begriff „Atom“, wie wir ihn kennen, leitet sich aus dem griechischen Wort „ατομος“ („atomos“, dt.: unteilbar) ab, da bereits im antiken Griechenland die Überlegung aufkam, ob Materie immer weiter teilbar sei oder ob man irgendwann auf unteilbare Teilchen, die „Atome“, stoßen würde.

Ende des 19. Jahrhunderts war bekannt, dass Materie sich tatsächlich aus einzelnen Atomen zusammensetzt, die aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften in das Periodensystem der Elemente eingeordnet werden konnten. Aufgrund der Tatsache, dass sich die chemischen Eigenschaften der Elemente periodisch wiederholen, gelangte man schließlich zu der Überzeugung, dass auch Atome aus kleineren Teilchen bestehen müssten.

Einen ersten Beweis dieser Theorie lieferte Thomson 1897 mit der Entdeckung des *Elektrons*, als er bei der Untersuchung der sogenannten *Kathodenstrahlen* herausfand, dass diese aus negativ geladenen Teilchen besteht, und daraufhin die spezifische Ladung Q/m dieser Teilchen bestimmte.

1911 gelang es Rutherford, durch Streuexperimente mit α -Teilchen an Goldfolien zu zeigen, dass die Elektronen einen kleinen Atomkern umgeben, in dem nahezu die gesamte Masse des Atoms vereint ist. Kurz darauf fand er auch den zweiten Atombaustein, das *Proton*, indem er zeigte, dass der Kern des Wasserstoffatoms ebenfalls in anderen Elementen vorkommt.

Mit der Entdeckung des *Neutrons* durch Chadwick (1932) und der Postulierung des 26 Jahre später experimentell nachgewiesenen *Neutrinos* durch Pauli (1930) konnte man schließlich auch die Drehimpulsverletzung im β -Zerfall erklären.

Im Laufe der nächsten Jahre wurden in Beschleunigerexperimenten weitere Teilchen nachgewiesen, wie beispielsweise das *Myon*, das *Tauon*, die drei heute bekannten Neutrinos ν_e , ν_μ , ν_τ und verschiedene *Hadronen*, also Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen.

Um diesen „Teilchenzoo“ zu ordnen, mangelte es vorerst noch an einer einheitlichen Theorie, die schließlich in den 60er Jahren von Gell-Mann und Zweig aufgestellt wurde. Sie besagt, dass Hadronen aus noch kleineren Teilchen bestehen, was schließlich am *Stanford Linear Accelerator* bestätigt wurde.

Heute weiß man, dass Hadronen aus *Quarks* und *Gluonen* bestehen und sich in *Baryonen* und *Mesonen* einordnen lassen. Baryonen bestehen aus drei Quarks, bzw. Antiquarks, während Mesonen aus einem Quark-Antiquark-Paar bestehen.

In dem so entstandenen heutigen „Standardmodell der Teilchenphysik“ lassen sich nun die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen, vermittelt durch *Eichbosonen*, beschreiben. Das Modell besagt, dass die uns bekannte Materie aus sechs Leptonen (Elektron, Myon, Tauon und die jeweiligen Neutrinos) und sechs Quarks (*Down*, *Up*, *Strange*, *Charme*, *Bottom*, *Top*) besteht, die sich jeweils in drei Generationen einordnen lassen. Diese zwölf Teilchen besitzen einen halbzahligen Spin und

2. Theorie

werden daher zu den Fermionen gezählt. Teilchen mit ganzzahligem Spin hingegen werden als *Bosonen* bezeichnet, wie z.B. die Austauschteilchen der Grundkräfte der Physik, die im kommenden Kapitel näher erläutert werden.

Zusätzlich sagt das Standardmodell noch die Existenz eines weiteren Teilchens, des *Higgs-Bosons* voraus, welches für die Masse der Materie- und Austauschteilchen verantwortlich ist. Die Entdeckung dieses Bosons ist Ziel einiger Experimente am LHC (näheres dazu in Kapitel 3.1).

Im Gegensatz zu den Leptonen tragen die Quarks noch zusätzlich eine sogenannte *Farbladung*, die entweder *rot*, *grün* oder *blau* sein kann. Teilchen, die aus Quarks gebildet werden, sind farbneutral, das heißt, dass ein Baryon aus je einem Quark jeder Farbe gebildet wird. Analog wird ein Meson aus einem Quark mit einer Farbe und einem Quark mit einer zugehörigen Anti-Farbe gebildet. Quarks können unter normalen Umständen nicht einzeln beobachtet werden, ein Umstand der als *Confinement* bezeichnet wird.

In Tabelle 1 sind die bisher nachgewiesenen Fermionen des Standardmodells mit einigen ihrer Eigenschaften aufgeführt. Zu jedem dieser Teilchen existiert jeweils ein Antiteilchen.

Fermionen	Generationen			Ladung	Spin	Farbe
	1	2	3			
Leptonen	e^-	μ^-	τ^-	-1	$1/2$	-
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0		
Quarks	u	c	t	$+2/3$	$1/2$	rot,grün,blau
	d	s	b	$-1/3$		

Tabelle 1: Die bisher nachgewiesenen Fermionen des Standardmodells und einige ihrer Eigenschaften [TM07], [Dem04]

2.1.2. Die Grundkräfte der Physik

Außer den Leptonen und Quarks beschreibt das Standardmodell der Teilchenphysik noch drei der vier heute bekannten *Grundkräfte der Physik*: Die *elektromagnetische*, die *schwache* und die *starke Wechselwirkung*.

Die vierte physikalische Grundkraft, die im Standardmodell nicht beschrieben wird, ist die *Gravitation*. Sie ist die schwächste der vier Wechselwirkungen. Für zwei Protonen ist sie beispielsweise um einen Faktor 10^{-36} kleiner als die elektromagnetische und kann daher auf subatomarer Ebene vernachlässigt werden. Der Vollständigkeit halber soll sie hier aber dennoch, genau wie die anderen Grundkräfte, kurz beschrieben werden.

Vermittelt werden die vier Grundkräfte über Austauschteilchen, die auch *Vektorbosonen* genannt werden.

Eine Zusammenfassung der Kräfte und ihrer Austauschteilchen findet sich in Tabelle 2.

Die Gravitationskraft

Die Gravitationskraft bewirkt die Anziehung zweier Körper, besitzt eine unendliche Reichweite und ist abhängig von der Masse der beiden Körper sowie ihrer relativen Entfernung zueinander.

Sie ist die Ursache für die Bildung und Bewegung der Himmelskörper und die Kraft, die es dem Menschen beispielsweise ermöglicht, sich auf der Erde zu bewegen.

Das Austauschteilchen der Gravitation ist das Graviton, das bisher allerdings nur ein hypothetisches Teilchen und nicht experimentell nachgewiesen ist.

Die elektromagnetische Kraft

Die Kraft, die uns im Alltag nach der Gravitation wohl am häufigsten begegnet, ist die elektromagnetische Kraft. Sie ist für alltägliche Phänomene wie Licht, elektrischen Strom oder Chemie verantwortlich.

Vermittelt wird die elektromagnetische Kraft durch ein masseloses und ungeladenes Teilchen, das *Photon*, das an die elektrische Ladung von anderen Teilchen koppelt. Aufgrund der Tatsache, dass das Photon masselos ist, ist auch die Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung unendlich.

Wesentliche Unterschiede zur Gravitation sind aber die Abschirmbarkeit der elektromagnetischen Kraft und ihre anziehende, bzw. abstoßende Wirkung, je nach Vorzeichen der beteiligten Ladungen, während die Gravitation ausschließlich anziehend wirkt.

Die schwache Kraft

Im Gegensatz zur Gravitation und zur elektromagnetischen Wechselwirkung ist die schwache Wechselwirkung für uns im alltäglichen Leben eher unzugänglich, da sie nur auf sehr kleinen Abständen in der Größenordnung von 1 fm wirkt. Der Grund hierfür ist die relativ hohe Masse ihrer Austauschteilchen, der geladenen W^\pm - bzw. ungeladenen Z^0 -*Bosonen*. Die Masse der Bosonen liegt bei ca. 80 GeV (W^\pm) bzw. bei ca. 90 GeV (Z^0) [TM07].

Die schwache Kraft koppelt an die schwache Ladung, d.h. an die dritte Komponente des Isospins I_3 und ist verantwortlich für die Zerfälle von Kernen und freien Neutronen, womit sie z.B. bei der Kernfusion in Sternen eine entscheidende Rolle spielt.

Die starke Kraft

Die starke Wechselwirkung wirkt auf die Farbladung der Quarks und sorgt für die Stabilität der Atomkerne. Ohne sie würden sich die Protonen im Atomkern durch die abstoßende Wirkung der elektromagnetischen Kraft voneinander weg bewegen.

2. Theorie

Die starke Kraft wird durch Gluonen (engl.: "glue", Kleber) vermittelt und durch die *Quantenchromodynamik* beschrieben, welche im folgenden Abschnitt näher erläutert wird. Ihre Reichweite beträgt ca. 1 fm, was in etwa dem Durchmesser eines Atomkerns entspricht.

WW	Austauschteilchen	Reichw.	rel. Stärke	koppelt an
el.-magn.	Photon	∞	$\alpha = \frac{1}{137}$	el. Ladung
stark	8 Gluonen	$\approx 1 \text{ fm}$	$\alpha_s = O(1)$	Farbladung
schwach	W^\pm Z^0	$\ll 1 \text{ fm}$	$\approx \alpha \cdot \frac{q^2}{m_W^2 c^2}$	schw. Ladung
Gravitation	Graviton	∞	$\alpha \cdot 10^{-36}$	Masse

Tabelle 2: Die vier Grundkräfte der Physik [TM07],[Dem04]

2.2. Die Quantenchromodynamik

Zur Beschreibung der starken Wechselwirkung wurde eine Eichtheorie, analog zur Quantenelektrodynamik (QED, beschreibt die elektromagnetische Wechselwirkung) entwickelt: die Quantenchromodynamik (QCD).

In der QCD sind die Pendanten zu den Photonen aus der QED die *Gluonen*, elektrisch ungeladene, masselose Punktteilchen, die in 8 Variationen vorkommen.

Aufgrund der fehlenden Masse der Gluonen müsste die starke Kraft, genau wie die elektromagnetische und die Gravitation, eine unendliche Reichweite besitzen. Dies ist nicht der Fall, da die Gluonen aufgrund der Farb-Antifarbladung, die sie tragen auch mit sich selbst wechselwirken.

Aus den Farb-Antifarbkombinationen aus (anti-)grün, (anti-)rot und (anti-)blau werden die verschiedenen Gluonen gebildet.

Wie bereits beschrieben, tragen auch die Quarks, aus denen Mesonen (Farb- und Antifarbl-Quark) und Baryonen (drei Quarks, je eines pro Farbe) bestehen, eine Farbladung, wobei die von ihnen gebildeten Teilchen farbneutral sind. Die Gluonen koppeln an diese Farbladung der Quarks.

In der Theorie wird dies in dem Potential V der starken Wechselwirkung deutlich [Ber02]:

$$V = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + \sigma r \quad (1)$$

Hier ist r der Abstand der beiden Quarks zueinander, σ ein konstanter Faktor und α_s die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung, die abhängig ist vom Impulsübertrag Q :

$$\alpha_s \propto \frac{1}{\ln(Q^2)} \quad (2)$$

Das Potential der starken Wechselwirkung ist in Abbildung 1 bildlich dargestellt.

In Gleichung (2) wird deutlich, dass die Kopplungskonstante mit steigendem Impulsübertrag, d.h. mit kleinerem Abstand der Quarks, immer kleiner wird. Dies führt zur sogenannten *asymptotischen Freiheit* der Quarks bei sehr kleinen Abständen.

Wird dagegen der Quark-Quark-Abstand sehr groß, so dominiert der lineare Term, d.h. das Potential wächst mit steigendem Abstand. Entfernt man die Quarks immer weiter voneinander, so steht ab einem bestimmten Abstand genügend Energie zur Verfügung um die Kombination eines Quarks und eines Antiquarks zu einem neuen Hadron zu ermöglichen. Dies ist der Grund für das Confinement.

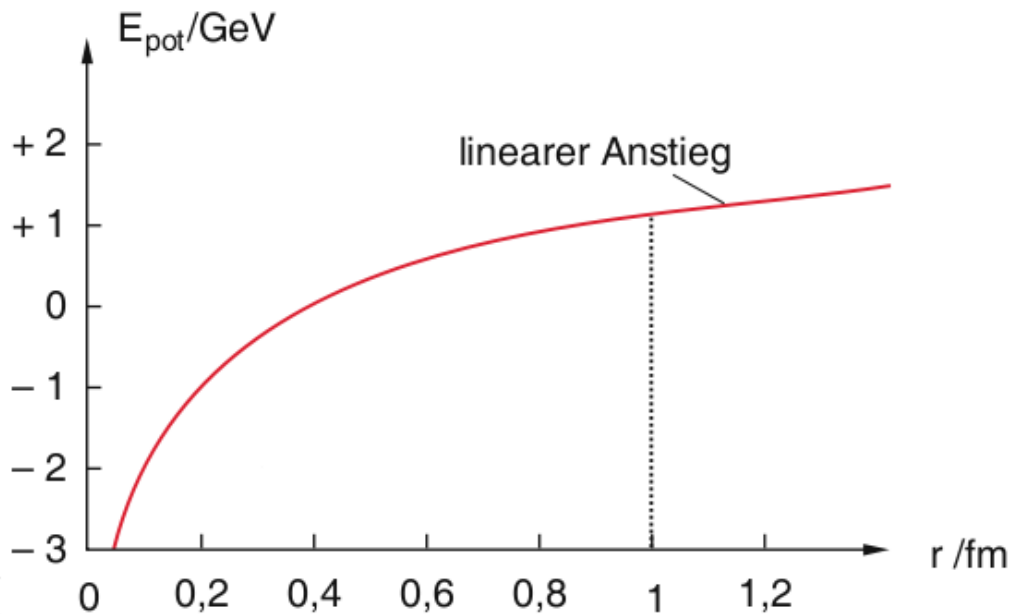


Abbildung 1: Das Potential der starken Wechselwirkung, aufgetragen gegen den Abstand zwischen einem Quark und einem Antiquark. Mit steigendem Abstand steigt auch das Potential [Dem04].

2.3. Das Quark-Gluon-Plasma

Mit dem Begriff *Quark-Gluon-Plasma* bezeichnet man einen Zustand quasifreier Quarks und Gluonen, d.h. dass die Quarks nicht mehr durch das Confinement in gebundene Zustände gezwungen werden. Man nimmt an, dass dieser Zustand im gesamten Universum kurze Zeit nach dem Urknall geherrscht hat, bevor die baryonische Materie nach etwa 10^{-5} s [BMS07] durch Hadronisierung entstand. Heutzutage vermutet man die Existenz eines QGP nur noch in Neutronensternen.

Nach der Gitter-QCD ist dieser Zustand theoretisch auf zwei Wegen erreichbar:

- Die Dichte der baryonischen Materie wird soweit erhöht, dass sich die Wellenfunktionen der einzelnen Baryonen überlagern und ein kaltes QGP entsteht. Ein

2. Theorie

typischer Wert für die Baryonenzahldichte, bei der ein QGP entsteht ist $n_B = 0,72 \text{ fm}^{-3}$ [KB04].

- Durch das Erhitzen der baryonischen Materie auf eine kritische Temperatur T_C wird eine kinetische Energie der Quarks und Gluonen erreicht, die ausreicht um ein heißes QGP zu erzeugen. Der Wert der kritischen Temperatur liegt bei etwa 170 MeV [ALI04].

Das QCD-Phasendiagramm ist in Abbildung 2 abgebildet. Hier ist die Temperatur gegen das chemische Potential μ_B , das ein Maß für die Baryonenzahl-Dichte ist, aufgetragen. Bei niedrigen Temperaturen und hohen Dichten findet ein Übergang erster Ordnung statt, während vermutet wird, dass der Übergang bei niedrigem chemischen Potential und hohen Temperaturen kontinuierlich ist und dem Übergang kurz nach dem Urknall am nächsten kommt.

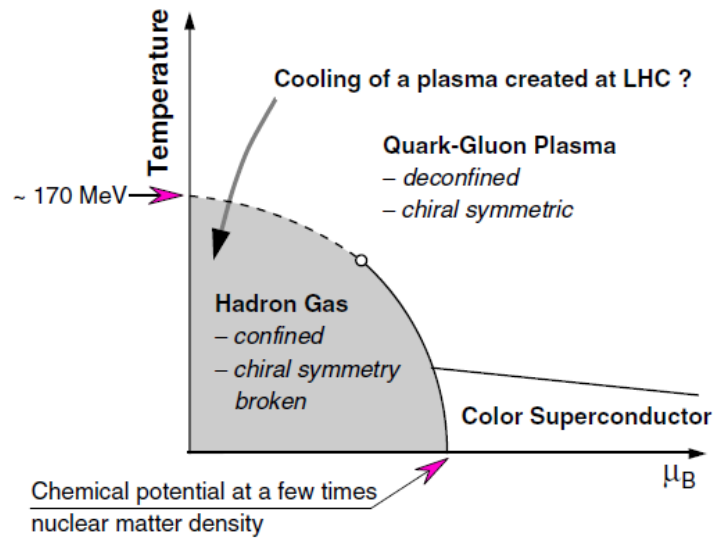


Abbildung 2: Phasendiagramm der QCD. Gestrichelte Linien entsprechen einem kontinuierlichen Übergang, durchgezogene einem Übergang erster Ordnung. Bei einem chemischen Potential von $\mu_B = 0$ wird ein Übergang bei $T_C \simeq 170 \text{ MeV}$ erwartet [ALI04].

Aufgrund der Schwierigkeit, ausreichend hohe Teilchendichten im Labor zu erzeugen, versucht man den QGP-Zustand über den zweiten Weg zu erreichen. Dazu werden in Teilchenbeschleunigern schwere Atomkerne auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und aufeinander geschossen. Dabei sind die Kerne aufgrund der hohen Geschwindigkeit Lorentz-kontrahiert, sodass sie für einen äußeren Beobachter wie Scheiben aussehen. Zur Verdeutlichung dieses Phänomens dient Abbildung 3.

Bei der Kollision finden Parton-Parton-Stöße¹ statt, wodurch die kinetische Ener-

¹Der Begriff „Parton“ fasst Quarks und Gluonen zusammen.

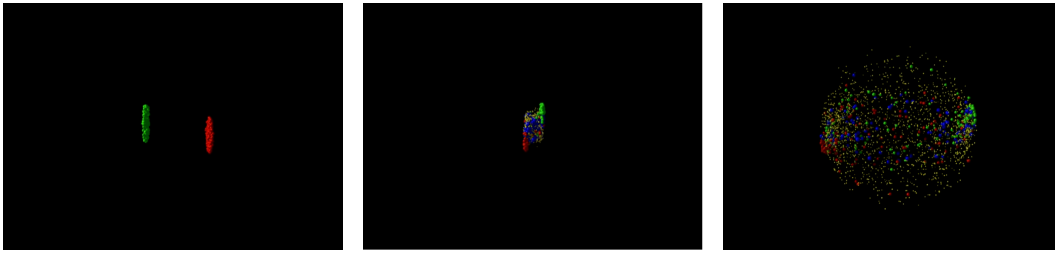


Abbildung 3: Zwei aufeinander fliegende Blei-Kerne bei einer Energie von 160 GeV/Nukleon. Die Kerne erscheinen aufgrund der hohen Geschwindigkeiten vor der Kollision als Scheiben. Die Nukleonen sind rot bzw. grün, Mesonen gelb und Hyperonen blau dargestellt [Web07].

gie der Partonen in ungerichtete Bewegung, also Wärme des entstehenden Mediums umgewandelt und die kritische Temperatur T_C überschritten wird. Dabei werden aufgrund der zur Verfügung stehenden Energie einige Tausende bis Zehntausende Partonen [BMS07] erzeugt. Ein Quark-Gluon-Plasma entsteht.

Die Zeit, in der das QGP besteht ist sehr kurz. Es dehnt sich schlagartig aus und kühlt dabei ab, sodass die Temperatur unter T_C fällt und die Partonen nach einer Zeit von etwa 10^{-22} s [BMS07] Hadronen bilden. Der Grund für die im Vergleich zum Urknall relativ kurze Zeit ist die sehr viel geringere Energie, die während eines Experiments am Teilchenbeschleuniger zur Verfügung steht.

Kühlt sich das System weiter ab, kommt es zunächst zum *chemischen Ausfrieren* – d.h. es finden keine inelastischen Stöße der Hadronen untereinander mehr statt – und bei noch niedrigerer Temperatur zum *kinetischen Ausfrieren*. Damit ist der Zeitpunkt gemeint, an dem die mittlere freie Weglänge der Hadronen groß genug ist, um das System verlassen zu können. Sobald dies passiert, besitzen die Teilchen einen festen Impuls und können detektiert werden.

2.3.1. Nachweis eines Quark-Gluon-Plasmas

Die kurze Lebensdauer des QGP macht es unmöglich, es direkt nachzuweisen. Man kann aber anhand der austretenden und detektierten Teilchen Signaturen beobachten, deren wahrscheinlichste Erklärung die Ausbildung eines QGP ist. Einige dieser Signaturen sollen hier aufgeführt werden:

Jet-Quenching

In der frühen Phase der Kollision zweier Atomkernen kommt es zu harten Parton-Parton-Stößen, bei denen hohe Impulse übertragen werden. Infolgedessen fragmentieren die Partonen in einen Kegel von Hadronen, der *Jet* genannt wird. Aufgrund der Fragmentierung beider Partonen sind zwei Jets in einem Winkel von 180° zu beobachten¹.

¹Der Winkel bezieht sich auf das Schwerpunktsystem der Partonen.

2. Theorie

Ohne die Anwesenheit eines QGP würden die Partonen sofort fragmentieren. Aufgrund der Wechselwirkung der Partonen mit dem QGP verlieren sie beim Durchqueren des QGP sehr viel Energie, weshalb die entstehenden Jets sich stark von solchen unterscheiden, die kein QGP durchqueren. Man spricht in diesem Fall von *Jet-Quenching* [YHM05]. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 4.

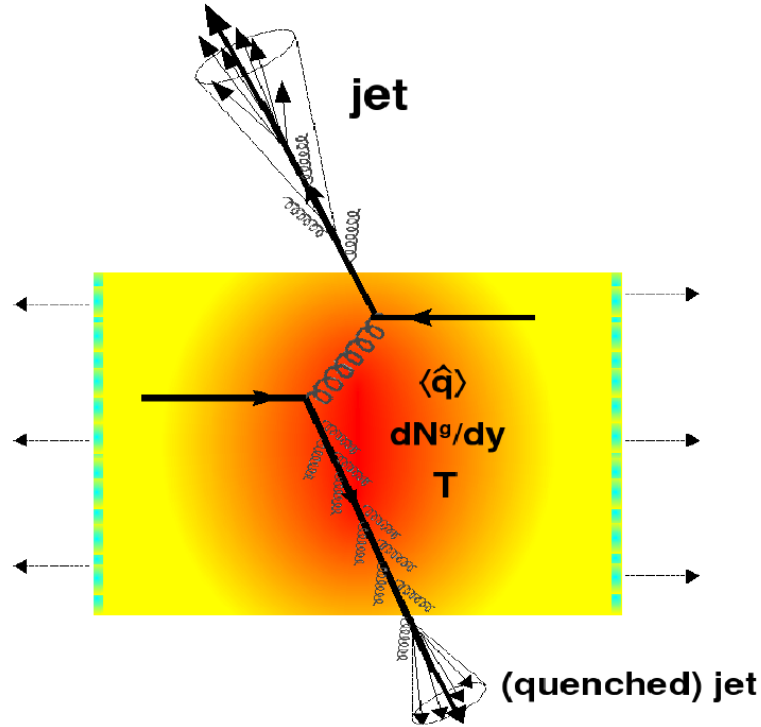


Abbildung 4: Jet-Quenching in einer Atomkern-Kollision. Zwei Quarks werden gestreut: Eines der Quarks fliegt direkt ins Vakuum, erzeugt Gluonen und hadronisiert, während das andere auf seinem Weg durch das QGP (orange-rot dargestellt) Energie verliert und außerhalb des QGP fragmentiert [Ent09].

Direkte Photonen

Unter *direkten Photonen* versteht man alle Photonen, die nicht aus hadronischen Zerfällen stammen, sondern in verschiedenen Phasen der Kollision entstehen. Man unterscheidet sie in *prompte Photonen* und *thermische Photonen*.

- Prompte Photonen entstehen bei der Kollision der Partonen durch harte Parton-Parton-Streuung.
- Thermische Photonen entstehen während der Phase des thermischen Gleichgewichts durch Zusammenstöße von Gluonen und Quarks miteinander.

Da Photonen nicht der starken Wechselwirkung unterliegen, können sie das QGP nahezu ungehindert verlassen und detektiert werden. Somit liefern sie Informationen über die verschiedenen Stadien der Ionenkollision. Um diese Informationen zu erhalten, muss man sie allerdings zunächst aus den Daten, in denen auch Photonen aus Hadronen-Zerfällen auftauchen, herausfiltern [KB04] [YHM05].

Erhöhung der Seltsamkeit

Strange-Quarks können aufgrund der Erhaltung der Seltsamkeit nur paarweise erzeugt werden. Ohne ein QGP müsste um ein $s\bar{s}$ -Paar zu erzeugen zuvor ein Meson-Paar erzeugt werden, welches dann unter anderem in die (Anti-)Strange-Quarks zerfallen kann. Die leichtesten seltsamen Teilchen sind (Anti-)Kaonen, die mit einer Ruhemasse von 987 MeV pro $K\bar{K}$ -Paar [YHM05] eine untere Energieschwelle für die Erzeugung eines $s\bar{s}$ -Paares angeben.

In einem QGP hingegen kann ein $s\bar{s}$ -Paar direkt durch die Fusion von zwei Gluonen entstehen. Die Energieschwelle hierfür liegt mit 200 MeV deutlich niedriger.

Falls ein QGP erzeugt wird, wird daher ein – im Vergleich zu anderen Teilchen – höherer Anteil an Strange-Quarks erwartet, als ohne die Anwesenheit eines QGP. Man spricht hierbei vom *strangeness enhancement factor*.

Quarkonia

Quarkonia sind Mesonen, die aus einem Quark und dem entsprechenden Antiquark bestehen: Ein Charm- (c) und ein Anticharm-Quark (\bar{c}) bilden ein *Charmonium*, ein Bottom- (b) und ein Antibottom-Quark (\bar{b}) bilden ein *Bottonium*.

Die Bildung solcher Quarkonia wird in einem QGP allerdings unterdrückt, da die Wahrscheinlichkeit, dass c , \bar{c} , b und \bar{b} sich aufgrund des Deconfinements so weit voneinander entfernen, dass ihre Farbladungen von up- oder down-Quarks abgeschirmt werden können sehr viel höher ist. Diese Unterdrückung konnte bereits am SPS am CERN für den niedrigsten Zustand des Charmoniums, das J/ψ , nachgewiesen werden [NA50].

Beim LHC werden allerdings weitaus höhere Kollisionsenergien erreicht als bisher (bis zu 30-fache Energien bei Pb-Pb-Kollisionen im Vergleich zum RHIC). Daher wird eine weitaus höhere Zahl an produzierten Charm- und Anticharm-Quarks erwartet, die sich zusätzlich im QGP frei bewegen können und daher mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auf passende Charm-/Anticharm-Quarks treffen, um Charmonia zu bilden. Für die Schwerionenkollisionen am LHC werden aufgrund dieser erhöhten Wahrscheinlichkeit sogar Erhöhungen der Charmonia-Produktion erwartet [YHM05, BMS07].

2. *Theorie*

3. Der LHC und ALICE

Im Oktober 1953 wurde das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) gegründet und sein Sitz in Genf festgelegt. Erste Versuche an Beschleunigern starteten vier Jahre später am *Synchro-Zyklotron*, das Protonen auf 600 MeV [CHH08] beschleunigte. Die nächste Stufe der Beschleuniger-Experimente fanden ab 1959 am *Proton Synchrotron* statt, mit dem Energien von 28 GeV [CHH08] erreicht werden konnten, und das, genau wie das 1976 gebaute *Super Proton Synchrotron* (Energien von bis zu 400 GeV), heute noch als Vorbeschleuniger dient. 1989 wurde der *Large Electron-Positron Collider* (LEP) in Betrieb genommen, mit dem bei der Kollision von Elektronen und Positronen Energien von über 200 GeV [CER08b] erreicht werden konnten. Im September 2008 wurde der *Large Hadron Collider* in Betrieb genommen, der in diesem Kapitel näher betrachtet wird.

3.1. Der Large Hadron Collider (LHC)

Der LHC ist der mit 27 km Länge größte Teilchenbeschleuniger der bis dato gebaut wurde. Installiert wurde er in dem ehemaligen LEP-Tunnel, der sich unterirdisch in einer Tiefe zwischen 50 und 175 m in der Nähe von Genf befindet.

In zwei Strahlröhren können bei einem Druck von 10^{-13} atm [CER08] sowohl Proton- als auch Schwerionen-Strahlen laufen, die an vier Punkten, an denen die vier Experimente positioniert sind, zur Kollision gebracht werden können.

Für Proton-Proton-Kollisionen sollen hierbei Schwerpunktsenergien von bis zu $\sqrt{s_{NN}} = 14$ TeV und für Blei-Blei-Kollisionen bis zu $\sqrt{s_{NN}} = 5,5$ TeV erreicht werden [CER08], womit der LHC den bisher stärksten Schwerionen-Beschleuniger RHIC¹ um das 30-fache übertrifft.

Eine hohe Luminosität² von $\mathcal{L} = 10^{-34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für Proton-Proton-Kollisionen und $\mathcal{L} = 10^{-27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für Blei-Blei-Kollisionen [CER08] soll eine genügend große Statistik zur Verfügung stellen.

Um solche Werte zu ermöglichen, muss ein enormer Aufwand betrieben werden: Die Teilchen werden durch Hohlraumresonatoren beschleunigt und durch supraleitende Magnete mit einer Feldstärke von bis zu 8,3 T auf eine kreisähnliche Bahn³ gezwungen. Dazu müssen die Geräte auf bis zu 1,9 K abgekühlt werden, weshalb ein neues Kühlsystem entwickelt wurde, das eine Kühlkapazität von insgesamt 170 kW besitzt. Die Magnete auf Betriebstemperatur zu bringen bzw. im Falle einer Wartung oder Erweiterung zu erwärmen dauert mehrere Wochen [CER08].

Zusätzlich zu den neu installierten Geräten werden ältere Beschleuniger, wie z.B. das Proton Synchrotron und das Super Proton Synchrotron als Vorbeschleuniger benutzt, um die Teilchen vor dem Einspeisen in den LHC auf Energien von bis

¹RHIC erreicht für Gold-Gold-Kollisionen Schwerpunktsenergien von $\sqrt{s_{NN}} = 0,2$ TeV [Hah03].

²Die Luminosität ist ein Maß für die Anzahl Teilchen pro Flächen- und Zeiteinheit.

³Die Bahn des LHC besteht eigentlich aus acht Bögen und acht geraden Strecken, entlang derer die vier Experimente, sowie Punkte zur Entsorgung oder Reinigung des Strahls liegen.

3. Der LHC und ALICE

zu 177 GeV pro Nukleon (Schwerionen) bzw. auf bis zu 450 GeV (Protonen) zu beschleunigen.

Entlang der Bahn des LHC sind vier große Experimente aufgebaut: *ATLAS* (**A** Toroidal **LHC** **A**pparatu**S**), *CMS* (**C**ompact **M**uon **S**olenoid) und *LHCb* (**L**arge **H**adron **C**ollider **b**eauty) zur Untersuchung von Proton-Proton-Kollisionen, sowie *ALICE* (**A** **L**arge **I**on **C**ollider **E**xperiment), welches für die Untersuchung von Blei-Blei-Kollisionen entworfen wurde.

ATLAS ist das größte Experiment am LHC und mit seinen enormen Ausmaßen (46 m Länge und 25 m Durchmesser) und einem Gewicht von 7000 Tonnen gleichzeitig der größte jemals entworfene Teilchen-Detektor [ATL10].

Eine der Hauptaufgaben von ATLAS ist, neben der Suche nach supersymmetrischen Teilchen und neuen Raumdimensionen, die Suche nach dem Higgs-Boson, dem Teilchen, das nach dem Standardmodell allen anderen Teilchen ihre Masse verleiht. Vor Inbetriebnahme des LHC konnte die Masse des Higgs-Bosons auf einen Bereich oberhalb von $113,2 \text{ GeV } c^{-2}$ eingegrenzt werden [Grz03]. Im Juli 2012 gab die ATLAS-Collaboration bekannt, dass ein Teilchen entdeckt wurde, welches eine Masse besitzt, die der erwarteten Masse des Higgs-Bosons von etwa 126,5 GeV entspricht [ATL12]. Um sicherzustellen, dass es sich hierbei wirklich um das Higgs-Boson handelt, müssen allerdings noch weitere Experimente durchgeführt werden.

CMS ist, ähnlich wie ATLAS, u.a. für die Suche nach dem Higgs-Boson entwickelt worden. Dabei ist CMS mit einer Länge von 21 m, einem Durchmesser von 15 m und einem Gewicht von 12500 t [CER08a] deutlich kleiner, wenn auch schwerer, als ATLAS. Die beiden „Konkurrenten“ CMS und ATLAS sind notwendig, um die etwaige Entdeckung des Higgs-Bosons durch eines der beiden Experimente von einem unabhängigen Experiment bestätigen zu lassen.

In der Tat gab auch CMS zur gleichen Zeit wie ATLAS die Entdeckung eines Teilchens mit einer Masse von 125,3 GeV [CMS12] bekannt, was im Rahmen der von beiden Kollaborationen angegebenen Messunsicherheiten mit den Ergebnissen von ATLAS übereinstimmt.

Außer der Suche nach dem Higgs-Boson beschäftigt sich CMS ebenfalls mit der Untersuchung zusätzlicher Dimensionen und der dunklen Materie.

LHCb ist mit einer Länge von 21 m, einer Breite von 13 m, einer Höhe von 10 m und einem Gewicht von 5600 t [CER08a] das kleinste der vier großen Experimente des LHC. Der deutlichste Unterschied zu den anderen drei Detektoren ist aber seine Bauweise: Während ALICE, ATLAS und CMS zylindrisch um das Strahlrohr gebaut sind, ist LHCb als Vorwärtsspektrometer aufgebaut, d.h. Teilchen werden nur in eine Richtung detektiert.

Die Hauptaufgabe von LHCb ist die Untersuchung der CP-Verletzung beim Zerfall von B-Mesonen und damit des Übergewichts von Materie gegenüber Antimaterie.

Dieser Überschuss ist eine notwendige Voraussetzung für die Existenz der heute bekannten Materie.

Der LHC und die Lage der Experimente sind in Abbildung 5 dargestellt.

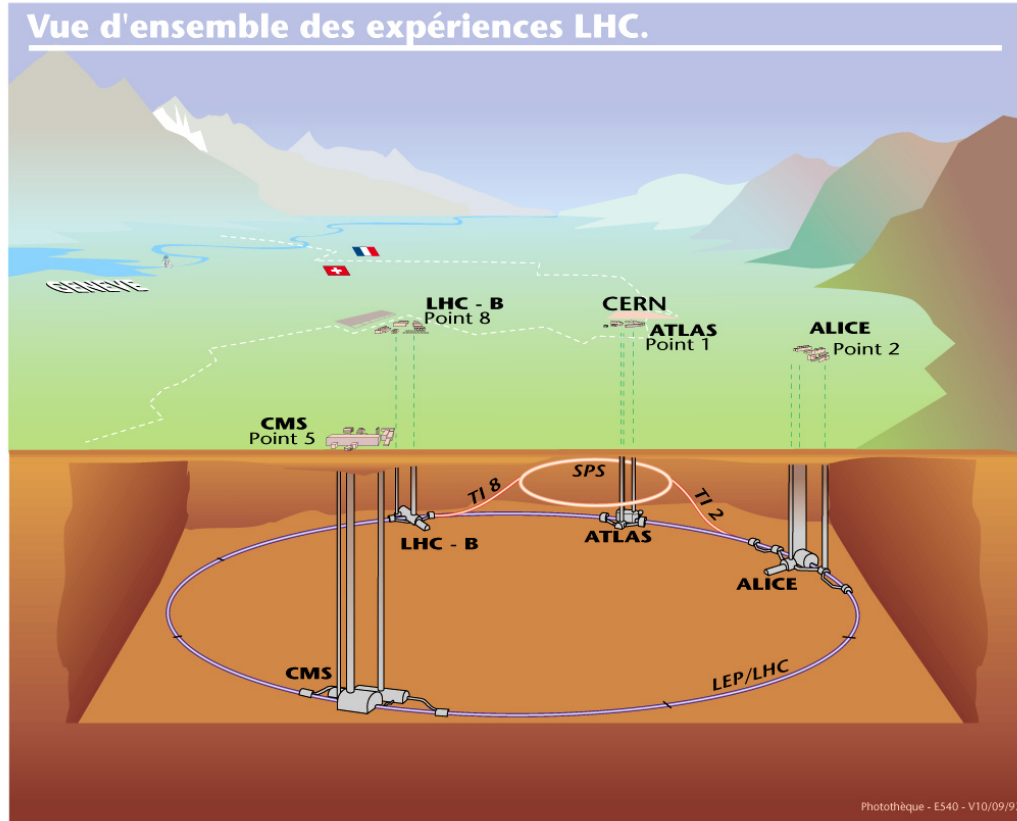


Abbildung 5: Der LHC und seine 4 Experimente: ALICE, ATLAS, LHCb und CMS. Zusätzlich ist das Super Proton Synchrotron (SPS) eingezeichnet, die letzte Stufe der Vorbeschleunigung, bevor die Teilchen in den LHC eingespeist werden. Hier werden die Blei-Atome zu Pb^{83+} ionisiert und auf eine Energie von 177 GeV pro Nukleon beschleunigt (Anmerkung: Die Teilchen besitzen schon vor dem SPS durch vorhergehende Beschleuniger eine gewisse Energie) [Car98].

3.2. ALICE

Um ein Quark-Gluon-Plasma zu erzeugen reichen die Energien, die bei Proton-Proton-Stößen erreicht werden, nicht aus. Daher werden im LHC auch Schwerionen wie Pb^{83+} miteinander oder auch mit Protonen zur Kollision gebracht. ALICE ist der einzige Detektor am LHC, der speziell für die Untersuchung von Schwerionen-

3. Der LHC und ALICE

Kollisionen ausgelegt ist¹. Dabei können aber auch hier wegen der kurzen Lebensdauer des QGP nur die entstehenden Teilchen (wie z.B. direkte Photonen oder Hadronen) untersucht werden. Mit 26 m Länge, einem Durchmesser von 16 m und einem Gewicht von etwa 10000 t [CER08a] ist ALICE der zweitgrößte Detektor des LHC und besteht, wie die anderen Detektoren auch, aus mehreren Subdetektoren, was in Abbildung 6 verdeutlicht wird. Dabei kann ALICE zunächst in den *Myonen-Arm* in Strahlrichtung, und den *zentralen Detektorteil*, der zylindrisch um das Strahlrohr angeordnet ist, unterteilt werden. Die Aufgabe des Myonen-Arms ist die Detektion von Myonen die u.a. Zerfallsprodukte schwerer Vektormesonen (z.B. J/ψ , Υ) sind. Produkte aus anderen Zerfällen, wie Photonen, Elektronen usw. werden im zentralen Detektorteil nachgewiesen.

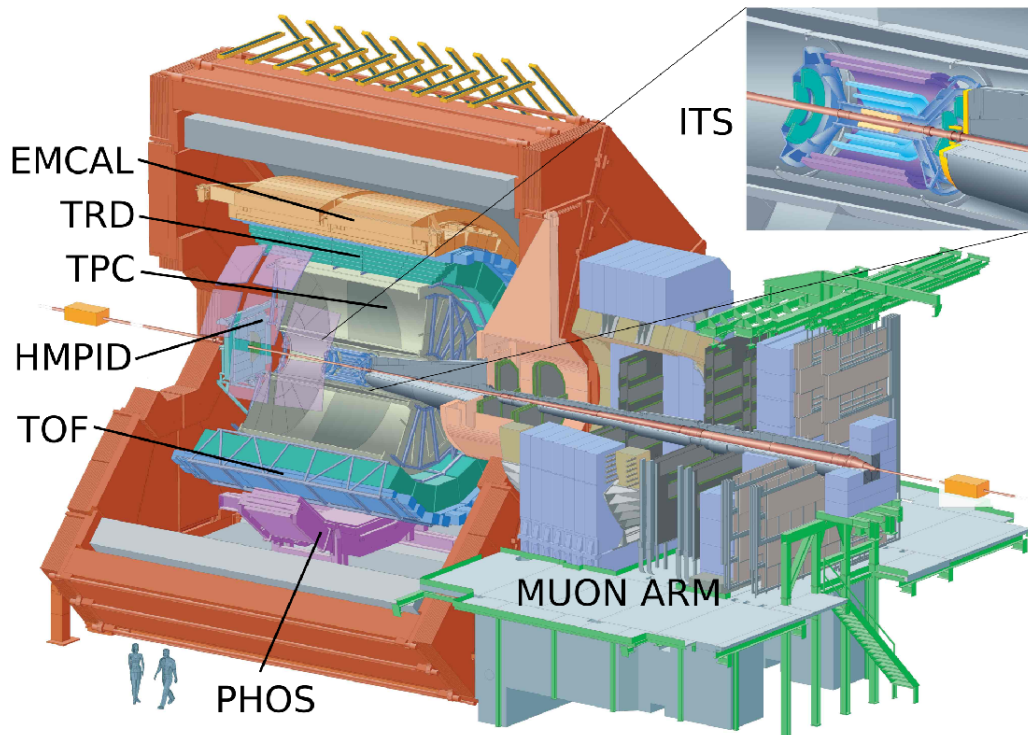


Abbildung 6: Der ALICE-Detektor mit seinen Subdetektoren. Er besteht aus einem zylindrischen zentralen Detektorteil und einem in Strahlrichtung liegenden Myonen-Arm. Der zentrale Detektorteil ist in den ehemaligen L3-Magneten eingebettet (orange dargestellt) [Kle08].

Der zentrale Detektorteil ist umgeben von einem Magneten, der ursprünglich für das L3-Experiment gebaut und später für das ALICE-Experiment wiederverwendet wurde. Dieser Magnet erzeugt ein Feld von 0,5 T, welches elektrisch geladene Teil-

¹ALICE ist ebenfalls in der Lage, Kollisionen leichterer Ionen oder Protonen zu untersuchen. Die dabei aufgenommenen Daten werden u.a. zur Kalibration und als Vergleichswerte genutzt.

chen entsprechend ihres Vorzeichens auf Helixbahnen zwingt. Dadurch kann über die Rekonstruktion der Teilchenspuren mit verschiedenen Detektoren ihr Impuls bestimmt werden.

Der innerste Subdetektor von ALICE, das *Inner Tracking System* (ITS) (4 cm bis 44 cm¹), besteht aus sechs Lagen hochauflösender Halbleiterdetektoren. Seine Aufgabe ist die Lokalisierung des primären Vertex² und der sekundären Vertizes³ kurzlebiger Teilchen und die Verbesserung der Impulsmessung der Teilchen.

Der nächste Subdetektor in radialer Richtung ist die *Time Projection Chamber* (TPC) (85 cm bis 2,5 m), der wichtigste Detektor in ALICE für die Spurrekonstruktion. In der TPC werden bis zu 20000 Teilchen pro Event über Vieldraht-Proportionalkammern detektiert. Dabei werden die Moleküle des Gases, mit dem die beiden Driftkammern der TPC gefüllt sind (90% Neon, 10% CO₂), beim Durchgang eines geladenen Teilchens ionisiert. Die herausgeschlagenen Elektronen wandern wegen des hohen elektrischen Feldes in der TPC durch die Driftkammern der TPC und ionisieren auf ihrem Weg weitere Gasmoleküle, wodurch es zur Gasverstärkung kommt. So werden pro einlaufendem geladenen Teilchen bis zu 40000 Elektronen in den Vieldraht-Proportionalkammern an den Enden der TPC detektiert. Je weiter ein Spurfragment eines geladenen Teilchens von den Enden der TPC entfernt ist, desto länger brauchen die Elektronen, um den Weg zurückzulegen. Eine Spur wird somit in eine Serie von Zeitsignalen umgewandelt. Wegen der Driftdauer der Elektronen von bis zu 88 μ s ist die TPC der langsamste Detektor von ALICE und wird nur ausgelesen, wenn das Ergebnis durch schnellere Detektoren als relevant angesehen wird.

An die TPC schließt sich der *Transition Radiation Detector* (TRD) (2,9 m bis 3,7 m) an, der Gegenstand dieser Arbeit ist und der daher im folgenden Kapitel gesondert behandelt wird.

Auf den TRD folgt der *Time of Flight*-Detektor (TOF), der aus insgesamt 90 Modulen besteht und eine aktive Fläche von 150 m² besitzt. Im TOF werden Teilchen, wie der Name bereits vermuten lässt, anhand ihrer Flugzeit mit Hilfe von Vielschicht-Widerstandsplattenkammern (MGRPC) identifiziert. Die MGRPCs funktionieren durch die Ionisation von Gasmolekülen durch geladene Teilchen und die Detektion der frei werdenden Elektronen. Ihre Zeitauflösung ist allerdings sehr viel höher als z.B. die der TPC. So können im TOF Zeitauflösungen von besser als 100 ps erreicht werden.

Die bisher aufgeführten Detektoren ITS, TPC, TRD, TOF decken eine Pseudo-Rapidität⁴ von $|\eta| < 0,9$ und den vollen Azimutwinkel ab [ALI04]. Außerhalb dieser Subdetektoren befinden sich noch weitere, die kleinere Winkelbereiche abdecken.

Der erste ist der *High Momentum Particle Identification Detector* (HMPID), ein aus sieben Modulen bestehender *Ring-Imaging-Cherenkov-Detector*, der Teilchen mit hohen transversalen Impulsen von bis zu 3,5 GeV/c (Kaonen) bzw. 5 GeV/c (Pro-

¹Soweit nicht anders angegeben sind alle Maße in radialer Richtung vom Strahlrohr gemessen.

²Der Punkt der Kollision

³Nachfolgende Teilchenzerfälle

⁴Die Pseudo-Rapidität ist ein Maß für den Winkel relativ zur Strahlachse.

3. Der LHC und ALICE

tonen) identifiziert. Der HMPID deckt einen azimuthalen Winkel von 58° ab, sowie eine Pseudorapidity von $|\eta| < 0,6$.

Die Aufgabe des *Photon-Spektrometer* (PHOS) ist die Detektion hochenergetischer Photonen, insbesondere der in Kapitel 2.3.1 erwähnten direkten Photonen, die Auskunft über die verschiedenen Stadien der Ionenkollision geben können.

Das PHOS ist etwa 4,6 m vom Vertex entfernt und deckt eine Fläche von ca. 8 m^2 , eine Pseudorapidity von $|\eta| < 0,12$ sowie einen Azimutwinkel von 100° ab. Es besteht aus fein segmentierten Blei-Wolfram-Szintillatoren, die allerdings außer Photonen auch geladene Teilchen detektieren könnten, was nicht erwünscht ist. Daher gehört zum PHOS zusätzlich ein *Charged Particle Veto*-Detektor mit dem geladene Teilchen von den Messungen ausgeschlossen werden können.

Der letzte Subdetektor, der ursprünglich nicht im Plan von ALICE auftauchte, aber nachträglich hinzugefügt wurde, ist das *Electro-Magnetic Calorimeter* (EMCal), das einen Azimutwinkel von 110° sowie eine Pseudorapidity von $|\eta| = 0,7$ abdeckt. EMCal dient zur Untersuchung des Jet-Quenchings und wird gleichzeitig als schneller Jet-Trigger eingesetzt, um z.B. das Auslesen der vergleichsweise langsamen TPC zu starten.

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

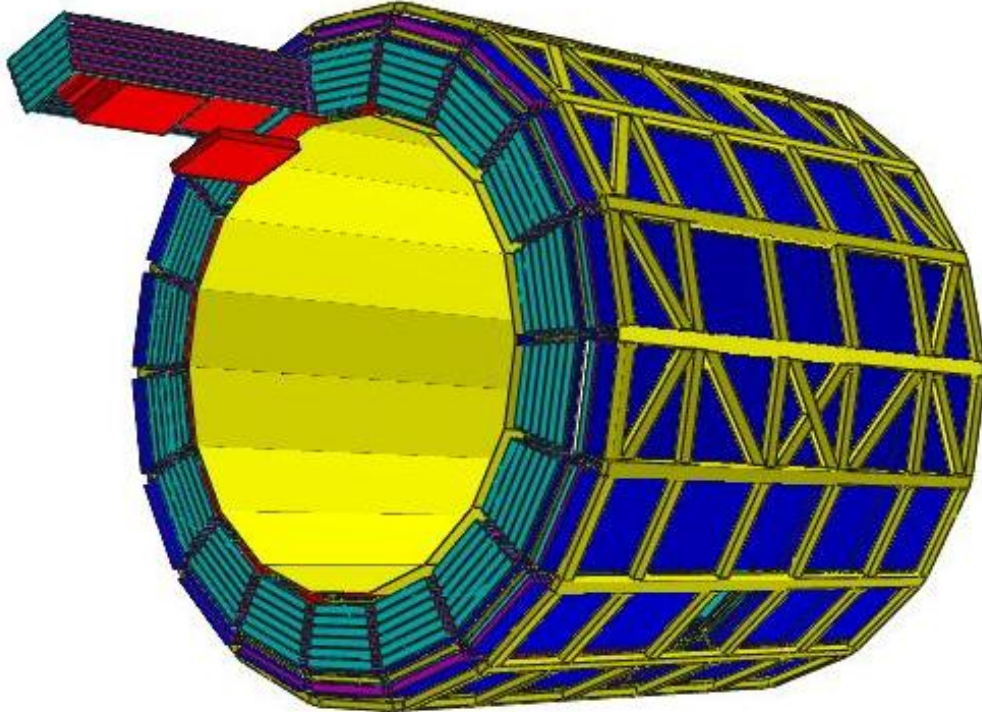


Abbildung 7: Schematische Darstellung des ALICE-TRD. Erkennbar sind die 18 Supermodule (Fronten grün eingefärbt), die wiederum in einzelne Kammern (rot) unterteilt sind [ALI09].

Der *ALICE Transition Radiation Detector (TRD)* ist im ALICE-Experiment zwischen der TPC und dem TOF eingebaut. Sein innerer Radius beträgt 2,9 m, sein äußerer Radius 3,7 m. Nach seiner Fertigstellung deckt der TRD den vollen Azimutwinkel sowie eine Pseudorapidity von $|\eta| = 0,9$ ab. Die gesamte Detektorfläche des TRD wird – sobald er fertig gestellt ist – über 700 m^2 betragen, wobei der Detektor mit etwa 18 m^3 eines Xe/CO₂-Gemisches gefüllt ist. Um die Module auszulesen werden über 1,2 Millionen Datenkanäle verbaut [TRD01].

4.1. Motivation für den TRD

In Kapitel 2.3.1 wurden Signaturen genannt, die auf die Entstehung eines QGP schließen lassen. Einige dieser Signaturen verlangen die Identifikation von Elektronen oder Positronen mit Transversalimpulsen von über $1 \text{ GeV}c^{-1}$. So zerfallen beispielsweise J/ψ ($c\bar{c}$ -Quark-Kombination) oder Υ ($b\bar{b}$ -Quark-Kombination), deren

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

Produktion im QGP am LHC theoretisch erhöht sein sollte, in Elektron-Positron-Paare mit hohem Impuls.

Im Impulsbereich oberhalb von $1 \text{ GeV}c^{-1}$ sind allerdings Pionen die Teilchen, die in Schwerionenkollisionen am häufigsten produziert werden. Pionen (π^+ , π^-) tragen ebenfalls eine elektrische Ladung von $\pm e$, dürfen aber in der Messung nicht mit Elektronen verwechselt werden.

Im Impulsbereich bis $1 \text{ GeV}c^{-1}$ kann die TPC den Pionenhintergrund ausreichend unterdrücken, bei höheren Impulsen schafft sie dies aber nicht mehr. Im TRD wird eine Unterdrückung des Pionenhintergrundes für Impulse über $1 \text{ GeV}c^{-1}$ aufgrund von *Übergangsstrahlung* ermöglicht (siehe Abschnitt 4.2).

Außer der Übergangsstrahlung werden in den TRD-Modulen auch die Spuren der Teilchen aufgezeichnet, wodurch die Spurrekonstruktion im ALICE – zusammen mit dem ITS und der TPC – vervollständigt wird. Teilchenspuren sind somit bis zum Vertex rekonstruierbar, wodurch wiederum der Impuls geladener Teilchen bestimmt werden kann.

Eine dritte Motivation für den TRD ist seine Funktion als Trigger. Der TRD ist in der Lage, physikalisch relevante Ereignisse schnell zu markieren, so dass diese bevorzugt aufgezeichnet werden. Dadurch wird eine ausreichende Statistik gewährleistet, um z.B. seltene Zerfälle wie $\Upsilon \rightarrow e^+ + e^-$ zu untersuchen¹.

4.2. Theorie des TRD

4.2.1. Die Bethe-Bloch-Formel

Durchquert ein geladenes Teilchen die Driftkammern des TRD, so deponiert es in ihnen Energie durch Stöße mit den Atomen innerhalb der Kammern. Die Hüllenelektronen der Atome werden durch diese Stöße angeregt, oder das Atom ionisiert. Der Energieverlust dE/dx der geladenen Teilchen wird dabei durch die *Bethe-Bloch-Formel* beschrieben [PRSZ09]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{n z^2}{\beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (3)$$

Dabei ist E die deponierte Energie, x die Dicke der durchquerten Schicht, m_e die Elektronenmasse, c die Lichtgeschwindigkeit, n die Elektronendichte des Mediums, z die Ladung des Teilchens, I das mittlere Anregungspotential der Atome² und $\beta = v/c$ der Quotient aus der Geschwindigkeit v des Teilchens und der Lichtgeschwindigkeit.

In Abbildung 8 ist der Verlauf des Energieverlustes eines Myons in Kupfer gegen den Impuls aufgetragen. Bei sehr kleinem Impuls nimmt der Energieverlust mit steigendem Impuls schnell ab, da die Teilchen beim Durchqueren des Mediums weniger Zeit haben, mit den Atomen zu interagieren. Teilchen, deren Impuls im Minimum der

¹Während eines typischen Betriebsjahrs mit Pb-Pb-Kollisionen werden etwa 550 Zerfälle eines Υ -Mesons in ein Elektron-Positron-Paar erwartet [TRD01].

²Das mittlere Anregungspotential der Atome beträgt für Kernladungszahlen $Z > 1$ typischerweise $16 \text{ eV} \cdot Z^{0,9}$ [PRSZ09]

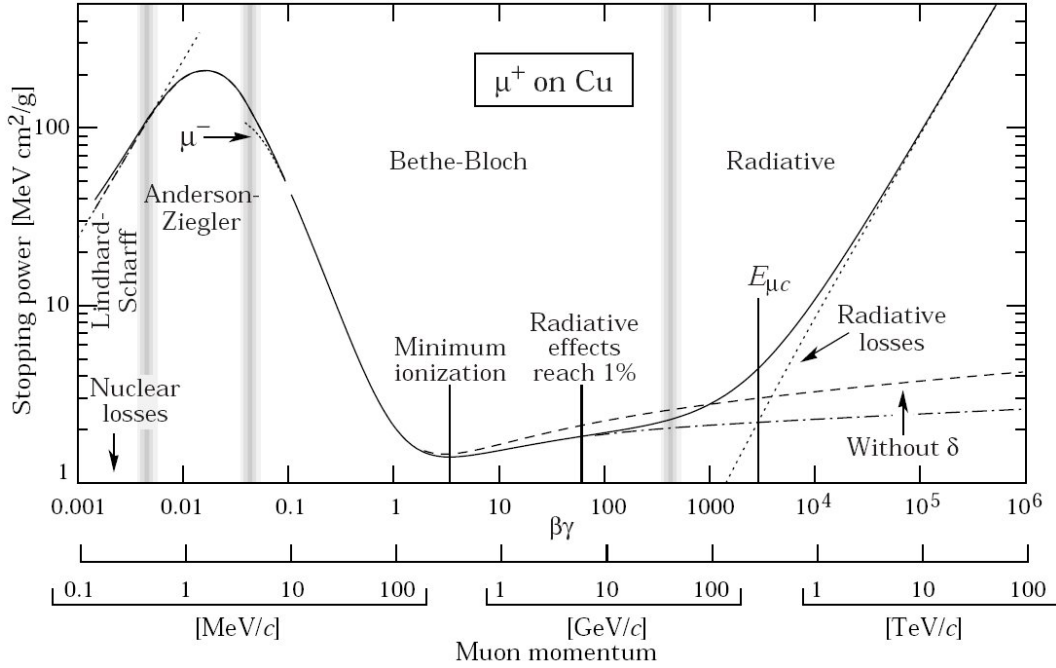


Abbildung 8: Aufgetragen ist der Energieverlust eines Myons in Kupfer gegen den Impuls. Der gesamte Energieverlust ist durch die durchgezogene Linie gekennzeichnet. Der Bereich zwischen den senkrechten Strichen ist der Bereich, in dem die Bethe-Bloch-Formel als Näherung gültig ist. Bei Energien oberhalb von $E_{\mu c}$ dominieren radiative Effekte [PDG10].

Kurve liegt, heißen *minimal ionisierend*. Mit steigendem Impuls wächst das transversale elektrische Feld des Teilchens, wodurch es auch mit Atomen, die weiter von der Spur des Teilchens entfernt sind, wechselwirken kann. Das Feld kann allerdings nicht beliebig groß werden, da es bei noch höheren Energien von den Elektronen der Atome des Mediums abgeschirmt wird. Die Kurve erreicht hier das sogenannte *Fermi-Plateau*, angedeutet durch die gestrichelte Linie in Abbildung 8.

Durch die Bethe-Bloch-Formel werden Energieverluste aufgrund von Stößen der durchquerenden Teilchen mit den Hüllenelektronen der Atome des Mediums beschrieben. Zusätzlich verlieren geladene Teilchen aufgrund von *Bremsstrahlung* auch Energie. Die Teilchen werden durch die Coulomb-Potentiale der Atome abgelenkt und geben Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab, wodurch sich der Anstieg der Kurve bei höheren Impulsen erklärt. Bei leichten Teilchen wie Elektronen und Positronen muss dieser Energieverlust schon bei geringen Energien¹ berücksichtigt werden.

¹Ab einer Energie von etwa $600 \text{ MeV}/Z$ [PRSZ09] überwiegt für Elektronen und Positronen der Energieverlust durch Bremsstrahlung.

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

4.2.2. Übergangsstrahlung

Übergangsstrahlung (eng.: *Transition Radiation*) wird genutzt um ultrarelativistische Elektronen oder Positronen ($\gamma \gg 1$) nachzuweisen. Sie kann entstehen, wenn ein geladenes Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit die Grenzfläche zwischen zwei Medien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten passiert. Dabei ist die Intensität der emittierten Übergangsstrahlung abhängig vom Lorentz-Faktor $\gamma = \frac{E}{mc^2}$. Die untere Schwelle, ab der die Intensität der Emission messbar ist liegt bei $\gamma \gtrsim 1000$ [Kwe09].

Im TRD wird die Übergangsstrahlung genutzt, um Elektronen und Pionen in einem Impulsbereich oberhalb von $1 \text{ GeV } c^{-1}$ zu separieren. Ein Elektron mit einem Impuls von $1 \text{ GeV } c^{-1}$ und einer Masse von $511 \text{ keV } c^{-2}$ hat einen Lorentz-Faktor von

$$\gamma = \frac{1 \text{ GeV}}{\frac{511 \text{ keV}}{c^2}} \cdot c^2 \approx 2000 \quad (4)$$

Ein Pion mit einem Impuls von $1 \text{ GeV } c^{-1}$ und einer Masse von $139,6 \text{ MeV } c^{-2}$ hingegen hat nur einen Lorentz-Faktor von $\gamma \approx 7$ und liegt somit deutlich unter der Schwelle zur Erzeugung von Übergangsstrahlung.

Da die Wahrscheinlichkeit für die Emission auch bei hohem γ sehr gering ist, ist es wichtig, dass das Teilchen möglichst viele Grenzschichten durchquert, um eine hohe Ausbeute an Übergangsstrahlungs-Photonen zu erreichen.

Die Intensität W der emittierten Strahlung kann in Abhängigkeit von ihrer Frequenz und dem Abstrahlwinkel durch die Gleichung

$$\frac{d^2W}{d\omega d\vartheta} = \frac{2\alpha\hbar\vartheta^3}{\pi} \left(\frac{1}{1/\gamma^2 + \vartheta^2 + \omega_1^2/\omega^2} - \frac{1}{1/\gamma^2 + \vartheta^2 + \omega_2^2/\omega^2} \right)^2 \quad (5)$$

beschrieben werden [ESA00]. Dabei sind ω und ϑ die Frequenz und der Abstrahlwinkel des emittierten Photons, α die Feinstrukturkonstante und $\omega_{1/2}$ die Plasma-Frequenzen¹ der durchquerten Medien.

Gleichung (5) hat ein Maximum bei einem Winkel von $\vartheta = 1/\gamma$, d.h. die Übergangsstrahlung wird in einem engen Kegel um die Trajektorie des Teilchens emittiert. Sie kann also der Spur des Teilchens zugeordnet werden.

Die durch die Elektronen erzeugte Übergangsstrahlung kann wiederum Gasatome in der Driftkammer des TRD ionisieren und somit nachgewiesen werden, wodurch die Elektronen von den Pionen unterschieden werden können. Näheres dazu in Kapitel 4.5.

4.3. Aufbau des TRD

Der TRD besteht aus 18 sogenannten *Supermodulen*, die zusammengesetzt einen Zylinder bilden. Die Supermodule sind in axialer Richtung jeweils in 5 Stapel (*stack*)

¹Plasmafrequenzen sind die Frequenzen, mit denen die gegeneinander verschobenen Raumladungen in einem insgesamt elektrisch neutralen Medium schwingen.

und in radialer Richtung in 6 Ebenen (*layer*) unterteilt. Pro Stapel und Ebene gibt es eine Auslesekommer, die *Modul* genannt wird und wieder in zwei Halbkammern unterteilt werden kann. Je nach Größe des Moduls sind auf ihm 104 oder 138 *Multi-Chip-Module* (MCM) in jeweils 8 Spalten (*column*) bzw. 12-16 Reihen (*pad-rows*) angebracht. Jedes MCM liest 18 ADC-Kanäle, sogenannte *pads* aus. In den MCMs wird eine erste Auswertung der Daten vorgenommen, was den Einsatz des TRD als schnellen Trigger ermöglicht. In Abbildung 9 ist der Aufbau des TRD skizziert.

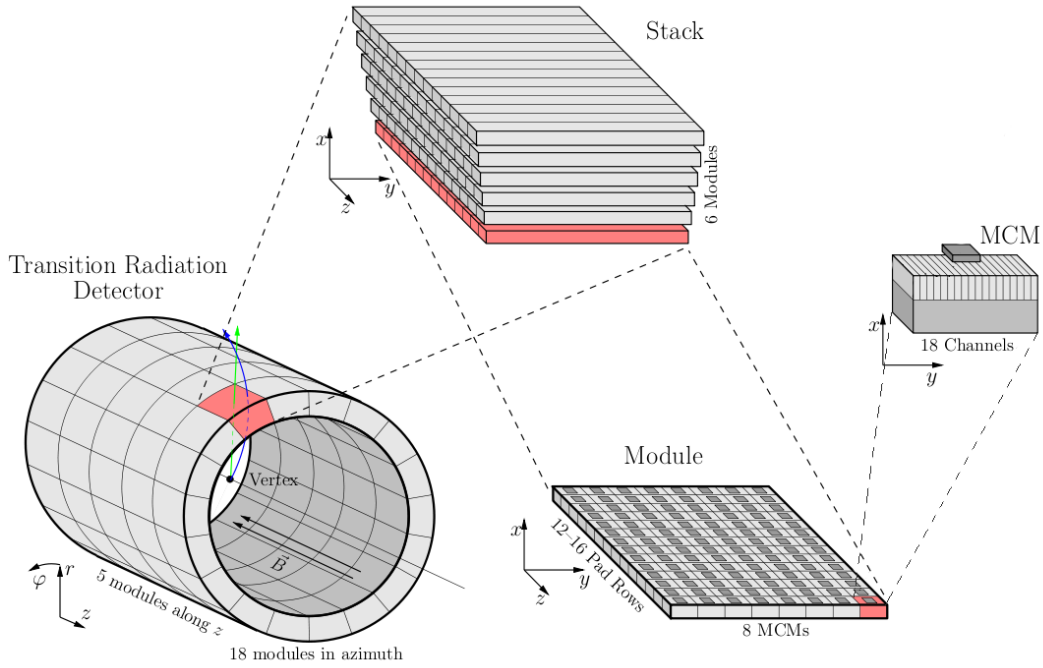


Abbildung 9: Schematischer Aufbau des TRD: Jedes der 18 Supermodule ist aus 30 Modulen, eingeteilt in 5 Stapel und 6 Ebenen, zusammengesetzt. Pro Modul gibt es 12-16 Pad-Rows mit jeweils 8 MCMs, die wiederum jeweils 18 Kanäle auslesen. [Cuv03]

4.3.1. Modulaufbau

Jedes der Module ist ca. 11 cm dick und stellt für sich bereits einen vollwertigen Übergangsstrahlungsdetektor dar, bestehend aus einem *Radiator*, einer Auslesekommer, die sich wiederum in einen Drift- und einen Verstärkungsbereich unterteilt, und einer Trägerplatte (eng.: *backplane*). Der schematische Querschnitt eines Moduls ist in Abbildung 10 dargestellt.

Die Übergangsstrahlung wird erzeugt, wenn ein geladenes Teilchen den Radiator durchquert. Radiatoren bestehen üblicherweise aus Stapeln aus Polypropylen-Folien, da diese die beste Strahlungsausbeute bieten. Um diese Folien in den TRD einzubauen müsste man sie auf stabile Metallrahmen spannen, die für den Messprozess aber

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

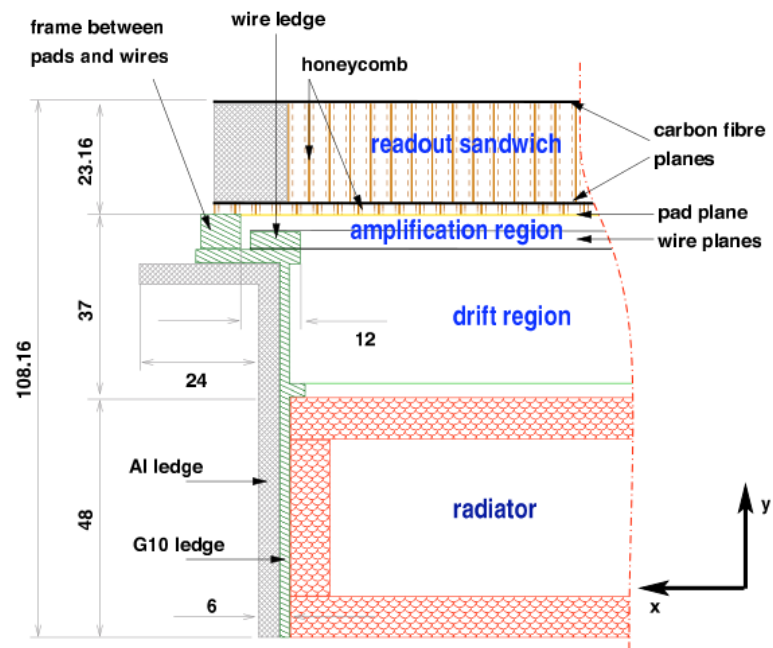


Abbildung 10: Schematischer Querschnitt eines TRD-Moduls. Im unteren Bereich befindet sich der Radiator, auf den die Drift- und Verstärkungsregion sowie die Auslese-Pads und die Trägerplatte folgen. Alle Maße sind in Millimeter angegeben [Ems10].

totes Material darstellen. Dies würde die geometrische Effizienz des TRD senken und gleichzeitig die Ausbeute der außerhalb des TRD gelegenen Detektoren vermindern. Aus diesen Gründen besteht der Radiator an den Grenzflächen aus 8 mm Rohacell HF71 Schaum, bedeckt mit 0,1 mm Kohlefaser-Laminat, was für eine hohe mechanische Stabilität bei geringer Dichte und guter Strahlungs-Ausbeute sorgt. Der Zwischenraum ist mit Polypropylen-Fasern (Freudenberg LRP375BK) gefüllt, die eine annähernd gute Übergangsstrahlungsausbeute liefern wie die Polypropylen-Folien. Auf das obere Ende des Radiators ist eine mit Aluminium beschichtete Mylar-Folie geklebt, die einerseits das Gas in der Driftregion hält und andererseits als Driftelektrode dient. Abbildung 11 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme des im Radiator verbauten Materials. Deutlich erkennbar ist die hohe Anzahl an Grenzflächen, die für die Emission von Übergangsstrahlung wichtig sind.

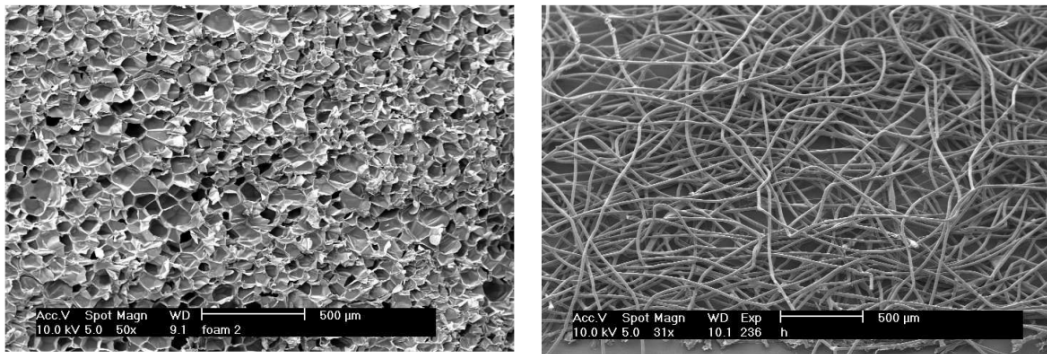


Abbildung 11: Das Radiatormaterial unter dem Elektronenmikroskop. Das linke Bild zeigt den Rohacell HF71 Schaum, das rechte Bild zeigt die Polypropylen-Fasern [TRD01].

Die Auslesekommer besteht aus einer 30 mm langen Driftregion und einer 7 mm langen Violdrahtproportionalkammer, die als Verstärkungsregion dient. Letztere beginnt mit den Kathodendrähten, die in einem Abstand von 2,5 mm zueinander angeordnet sind, gefolgt von den Anodendrähten in der Mitte der Verstärkungsregion (der Abstand der Drähte untereinander beträgt 5 mm) und endet mit den Kathodenpads. Die Kathodenpads bestehen aus auf der Ausleseplatte angebrachten Streifen, die je nach Position zwischen $4,9 \text{ cm}^2$ und $8,13 \text{ cm}^2$ groß sind [TRD01]. In den sechs aufeinanderfolgenden Ebenen sind die Pads abwechselnd um $\pm 2^\circ$ relativ zur z-Achse gedreht, wodurch die Auflösung in z-Richtung erhöht wird. Nähere Informationen hierzu finden sich in [Ems10] oder in [TRD01].

Die gesamte Auslesekommer ist mit einem Xe-CO₂-Gemisch im Verhältnis 85:15 gefüllt.

Die Trägerplatte besteht aus einem wabenförmigen Kohlefaser-Sandwich. Sie sorgt für die nötige mechanische Stabilität und die Planheit der Oberfläche des Moduls.

Jedes Modul besitzt 16 Pad-Reihen (außer die Module in Stapel 2, diese besitzen 12 Pad-Reihen) mit jeweils 144 Kathodenpads, die – in Gruppen á 18 Pads – von den MCMs auf der Rückseite der Trägerplatte ausgelesen werden.

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

4.3.2. Verstärkung

Da die Ladung, die durch das geladene Teilchen, das den Detektor durchquert, erzeugt wird, nicht ausreicht, um ausgelesen zu werden, muss sie im Verstärkungsbereich vervielfacht werden.

Dazu wird an den Anodendrähten eine Spannung von +1,4 kV angelegt, während an den Kathodendrähten keine Spannung anliegt. Dadurch entsteht ein inhomogenes elektrisches Feld. In diesem Feld werden die Elektronen so stark beschleunigt, dass sie weitere Gasatome ionisieren, wodurch die Ladung lawinenartig verstärkt wird. Die erzeugten Elektronen wandern zu den Anodendrähten, die Ionen zu den Kathodenpads und -drähten. In den Kathodenpads wird eine Spiegelladung induziert, die von den ladungssensitiven Vorverstärkern in der Ausleseelektronik in ein Spannungssignal umgewandelt wird.

Die zurückbleibenden, angeregten Xenon-Atome gelangen durch Emission von Photonen wieder in den Grundzustand. Damit die Lawine nicht dauerhaft aufrecht erhalten wird und ein neues Teilchen detektiert werden kann, fungiert das CO₂ als Quencher und absorbiert die emittierten Photonen.

4.4. Ausleseelektronik

Auf der Trägerplatte ist ein Teil der Elektronik des TRD verbaut. Dazu gehören die Multi-Chip-Module (MCM), die die Kathodenpads auslesen und die Daten digitalisieren und aufbereiten, optische Ausleseeinheiten (*Optical Readout Interface*, ORI), die die Daten von den Auslesekamern weiterleiten und Detektor-Kontrollkarten (*Detector Control System-Board*, DCS-Board), mit denen die MCMs, die ORIs und die Auslesekamern konfiguriert und kontrolliert werden. Abbildung 12 zeigt die auf einem Modul verbaute Ausleseelektronik. Ein weiterer Bestandteil der Ausleseelektronik, die *Global Tracking Unit* (GTU) befindet sich außerhalb des L3-Magneten.

4.4.1. Readout Boards

Die Elektronik auf den Modulen ist auf sechs (Stapel 2) bis acht (alle anderen Stapel) Ausleseplatinen, genannt *ReadOut Boards* (ROB), aufgeteilt auf denen die MCMs, die ORIs und das DCS-Board angebracht sind. Auf den ROBs befinden sich außerdem Stromkreise zur Versorgung der MCMs und ORIs, ein *Network Interface* um die Daten von den MCMs an die ORIs zu leiten, sowie ein SCSN Bus, über den das DCS-Board Zugriff auf die MCMs hat.

Auf jedem ROB befinden sich Regler für die Stromzufuhr, die 1,8 V oder 3,3 V für die MCMs zur Verfügung stellen und von der Software des DCS-Boards, auf dem ein Linux-System installiert ist, gesteuert werden können.

Nicht alle ROBs sind gleich aufgebaut. Die ROB-Typen T1A, T1B, T4A und T4B tragen jeweils 17 MCMs und unterscheiden sich nur in der Anordnung ihrer Steckplätze für die Verbindungen untereinander. ROBs des Typs T2B besitzen zusätzlich eine Schnittstelle für das DCS-Board, und die Typen T3A und T3B jeweils eine Schnittstelle für ein ORI. Ein vollständiges Modul besitzt zwei T1A-ROBs sowie je

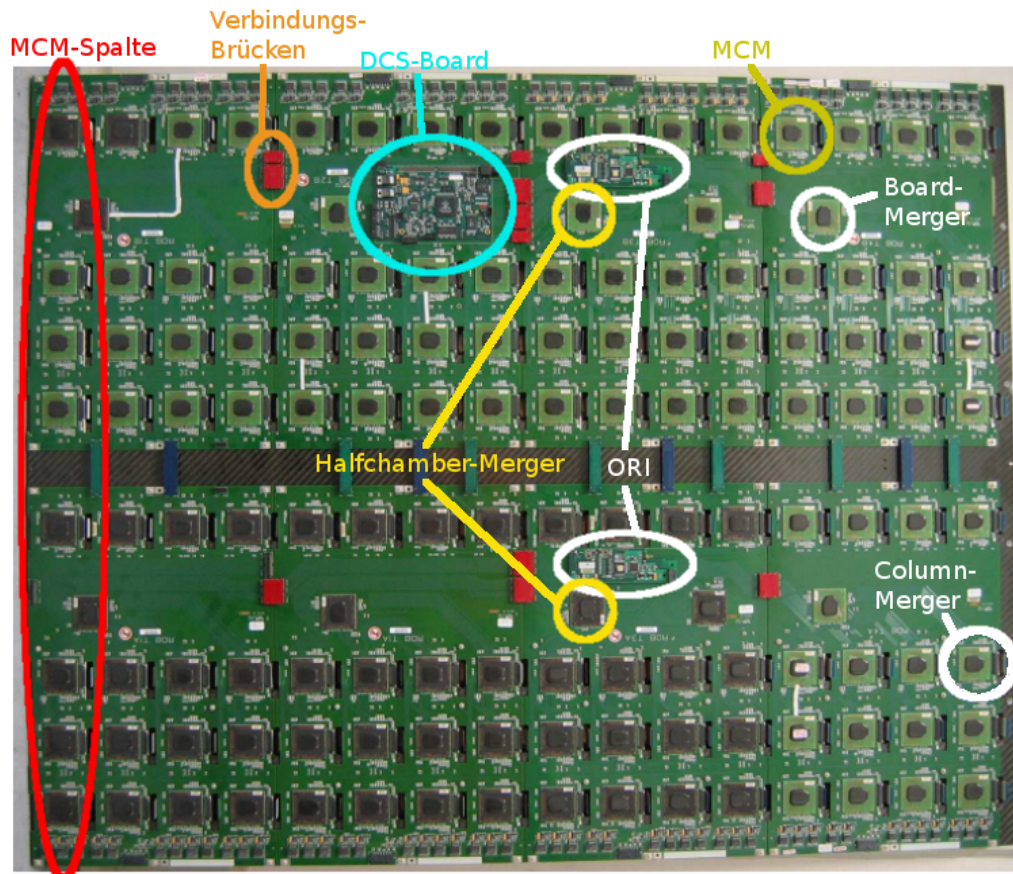


Abbildung 12: Die auf einem TRD-Modul verbaute Ausleseelektronik. Eingezeichnet sind die optischen Ausleseeinheiten (ORI), die digitale Detektor-Kontrollkarte (DCS), sowie ein einzelnes Multi-Chip-Modul (MCM) und eine MCM-Spalte (MCM-column) [Ems10].

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

ein ROB der Typen T1B, T2B, T3A und T3B. Die ROBs der Typen T4A und T4B sind zusätzlich auf allen Modulen der Stapel null, eins, drei und vier (sogenannte C1-Kammern) verbaut, während sie auf den Modulen des Stapels 2 (C0-Kammern) fehlen. Die Anordnung der einzelnen ROBs ist in Abbildung 13 skizziert.

Verbunden werden die ROBs untereinander über Brücken, die in die jeweiligen Steckplätze gesteckt werden können. Sie sind in Abbildung 12 eingezeichnet.

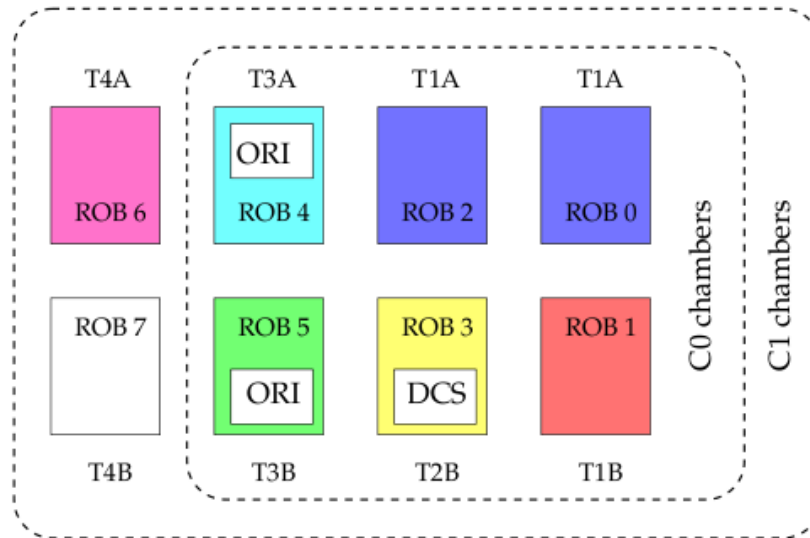


Abbildung 13: Schema der verschiedenen ROB-Typen auf einem TRD-Modul. Alle ROB-Typen tragen mindestens 17 MCMs. Auf den Typen T3A und T3B sind zusätzlich die ORIs, sowie ein weiteres MCM angebracht. Auf dem Typ T2B befindet sich das DCS-Board [Wes09].

4.4.2. Detektor-Kontrolle

Um einen möglichst reibungslosen Messablauf zu ermöglichen muss die Elektronik der Ausleseammern ständig kontrolliert und hin und wieder konfiguriert werden. Hierfür ist das Detektor-Kontroll-System zuständig, genauer gesagt das DCS-Board der Ausleseammern. Es kontrolliert sämtliche auf einem Modul verbaute Elektronik inklusive ihrer Temperatur und steuert die Stromversorgung der einzelnen Bauteile. Das DCS-Board ist eine Computer-Platine, auf der ein Linux-System installiert ist und die außer im TRD auch in der TPC und im PHOS zum Einsatz kommt. Sie kann über ein TCP/IP-Netzwerk gesteuert werden.

Vom DCS-Board aus kann jedes einzelne MCM über einen *Slow Control Serial Network-Bus* (SCSN-Bus) angesteuert werden. Dadurch kann der MCM, falls er beschädigt sein sollte oder falsche Daten liefert, aus dem Datenstrom herausgenommen werden, so dass ein Datenverlust der gesamten Kammer verhindert wird. Außerdem übernimmt das DCS-Board die Konfiguration der MCMs – die über keinen eigenen nicht flüchtigen Speicher verfügen – sobald sie eingeschaltet werden.

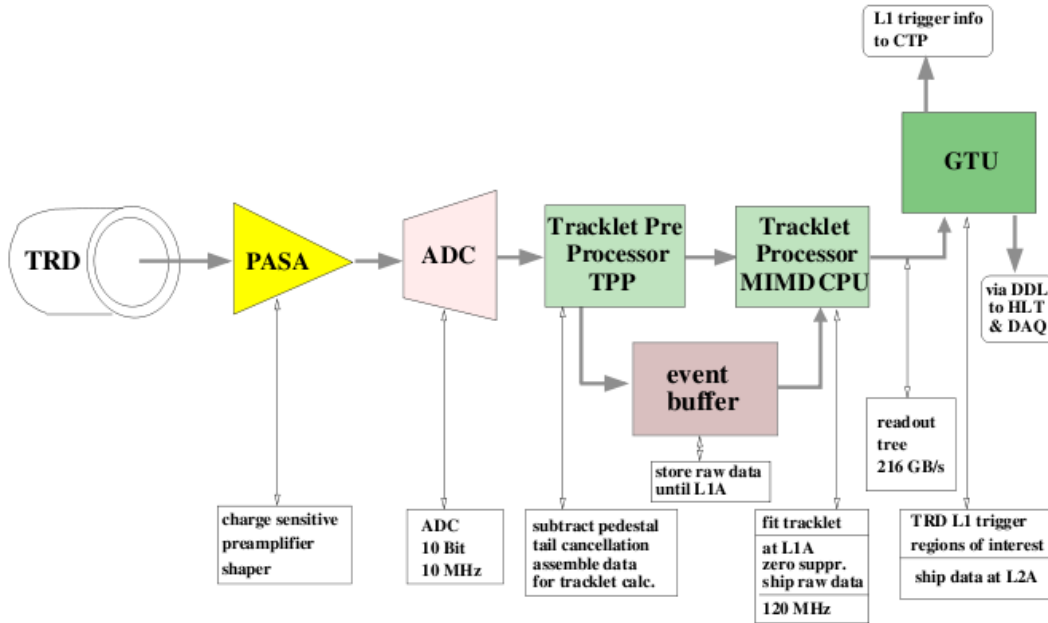


Abbildung 14: Die Signalverarbeitung in einem MCM, schematisch dargestellt. Die Kathodenpads werden vom PASA ausgelesen und die Signale verstärkt an den TRAP weiter geleitet, wo sie in digitale Daten umgewandelt und durch verschiedene digitale Filter aufbereitet werden [Ems10].

4.4.3. Multi-Chip-Module

Das Auslesen der Kathodenpads erfolgt durch 16 der auf den ROBs verbauten Multi-Chip-Module (MCM), wobei jeder dieser MCMs 18 Pads mit einer Frequenz von 10 MHz auslesen kann. Zusätzlich gibt es auf jedem ROB mindestens einen weiteren MCM, der zur Weiterleitung der Daten dient (siehe Kapitel 4.4.5). Zusätzlich berechnen die MCMs Spursegmente (*Tracklets*), also den Weg, den das Teilchen durch die Kammer genommen hat. Diese Tracklet-Informationen werden an die GTU gesendet und dort zur Rekonstruktion der Teilchenspur genutzt. Aufgrund der so gewonnenen Informationen können verschiedene Trigger-Entscheidungen getroffen werden.

Ein MCM besteht aus zwei Teilen: Einem Analog-Chip mit einem *PreAmplifier/ShAper* (PASA), der wiederum 18 Kanäle für die Auslese pads bereitstellt und einem zweiten Chip, dem *TRAcklet Processor* (TRAP), der 21 *Analog-Digital-Konverter* (ADC) und den digitalen Teil des MCM beinhaltet.

Jedes Kathodenpad ist mit einem der 18 PASA verbunden, der die auf dem Pad induzierte Ladung ausliest. Der PASA wandelt die Ladung in eine Spannung um, erzeugt so ein Signal, verstärkt es und gibt es an den TRAP weiter.

Im TRAP werden die bis jetzt noch analogen Daten der PASAs von ADCs in digitale Signale umgewandelt. Dies geschieht mit einer Rate von 10 MHz, was bei einer Driftzeit von $2\text{ }\mu\text{s}$ 20 Datenpunkten (*timebins*) entspricht. Die weitere Verarbeitung der Daten ist in Abbildung 14 dargestellt.

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

Nach der Digitalisierung des Signals kann es mit verschiedenen Filtern bearbeitet werden. Die Aufbereitung mit Hilfe der Filter muss an dieser Stelle geschehen, da die so entstehenden Informationen für weitere Trigger-Entscheidungen ausschlaggebend sind. Je nach Konfiguration der TRAPs sind die fünf möglichen Filter aktiviert oder deaktiviert.

Folgende Filter stehen zur Verfügung [Ang05]:

- *Nonlinearity Correction*: Dieser Filter korrigiert anhand einer Lookup-Tabelle Nichtlinearitäten, die durch den PASA verursacht werden.
- *Pedestal Correction*: Mit diesem Filter wird die individuelle Baseline für jeden Kanal bestimmt, abgezogen und eine allgemeingültige Baseline addiert.
- *Gain Correction*: Dieser Filter kompensiert die geringen Unterschiede bei der Verstärkung der einzelnen PASAs und ADCs.
- *Tail Cancellation*: Mit diesem Filter wird der lange Ausläufer des Signals, bedingt durch das Driften der Xe-Ionen nach der Gasverstärkung, unterdrückt.
- *Crosstalk suppression*: Aufgrund der Kapazität der Kathodenpads beeinflusst die in einem Pad induzierte Ladung ebenfalls die benachbarten Pads. Dieser Effekt wird hiermit aus den Signalen herausgefiltert. Bei bisherigen Messungen war das Einschalten dieses Filters jedoch noch nicht notwendig.

Sind die Filter aktiviert, so laufen sie kontinuierlich. Die Ausgabe der Filter wird in einem Ereignispuffer abgelegt und gleichzeitig an den Spur-Präprozessor (*Tracklet Preprocessor*, TPP) weitergegeben, der nach Treffern auf den Kathodenpads sucht und Fit-Parameter für die Spursegmente berechnet. Dabei können vier Treffer gleichzeitig bearbeitet werden. Werden mehr als vier Ereignisse gefunden, so werden die vier Ereignisse mit der größten deponierten Ladung ausgewählt. Ist per Konfiguration der MCMs keine Verzögerung für die Ausgabe der ADCs eingestellt, so sind die TPPs fast gleichzeitig mit der Driftzeit mit den Berechnungen fertig. Die Ergebnisse werden dann an den Spur-Prozessor (*Tracklet Processor*, TP) weitergeleitet, wo sie von vier CPUs gleichzeitig verarbeitet werden können. Jeder CPU kann dabei ein Spursegment aus den vorher bestimmten Fit-Parametern berechnen. Aufgrund der durch das Magnetfeld des L3-Magneten bedingten Lorentz-Kraft ist die Spur der Teilchen gekrümmt. Die Krümmung ist aber bei hohen Impulsen so gering, dass sie bei einer Driftstrecke von 3 cm vernachlässigt werden kann. Die Spursegmente können also durch lineare Fits beschrieben werden. Sobald die Berechnung fertig ist, werden die Spursegment-Parameter, also die Steigung und der Offset des Spursegments, über den *Readout Tree* (siehe Abschnitt 4.4.5) an die ORIs geschickt.

Wird vom Trigger-System entschieden, dass ein Ereignis relevant ist, so wird ein Signal an die Ausleseammern geschickt und die MCMs senden den Inhalt des Ereignispuffers an die GTU.

An den Grenzen zwischen zwei MCMs kann es zu unerwünschten Grenzeffekten kommen. Um diese zu vermeiden, werden pro MCM drei Kanäle von je einem ADC im gleichen MCM und zusätzlich von einem MCM im benachbarten ADC ausgelesen. Mehr dazu in Kapitel 5.

4.4.4. Global Tracking Unit

In der Global Tracking Unit (GTU) werden die Daten der MCMs gesammelt und zwischengespeichert sowie ein L1-Trigger-Beitrag für das ALICE-Triggersystem geliefert. Für nähere Informationen zum Triggersystem sei hier auf [EFK04] verwiesen. Die GTU beinhaltet eine *Trigger Generation Unit* (TGU), 90 *Track Matching Units* (TMU) und 18 *SuperModule Units* (SMU) und ist über zwei optische Verbindungen pro Auslesekommer mit dem TRD verbunden. Die Spursegmente eines Stapels werden von einer TMU empfangen, die die Spuren rekonstruiert und die Teilchen-Impulse berechnet. Aufgrund der so erhaltenen Informationen wird von der TGU eine L1-Beitrag-Entscheidung getroffen, die dann an den *Central Trigger Processor* (CTP) von ALICE weitergegeben wird (auch hierzu siehe [EFK04]). Kommt von dem CTP ein L1A-Triggersignal zurück, so werden die Rohdaten der MCMs ausgelesen und in den SMUs zwischengespeichert bis vom CTP ein L2-Trigger zur Weiterleitung oder zum Verwerfen der Daten kommt. Sollte nach $0,5\ \mu\text{s}$ kein Signal vom CTP kommen, werden die Daten verworfen. In den SMUs können mehrere Ereignisse zwischengespeichert werden, was die Totzeit des TRD verringert.

4.4.5. Der Weg der Daten

Der *Readout Tree* (ROT) ist ein Netzwerk, das einerseits die Daten der MCMs zu den ORIs sendet und gleichzeitig Triggersignale an die MCMs gibt.

Der ROT ist ein in vier Stufen unterteiltes hierarchisches Netzwerk, anschaulich dargestellt in Abbildung 15.

Auf der niedrigsten Stufe stehen die einfachen MCMs, die die Daten aufnehmen und die Tracklets (Teile der Teilchenspur) berechnen. Auf jedem ROB gibt es zwölf normale MCMs, die keine andere Aufgabe haben. Auf der nächsten Stufe stehen die *Column-Merger*. Das sind MCMs, die ebenfalls Daten aufnehmen und Tracklets berechnen, die aber zusätzlich noch die Daten der drei anderen MCMs in ihrer Spalte sammeln und alle Daten zusammen an den *Board-Merger* schicken. Dieser stellt die dritte Hierarchie-Stufe dar. Auf jedem ROB gibt es einen Board-Merger. Dies ist ein MCM, der keine eigenen Daten aufnimmt, sondern ausschließlich die Daten der vier Column-Merger sammelt und sie weiterschickt. Die höchste Hierarchie-Stufe bildet der *Halfchamber-Merger*. Halfchamber-Merger nehmen wie Board-Merger keine eigenen Daten auf, sondern sammeln die Daten der drei (Stapel 2) bzw. vier Board-Merger und geben sie an das ORI weiter. Halfchamber-Merger sind nur auf ROBs verbaut, auf denen sich auch ORIs befinden. Die Daten werden von den ORIs über Glasfaserkabel an die außerhalb des L3-Magneten positionierte GTU geleitet, wo u.a. Triggerentscheidungen getroffen werden und von dort aus – sofern das Event vom Trigger-System als relevant eingestuft wurde – weiter zur Datenverarbeitung (*Data Acquisition*, DAQ).

Triggersignale werden über eine optische Faser (TTC-Faser) an das DCS-Board gesendet und an die beiden Halfchamber-Merger weitergegeben. Von dort aus werden

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

die Signale über den ROT in entgegengesetzter Richtung zum Datenstrom bis hin zu den normalen MCMs geleitet.

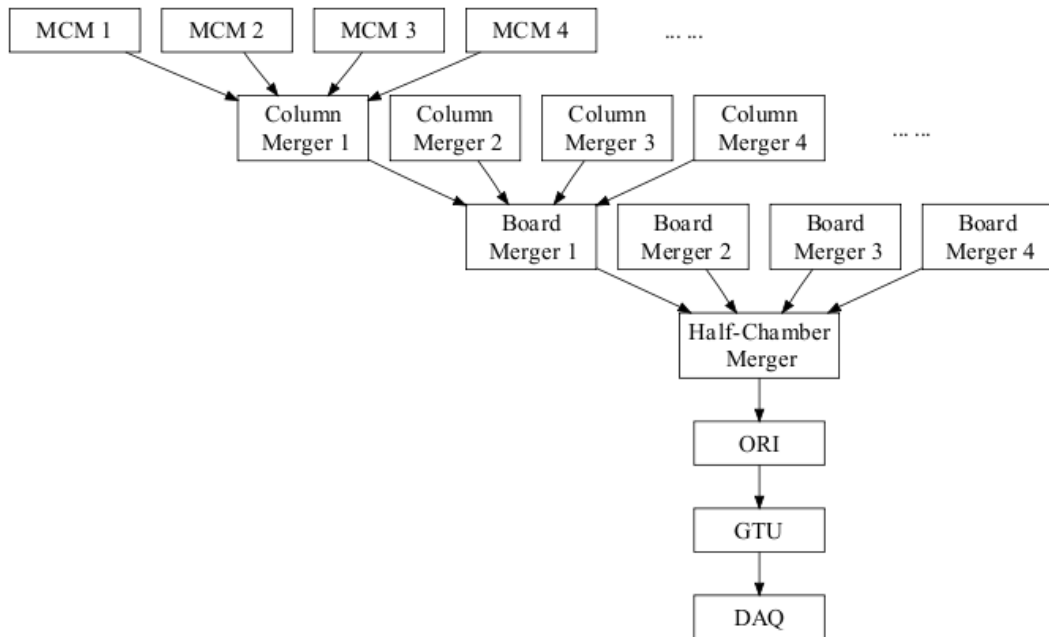


Abbildung 15: Der Readout Tree: Daten werden von den normalen MCMs über die CMs und die BMs an die HCMs geleitet und von dort aus über die ORIs und die GTU bis hin zur DAQ gesandt [Kle08].

4.5. Signale und Interpretation

Elektronen mit einem Impuls über $0,5 \text{ GeV } c^{-1}$ [Ems10] erzeugen wegen ihres hohen Lorentz-Faktors im Radiator mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Übergangsstrahlung im Bereich der Röntgenstrahlung. Pionen haben wegen ihrer hohen Masse keinen passenden Lorentz-Faktor und passieren den Radiator, ohne Übergangsstrahlung zu erzeugen. Sowohl die Pionen als auch die Elektronen ionisieren auf ihrem weiteren Weg durch die Driftregion Xenon-Atome und lösen somit eine Lawine von freien Elektronen aus.

Die von den Elektronen im Radiator erzeugten Übergangsstrahlungs-Photonen haben typischerweise eine Energie von ca. 10 keV und in Xenon eine mittlere freie Weglänge von etwa 1 cm [TRD01]. Sie werden also mit hoher Wahrscheinlichkeit am Anfang der Driftstrecke durch Photo- oder Compton-Effekte gestoppt und ionisieren wiederum Xenon-Atome.

Sowohl die durch die geladenen Teilchen als auch die durch die Photonen erzeugten Elektronen wandern mit konstanter Geschwindigkeit in Richtung des Endes der Auslekammer, wo das Signal verstärkt wird (siehe Kapitel 4.3.2).

In Abbildung 16 ist der Vorgang schematisch dargestellt.

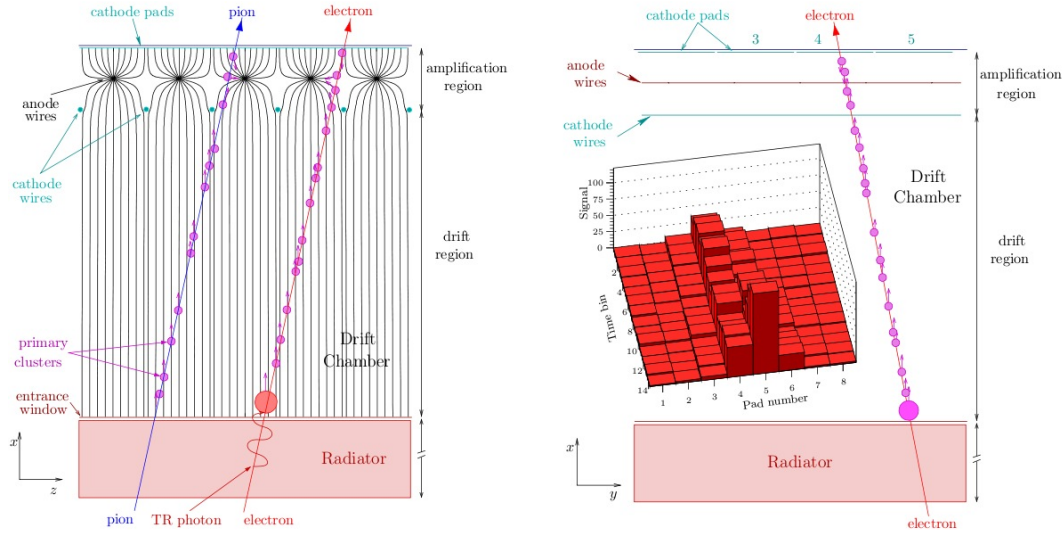


Abbildung 16: Die Funktionsweise eines TRD-Moduls. Links: Schnitt durch ein Modul. Ein Pion erzeugt Elektronencluster entlang seiner Bahn, ein Elektron erzeugt im Radiator zusätzlich Übergangsstrahlung. Rechts: Die induzierte Ladung auf den Kathodenpads pro Driftzeit [TRD01].

Die Spur der Teilchen wird im TRD über die Driftzeit bestimmt. Da zwischen der Driftelektrode ($-2,1\text{ kV}$) und den Kathodendrähten ein konstantes elektrisches Feld anliegt, driften die Elektronen mit einer konstanten Geschwindigkeit zu den Kathodendrähten. Die dafür benötigte Zeit ist proportional zur radialen Position, an der das freie Elektron durch Ionisation eines Xenon-Atoms erzeugt wurde. Mit der Information über diese Position kann mit den verschiedenen Ebenen des TRD die Spur des ionisierenden Teilchens rekonstruiert werden.

Abbildung 17 zeigt die durchschnittliche Signalhöhe für Teilchen mit einem Impuls von $2\text{ GeV } c^{-1}$, aufgetragen gegen die Driftzeit. Der Peak zu Beginn der Driftzeit entsteht durch Elektronen, die in gleichen Abständen vor und hinter den Anodendrähten erzeugt werden und dementsprechend gleiche Driftzeiten haben. Sind diese Elektronen an den Anodendrähten angekommen, sinkt das Signal auf ein Plateau ab, hervorgerufen von den Elektronen, die aus der Driftregion zu den Anodendrähten wandern. Nach etwa $2\text{ }\mu\text{s}$ sinkt das Signal ab, da nach dieser Zeit die letzten Elektronen aus dem Driftbereich die Anodendrähte erreicht haben.

Für die Elektron-Pion-Separation bieten sich nun zwei verschiedene Hinweise:

- Elektronen (liegen in Abbildung 8 im Fermi-Plateau) haben einen höheren spezifischen Energieverlust als Pionen (minimal ionisierende Teilchen), wodurch das Energieplateau höher liegt.
- Elektronen mit einem Impuls von $2\text{ GeV } c^{-1}$ erzeugen beim Durchqueren des Radiators durchschnittlich 1,45 Übergangsstrahlungs-Photonen [Ems10], die wiederum Xenon-Atome am Anfang des Driftbereichs ionisieren. Das Ergebnis ist ein zweiter Peak am Ende der Driftzeit.

4. Der Transition Radiation Detector (TRD)

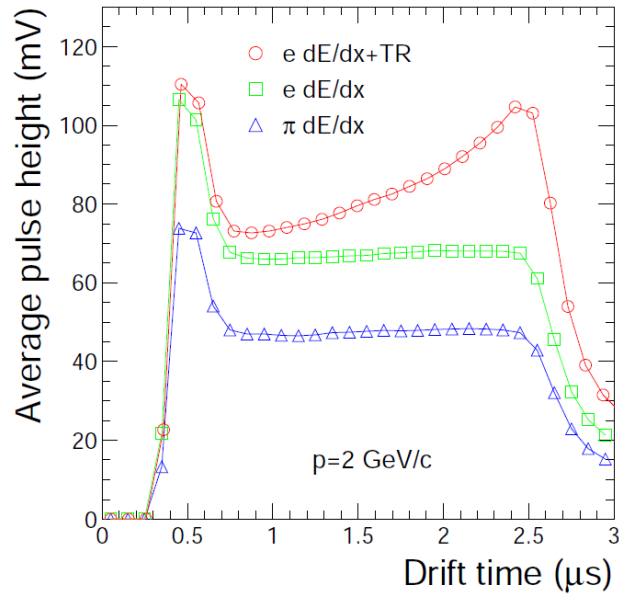


Abbildung 17: Im TRD-Modul erzeugte Signale als Funktion der Driftzeit für Elektronen mit Übergangsstrahlung, Elektronen ohne Übergangsstrahlung und Pionen. Gut zu erkennen sind die Unterschiede in den Höhen der Plateaus zwischen Elektronen und Pionen, sowie der zusätzliche, von der Übergangsstrahlung erzeugte Peak am Ende der Driftzeit [And03].

Aus den Signalen kann durch den Vergleich der gesamten deponierten Ladung mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für die deponierte Ladung von Elektronen oder Pionen (*LQ-Methode*) oder mit Hilfe von neuronalen Netzwerken (Details dazu in [Wil04]) bestimmt werden, ob es sich bei dem Teilchen um ein Elektron oder ein Pion handelt.

4.6. Doppelt ausgelesene Pads

Die Positionsbestimmung für die einzelnen Cluster eines Tracklets funktioniert über die Bestimmung des Ladungsschwerpunkts auf den getroffenen Auslese-Pads. Wird ein Pad „getroffen“, so bedeutet dies, dass auf ihm eine Spiegelladung induziert wird. Dabei wird durch den geringen Abstand der Pads untereinander auch eine kleinere Spiegelladung auf den beiden benachbarten Pads induziert¹. Aus den Informationen, wie groß die auf den drei Pads induzierten Ladungen sind, kann der Ladungsschwerpunkt und somit die Position des durchquerenden Teilchens mit einer Auflösung von bis zu $389 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ bestimmt werden [Wul09]. Dabei kann es

¹Werden Spiegelladungen auf zwei benachbarten Pads induziert, spricht man von einem *3-Pad-Cluster*. Es kann auch zu 4-, 2- oder 1-Pad-Clustern kommen, die aber weitaus weniger häufig vorkommen.

– wie in Abschnitt 4.4.3 bereits angesprochen wurde – an den Grenzen zwischen zwei MCMs zu unerwünschten Effekten kommen.

Ein Beispiel für einen solchen Grenzeffekt ist ein Teilchen, dass den Detektor so durchquert, dass das mittlere der drei getroffenen Pads ein Pad am Rande eines MCMs ist. Wird ein Rand-Pad getroffen, so werden die Informationen des neben ihm liegenden Pads im gleichen MCM und des entsprechende Pads auf der anderen Seite, welches aber zum benachbarten MCM gehört, zur Bestimmung des Ladungsschwerpunkts benötigt. Da die MCMs untereinander keine Informationen austauschen, fehlen beiden MCMs notwendige Informationen zur Bestimmung des Ladungsschwerpunkts. Im „getroffenen“ MCM beispielsweise würden nur zwei Pads Informationen liefern, womit sich zwangsweise der Ladungsschwerpunkt von der Grenze zwischen beiden MCMs weg verlagern würde.

Würden die Rand-Pads also nur von den jeweils zugehörigen MCMs ausgelesen, würden die Akzeptanz und die Genauigkeit des TRD massive Verluste erleiden. Aus diesem Grund werden die Rand-Pads von jeweils einem ADC-Kanal im gleichen und im benachbarten MCM ausgelesen.

In jedem MCM gibt es insgesamt drei doppelt ausgelesene Pads, die von je zwei ADCs ausgelesen werden. Dabei sitzen zwei doppelt ausgelesene Pads auf der einen und eines auf der anderen Seite des MCMs. Abbildung 18 zeigt das Auslese-Schema der doppelt ausgelesenen Pads.

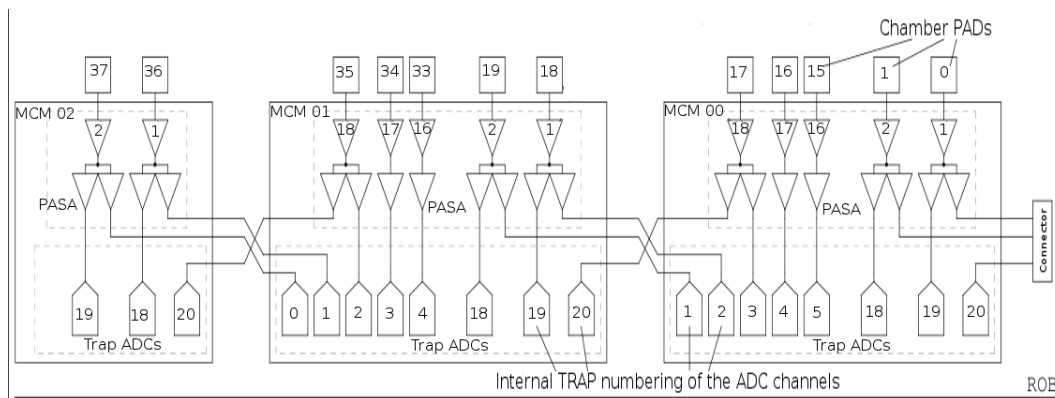


Abbildung 18: Das Auslese-Schema der *Shared Pads*: Pro MCM werden 3 Pads jeweils von einem ADC des eigenen, sowie einem ADC des benachbarten MCMs ausgelesen [Ang07].

Im folgenden werden die ADC-Kanäle, die in dem selben MCM liegen wie das doppelt ausgelesene Pad der Einfachheit halber als *ADC* bezeichnet und die dazugehörigen ADC-Kanäle im benachbarten MCM als *Schatten-ADC*. Um einem Pad bzw. einem ADC eine Position zuzuordnen sollen an dieser Stelle Koordinaten definiert werden:

- Die Position eines Pads ist festgelegt durch das Modul, in dem es sich befindet, sowie durch die Nummer der Pad-Reihe und die Nummer der Pad-Spalte.

4. *Der Transition Radiation Detector (TRD)*

Positionen für Pads werden im Folgenden durch (Modul-Nr., Pad-Reihe, Pad-Spalte) angegeben. Dabei geht die Modul-Nr. von 0 bis 29, die Pad-Reihe von null bis elf (Stapel 2) bzw. von 0 bis 15 (alle anderen Stapel) und die Pad-Spalte von 0 bis 144.

- Die Position eines ADCs ist ähnlich wie bei einem Pad durch Modul und Pad-Reihe festgelegt, allerdings mit der ADC-Spalte als dritte Koordinate. Die ADC-Spalten-Nummerierung ist nicht mit der Nummerierung in Abbildung 18 zu verwechseln. ADC-Positionen werden im Folgenden durch (Modul-Nr., Pad-Reihe, ADC-Spalte) angegeben. Die Bereiche der Modul-Nr. und der Pad-Reihe sind die gleichen wie zuvor, der Bereich der ADC-Spalte geht von 1 bis 165.

5. Gain-Korrektur

In diesem Kapitel wird die relative Verstärkung der ADCs zweier benachbarter MCMs bestimmt. Nachdem erklärt wurde wieso dies notwendig ist, soll kurz die Vorgehensweise beschrieben werden, mit der die relative Verstärkung ermittelt wird. Dazu gehört das Ermitteln einer Grundlinie, der ein eigener Abschnitt gewidmet ist und schließlich die Bestimmung der relativen Verstärkung selbst, welche im letzten Abschnitt dieses Kapitels beschrieben wird.

5.1. Motivation

Um die Spur des Teilchens mit Hilfe des TRD rekonstruieren zu können, muss man mit Hilfe der MCMs seine Spurfragmente möglichst genau bestimmen. Wegen der in Abschnitt 4.6 angesprochenen Grenzeffekte zwischen einzelnen MCMs werden einige Pads von einem ADC und einem Schatten-ADC ausgelesen. ADC und Schatten-ADC eines doppelt ausgelesenen Pads sollten in etwa den gleichen Wert ausgeben. Aufgrund von Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der MCMs kommt es in der Regel aber vor, dass beide ADC-Werte leicht voneinander abweichen, sowohl innerhalb eines MCMs untereinander als auch zwischen einzelnen MCMs. Um die Daten der ADCs und ihrer zugehörigen Schatten-ADCs miteinander vergleichen zu können, muss das Verhältnis der Verstärkungen der ADCs relativ zueinander bestimmt werden. Für ADCs, die normale Pads auslesen, wurden bereits Methoden zur Kalibrierung untereinander entwickelt. Nähere Informationen hierzu finden sich in [Alb10] und [Bai09]. Die Bestimmung der relativen Verstärkung der Schatten-ADCs im Vergleich zu den zugehörigen ADCs soll in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden.

5.2. Vorgehensweise

Um die relative Verstärkung der ADCs, die zu doppelt ausgelesenen Pads gehören, zu bestimmen, geht man in mehreren Schritten vor.

Zunächst werden die Werte der ADCs und der Schatten-ADCs für 30 Timebins aufsummiert und gegeneinander in einem Histogramm aufgetragen¹.

Der Grund für die Addition der 30 Timebins ist die unterschiedliche Signallaufzeit benachbarter MCMs. Wegen diverser Faktoren, wie z.B. unterschiedlicher Kabellängen, fangen benachbarte MCMs nicht gleichzeitig an, die Pads auszulesen. Der zeitliche Unterschied ist zwar minimal (im Bereich einiger Nanosekunden), er reicht aber dennoch aus, dass das Signal der Pads sich in dieser kurzen Zeit derart ändern kann, dass die Werte der MCMs in gleichen Timebins stark voneinander abweichen können. Durch die Addition der Werte aller 30 Timebins werden die Auswirkungen solcher Abweichungen unterdrückt, sodass die Werte der benachbarten MCMs miteinander vergleichbar sind.

¹Wird im weiteren Verlauf von „aufsummierten ADC-Werten“ gesprochen, so ist immer die Summe über 30 Timebins gemeint.

5. Gain-Korrektur

Ein Histogramm zum Vergleich der ADC- und Schatten-ADC-Werte ist beispielhaft für einen Run des Supermoduls XIII des TRD in Abbildung 19 gezeigt¹. Dabei sind in diesem Histogramm die ADC- und Schatten-ADC-Werte für alle Pads des Supermoduls aufgetragen.

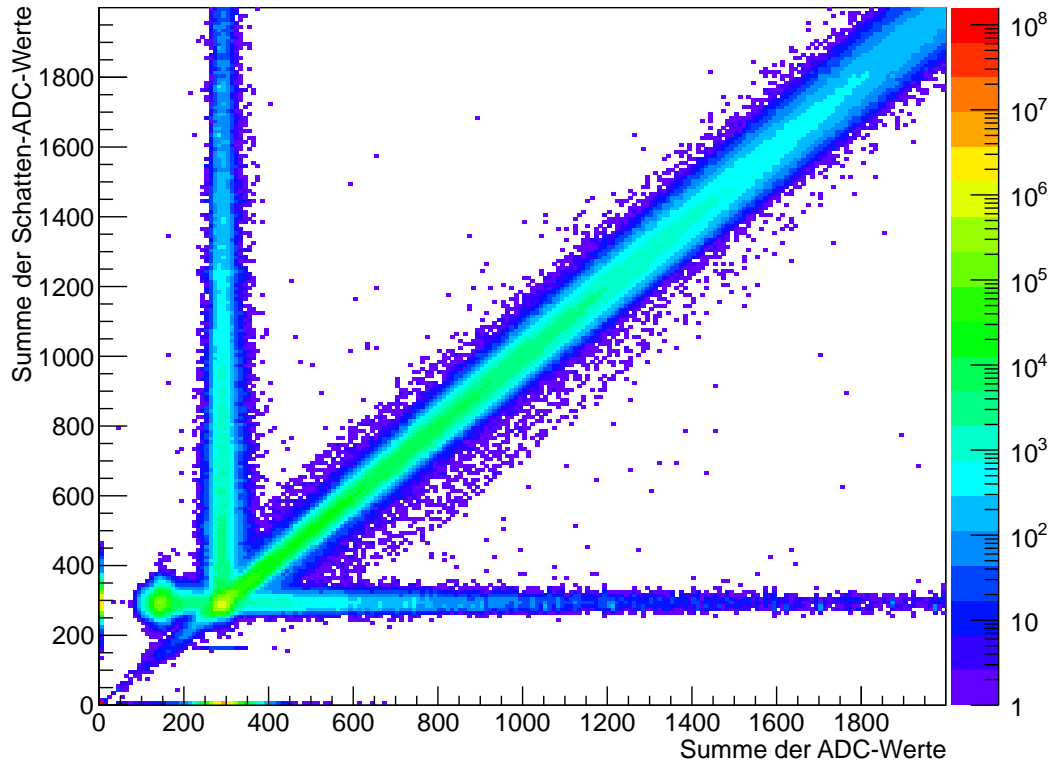


Abbildung 19: Die Werte der Schatten-ADCs gegen die Werte der ADCs, jeweils über 30 Timebins aufsummiert. Die Farbskalierung ist logarithmisch dargestellt, um Intensitätsunterschiede deutlicher hervorzuheben.

Ein solches Histogramm, in dem die Daten mehrerer hundert MCMs aufgetragen sind, lässt sich nicht zur Bestimmung der relativen Verstärkung einzelner ADCs verwenden.

In diesem Histogramm wird aber deutlich, dass ein Großteil der Punkte um eine Gerade mit einer Steigung von ungefähr 1 herum liegt, was wegen der allgemein geringen Abweichung zwischen ADC- und Schatten-ADC-Werten zu erwarten ist. Auffällig sind aber auch Punktwolken, die annähernd parallel zur x- und zur y-Achse liegen. Woher diese Punktwolken stammen, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Für die Bestimmung der relativen Verstärkung sind diese Werte aber nicht relevant, weshalb sie im Folgenden nicht weiter beachtet werden. Für den weiteren Verlauf

¹Falls nicht anders angegeben gehören alle Daten und Histogramme in diesem Kapitel zum Supermodul XIII.

werden daher alle ADC- und Schatten-ADC-Werte vernachlässigt, die kleiner als 400 sind.

In Abbildung 20 sind die ADC- und Schatten-ADC-Werte, die größer sind als 400, für alle doppelt ausgelesenen Pads des Supermoduls XIII aufgetragen.

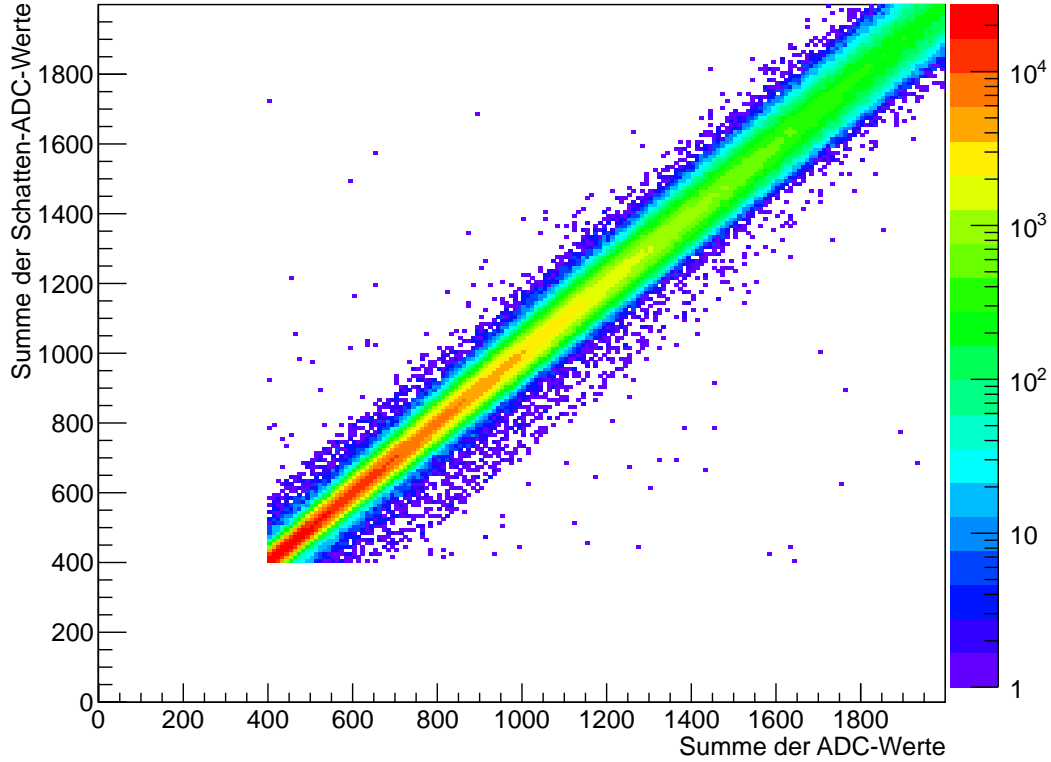


Abbildung 20: Aufgetragen sind die Werte der Schatten-ADCs gegen die Werte der ADCs, die – jeweils über 30 Timebins aufsummiert – größer sind als 400. Die z-Achse ist logarithmisch dargestellt, um Intensitätsunterschiede deutlicher hervorzuheben. Eine Anordnung der Punkte um eine gedachte Linie mit der Steigung 1 ist gut zu erkennen.

Der nächste Schritt ist die Betrachtung eines *TProfiles*¹, in dem die aufsummierten Werte der ADCs und Schatten-ADCs gegeneinander aufgetragen sind, diesmal allerdings nur für ein doppelt ausgelesenes Pad.

Ein solches TProfile mit der gefitteten Ausgleichsgerade ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Daten hierfür stammen von dem Pad mit den Koordinaten (1,0,17). Betrachtet man nun Ausgleichsgeraden für die Messdaten mehrerer doppelt ausgelesener Pads, so wird deutlich, dass die Parameter (Geradensteigung und y-Achsenabschnitt) der einzelnen Geraden nicht übereinstimmen.

¹Weitere Informationen zu TProfiles finden sich in der Dokumentation zu ROOT auf der Internetseite des CERN.

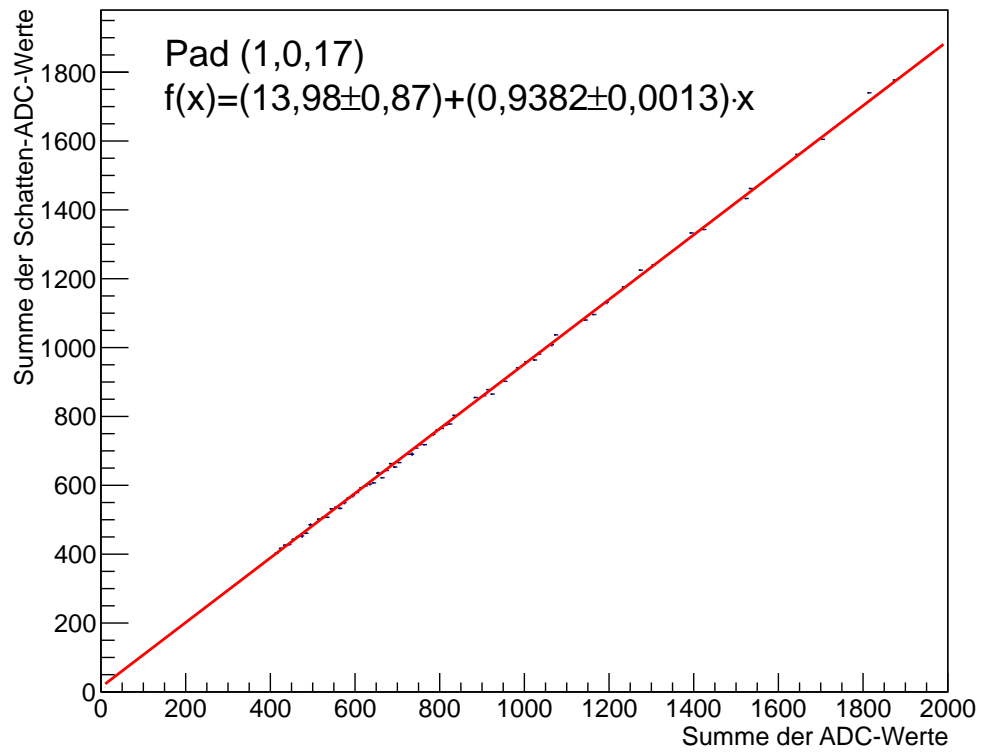


Abbildung 21: Aufgetragen sind die Werte der Schatten-ADCs gegen die Werte der ADCs, jeweils über 30 Timebins aufsummiert, für das Pad mit den Koordinaten (1,0,17), sowie die angefitete Ausgleichsgerade.

Zur Veranschaulichung wurden die Fit-Geraden der Pads mit den Positionen (0,0,17) bis (9,0,17) in Abbildung 22 verglichen.

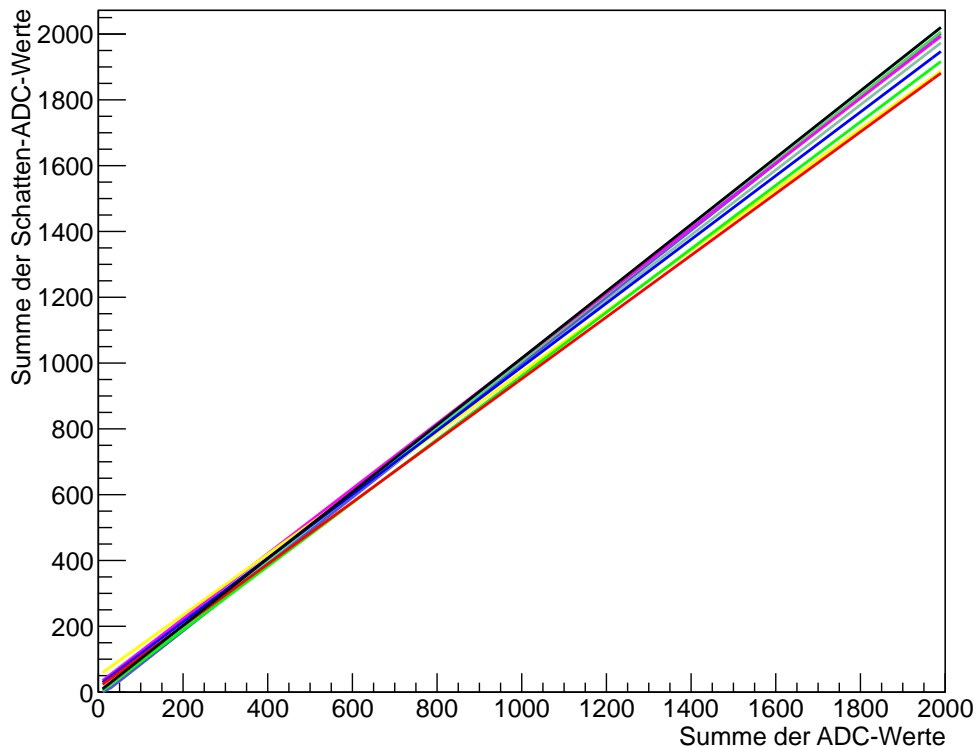


Abbildung 22: Die Fit-Geraden der doppelt ausgelesenen Pads mit den Koordinaten (0,0,17) bis (9,0,17). Die Unterschiede zwischen den Steigungen und den y-Achsenabschnitten der Geraden sind gut zu erkennen.

Die Tatsache, dass die Geraden ungleiche Steigungen haben und sich nicht im Ursprungspunkt des Koordinatensystems schneiden, deutet darauf hin, dass eine Grundlinie existiert, die im nächsten Abschnitt bestimmt wird.

Ist die Grundlinie bestimmt, so wird sie von den aufsummierten Werten der ADCs und Schatten-ADCs abgezogen. Aus den Differenzen wird die relative Verstärkung des Schatten-ADC im Vergleich zum ADC berechnet. Mehr dazu in Abschnitt 5.4.

5.3. Grundlinie

In Abbildung 22 ist zu erkennen, dass sich die Geraden nicht in einem Punkt schneiden, an dem man die Grundlinie hätte ablesen können. Der Grund dafür liegt in den Fehlern für die Steigung und den y-Achsenabschnitt, mit denen die Parameter der Geraden angegeben werden. Aufgrund dieser Abweichungen und der Tatsache, dass die einzelnen Geraden teilweise annähernd parallel zueinander liegen, lässt sich kein

eindeutiger Schnittpunkt bestimmen. Die Grundlinie muss also auf andere Art und Weise bestimmt werden.

Im Fall der im TRD verbauten ADCs liegt die Grundlinie ungefähr im Bereich zwischen 10 und 100. Die Grundlinien einzelner ADCs weichen dabei aber mehr oder weniger stark voneinander ab. Da der TRD als Trigger dienen und möglichst genaue Daten liefern soll, ist es nötig, dass die ADCs möglichst die gleiche Grundlinie haben, damit ihre Werte gut miteinander vergleichbar sind. Aus diesem Grund wird von jedem ADC einzeln die Grundlinie ermittelt und von den Werten, die er liefert, abgezogen. Um sicher zu gehen, dass nach der Subtraktion kein ADC negative Werte liefert, wird eine allgemeine Grundlinie von 10 zu der Differenz addiert.

Wenn von einem Ereignis gesprochen wird, so ist damit gemeint, dass der gesamte TRD¹ einmal ausgelesen wird. Dabei wird erwartet, dass der größte Teil der ADCs keine Teilchen detektiert und daher nur die Grundlinie sendet. Der größte Teil der ADC-Werte sollte also bei etwa 10 liegen². Aufsummiert über 30 Timebins wird dementsprechend erwartet, dass die meisten Ergebnisse bei etwa 300 liegen.

Zur Ermittlung der Grundlinie wird dies genutzt, indem ein Histogramm erstellt wird, in dem die Häufigkeit der ermittelten ADC-Werte aufgetragen ist. Dieses Histogramm ist in Abbildung 23 dargestellt.

Auffällig ist dabei ein Peak bei etwa 150, zusätzlich zu dem erwarteten Peak bei 300. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass auch in dem Histogramm in Abbildung 19 eine Anhäufung von Datenpunkten bei einem ADC-Wert von 150 und einem Schatten-ADC-Wert von 300 liegt. Bei einem Schatten-ADC-Wert von 150 hingegen zeigt sich keine solche Anhäufung. Dies legt die Vermutung nahe, dass diese Datenpunktanhäufung nur durch ADCs hervorgerufen wird, die zu doppelt ausgelesenen Pads gehören.

Zur Kontrolle wird ein ähnliches Histogramm erstellt, aus dessen Berechnung die Werte für ADCs und Schatten-ADCs von doppelt ausgelesenen Pads herausgenommen werden. Abbildung 24 zeigt dieses Histogramm. Da der zusätzliche Peak bei etwa 150 verschwunden ist, scheint die Theorie, dass er nur von ADCs stammt, die zu einem doppelt ausgelesenen Pad gehören, bestätigt. Eine mögliche Erklärung für die Entstehung solcher Werte ist, dass es sich hierbei um ADCs handelt, deren zugehöriger Schatten-ADC nicht an den PASA angeschlossen ist. Dies wäre beispielsweise bei den Pads am Rand eines Auslesemoduls der Fall (vgl. Abbildung 18). Möglicherweise erzeugt der einzeln angeschlossene ADC aufgrund eines veränderten Widerstands am anderen Ausgang des PASA falsche Werte, wodurch die Datenpunktanhäufung bei 150 erklärt werden könnte. Zur genaueren Klärung dieser Theorie müsste man die Verbindung zwischen PASA und ADC genauer untersuchen, was aus zeitlichen Gründen im Rahmen dieser Diplomarbeit leider nicht mehr möglich war.

¹In dieser Arbeit wird nur mit den Daten einzelner TRD-Supermodule gearbeitet, die während der Zusammenbau- und Testphase an der WWU Münster aufgenommen wurden. Bei seinem späteren Einsatz am CERN werden alle 18 Supermodule des TRD und alle anderen Detektoren von ALICE ausgelesen.

²Die tatsächliche Grundlinie liegt nicht exakt bei 10, sondern bei etwa 9,7.

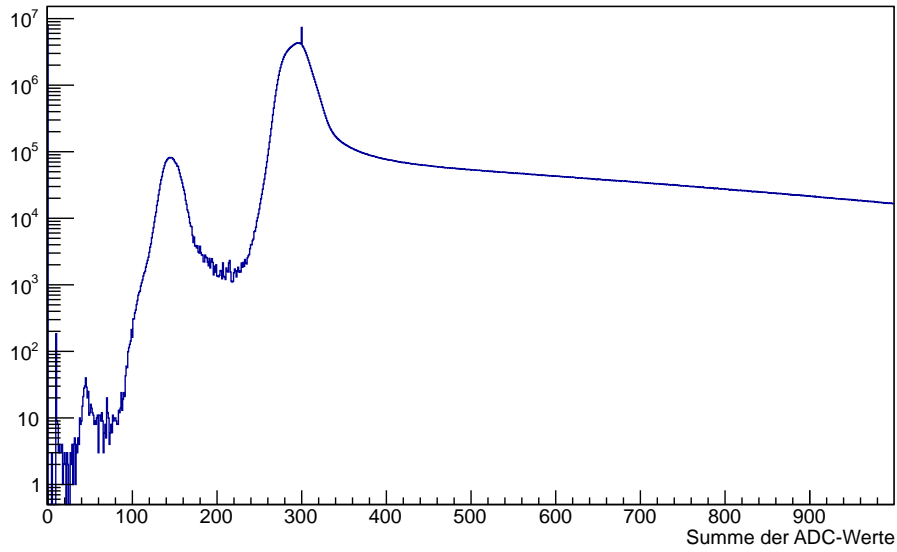


Abbildung 23: Aufgetragen ist die Häufigkeit der von einem TRD-Modul ausgegebenen ADC-Werte (über 30 Timebins summiert). Deutlich erkennbar ist ein zusätzlicher Peak bei etwa 150 und ein durch maskierte Pads verursachter sehr scharfer Peak bei 300.

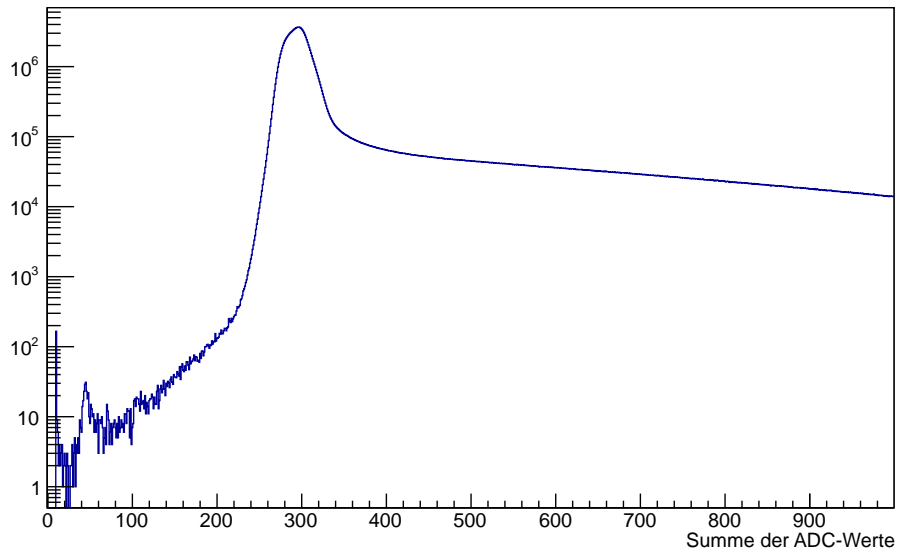


Abbildung 24: Die Häufigkeit der von einem TRD-Modul ausgegebenen ADC-Werte (über 30 Timebins summiert) für ADCs die nur normale Pads auslesen.

5. Gain-Korrektur

Eine weitere Auffälligkeit in Abbildung 23 ist ein sehr scharfer Peak bei exakt 300. Einige Pads senden während des Betriebs des TRD durchgehend falsche Werte. Dies ist z.B. bei defekten Pads der Fall, oder bei denen, die direkt am Rand des TRD sitzen, da diese äußeren Pads aufgrund ihrer Position durch das Metall der Außenwände zu stark beeinflusst werden. Um die Verfälschung der Messwerte durch die fehlerhaften Werte solcher Pads zu vermeiden, werden sie maskiert, d.h. ihre tatsächlichen Werte werden nicht aufgenommen, sondern ihnen wird grundsätzlich ein Wert von 10 zugewiesen. Aufsummiert über 30 Timebins kommt somit der Wert 300 zustande, der besonders häufig im Histogramm auftaucht, da diese Pads immer den gleichen Wert senden.

Nimmt man diese Pads bei der Erstellung des Histogramms heraus, so verschwindet der Peak. Dies ist relevant, da an das Histogramm eine Gauß-Kurve angefitet werden soll, um die Grundlinie zu bestimmen. Ohne den störenden Einfluss der maskierten Pads kann diese Kurve genauer angefitet werden. Das Maximum der Gaußkurve entspricht dann der durchschnittlichen Grundlinie, die im weiteren Verlauf von den aufsummierten ADC-Werten abgezogen werden muss. Für die Daten des Supermoduls XIII ergibt sich somit eine Grundlinie von 293,6 (vgl. Abbildung 25). Da der Verlauf der Kurve nicht Gauß-förmig ist, ist das reduzierte χ^2 zu groß, als dass der für die ausgelesenen Fitparameter angegebene Fehler als tatsächlicher Fehler für die Grundlinie angenommen werden sollte. Aus diesem Grund wird hier ohne Angabe eines Fehlers weiter gearbeitet.

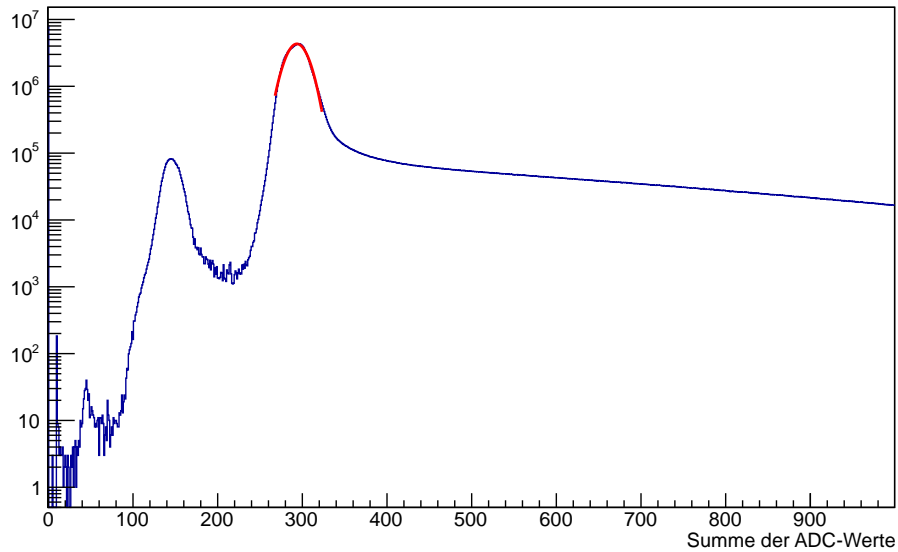


Abbildung 25: An die Häufigkeitsverteilung der aufsummierten ADC-Daten wurde ein Gauß-Fit gelegt. Aus dem Maximum des Fits ergibt sich die Grundlinie zu 293,6 mit einer Standardabweichung von 13,6.

5.4. Bestimmung der relativen Verstärkung

Nachdem im vorherigen Abschnitt die durchschnittliche Grundlinie der ADC-Kanäle ermittelt wurde, kann nun die relative Verstärkung der ADCs, die zu einem doppelt ausgelesenen Pad gehören, bestimmt werden. Dazu werden mit Hilfe von AliRoot¹ die Daten des TRD ausgelesen und in einem N-Tupel² gespeichert.

In dem N-Tupel sollen nur Einträge der doppelt ausgelesenen Pads stehen. Daher wird zunächst überprüft, ob die Daten, die aktuell ausgelesen werden, tatsächlich von einem doppelt ausgelesenen Pad stammen. Diese Überprüfung geschieht anhand der Pad-Spalte: Es liegen immer drei doppelt ausgelesene Pads nebeneinander³, wie in Abbildung 18 zu sehen ist. Die Nummerierung der Pad-Spalten ist MCM-übergreifend, sie geht also von 0 bis 143. Die ersten drei doppelt ausgelesenen Pads sind die Pads mit den Spalten-Nummern 17, 18 und 19. Da in einem MCM 18 Pads liegen, errechnen sich die Nummern der nächsten drei doppelt ausgelesenen Pads, indem man zu der aktuellen Pad-Nummer 18 hinzu addiert, d.h. die nächsten drei doppelt ausgelesenen Pads liegen in den Spalten 35, 36 und 37 usw. Aus den Pad-Nummerierungen können dann die Nummern der ADCs und Schatten-ADCs bestimmt werden. Sie können aus Tabelle 3 abgelesen werden.

AliROOT bietet je eine Methode um die Daten sowohl entsprechend der Pad-Nummerierung, als auch entsprechend der ADC-Nummerierung auszulesen, da die Nummerierungen nicht übereinstimmen.

Um die Mehrfachverwendung von Tracklets zu vermeiden, werden bei der Datenanalyse nur die Daten der getroffenen Pads verwendet, nicht aber die Daten der daneben liegenden. Daher sind auch für die Bestimmung der relativen Verstärkungen nur die Daten der getroffenen Pads relevant. Deswegen, und um Datenvolumen zu sparen, wird mit Hilfe der Pad-Nummerierung zunächst bestimmt, ob das doppelt ausgelesene Pad getroffen wurde, oder ob es eines der beiden seitlich daneben liegenden Pads ist. Dazu wird überprüft, ob die aufsummierten Werte des aktuellen Pads größer sind als die des darüber und des darunter liegenden Pads.

Ist dies der Fall, werden die aufsummierten Werte des zugehörigen ADCs und des Schatten-ADCs berechnet und zusammen mit den anderen Werten im N-Tupel abgespeichert.

Aus diesem N-Tupel können nun die Daten für die relative Verstärkung jederzeit abgerufen werden. Wie die Daten dabei dargestellt werden (Tabelle, Histogramm, o.ä.) bleibt dem Anwender freigestellt.

Zur Berechnung der relativen Verstärkung muss zunächst die Grundlinie sowohl von den über 30 Timebins aufsummierten ADC- als auch von den aufsummierten

¹ROOT ist eine Software, die speziell für die Analyse großer Datenmengen entwickelt wurde. Für diese Diplomarbeit wurde AliRoot benutzt, eine ROOT-Version, die um Klassen und Methoden für die Arbeit am ALICE-Experiment erweitert wurde.

²Weitere Informationen über N-Tupel finden sich in der ROOT-Dokumentation auf der Internetseite des CERN

³Die beiden ersten Pads in MCM00 und das letzte Pad in MCM08, die eigentlich doppelt ausgelesen werden sollten, besitzen, da kein benachbarter MCM vorhanden ist, keinen Schatten-ADC (vgl. Abbildung 18).

Pad-Nr.	ADC-Nr.	Schatten-ADC-Nr.
17	18	21
18	22	19
19	23	20
35	39	42
36	43	40
37	44	41
53	60	63
54	64	61
55	65	62
71	81	84
72	85	82
73	86	83
89	102	105
90	106	103
91	107	104
106	123	126
108	127	124
109	128	125
125	144	147
126	148	145
127	149	146

Tabelle 3: Die Nummerierung der doppelt ausgelesenen Pads und der zugehörigen ADCs und Schatten-ADCs.

Schatten-ADC-Werten für ein einzelnes Ereignis des zugehörigen Pads abgezogen werden. Anschließend wird das Ergebnis für die Schatten-ADCs durch das Ergebnis für die ADCs geteilt. Der Quotient entspricht der relativen Verstärkung für ein Ereignis. Die relativen Abweichungen können von Ereignis zu Ereignis leicht schwanken, weshalb man den Mittelwert über alle Ereignisse bilden muss, um einen für die Kalibration brauchbaren Wert zu erhalten.

Für diese Diplomarbeit wird die relative Verstärkung in Form von Histogrammen dargestellt. Dazu wird für jedes Modul ein eigenes Histogramm erstellt, in dem auf der x-Achse die Pad-Reihe, auf der y-Achse die Pad-Spalte und farblich kodiert der Mittelwert der relativen Verstärkung des zugehörigen Pads aufgetragen werden.

Mit dem zuvor berechneten Wert für die Grundlinie von 293,6 können nun die Histogramme zur Veranschaulichung der relativen Verstärkung erstellt werden.

In Abbildung 26 ist als Beispiel das Histogramm für das Modul 0 des Supermoduls XIII gezeigt.

Aus dem Histogramm lässt sich ablesen, dass die Abweichungen der ADC-Werte von den Schatten-ADC-Werten überwiegend im Bereich von 10% liegt.

Zum Schluss soll noch die durchschnittliche relative Verstärkung aller doppelt

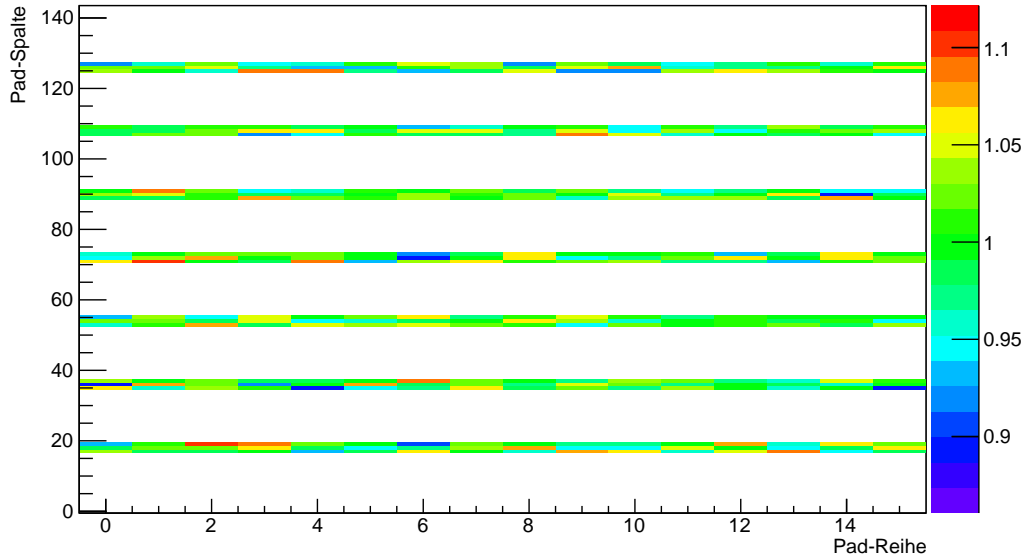


Abbildung 26: Die relative Verstärkung der doppelt ausgelesenen Pads im Modul 0 des Supermoduls XIII. Auf der x-Achse sind die Pad-Reihen, auf der y-Achse die Pad-Spalten aufgetragen. Die relative Verstärkung der doppelt ausgelesenen Pads ist farblich kodiert. Für das doppelt ausgelesene Pad mit den Koordinaten (0,0,35) existieren keine ADC- oder Schatten-ADC-Werte über 400.

ausgelesener Pads in einem Supermodul bestimmt werden. Dazu wird in einem Histogramm die Häufigkeit, mit der eine bestimmte relative Verstärkung vorkommt, aufgetragen (vgl. Abbildung 27).

Aus dem Maximum der Verteilung ergibt sich eine durchschnittliche relative Verstärkung von 1,002 mit einer Standardabweichung von 0,066.

Eine derart hohe Standardabweichung und damit verbundene Abweichungen der ADC- von den Schatten-ADC-Werten um mehrere Prozent wirken sich bereits auf die Elektroneneffizienz des TRD aus. So bewirkt eine 5% höhere Verstärkung bereits eine Steigerung der Elektroneneffizienz von 3,24 – 3,36% [Hes11].

Die Folge sind verschiedene Bereiche mit unterschiedlich hoher Elektroneneffizienz, verteilt über die Detektorfläche des TRD. Um dies zu verhindern, wird die relative Verstärkung von ADCs und Schatten-ADCs für doppelt ausgelesene Pads bei Testruns an der WWU Münster für Offline-Kalibrationen bereits mit einbezogen. Bei der Datenanalyse am CERN muss dies in Zukunft auch erfolgen.

5. Gain-Korrektur

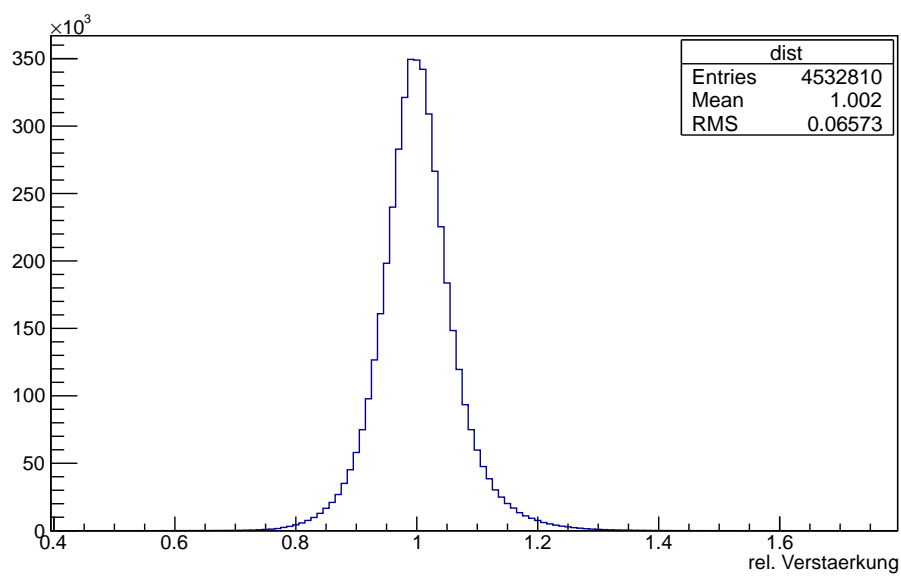


Abbildung 27: Verteilung der relativen Verstärkung. Der Durchschnitt der relativen Verstärkung ergibt sich aus dem Maximum der Verteilung zu 1,002 mit einer Standardabweichung von 0,066.

6. Die Rohdaten des TRD

Die Daten des TRD sind Teil des Datenstroms des gesamten ALICE-Experiments. Die Daten von ALICE als Ganzes werden von einer Software namens *Data Acquisition and Test Environment* (DATE) gesammelt. Sobald die Daten gesammelt wurden stellt DATE sie wiederum für die Verarbeitung und die Analyse in großen Rechnersystemen, die hunderte von Computern umfassen können, zur Verfügung.

Die Daten werden in sogenannte *Super-Events* unterteilt. Ein Super-Event besteht aus den Daten aller Subdetektoren von ALICE bzw. – sofern die Subdetektoren aufgeteilt werden, wie z.B. der TRD in einzelne Supermodule – aller Einzelteile der Subdetektoren, für ein Ereignis.

Super-Events werden wiederum unterteilt in *Sub-Events*. Damit sind die Daten eines einzelnen Bauteils, wie z.B. eines Supermoduls des TRD gemeint.

Die Daten eines einzelnen Bauteils werden über *Detector Data Links* (DDL) an *Local Data Concentrators* (LDC) gesendet und dort gesammelt. Die Daten der LDCs werden wiederum über ein Netzwerk auf mehrere *Global Data Collectors* (GDC) verteilt, die die Daten dann schließlich zum Speicher weiterleiten.

In diesem Kapitel sollen die vom TRD ausgegebenen Daten, auf die in den folgenden Kapiteln zugegriffen wird, kurz erläutert werden¹. Weitere Informationen über DATE, seine Funktionsweise und die Daten von ALICE finden sich in [ALI06].

Der Datenstrom des TRD enthält Tracklet-Daten, die bei Eingang eines Level-0-Triggers an die GTU gesendet werden, Rohdaten (engl.: *Raw Data*) sowie Daten aus der GTU. Er wird erst nach Eingang eines Level-1-Triggers an die DAQ gesendet.

Die Signale der Auslese-Pads werden von den ADCs der MCMs in digitale Signale umgewandelt und bestehen fortan aus einer Folge von Einsen und Nullen, die aufgeteilt sind in 32-Bit-Datenworte. Solche Datenworte können in Binärschreibweise Bit für Bit untersucht werden.

Wird in dieser Diplomarbeit ein 32-Bit-Datenwort ausgeschrieben, so startet – sofern nicht anders beschrieben – die Bit-Reihenfolge, und damit auch die Nummerierung der Bits immer rechts mit „0“ und endet links mit „31“. Das niedrigstwertige Bit, also das äußerste rechte Bit, wird mit „LSB“ (engl.: *Least Significant Bit*), das höchstwertige Bit, also das äußerste linke Bit, mit „MSB“ (engl.: *Most Significant Bit*) bezeichnet.

Auf dem Weg der Daten entlang des Readout Trees werden zu den reinen Messdaten mehrere Datenworte und *Header*² hinzugefügt, die einerseits den bis auf ADC-Ebene genauen Ursprungsort der Daten angeben und gleichzeitig Informationen über die Konfiguration des TRD liefern. Der erste Header, den ein Supermodul sendet, ist der *Common Data Header* (CDH), eine Folge von acht Datenworten, die z.B. Informationen über die Länge des Datenblocks oder die eingehenden Trigger enthält. Auf

¹Für genauere Informationen zu den Daten siehe [OAA07, CRK11]

²Header können einzeln auftauchen oder in Zusammenhang mit einem *Index Word*, das z.B. die Länge des Headers angibt. Wird in dieser Diplomarbeit von „Headern“ gesprochen, sind eventuelle Index Words mit eingeschlossen

6. Die Rohdaten des TRD

den CDH folgt der Supermodul Header mit Informationen über die Art des Events, Trigger-Konfigurationen etc.

Die bisherigen Header werden für jedes Supermodul einmal in den Datenstrom eingespeist. Die darauf folgenden Daten werden stapelweise mitgeschickt. Dazu gehören unter anderem der *Stack Tracking Header*, *Trigger Header* und der *Stack Header*.

Sobald diese Header gesendet wurden, werden die Daten für jede Halbkammer gesandt. Hier tauchen im Datenstrom die ersten wirklichen Messdaten auf, die *Tracklet Data*. Dies sind die Spurfragment-Daten, die bei Eingang eines Level-0-Triggers an die GTU gesendet werden. Das Ende der Spurfragment-Daten markiert ein fester *EndOfTracklet*-Marker. Dieser Marker taucht immer exakt zweimal im Datenstrom auf und hat den Wert „0x10001000“. Auf ihn folgen mehrere Header, die Informationen über die Anzahl der aufgenommenen Timebins, die Anzahl der Ereignisse, den Ort eines jeden Ereignisses und vieles mehr enthalten. Folgende Header werden dazu an unterschiedlichen Stellen in den Datenstrom eingespeist: *HC-Header*, *MCMHeader* und *AdcMask*. Die *AdcMask* taucht nur bei ZS-Ereignissen¹ auf, bei allen NZS-Ereignissen² werden alle Kanäle vollständig ausgelesen. Nach diesen Headern folgen die eigentlichen Rohdaten, die bei Eingang eines Level1-Triggers aus den Ereignis-Puffern der MCMs ausgelesen werden. Das Ende der Rohdaten wird durch *EndOfRawData*-Markierungen gekennzeichnet, die immer den Wert „0x00000000“ haben.

Den Abschluss des Datenblocks bildet der sogenannte *Trailer*, der wiederum einmal pro Supermodul gesendet wird. Die Erzeugung des Trailers ist optional und dient der Überprüfung der gesendeten Daten.

In Tabelle 4 ist die Struktur der Daten gezeigt, wie sie schließlich bei Eingang eines Level-1-Triggers für jeden der fünf Stapel eines Supermoduls an die DAQ gesendet wird. Die Struktur gilt für einen Datenblock eines voll funktionsfähigen Supermoduls, in dem 60 Halbkammern mit je 16 auszulesenden MCMs pro Readout Board eingebaut sind. Um eventuelle Verwirrung bei der Lektüre der angegebenen Quellen zu vermeiden werden hier die englischen Schreibweisen und Original-Bezeichnungen der einzelnen Header und Masken, ohne sie zu übersetzen, verwendet.

Die verschiedenen Header und Masken tauchen unterschiedlich oft im Datenstrom auf. Den *Common Data Header* (CDH) gibt es nur einmal pro Ereignis und Supermodul, während 60 HC-Header – pro Halbkammer einer – ausgegeben werden. Der Aufbau der Datenstruktur ist in Abbildung 28 für einen Stapel skizziert. Aus Platzgründen wurde darauf verzichtet, alle fünf Stapel einzuzuzeichnen. Die übrigen Stapel sind im Datenstrom – genau wie Stapel 0 – unterhalb des CDH angeordnet.

Da einige der Header, Masken und ADC-Worte für die weitere Analyse der Daten wichtig sind, sollen die für diese Arbeit relevanten im Folgenden kurz erklärt und aufgeschlüsselt werden. Dafür werden die einzelnen Datenworte in einer *top-down*-

¹ZS = Nullunterdrückung (engl.: *Zero Supression*), zur Optimierung der Auslesezeit und des Verbrauchs von Speicher werden bei ZS-Ereignissen Pads, auf denen keine Ladung induziert wurde, ignoriert.

²NZS = non-ZS

Datenworte kommen nur einmal pro Supermodul im Datenstrom vor
<i>Common Data Header</i> (CDH)
<i>Supermodule Index Word</i> (SMIW)
<i>Supermodule Header</i> (SMH)
Datenworte wiederholen sich für jeden einzelnen Stapel
<i>Stack #i Tracking Index Word</i> (STIW _i)
<i>Stack #i Tracking Header</i> (STH _i)
<i>Trigger #i Index Word</i> (TrigIW _i)
<i>Trigger #i Header</i> (TrigH _i)
<i>Stack #i Index Word</i> (SIW _i)
<i>Stack #i Header</i> (SH _i)
Daten wiederholen sich für jede einzelne Halbkammer
<i>Tracklet Data</i>
<i>EndOfTracklet</i>
<i>HC-Header</i>
<i>MCMHeader</i>
<i>AdcMask</i>
<i>ADC-Data</i>
<i>EndOfRawData</i>
Ab hier nur einmal pro Supermodul
<i>Trailer Index Word</i> (TIW)
<i>Trailer Data Content Word</i> (TDC-Words) 0-3

Tabelle 4: Die Struktur der TRD-Daten, die bei Eingang eines Level-0-Triggers an die DAQ gesendet werden. Die ersten drei und die letzten fünf Datenworte kommen nur einmal pro Supermodul im Datenstrom vor, die restlichen Datenworte wiederholen sich für jeden Stapel.

Hierarchie beschrieben. Es wird also bei dem *Supermodule Index Word* begonnen und endet beim einzelnen *ADC-Data-Word*.

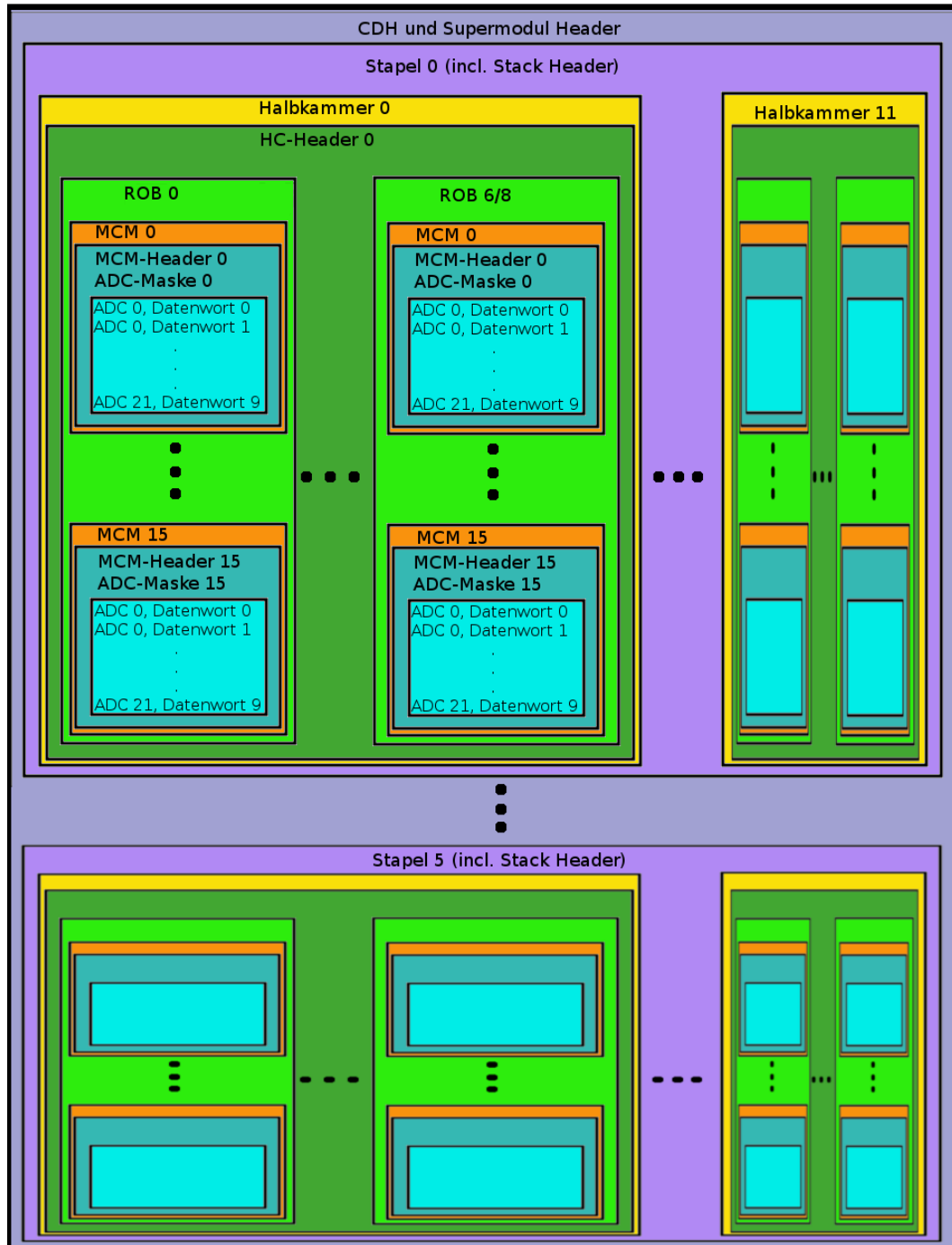


Abbildung 28: Die Struktur der Daten des TRD für einen Stapel. Die anderen vier Stapel sind im Datenstrom ebenfalls unter dem CDH angeordnet. Bei einem voll funktionsfähigen Supermodul, das 30 Timebins ausliest, kommen im Datenstrom ein CDH, 60 HC-Header, 3648 MCM-Header und ADC-Masken sowie bis zu 766080 ADC-Datenworte vor.

6.1. Supermodule Header

Der Supermodule Header wird von der SMU in der GTU erzeugt und in den Datenstrom eingespeist. Er besteht aus einem *Supermodule Index Word* (SMIW) und dem eigentlichen *Supermodule Header* (SMH) – der je nach Header-Version – aus bis zu 78 Datenworten bestehen kann. Die Anzahl der SMH-Datenworte kann, genau wie die Version des aktuellen SMH, aus dem SMIW abgelesen werden. Außerdem gibt das SMIW Informationen darüber, ob das Ereignis ein *Start-of-Data*-, ein *End-of-Data*- oder ein normales physikalisches Ereignis ist. Zusätzlich kann man aus den Bits des SMIW ablesen, ob Trailer-, Spur- oder Spurfragment-Daten mitgeschickt werden, unter welchen Bedingungen der *Trigger Header* in den Datenstrom eingespeist wird und schließlich von welchen Stapeln Daten erwartet werden.

Der SMH besteht aus mehreren Datenworten, die Aufschluss geben über das Hardware-Design, das Ereignis selbst und die jeweiligen Trigger-Konfigurationen. Dazu stehen zwei Header-Versionen zur Verfügung, die mit 0xB und 0xC abgekürzt werden. In der Header-Version 0xB findet man unter anderem Informationen über den *GTU L1 Cosmic Trigger*. Diese Header-Version ist nur in Cosmic-Runs zu finden. In der Version 0xC findet man in der Trigger-Maske neben Informationen über die Trigger-Algorithmen auch die *Trigger Fired Flags*, die angeben, für welche Trigger-Algorithmen für das Event ausgelöst wurden. Die detaillierten Inhalte des SMH sind im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht relevant, in [CRK11] finden sich allerdings weitere Informationen.

Die Form des SMIW und die Bedeutung der einzelnen Bits ist in Tabelle 5 aufgeführt.

SMIW = ssss ssss ssss ssss vvvv rlae edtm mmmm _s		
Name	Position	Inhalt
s	31-16	Anzahl der Datenworte im Supermodule Header
v	15-12	Supermodule Header Version
r	11	zur Zeit unbenutzt
l	10	<i>Trailer Enabled Bit</i>
a	9	<i>Trigger Header</i> Auslese-Modus
e	8-7	Ereignis-Typ
d	6	<i>Track Data Enabled Bit</i>
t	5	<i>Tracklet Data Enabled Bit</i>
m _s	4-0	Stack Mask

Tabelle 5: Das SMIW und die Bedeutung der Bits.

Ist der *Trigger Header* Auslese-Modus auf „0“ gesetzt, so werden *Trigger Index Word* und *Trigger Header* entsprechend der Trigger-Maske, das heißt für jeden aktiven Trigger-Algorithmus, gesendet. Ist das Bit auf „1“ gesetzt, so wird ein spezielles *Trigger Index Word* nur dann gesendet, falls gleichzeitig Trigger für das Ereignis

ausgelöst wurde. Die Trigger-Maske ist Teil des SMH der Version 0xB. Nähere Informationen dazu finden sich in [CRK11].

Die *Track (d)* und *Tracklet (t) Data Enabled Bits* geben an, ob für das Ereignis Spur- oder Spurfragment-Daten gesendet werden.

In der *Stack Mask* wird durch Setzen des entsprechenden Bits gezeigt, welcher Stapel für das Ereignis Daten geschickt hat.

6.2. Stack Header #i

Der Stack Header wird von der TMU in der GTU erzeugt und besteht aus einem *Stack #i Index Word* (SIW_i) und mindestens sieben *Stack #i Header*-Datenworten ($SH_{i,j}$). Dabei ist i die Nummer des Stapels und $j \in [0,6]$ die Nummer des Datenwortes. Fehlt eines dieser Datenworte, ist der Stack-Header zu klein, was einen Fehler verursacht.

Das SIW_i gibt an, aus wie vielen Datenworten der Stack Header besteht und welche Version des Stack Headers gesendet wird. Die Version des Stack Headers ändert sich nur sehr selten, die aktuelle Version ist „0xA“. In dieser Diplomarbeit wurde nur mit der aktuellen Version gearbeitet, weshalb der Stack Header auch nur für diese Version beschrieben wird.

Das SIW_i enthält außerdem eine *Link Mask*, die für jede der zwölf Halbkammern des Stapels ein Bit zur Verfügung stellt. Je nachdem ob das Bit in der *Link Mask* gesetzt ist oder nicht, werden von der entsprechenden Halbkammer Daten erwartet. Ist eines der Bits nicht gesetzt, wird die entsprechende Halbkammer im Datenstrom übersprungen.

Auf das SIW_i folgen die SH_i -Datenworte, die inhaltlich unterteilt werden können in $SH_{i,0}$ und $SH_{i,j}$. Dabei beschreibt i die Nummer des Stapels, während $j \in [1,6]$ die Nummer des Datenwortes angibt.

Das erste Datenwort, SH_0 , enthält Informationen über das Event und die beteiligte Hardware, wie z.B. die Identifikations-Nummer des Stapels.

In den nächsten sechs Datenworten $SH_{i,j}$ stehen die sogenannten *Flags*¹ der einzelnen Halbkammern. Dabei sind die *Flags* von jeweils zwei Halbkammern in einem Datenwort zusammengefasst. Die Nummer der Halbkammer leitet sich aus der Nummer des Datenwortes ab: In Datenwort $SH_{i,j}$ sind die *Flags* der Halbkammern j und $j+1$ enthalten.

Die *Flags* geben unter anderem Auskunft darüber, ob die GTU Daten der jeweiligen Halbkammer empfangen hat und ob es sich dabei um echte Daten, oder z.B. um künstlich generierte Daten handelt. Ersteres kann anhand der sogenannten *Link Monitor Flags* abgelesen werden, letzteres anhand der sogenannten *Link Data Type Flags*. Ist eines der *Link Monitor Flags* gesetzt, so bedeutet dies, dass von der entsprechenden Halbkammer keine Daten innerhalb eines vorgeschriebenen Zeitfensters gesendet wurden. Ein gesetztes *Link Data Type Flag* bedeutet, dass es sich nicht um echte Messdaten handelt. Für die physikalische Analyse dürfen nur Daten verwen-

¹ *Flags* haben in der Informatik die Funktion von Markierungen.

det werden, in denen weder die *Link Monitor Flags* noch die *Link Data Type Flags* gesetzt sind!

In den Tabellen 6, 7 und 8 sind die einzelnen Datenworte des Stack Headers und die Bedeutung ihrer Bits aufgelistet.

$SIW_i = \text{ssss ssss ssss ssss}_i \text{ vvvv}_i \text{ mmmm mmmm mmmm}_i$		
Name	Position	Inhalt
s_i	31-16	Anzahl der Worte im Stack Header
v_i	15-12	Header Version
m_i	11-0	<i>Link Mask</i>

Tabelle 6: Das SIW_i und die Bedeutung der Bits.

$SH_{i,0} = \text{vvvv vvvv vvvv vvvv bbbb bbbb rrrr rrrc}$		
Name	Position	Inhalt
v	31-16	Hardware Design Revision
b	15-8	<i>Physical Board ID</i>
r	7-1	Derzeit nicht genutzt
c	0	<i>Clean Checkout Flag</i>

Tabelle 7: Das erste Datenwort des SH_i und die Bedeutung der Bits.

$SH_{i,j} = \text{dddd}_{j+1} \text{ rrrr rrtt}_{j+1} \text{ mmmm}_{j+1} \text{ dddd}_j \text{ rrrr rrtt}_j \text{ mmmm}_j$		
Name	Position	Inhalt
d_j	15-12	<i>Link Debug Flags</i>
r	11-6	Derzeit nicht genutzt
t_j	5-4	<i>Link Data Type Flags</i>
m_j	3-0	<i>Link Monitor Flags</i>

Tabelle 8: Die Datenworte 6 bis 1 des SH_i und die Bedeutung der Bits. Dabei steht i für die Nummer des Stapels und $j \in [1,6]$ für die Nummer des Datenwortes. Ein Datenwort steht für zwei Halbkammern, deren Nummerierung sich aus der Nummer des Datenwortes berechnet.

6.3. HC-Header

Der HC-Header gibt den Beginn der TRAP-Daten einer Halbkammer an. Im Datenstrom sind HC-Header an den vorhergehenden EndOfTracklet-Markern, die immer den Wert 0x10001000 haben, erkennbar. Im Datenstrom tauchen immer exakt zwei dieser Marker hintereinander auf. Früher wurde als Endmarker der Wert 0xaaaaaaaa

benutzt, der in älteren Daten noch auftauchen kann. Sie markieren, wie der Name vermuten lässt, das Ende der Tracklet-Daten und den Anfang der TRAP-Daten, die erst nach Eingang eines entsprechenden Triggers aus dem Ereignis-Puffer der MCMs ausgelesen werden.

HC-Header werden in den ORIs der Halbkammern erzeugt und bestehen aus mindestens zwei und höchstens vier Datenworten, die mit $h[0]$ bis $h[3]$ bezeichnet werden. Für diese Diplomarbeit sind nur $h[0]$ und $h[1]$ relevant, die anderen beiden Datenworte werden daher nicht näher besprochen. Für weitere Informationen sei hier auf [OAA07] verwiesen.

Aus dem ersten Datenwort $h[0]$ kann man anhand der *Raw Version Major Number*, der ein eigener Abschnitt gewidmet ist (Abschnitt 6.4), Informationen über die Art des Events erfahren. Außerdem ist in $h[0]$ die genaue Position der Halbkammer angegeben. Die Position ist dabei festgelegt durch die Nummer des Supermoduls, der Lage, des Stapels und der Seite der Halbkammer. Als Möglichkeit für die Seite kommt „A“ oder „B“ in Frage. Mit Seite „B“ ist dabei die Seite der Halbkammer gemeint, auf der das DCS-Board angebracht ist. Die Reihenfolge, in der die Daten der einzelnen Halbkammern erwartet werden, ist fix und führt zur Ausgabe von Fehlernachrichten, sollte die Reihenfolge der eingehenden Daten abweichen. Zur Identifikation des $h[0]$ gibt es drei Checkbits: Das MSB hat den Wert „1“¹ und die beiden niedrigstwertigen Bits haben den Wert „01“. Zusätzlich gibt $h[0]$ Auskunft über die Anzahl der noch folgenden HC-Header-Datenworte. Diese Zahl ist mindestens eins und höchstens drei.

Das Datenwort $h[1]$ wird immer mitgesendet und enthält die Information, wie viele Timebins in diesem Ereignis aufgenommen wurden. Für aufeinander folgende HC-Header eines Ereignisses sollte die Anzahl der Timebins gleich sein, was während der Datenanalyse laufend überprüft wird. In $h[1]$ ist theoretisch Platz für 63 Timebins. Wegen der Bauweise der TRAPs wird die Anzahl der Timebins normalerweise auf 30 begrenzt. Spezielle Software und Konfiguration könnte die Anzahl auf 63 erhöhen, was aber mit deutlich höherem Energieverbrauch verbunden wäre. Wie in $h[0]$ dienen auch in $h[1]$ die beiden niedrigstwertigen Bits mit dem fixen Wert „01“ als Checkbits. Im Gegensatz zu $h[0]$ dient das MSB allerdings nicht als Checkbit.

Die HC-Header-Datenworte $h[0]$ und $h[1]$ und die Bedeutung ihrer Bits können aus Tabelle 9 bzw. Tabelle 10 abgelesen werden.

6.4. Raw Version Major Number (RVMN)

Die *Raw Version Major Number* (RVMN) ist Teil des HC-Header-Datenwortes $h[0]$ (Bit 30-24). Die Definition der RVMN (und der *Raw Version Minor Number*) ist abhängig davon, welche Header-Version gerade vorliegt. Hier soll nur die Header-Version besprochen werden, in der das MSB x des HC-Header-Datenwortes $h[0]$ den Wert „1“ hat. Header-Versionen des Supermoduls I (2006) werden also nicht berücksichtigt.

¹Für ältere Daten des Supermoduls I kann das MSB einen anderen Wert als „1“ haben.

h[0]=xmmm mmmm nnnn nnnq qqss sssp ppcc ci01			
Name	Position	Wert	Inhalt
x	31	1	<i>Raw Version Special Number</i>
m	30-24	0-127	<i>Raw Version Major Number</i>
n	23-17	0-127	<i>Raw Version Minor Number</i>
q	16-14	0-7	Anzahl der zusätzlichen HC-Header-Datenworte
s	13-9	0-17	Supermodul-Nummer (ALICE Nummerierung)
p	8-6	0-5	Lagen-Nummer
c	5-3	0-4	Stapel-Nummer
i	2	0-1	Seite der Kammer (0:A, 1:B)

Tabelle 9: D HC-Header-Datenwort h[0] und die Bedeutung der Bits.

h[1]=tttt ttbb bbbb bbbb bbbb bbpp pphh hh01			
Name	Position	Wert	Inhalt
t	31-26	0-63	Anzahl der Timebins
b	25-10	0-65535	<i>Bunch crossing counter</i>
p	9-6	0-15	<i>Pretrigger counter</i>
h	5-2	0-11	<i>Pretrigger phase</i>

Tabelle 10: Das HC-Header-Datenwort h[1] und die Bedeutung der Bits.

Anhand der RVMN kann man Informationen über die Art der Daten erfahren. Unterschieden wird dabei zwischen *Test pattern* (TP)-, *Zero Suppressed* (ZS)-, *Disable Tracklets* (DT)- und *Cosmics*-Daten.

TP-Daten sind Testdaten, die in den MCMs konfiguriert werden. Sie dienen, wie der Name bereits sagt, dem Testen des TRDs entlang des Readout Trees. Dazu werden nach einem bestimmten Muster Daten in den MCMs erzeugt und an die DAQ gesendet. Bei der Datenanalyse wird überprüft, ob die ankommenden Daten mit dem erwarteten Muster übereinstimmen. Welchem Muster die Daten entsprechen sollen, ist abhängig vom TP-Modus, der ebenfalls – sofern TP-Daten gesendet werden – aus der RVMN abgelesen werden kann. Ausführliche Informationen über die Daten der einzelnen TP-Modi und die Schemata zur Berechnung der Daten stehen in [OAA07]. Sind die eingehenden Daten TP-Daten und stimmen die ankommenden Daten nicht mit dem Testmuster überein, so wird eine entsprechende Fehlernachricht ausgegeben. Ursache für so einen Fehler kann beispielsweise ein Bitflip¹ entlang des Readout Trees sein.

ZS-Daten sind Daten, in denen ADC-Kanäle, die keine Messwerte ausgelesen ha-

¹Ein Bitflip bedeutet den spontanen Wechsel eines Bits von „0“ zu „1“, bzw. umgekehrt. Dies kann durch äußere Einflüsse, wie z.B. Strahlung, oder eine Reflexion in der Übertragungsleitung verursacht werden.

6. Die Rohdaten des TRD

ben, unterdrückt werden. Für den Fall, dass ZS-Daten gesendet werden, kann jedes 128., jedes 256. oder jedes 1024. Ereignis komplett, ohne die Unterdrückung einzelner ADC-Kanäle, gesendet werden. Auch hierfür gibt es in der RVMN entsprechende Bits.

Da der ZS- und der TP-Modus nicht miteinander kompatibel sind, sollten die beiden Bits nicht gleichzeitig gesetzt sein.

Die Namen der beiden anderen Modi (DT, Cosmics) sprechen für sich selbst: bei DT werden keine Tracklets berechnet oder mitgeschickt, bei Cosmics werden spezielle Tracklets für einen Cosmic-Trigger erzeugt.

Die Bedeutung der einzelnen Bits der RVMN ist in Tabelle 11 aufgeführt.

Bit in RVMN	Definition
6	Test-Vorlage (engl.: <i>Test pattern</i>) (TP)
5	<i>Zero suppression</i> (ZS)
4	Tracklets deaktivieren (engl.: <i>Disable Tracklets</i>) (DT)
3	<i>Cosmics mode</i>
2-0	Optionen (OP), verschiedene Bedeutung
	ZS: 01 - sende jedes 128. Ereignis vollständig
2-1	ZS: 10 - sende jedes 256. Ereignis vollständig
	ZS: 11 - sende jedes 1024. Ereignis vollständig
0	ZS: 1 - unterdrücke MCM-Header/leere ADC-Maske
0	Kein ZS, Kein TP: 1 - berechne ADC-Statistiken im TRAP-Speicher
2-0	TP: Nummer des Test-Modus

Tabelle 11: Die Bedeutung der Bits der RVMN.

6.5. MCMHeader

Der MCMHeader wird, wie der Name vermuten lässt, in den einzelnen MCMs erzeugt und in den Datenstrom eingespeist. Er kann in das eigentliche Header-Datenwort und eine AdcMask unterteilt werden. Aus den bisherigen Headern konnte die Position der Halbkammer bestimmt werden, von der die aktuellen Daten stammen. Aus dem MCMHeader können die Informationen gezogen werden, von welchem ROB und, noch genauer, von welchem MCM die Daten aufgenommen wurden. Dabei wird von der Analyse-Software erwartet, dass die ROBs und MCMs in der richtigen Reihenfolge im Datenstrom auftauchen, was während der Datenanalyse laufend überprüft wird.

Außerdem ist in den Headern die Anzahl der bisher gezählten Ereignisse gespeichert. Dabei werden im MCMHeader nur die niedrigstwertigen 20 Bits des Ereigniszählers des TRAP übernommen. Die Anzahl der Ereignisse sollte für alle MCMs die gleiche sein. Eine mögliche Fehlerquelle, die auch während der Datenanalyse

überprüft wird, ist eine ungleiche Anzahl von Datenworten in aufeinander folgenden MCMHeadern.

Die niedrigsten vier Bits haben immer den Wert „1100“, sie dienen also als Checkbits und werden ebenfalls von der Analysesoftware überprüft.

Die AdcMask wird nur bei ZS-Events von den MCMs erzeugt. Bei ZS-Events werden die ADC-Kanäle, die in dem Ereignis keine Daten von den Pads empfangen haben, unterdrückt, um Datenvolumen zu sparen. In der AdcMask wird daher deutlich gemacht, welche ADCs tatsächlich Daten geschickt haben. Dazu gibt es für jeden einzelnen ADC ein entsprechendes Bit, das gesetzt wird, falls der ADC Daten mitschickt. Das niedrigste dieser 21 Bits steht dabei für den ADC-Kanal 0, das höchste für Kanal 20.

Zusätzlich enthält die AdcMask einen Counter, der ebenfalls innerhalb der MCMs erzeugt wird. Er zählt die Anzahl der gesetzten Bits, also der Daten sendenden ADCs. Die Datenanalyse-Software von AliROOT ist in der Lage, sowohl aus dem Zähler, als auch aus den Bits 24 bis 4 die Anzahl der ADC-Kanäle, die Daten senden, auszulesen. Eine mögliche Fehlerursache ist eine Zahl im Counter, die nicht der Anzahl der gesetzten Bits entspricht. Bei NZS-Events werden alle ADC-Kanäle ausgelesen, weshalb keine eigene Maske erzeugt werden muss.

Auch in der AdcMask dienen die niedrigstwertigen vier Bits mit dem Wert 1100 als Checkbits. Um die AdcMask vom MCMHeader unterscheiden zu können, haben die beiden höchstwertigen Bits als zusätzliche Checkbits den Wert 01.

Die Form des MCMHeaders und die Bedeutung der einzelnen Bits ist in Tabelle 12 aufgeführt, Tabelle 13 zeigt Form und Bits der AdcMask.

MCMHeader = xrrr mmmm eeee eeee eeee eeee eeee 1100			
Name	Position	Wert	Inhalt
x	31	0-1	0 vor, 1 seit 2007
r	30-28	0-7	Position des ROB
m	27-24	0-15	MCM-Position (ALICE Nummerierung)
e	23-4	$0-20^{20} - 1$	Ereignis-Zähler, beginnend bei 1

Tabelle 12: Der MCMHeader und die Bedeutung der Bits.

AdcMask = nncc cccm mmmm mmmm mmmm mmmm mmmm 1100			
Name	Position	Wert	Inhalt
n	31-30	01	zusätzliche Checkbits
c	29-25	0-31	Zähler
m	24-4	$0-2^{21} - 1$	Daten sendende ADCs

Tabelle 13: Die AdcMask und die Bedeutung der Bits.

6.6. ADC-Data-Word

Die eigentlichen Messdaten des TRD sind in den ADC-Data-Words gespeichert. Die Anzahl der gesendeten Datenworte pro ADC-Kanal hängt dabei von der Anzahl der ausgelesenen Timebins ab, die aus dem zweiten HC-Header (h[1], vgl Abschnitt 6.3) ausgelesen werden kann. Jeder ADC hat 10 Bit Auflösung. In ein 32-Bit-Datenwort passen also drei ADC-Samples. Wegen der Abhängigkeit der Anzahl der Daten von der Anzahl der Timebins N_t ergibt sich die Anzahl der ADC-Datenworte N_{ADC} zu

$$N_{ADC} = \left(\frac{N_t - 1}{3} + 1 \right), \quad (6)$$

wobei eventuelle Nachkommastellen wegfallen, da $N_{ADC} \in \mathbb{Z}$ sein muss.

Falls N_t kein Vielfaches von drei ist, falls also nicht alle Bits des letzten ADC-Datenwortes mit ADC-Daten gefüllt sind, werden die restlichen Bits auf Null gesetzt.

Ein ADC-Data-Word w hat die Form

$$w = \text{xxx xxx xxyy yyyy yyyy zzzz zzzz zzff},$$

wobei x , y und z für die Timebins $3i + 2$, $3i + 1$ und $3i$ stehen, mit $i \in \mathbb{Z}$.

Das LSB und das LSB+1 zusammen sollten für ADC-Kanäle mit einer geraden Zahl den Wert „11“ und für Kanäle mit einer ungeraden Zahl den Wert „10“ haben.

6.7. Trailer

Der in der GTU erzeugte Trailer besteht aus einem *Trailer Index Word* (TIW) und mindestens vier *Trailer Data Content Words* (TDC_i) und wird nur mitgesendet, wenn im SMIW das entsprechende Bit gesetzt ist. Ist der Trailer kleiner als erwartet, fehlt also eines der vier TDC_i, wird eine Fehlerbenachrichtigung ausgegeben.

Der gesamte Trailer dient der Überprüfung der Daten auf ihrem Weg zur DAQ. Dazu werden sogenannte zyklische Redundanzprüfungen (engl.: *Cyclic Redundancy Check*, CRC) eingeführt. CRCs sind Prüfsummen, die an festen Punkten in den Datenstrom eingebaut werden, um zu testen, ob die Daten die von den MCMs ausgegeben werden, unverändert an der DAQ ankommen, oder ob sie beispielsweise durch das Flippen eines Bits verändert werden. Diese Überprüfung geschieht, indem die Prüfsummen an bestimmten Stellen von der Analyse-Software überprüft und miteinander abgeglichen werden.

Im TIW stehen die Anzahl der darauf folgenden Datenworte (mindestens vier), die Trailer Version und ein Marker (0xf51), um das TIW identifizieren zu können. Die Bits des Markers dienen gleichzeitig als Checkbits und werden von der Analyse-Software überprüft. Eine Abweichung vom vorgegebenen Wert führt zur Ausgabe eines Fehlers.

In der bisherigen Implementierung der TRD-Software gibt es vier verschiedene TDC-Words. In ihnen stehen die Prüfsummen, die an bestimmten Stellen in den Datenstrom eingespeist werden sowie Informationen darüber, ob die Prüfsummen

vor und nach der Zwischenspeicherung im SRAM der TMU (*Static RAM*¹) bzw. vor und nach der Übertragung über die Backplane per LVDS (*Low Voltage Differential Signaling*²) übereinstimmen.

In TDC₀ steht die Prüfsumme des Stapels 0, sowie *Flags*, die für den Stapel mit der Nummer *i* ($i \in [0,4]$) angeben, ob die CRCs vor und nach dem LVDS bzw. vor und nach dem SRAM übereinstimmen. Ein falsch gesetztes Flag an dieser Stelle kann einen Fehler hervorrufen. In TDC₁ und TDC₂ stehen die CRCs der Stapel 1 bis 4 und im letzten TDC₃ stehen schließlich die Prüfsummen der DDL-SIU-Karte. Diese Karte ist für die Übertragung der gepufferten Ereignisdaten eines Supermoduls von der GTU zur DAQ zuständig [Ret07].

In den Tabellen 14 und 15 sind die Datenworte des Trailers, sowie die Bedeutung ihrer Bits aufgeführt.

TIW = ssss ssss ssss ssss _{tr} vvvv xxxx xxxx xxxx			
Name	Position	Inhalt	
s_{tr}	31-16	Anzahl der Trailer-Datenworte	
v	15-12	Trailer Version	
x	12-0	<i>Trailer Index Word Marker (0xf51)</i>	

Tabelle 14: Das TIW und die Bedeutung der Bits.

TDC-Word 0 = cccc cccc cccc cccc ₀ rrrr rrpp ppp _i q qqqq _i			
TRD-Word 1 = cccc cccc cccc cccc ₂ cccc cccc cccc cccc ₁			
TRD-Word 2 = cccc cccc cccc cccc ₄ cccc cccc cccc cccc ₃			
TRD-Word 3 = cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc _s			
Name	Position	Wert	Inhalt
r	15-10	derzeit nicht genutzt	
p_i	9-5	<i>Post LVDS backplane match flags</i>	
q_i	4-0	<i>Post SRAM CRC match flags</i>	
c₀	31-16	CRC ₁₆ in Stapel 0	
c₁	15-0	CRC ₁₆ in Stapel 1	
c₂	31-16	CRC ₁₆ in Stapel 2	
c₃	15-0	CRC ₁₆ in Stapel 3	
c₄	31-16	CRC ₁₆ in Stapel 4	
c_s	31-0	CRC ₃₂ SIU	

Tabelle 15: Die TDC-Words und die Bedeutung der Bits.

¹Der Zwischenspeicher der TMU.

²LVDS bezeichnet einen Schnittstellen-Standard für Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung.

6.8. Ein Beispiel

Nachdem die Bedeutung der verschiedenen Bits in den einzelnen Datenworten theoretisch erklärt wurde, soll sie hier an einem kurzen Beispiel noch einmal verdeutlicht werden. Dazu wird hier eine Reihe von Datenworten aus dem Datenstrom eines Runs¹ herausgesucht und analysiert.

Aus dem Datenstrom für den Run des Supermoduls XII mit der Run-Nummer² 2770 wird die folgende Kette von Datenworten herausgesucht:

```

...
10001000
10001000
82004001
7bc429a9
8c00002c
...
```

Die ersten beiden Datenworte sind *EndOfTracklet*-Marker, anhand derer man HC-Header, die im Datenstrom direkt auf solche Marker folgen sollten, gut erkennen kann.

Das nächste Datenwort sollte demnach das erste HC-Header-Datenwort h[0] sein. In Tabelle 16 wird sowohl h[0] in Hexadezimal- und in Bitschreibweise als auch, zum besseren Verständnis, die Bedeutung der einzelnen Bits.

hexadezimal	8	2	0	0	4	0	0	1
binär	1000	0010	0000	0000	0100	0000	0000	0001
Bedeutung	xmmm	mmm	nnnn	nnnq	qqss	sssp	ppcc	ci01
Wert	2	0	1	0	0	0	0	0

Tabelle 16: Das HC-Datenwort h[0] in Hexadezimal- und Binärschreibweise sowie die Bedeutung der einzelnen Bits. Die senkrechten Striche in der letzten Zeile markieren die Grenzen zweier Bitgruppen, z.B. die Grenze zwischen „m“ und „n“.

Anhand der Bedeutung der Bits (vgl. Abschnitt 6.3 und Abschnitt 6.4) lässt sich aus der Bitfolge die Konfiguration des Runs und die Position der Halbkammer ablesen. Das MSB hat den Wert „1“, das LSB und das LSB+1 haben zusammen den Wert „01“, die Checkbits für einen HC-Header passen also. Für die Position ergibt sich aus den Bits 13 bis 2, dass sich die Halbkammer im Supermodul³ 0 (s), Lage 0 (p), Stapel 0 (c), auf der A-Seite befindet. Aus der RVMN (m) in den Bits 30 bis 24 ergibt sich, dass der Run kein TP-Run, kein ZS-Run und kein DT-Run war

¹Als *Run* wird eine Messung mit dem TRD, bzw. an der WWU Münster mit einem Supermodul des TRD bezeichnet

²Für die Test-Runs an der WWU Münster wird jedem Run eine fortlaufende Nummer zugewiesen.

³Für Testruns an der WWU Münster wird jedem Supermodul in den Daten die Nummer 0 zugewiesen, unabhängig von der Nummerierung der Supermodule am CERN.

und dass jedes 128. Ereignis vollständig gesendet wurde. Aus den Bits 16 bis 14 (q) ergibt sich, dass ein zusätzliches HC-Header-Datenwort h[1] mitgeschickt wurde. Dementsprechend wäre h[1] das nächste Datenwort. Dies ist in Tabelle 17 aufgeführt.

hexadezimal	7	b	c	4	2	9	a	9
binär	0111	1011	1100	0100	0011	1001	1010	1001
Bedeutung	tttt	ttbb	bbbb	bbbb	bbbb	bbpp	pphh	hh01
Wert	30			61710			6	

Tabelle 17: Das HC-Datenwort h[1] in Hexadezimal- und Binärschreibweise sowie die Bedeutung der einzelnen Bits. Die senkrechten Striche in der letzten Zeile markieren die Grenzen zweier Bitgruppen, z.B. die Grenze zwischen „t“ und „b“.

Auch hier passen die Checkbits (LSB und LSB+1), im Gegensatz zu h[0] dient das MSB in h[1] nicht als Checkbit.

Aus den Bits 31 bis 26 (t) kann man herauslesen, dass in diesem Run 30 Timebins aufgenommen wurden.

Das nächste Datenwort sollte erwartungsgemäß ein MCMHeader sein. Die binäre Form des Datenwortes ist in Tabelle 18 dargestellt.

hexadezimal	8	c	0	0	0	0	2	c
binär	1000	1100	0000	0000	0000	0000	0010	1100
Bedeutung	xrrr	mmmm	eeee	eeee	eeee	eeee	eeee	1100
Wert	0	12			2			

Tabelle 18: Der MCMHeader in Hexadezimal- und Binärschreibweise sowie die Bedeutung der einzelnen Bits. Die senkrechten Striche in der letzten Zeile markieren die Grenzen zweier Bitgruppen, z.B. die Grenze zwischen „m“ und „e“.

Das MSB und die vier niedrigsten Bits, die im MCMHeader als Checkbits dienen, haben die passenden Werte, das Datenwort ist also tatsächlich ein MCMHeader.

Aus den Bits 30 bis 24 lässt sich ablesen, dass der MCM auf dem ROB 0 sitzt und die Nummer 12 hat. Aus den Bits 23 bis 4 kann man ablesen, dass zwei Ereignisse aufgenommen wurden.

Anhand dieses Beispiels wurde deutlich gemacht, wie die Daten des TRD auszu- lesen sind. Für andere Datenworte wie CDH oder AdcMask sind die Datenworte auf dieselbe Art und Weise zu analysieren.

6. *Die Rohdaten des TRD*

7. Erklärung der möglichen Fehler

Bei Messungen mit dem TRD kann es zu diversen Fehlern kommen. Für 20 solcher Fehler sind in der AliROOT-Klasse `AliTRDdrawStream` passende Fehlermeldungen implementiert worden, die über die Art des Fehlers und die Position, an der der Fehler entstanden ist, Aufschluss geben. Dabei gehört zu jedem Fehler ein Fehlercode (engl.: *Errorcode*), der gleichzeitig mit einer Nummer (0 bis 20) verbunden ist und eine Fehlernachricht (engl.: *ErrorMessage*). Im Quellcode sind Fehlercode und Fehlernachricht unter den englischen Begriffen zu finden. Die Suche nach dem Fehlercode im Quelltext führt zu den Stellen, an denen der Fehler aufgerufen wird.

Die Fehler werden je nach Ebene, auf der sie verursacht werden, (MCM-Ebene, Stapel-Ebene, etc.) in *Equipment-Error* (Supermodul-Ebene), *Stack-Error* (Stapel-Ebene), *Link-Error* (Halbkammer-Ebene) *ROB-Error* (ROB-Ebene) und *MCM-Error* (MCM- bzw. teilweise ADC-Ebene) unterschieden, wobei einige der Fehler auch auf unterschiedlichen Ebenen auftauchen können.

Die 20 Fehler sollen in diesem Kapitel mit Code, Nachricht und Ebene aufgeführt werden. Außerdem soll – sofern dies ohne den Quelltext möglich ist – erklärt werden, welche Umstände zum Auftreten des jeweiligen Fehlers führen.

Fehler 0 – kUnknown

Fehlercode: „kUnknown“

Fehlernachricht: „Unknown error“

Art des Fehlers: „Equipment-Error“

Die erste Möglichkeit, weshalb hier ein Equipment-Error ausgegeben wird, ist ein ungültiger Marker im *Trailer Index Word*. Der Marker des TIW sollte den Wert „0xf51“ (vgl. Abschnitt 6.7) haben.

Die zweite Möglichkeit für einen Equipment-Error ist ein unvollständiger SMH.

Art des Fehlers: „Stack-Error“

Wenn die Analyse-Software am erwarteten Ende der Daten eines Stapels noch Datenworte überspringen muss, um zum tatsächlichen Stapel-Ende zu gelangen, wird dieser Stack-Error ausgegeben.

Art des Fehlers: „Link-Error“

Der Link-Error tritt auf, wenn eines der vier erwarteten TDC-Words fehlt (vgl. Abschnitt 6.7).

Art des Fehlers: „MCM-Error“

In Stapel 2 gibt es 12 Pad-Reihen, die von null bis elf nummeriert sind. Sollte in den Daten des Stapels 2 für die Nummer einer Pad-Reihe ein höherer Wert als elf auftreten, wird ein MCM-Error ausgegeben.

Fehler 1 – kLinkMonitor

Fehlercode: „kLinkMonitor“

Fehlernachricht: „Link monitor active“

Art des Fehlers: „Link-Error“

Sind die *Link Monitor Flags* für eine Halbkammer im *Stack #i Header* gesetzt (vgl. Abschnitt 6.2), hat also die TMU innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters keine Daten von einer Halbkammer empfangen, wird diese Fehlermeldung ausgegeben.

Fehler 2 – kEvCntMismatch

Fehlercode: „kEvCntMismatch“

Fehlernachricht: „Event counter mismatch“

Art des Fehlers: „MCM-Error“

Dieser Fehler tritt auf, falls die Anzahl der Events im Header des aktuellen MCMs nicht mit der Anzahl im Header des vorherigen MCMs übereinstimmt.

Fehler 3 – kNonTrdEq

Fehlercode: „kNonTrdEq“

Fehlernachricht: „not a TRD equipment (1024-1041)“

Art des Fehlers: „Equipment-Error“

Jeder optischen Faser von einem der Subdetektoren des ALICE-Detektors wird eine *Equipment-ID* zugewiesen, anhand derer erkennbar ist, um welches Teil es sich handelt. Zu den einzelnen Supermodulen des TRD gehören die Equipment-IDs 1024 bis 1041. Fehler 3 wird ausgegeben, wenn die Equipment-ID, die in den Daten auftaucht, keine Supermodul-Equipment-ID ist, d.h. wenn sie nicht im Bereich von 1024 bis 1041 liegt.

Fehler 4 – kStackHeaderInvalid

Fehlercode: „kStackHeaderInvalid“

Fehlernachricht: „Invalid stack header“

Art des Fehlers: „Equipment-Error“

Der Equipment-Error tritt auf, wenn die Länge des *Stack #i Header* die Größe des eingelesenen Datenblocks überschreitet.

Art des Fehlers: „Link-Error“

Zwei Bedingungen können diesen Link-Error aufrufen:

Die erste Bedingung ist ein zu kleiner *Stack #i Header* (vgl. Abschnitt 6.2). Ein *Stack #i Header* besteht normalerweise aus sieben Datenworten. Während der Analyse wird die Anzahl der zu erwartenden Datenworte aus dem *Stack #i Index Word* ausgelesen. Werden laut *Stack #i Index Word* weniger als acht Datenworte (*Stack #i Index Word* plus 7 *Stack #i Header*-Worte) gesendet, wird der Fehler ausgegeben. Die zweite Bedingung, unter der ein Link-Error ausgegeben wird, ist, wenn im *Stack #i Index Word* eine andere Version des Stack Headers auftaucht, als erwartet. Die

aktuell verwendete – und erwartete – *Stack #i Header*-Version ist 0xA (vgl. Abschnitt 6.2.)

Fehler 5 – kInvalidDetector

Fehlercode: „kInvalidDetector“

Fehlernachricht: „Invalid detector number“

Art des Fehlers: „Link-Error“

Da der TRD aus 540 einzelnen Modulen besteht, die von 0 bis 539 durchnummeriert sind, tritt Fehler 5 auf, wenn die aktuell berechnete Nummer des Moduls nicht im Bereich von 0 bis 539 liegt. Die Modul-Nummer *det* wird dazu aus der aktuellen Supermodul-Nummer *fCurrSm*, der aktuellen Stapel-Nummer *fCurrStack* und der aktuellen Lagen-Nummer *fCurrLayer*, die aus dem ersten HC-Header-Datenwort ausgelesen werden, über die Formel

$$det = fCurrSm \cdot 30 + fCurrStack \cdot 6 + fCurrLayer \quad (7)$$

berechnet.

Fehler 6 – kNoDigits

Fehlercode: „kNoDigits“

Fehlernachricht: „No digits could be retrieved from the digitsmanager“

Art des Fehlers: „Link-Error“

Dieser Fehler ist ein Softwarefehler, der auf einen Fehler oder auf eine unvollständige Initialisierung der Klasse *AliTRDDigitsManager* hinweist. In der Regel ist dies kein Fehler in den Daten.

Fehler 7 – kHCmismatch

Fehlercode: „kHCmismatch“

Fehlernachricht: „HC header mismatch“

Art des Fehlers: „Link-Error“

Dieser Fehler kann zwei Ursachen haben.

Die erste Ursache ist das Erreichen einer EndOfRawData-Markierung (vgl. Kapitel 6) während des Lesens der Daten, obwohl ein HC-Header erwartet wird.

Die zweite Ursache ist, dass die Daten im HC-Header nicht mit den aufgrund des *Stack #i Index Words* erwarteten Daten übereinstimmen. Gemeint sind hier die Daten für die Supermodul-, Stapel- oder Lagen-Nummer oder die Seite der Halbkammer (vgl. Abschnitt 6.3). Da aus dem *Stack #i Index Word* bekannt ist, welche Halbkammern Daten schicken sollen und die Reihenfolge der Kammern festgelegt ist, lassen sich so fehlende Kammern oder fehlerhafte Header erkennen.

Fehler 8 – kHCcheckFailed

Fehlercode: „kHCcheckFailed“

Fehlernachricht: „HC check bits wrong“

Art des Fehlers: „Link-Error“

Dieser Fehler bedeutet, dass bei der Überprüfung eines HC-Header-Datenwortes die Checkbits nicht passen, d.h. wenn das LSB und das LSB+1 zusammen nicht den Wert „01“ haben (vgl. Abschnitt 6.3).

Fehler 9 – kPosUnexpec

Fehlercode: „kPosUnexpec“

Fehlernachricht: „Unexpected position in readout stream“

Art des Fehlers: „ROB-Error“

Dieser Fehler taucht als ROB-Error auf, wenn die aktuelle ROB-Nummer kleiner ist, als die vorherige. Die Reihenfolge, in der die ROBs Daten senden, ist festgelegt und für das GTU-Tracking notwendig. Eine Abweichung von dieser Reihenfolge wird daher als Fehler gewertet.

Art des Fehlers: „MCM-Error“

Als MCM-Error taucht dieser Fehler auf, wenn die aktuelle MCM-Nummer kleiner ist, als die vorherige. Die Bedeutung ist die gleiche wie beim ROB-Error.

Fehler 10 – kTPmodeInvalid

Fehlercode: „kTPmodeInvalid“

Fehlernachricht: „Invalid testpattern mode“

Art des Fehlers: „Link-Error“

Für das Testen des TRD gibt es verschiedene TP-Modi (vgl. Abschnitt 6.4 oder [OAA07]). Handelt es sich bei den aktuellen Daten um einen TP-Run, so wird überprüft, ob der angegebene Testmodus zulässig ist. Als zulässig gelten hierbei die Testmodi 1, 2 und 3. Entspricht die TP-Nummer in den Bits zwei bis null der RVMN keinem der Testmodi, wird dieser Fehler ausgegeben. Eine Ausnahme bildet hier aber das Config-Event, das als TP-Modus 7 in der RVMN eingetragen ist. Dieses Ereignis zählt zwar zu den TP-Daten, da es aber nur einmal im Run auftaucht, wird der Run nicht als TP-Run gewertet.

Fehler 11 – kTPmismatch

Fehlercode: „kTPmismatch“

Fehlernachricht: „Testpattern mismatch“

Art des Fehlers: „MCM-Error“

Die Daten für einen Run mit Testmuster-Daten (TP) werden nach einem bestimmten Muster innerhalb des TRD berechnet (vgl. [OAA07]), die dementsprechend von der Analysesoftware des TRD erwartet werden. Die Software vergleicht die erwarteten

Daten mit denen, die tatsächlich vom TRD gesendet werden, und gibt den Fehler 11 aus, falls die Daten nicht übereinstimmen.

Fehler 12 – kNtimebinsChanged

Fehlercode: „kNtimebinsChanged”

Fehlernachricht: „Number of timebins changed”

Art des Fehlers: „Link-Error”

Beim Auslesen der HC-Header wird aus dem h[1]-Datenwort die Anzahl der Timebins ermittelt. Passt die Anzahl der Timebins in der aktuellen Halbkammer nicht zu der Anzahl aus der vorhergehenden Halbkammer, wird dieser Fehler ausgegeben.

Fehler 13 – kAdcMaskInconsistent

Fehlercode: „kAdcMaskInconsistent”

Fehlernachricht: „ADC mask inconsistent”

Art des Fehlers: „MCM-Error”

Fehler 13 tritt auf, wenn für einen MCM die Zahl der gesetzten Bits in der AdcMask (Bits 24 bis 4), also die Zahl der auszulesenden Kanäle, nicht mit der in der Adc-Maske angegebenen Zahl (Bits 29 bis 25) übereinstimmt.

Fehler 14 – kAdcCheckInvalid

Fehlercode: „kAdcCheckInvalid”

Fehlernachricht: „ADC check bits invalid”

Art des Fehlers: „MCM-Error”

Dieser Fehler wird durch unpassende Checkbits eines ADC-Datenwortes verursacht. Das heißt, wenn das LSB und das LSB+1 zusammen einen anderen Wert haben als „11” für ungerade Kanalzahlen oder einen anderen Wert als „10” für gerade Kanalzahlen (vgl. Abschnitt 6.6). Dabei bezieht sich die Kanalzahl auf die ADC-Nummerierung und gibt nicht an, wie viele ADCs bisher ausgelesen wurden.

Fehler 15 – kAdcDataAbort

Fehlercode: „kAdcDataAbort”

Fehlernachricht: „Missing ADC data”

Art des Fehlers: „MCM-Error”

Während des Lesens der Daten wird die Anzahl der auftretenden ADC-Worte mitgezählt, bis entweder der EndOfRawData-Marker oder die Anzahl der erwarteten Datenworte, die nach Formel 6 berechnet wird, erreicht sind. Stimmen an diesem Punkt die Anzahl der gezählten Datenworte nicht mit der erwarteten Anzahl überein, wurde also eine *EndOfData*-Markierung erreicht, bevor alle ADC-Daten gelesen werden konnten, wird Fehler 15 ausgegeben.

Fehler 16 – kAdcChannelsMiss

Fehlercode: „kAdcChannelsMiss“

Fehlernachricht: „Missing expected ADC channels“

Art des Fehlers: „MCM-Error“

Während die einzelnen ADC-Kanäle ausgelesen werden, wird die Anzahl der gelesenen Kanäle mitgezählt, bis entweder der EndOfRawData-Marker, oder die Anzahl der erwarteten ADC-Kanäle (ZS-Daten: Anzahl der Kanäle in der ADC-Mask, NZS-Daten: 21, vgl. Abschnitt 6.5) erreicht sind. Der Fehler wird ausgegeben, wenn die Anzahl der mitgezählten Kanäle nicht mit der Anzahl der erwarteten Kanäle übereinstimmt, d.h. wenn die *EndOfData*-Markierung erreicht wurde, bevor alle ADC-Kanäle gelesen werden konnten.

Fehler 17 – kMissMcmHeaders

Fehlercode: „kMissMcmHeaders“

Fehlernachricht: „Missing MCM headers“

Art des Fehlers: „Link-Error“

Während die Daten gelesen werden, wird mitgezählt, wie viele MCM-Header im Datenstrom auftauchen bevor ein Endmarker erreicht wird. Stimmt die Anzahl der MCM-Header nicht mit der erwarteten Anzahl (48 für Stapel 2, 64 für alle anderen Stapel) überein, so wird Fehler 17 ausgegeben.

Fehler 18 – kMissTpData

Fehlercode: „kMissTpData“

Fehlernachricht: „Missing TP data“

Art des Fehlers: „MCM-Error“

Bei Testmuster-Daten werden pro ADC-Kanal zehn Datenworte erwartet. Wird der Endmarker der Daten erreicht, bevor diese zehn Datenworte pro ADC-Kanal gelesen wurden, wird dieser Fehler ausgegeben. Dieser Fehler ist analog zu Fehler 15 und 16 für echte ADC-Messdaten.

Fehler 19 – kCRCmismatch

Fehlercode: „kCRCmismatch“

Fehlernachricht: „CRC mismatch“

Art des Fehlers: „Equipment-Error“

Dieser Fehler bedeutet, dass die Prüfsummen (CRC) vor dem Einspeisen der Daten in die GTU entweder mit den Prüfsummen nach dem Zwischenspeichern im SRAM der TMU oder mit den Prüfsummen nach der Übertragung von der TMU zur SMU nicht übereinstimmen.

Ein anschauliches Beschreiben der einzelnen Fehler ohne Zuhilfenahme des zugehörigen Quelltextes ist relativ schwierig. Interessierten Lesern wird – sofern sie der Programmiersprache C++ mächtig sind – empfohlen, den Quelltext der AliROOT-Klasse *AliTRDrawStream* hinzuzuziehen.

7. *Erklärung der möglichen Fehler*

8. Analyse der Fehler

Die einzelnen Ausleseammern des TRD werden in fünf verschiedenen Instituten gebaut und nach Münster transportiert, wo jeweils 30 von ihnen zu einem Supermodul zusammengesetzt werden.

Während der gesamten Fertigungsphase eines Supermoduls kann es zu Fehlern kommen. Diese Fehler können sowohl durch die Produktion der einzelnen Bauteile, wie Computerchips, Verstärker oder Glasfaserkabel, als auch durch Fehler beim Zusammenbau der Kammern bzw. beim Zusammenschließen der Kammern zu einem Supermodul bedingt sein.

Ist ein Supermodul am CERN eingebaut, kann es nicht jederzeit wieder ausgebaut werden, um eventuelle Fehler zu beheben, oder gar ganze Kammern auszutauschen. Aus diesem Grund werden die fertigen Supermodule in Münster getestet, um beispielsweise die Dichtigkeit der Gaskammern oder die korrekte Funktion der Ausleseelektronik zu überprüfen. Dazu werden pro Supermodul mehrere Testruns durchgeführt. Die meisten dieser Runs werden erst durchgeführt, wenn das komplette Supermodul fertiggestellt ist, teilweise kann es aber auch vorkommen, dass Runs durchgeführt werden, bevor alle Ausleseammern des Supermoduls eingebaut sind.

Bisher wurden jedoch Hardware- oder Bauart-bedingte Fehler, die mit Hilfe der AliROOT-Klasse *AliTRDrawStream* aus den Daten des TRD ausgelesen werden, kaum bis gar nicht untersucht. Einige dieser Fehler können vor dem Einbau eines Supermoduls am CERN erkannt und behoben werden. Gegenstand dieser Diplomarbeit ist es, eine Methode zu entwickeln um eine möglichst genaue Kenntnis der Fehler, ihrer Positionen innerhalb des TRD und, wenn möglich, sogar ihrer Ursachen, zu erlangen.

Auf dieser Grundlage kann in Zukunft eine Methode, z.B. in Form einer Software, entwickelt werden, mit der die in Münster aufgenommenen Testrun-Daten auf solche Fehler überprüft werden, so dass Fehlerquellen frühzeitig behoben werden können. Eine solche Software kann online, das heißt während der Datennahme, oder auch offline, also nachdem die Daten gespeichert wurden, die Daten kontrollieren.

Für die Untersuchung der Fehler wurden zwei Makros geschrieben. Eines der Makros liest die von *AliTRDrawStream* erzeugten Fehlermeldungen und speichert die Nummer des Fehlers und die Position in einem Tree¹. Zur Bestimmung der Position gehören die Nummer des Supermoduls, des Stapels, der Halbkammer, des ROBs, des MCMs und des ADCs. Dabei ist die Tiefe der Ebene, bis zu der die Position bestimmt werden kann, von der Art des Fehlers abhängig. Für einen Link-Error kann die Position beispielsweise bis auf Halbkammer-Ebene bestimmt werden, für einige MCM-Errors sogar bis auf ADC-Ebene. Zusätzlich bietet das Makro die Möglichkeit, Debug-Informationen über die gefundenen Fehler auszugeben. Die Menge an Informationen hängt vom eingestellten Debug-Level ab. In den meisten Fällen ist bereits

¹Weitere Informationen über Trees finden sich in der Root-Dokumentation auf der Internetseite des CERN

der niedrigste Level ausreichend, auf dem die vollständigen Fehlernachrichten sowie die Ereignis-Nummer und – teilweise – das als fehlerhaft erkannte Datenwort ausgegeben werden.

Das zweite Makro gibt die Datenworte eines Ereignisses in Hexadezimalschreibweise aus, wodurch ermöglicht wird, die Daten Bit für Bit zu untersuchen und so Hinweise auf eine mögliche Fehlerursache zu finden.

8.1. Untersuchte Daten

Die Menge der Daten, die für einen Testrun generiert werden, ist abhängig von der Art des Runs und von seiner Laufzeit. Einige Runs, die nur kurze Zeit laufen, enthalten nur Daten für einige hundert Ereignisse. Andere Runs, die über mehrere Stunden oder sogar Tage laufen, enthalten die Daten von mehreren 10^6 Ereignissen. Die Daten eines solchen Runs werden in viele einzelne Dateien aufgeteilt, von denen jede etwa 1 GB groß ist. Eine solche Datei kann die Daten von mehreren 10^5 Events enthalten. Wie viele Dateien erstellt werden, hängt im Wesentlichen von der Laufzeit des Runs ab.

Aus Zeitgründen ist es oftmals nicht möglich, alle Dateien eines solch langen Runs zu untersuchen. Man kann aber wegen der hohen Anzahl an Ereignissen pro Datei davon ausgehen, dass alle Fehler, die eventuell während des Runs auftreten, innerhalb der ersten Dateien auftauchen. Daher reicht es meist aus nur wenige Dateien oder sogar nur die erste Datei des Runs zu untersuchen.

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit untersuchten Dateien sind in den Tabellen 20 und 21 im Anhang A aufgelistet.

Bei der Untersuchung der einzelnen Runs zeigt sich, dass unterschiedliche Fehler verschieden häufig auftreten. Zur Veranschaulichung ist die Häufigkeit, mit der ein Fehler pro Run aufgetreten ist, nach Run-Nummer und Fehlercode sortiert in den Tabellen 22 bis 32 aufgetragen, die ebenfalls im Anhang zu finden sind. In den Tabellen findet man für einen Run die Anzahl der Ereignisse in der entsprechenden Datei, die Zahl der zum Zeitpunkt des Runs eingebauten Module sowie die Häufigkeit, mit der ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Fehlercode. Für jeden Run wurde nur die erste Datei untersucht.

Der Übersicht halber soll in Tabelle 19 kurz gezeigt werden, welcher Fehler in welchem Supermodul aufgetreten ist. Ein „X“ in dem entsprechenden Feld markiert dabei einen aufgetretenen Fehler in dem Supermodul.

Die Häufigkeit der in einem Run aufgetretenen Fehler wird deutlicher wenn man sie in einem Histogramm sieht. Dies ist in Abbildung 29 verdeutlicht. Die Daten hierfür stammen aus Run 1520 des Supermoduls VI.

Für einen Testrun in Münster sind verschiedene Modi und Konfigurationen verfügbar. So können bei einem Run beispielsweise alle 30 Module zur Datennahme benutzt werden, oder auch nur einzelne Stapel oder Lagen. Zusätzlich werden auch Daten mit unterschiedlichen Trigger- und Detektor-Konfigurationen genommen, wie zum Beispiel *Noise*-Runs, oder *Cosmics*-Runs. Alleine für Cosmics-Runs stehen wiederum unterschiedliche Konfigurationen zur Verfügung, die aufgrund neuer TRAP-

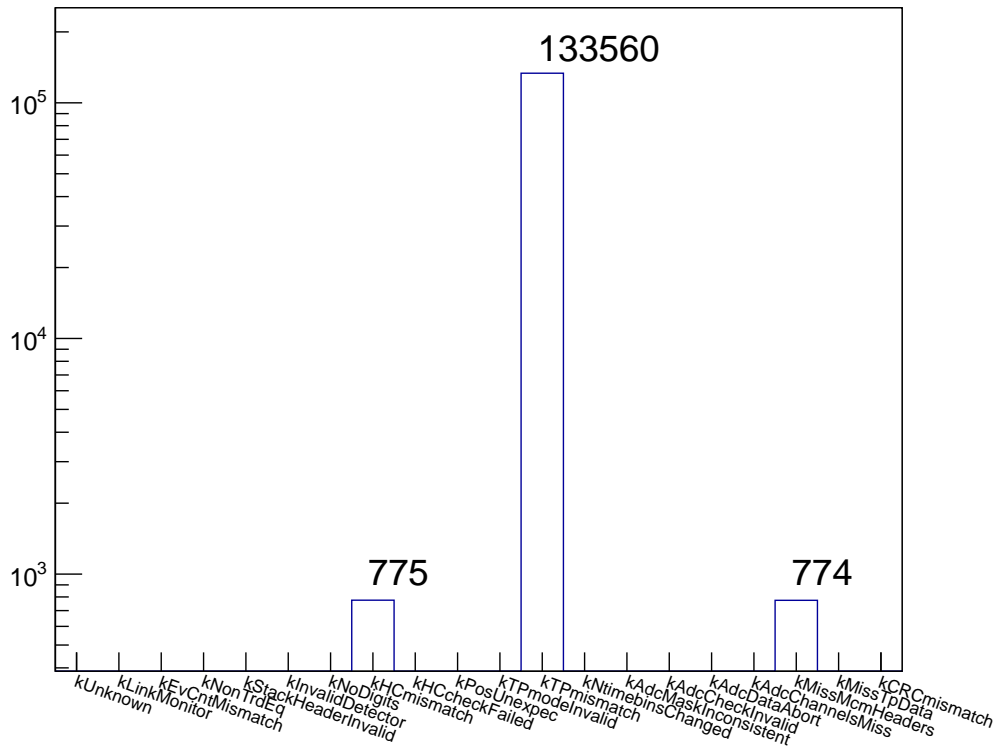


Abbildung 29: Die im Run 1520 des Supermoduls XI aufgetretenen Fehler.

Software oder neuer Funktionalitäten im Laufe der Zeit hinzugefügt wurden. Aus diesem Grund sind die Daten einzelner Runs nicht immer miteinander vergleichbar, was die Suche nach einer Fehlerursache anhand von Gemeinsamkeiten erschwert.

8. Analyse der Fehler

	II(rebuild)	VI	VII	VIII	XI	XII	XIII
kUnknown							
kLinkMonitor	X	X	X	X	X		
kEvCntMismatch	X	X	X	X	X	X	X
kNonTrdEq							
kStackHeaderInvalid							
kInvalidDetector							
kNoDigits							
kHCmismatch		X	X	X	X	X	X
kHCcheckFailed		X	X				
kPosUnexpec	X	X	X	X	X	X	X
kTPmodeInvalid							
kTPmismatch	X	X	X				
kNtimebinsChanged							
kAdcMaskInconsistent		X	X			X	X
kAdcCheckInvalid	X	X	X	X	X	X	X
kAdcDataAbort			X				
kAdcChannelsMiss			X				
kMissMcmHeaders		X	X		X		
kMissTpData							
kCRCmismatch							

Tabelle 19: Übersicht über die aufgetretenen Fehler pro Supermodul. Ein „X“ bedeutet, dass der Fehler in dem entsprechenden Supermodul aufgetreten ist.

8.2. Finde den Fehler!

Um die Ursache eines Fehlers zu finden und feststellen zu können, ob es sich um einen behebbaren Hardware-Fehler handelt, muss zunächst herausgefunden werden, an welcher Stelle im Supermodul der Fehler produziert wurde.

Die von *AliTRDrawStream* im sogenannten *Errortree* gespeicherten Daten und die Debug-Informationen, die optional ausgegeben werden können, helfen bei der Fehlersuche. Je nachdem, auf welcher Ebene der Fehler auftritt, wird die Position des Fehlers unterschiedlich genau im Errortree abgespeichert. So kann ein Stack-Error bis auf Stapel-Ebene genau verfolgt werden, ein MCM-Error jedoch bis auf MCM-, teilweise sogar bis auf ADC-Ebene.

Mit Hilfe des Makros *PositionPlots.C* kann graphisch ausgegeben werden, wie häufig ein Fehler an welcher Position aufgetreten ist. Sieht man sich die Fehler aus Run 1520 des Supermoduls XI in Abbildung 29 an und vergleicht sie bei Bedarf mit Kapitel 7, so sieht man, dass alle auftretenden Fehler mindestens bis auf Halbkammer-Ebene genau bestimmbar sind. Mit Hilfe des Makros kann nun dargestellt werden, welcher Fehler wie häufig in einer Halbkammer aufgetreten ist. Dies ist in Abbildung 30 verdeutlicht. Dabei sind in dem Histogramm auf der x-Achse alle Halbkammern der fünf Stapel hintereinander angeordnet, beginnend mit den Halbkammern des Stapels 0.

Betrachtet man nun beispielsweise Fehler 7 (*kHCmismatch*) in Abbildung 30, so fällt auf, dass dieser Fehler nur in einer Halbkammer auftritt. Da Fehler 7 ein Link-Error ist, ist die Position der Fehlerursache nicht genauer als bis auf Halbkammer-Ebene bestimmbar. Am Beispiel des Fehlers *kHCmismatch* aus Run 1520 soll nun die weitere Vorgehensweise bestimmt werden.

Das Makro, das auch den Errortree erstellt hat, ist in der Lage, Debug-Informationen auszugeben, anhand derer man weitere Informationen gewinnt, wie zum Beispiel die Nummer des Ereignisses oder das Datenwort, in dem der *AliTRDrawStream* den Fehler entdeckt hat. In diesem Fall ist das Datenwort das h[1]-Datenwort aus einem der HC-Header. Aus den Debug-Informationen geht hervor, dass der Fehler in nahezu jedem Ereignis auftritt. Vergleicht man jetzt in Tabelle 24 die Anzahl der Ereignisse und die Häufigkeit, mit der der Fehler aufgetreten ist, so sieht man, dass der Fehler nur in zwei Ereignissen nicht auftritt. Diese Ereignisse sind vermutlich *StartOfRun*- und *EndOfRun*-Ereignisse. In diesen stehen keine für die Analyse relevanten Daten. Es wird also auch nicht erwartet, dass in ihnen ein Fehler auftritt.

Mit einem zweiten Makro (*dumpraw.C*) kann man sich nun die einzelnen Datenworte für ein Ereignis in der Reihenfolge, in der sie im Datenstrom auftauchen, ausgeben lassen. Zunächst wird der, in den Debug-Informationen enthaltene, HC-Header aus dem Datenstrom herausgesucht und mit den anderen HC-Headern vor und nach dem Auftreten des Fehlers verglichen. Dazu werden die einzelnen h[1]-Datenworte der Header, wie in Kapitel 6.8 beschrieben, Bit für Bit untersucht.

Dabei fällt auf, dass die einzelnen Halbkammern immer in einer bestimmten Reihenfolge eingelesen werden. Die Reihenfolge beginnt bei Stapel 0, Lage 0, Seite A, darauf folgt die entsprechende Seite B, anschließend Stapel 0, Lage 1, Seite A etc.

8. Analyse der Fehler

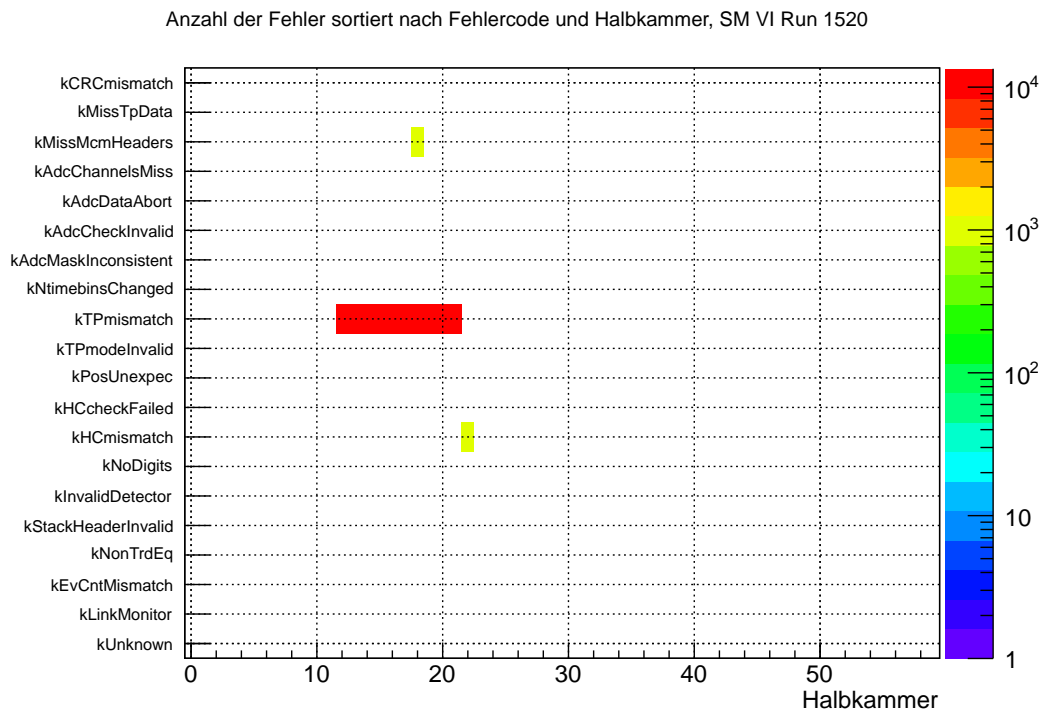


Abbildung 30: Häufigkeit der Fehler, sortiert nach Fehlernummer und Halbkammer für SM VI, Run 1520. Auf der x-Achse sind alle Halbkammern der fünf Stapel hintereinander angeordnet, beginnend mit den Halbkammern des Stapels 0.

Wenn man zu dem Datenwort gelangt, in dem der Fehler auftritt, wird deutlich, dass an dieser Stelle die Seiten A und B des Stapels 1, Lage 5 im Datenstrom vertauscht sind. Da die Reihenfolge, in der Halbkammern eingelesen werden sollen, fest vorgeschrieben ist, wurde somit der Fehler identifiziert.

Über die Ursache des Fehlers geben die Daten keinen Aufschluss mehr. An dieser Stelle können nur noch Vermutungen angestellt werden, wodurch der Fehler hervorgerufen wurde.

Eine mögliche Ursache ist das Vertauschen von Kabelsteckplätzen beim Zusammenbau des Supermoduls in Münster. Die Verbindung von den Halbkammern zu außerhalb des Supermoduls liegenden GTU erfolgt über Glasfaserkabel. Diese Kabel werden beim Zusammenbau per Hand sowohl an den Halbkammern als auch an der Innen- und Außenseite eines Patchpanels des Supermoduls eingesteckt. Falls bei diesem Vorgang ein Fehler gemacht wurde und die Steckplätze oder Kabel der beiden betroffenen Halbkammern vertauscht wurden, würden die Halbkammern nicht in der erwarteten Reihenfolge ausgelesen. Der Fehler 7 könnte hierdurch verursacht worden sein.

Bei der Betrachtung von Tabelle 23 fällt auf, dass bei früheren Runs mit diesem Supermodul der Fehler 7 nicht auftaucht, was der Theorie der vertauschten Kabel

widersprechen würde. Aus diesem Grund wurden die Log-Dateien des Runs zur Recherche hinzugezogen. Solche Dateien werden automatisch bei jedem Start und Ende eines Runs angelegt und enthalten Informationen über die Konfiguration des Runs sowie den Ereignis-Zähler und Informationen darüber, ob das komplette Supermodul für den Run benutzt wurde, oder nur einzelne Auslesemodule. Aus den Log-Dateien wird klar, dass für die früheren Runs, in denen der Fehler 7 nicht aufgetreten ist, nicht das komplette Supermodul, sondern nur einzelne Stapel genutzt wurden. Das Auslesem modul, in dem der Fehler aufgetreten ist wurde dabei nicht genutzt. Der Fehler 7 kann also in so einem Run nicht aufgetreten sein. Die Vertauschung von Kabeln bleibt als Theorie also weiter bestehen.

Da das Supermodul VI bereits in ALICE eingebaut wurde, ist die Überprüfung dieser Theorie nicht ohne weiteres möglich. Beim Zusammenbau zukünftiger Supermodule kann die oben beschriebene Methode aber angewandt werden, um solche Fehlerquellen während des Zusammenbaus zu erkennen und, wenn möglich, zu beheben.

8.3. Weitere Fehler

Wie in Tabelle 19 zu sehen ist gibt es noch mehrere Fehler, die während der Testruns in Münster aufgetreten sind. Da es noch weitaus mehr Daten aus anderen Testruns gibt, besteht natürlich auch noch die Möglichkeit, dass Fehler aufgetreten sind, die bisher noch nicht entdeckt wurden. In diesem Abschnitt sollen einige weitere Fehler analysiert und erläutert werden.

Fehler 1 – *kLinkMonitor*

In Abbildung 31 ist die Häufigkeit der in Run 2319 des Supermoduls VIII aufgetretenen Fehler, sortiert nach Fehlercode und Halbkammer aufgetragen. Man erkennt, dass der Fehler 1 (*kLinkMonitor*) in allen 20 Halbkammern, die zum Zeitpunkt des Runs eingebaut waren (vgl. Tabelle 21), auftritt. Da dieser Fehler ein Link-Error ist kann die Position, an der der Fehler auftritt nicht genauer bestimmt werden. Aus den Log-Dateien des Runs wird klar, dass die Konfigurationen des Triggersystems¹, der GTU und des Supermoduls nicht zusammen passen. Die GTU benötigt, um ein Ereignis zu registrieren, keinen Level-1-Trigger. Zum Senden der Daten erwartet das Supermodul allerdings ebendiesen Level-1-Trigger. Das Triggersystem wurde scheinbar so konfiguriert, dass kein Level-1-Trigger gesendet wurde. Die nötigen Trigger für die GTU wurden gesendet, es wurden also Daten eines Ereignisses erwartet. Der für das Senden der Daten benötigte Level-1-Trigger für das Supermodul fehlte aber, weshalb für keines der von der GTU registrierten Ereignisse Daten der Halbkammern gesendet wurden. Dies erklärt auch, warum die Anzahl der Fehler das Produkt aus der Anzahl der Ereignisse (abzüglich *StartOfRun*- und *EndOfRun*-Ereignisse) und der Anzahl der eingebauten Halbkammern ist (vgl. Tabelle 28). Die Fehlerursache

¹Nähere Informationen zum Triggersystem finden sich in [Ani11].

8. Analyse der Fehler

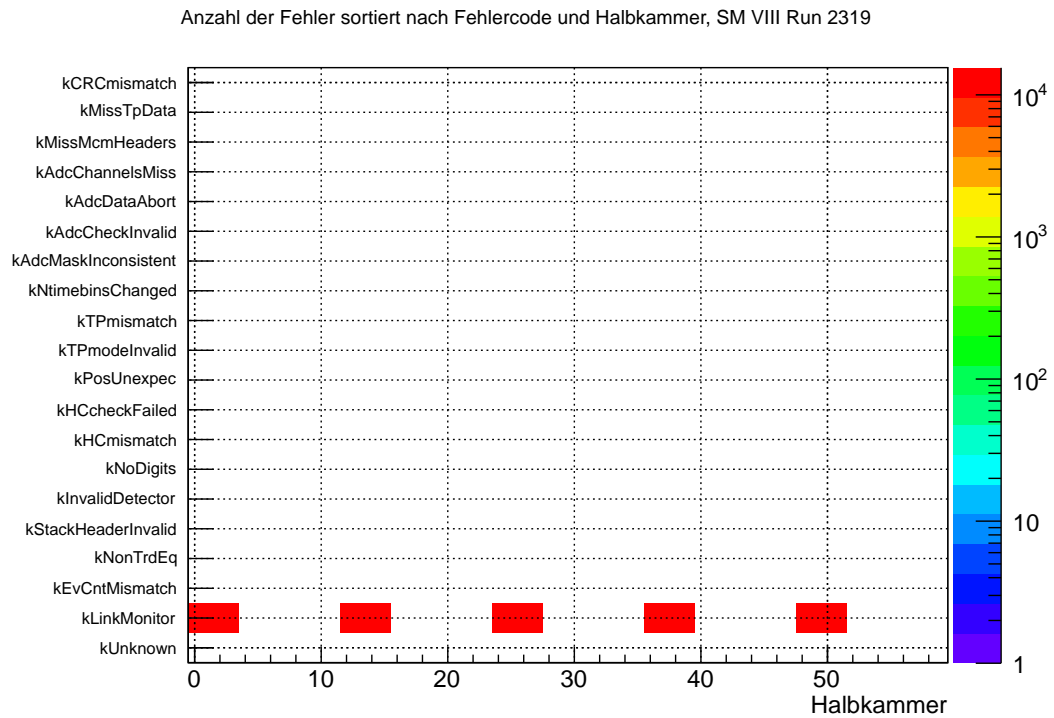


Abbildung 31: Häufigkeit der Fehlers in Run 2112 des Supermoduls VIII, sortiert nach Fehlercode und Halbkammer.

ist hier also eine falsche Konfiguration, die wiederum auf einen Bedienungsfehler zurückzuführen ist.

Fehler 7 – kHCmismatch

Fehler 7 wurde im vorherigen Abschnitt bereits besprochen, er ist hier nur der Vollständigkeit halber noch einmal aufgelistet.

Fehler 11 – kTPmismatch

Für diesen Fehler wurden mehrere Runs untersucht, in deren Daten der Fehler aufgetreten ist. Dabei ist aufgefallen, dass es sich hierbei ausschließlich um Runs handelt, zu deren Beginn der Ereignis-Zähler auf 0 gesetzt war. Ist der Ereignis-Zähler zu Beginn eines Runs auf 0 gesetzt, so wird als erstes Event ein Konfigurations-Ereignis erwartet. Das Konfigurations-Ereignis enthält die gesamte Konfiguration des Detektors, so dass anhand der Daten dieses Ereignisses überprüft werden kann, wie der Detektor konfiguriert war. In der *Raw Version Major Number* des HC-Headers ist das Konfigurations-Event mit dem Wert „111“ in den drei niedrigstwertigen Bits gekennzeichnet, was dem TP-Modus 7 entspricht.

Außerdem wurde bei der Analyse der Debug-Informationen deutlich, dass der Fehler ausschließlich in dem Ereignis mit der Nummer 1 auftritt, also dem ersten Ereignis nach dem *StartOfRun*-Ereignis. Die Untersuchung der im Errortree gespeicherten Daten bestätigten dies. Zur Anschauung dient hier Abbildung 32, die die Ereignis-Nummern, in denen der Fehler 11 aufgetreten ist, zeigt. Die Daten hierfür stammen aus dem Run 2112 des Supermoduls VII.

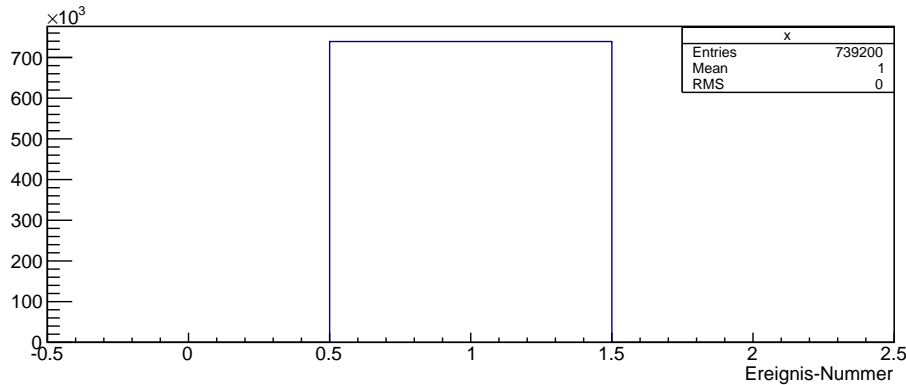


Abbildung 32: Häufigkeit des Fehlers 11, sortiert nach Ereignis-Nummer. Die Daten stammen aus dem Run 2112 des Supermoduls VII.

Die Debug-Informationen geben außerdem das aktuell gelesene HC-Header-Wort aus. Aus den HC-Header-Worten `h[1]` der jeweiligen Halbkammern kann man ablesen, dass die hier empfangenen Daten Testmuster-Daten des Testmodus 3 sind. Der Fehler ist also gefunden.

Um eine mögliche Fehlerquelle zu finden betrachtet man die Zeiten, zu denen Runs, die den Fehler 11 aufweisen, gestartet wurden. Es fällt auf, dass viele dieser Runs in sehr kurzer Zeit gelaufen sind. Eine mögliche Ursache für den Fehler 11 ist hier eine falsche Konfiguration des TRD, die durch unsachgemäße Bedienung bedingt war.

Fehler 13 – `kAdcMaskInconsistent`

Zur Bestimmung einer Fehlerursache wurden mehrere Runs des Supermoduls XIII untersucht. Dabei fiel auf, dass für alle untersuchten Runs der Fehler in der selben Halbkammer auftritt. Als Beispiel ist dies in Abbildung 33 verdeutlicht. Die Daten hierfür stammen aus dem Run 2919 des Supermoduls XIII.

Da der Fehler 13 zu den MCM-Fehlern gehört wurde versucht, eine tiefere Ebene der Fehlerposition zu bestimmen. Zunächst wurden dazu für alle Fehler die ROB-Nummer gegen die Link-Nummer aufgetragen (vgl. Abbildung 34). Hierin sind sowohl Fehler 13, als auch Fehler 14 (`kAdcCheckInvalid`) enthalten, da sich gezeigt hat, dass alle Fehler aus dem selben ROB stammen.

Anschließend wurde versucht, einen bestimmten MCM auszumachen, in dem der Fehler auftritt. Hier konnte jedoch kein Muster festgestellt werden, was eine genauere

8. Analyse der Fehler

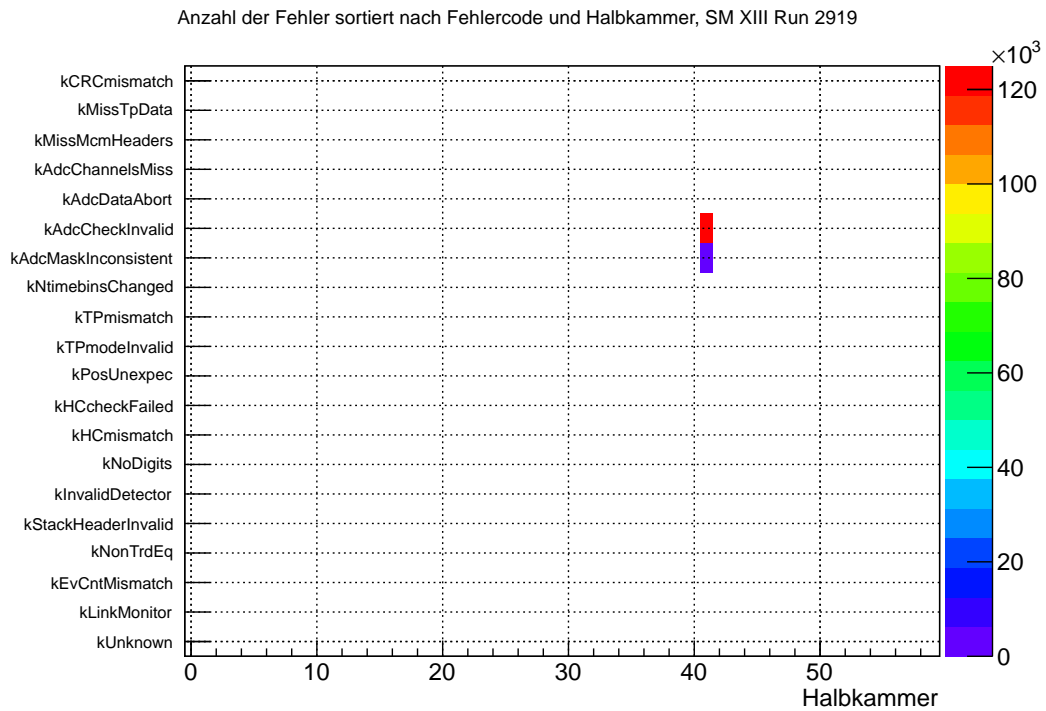


Abbildung 33: Häufigkeit der Fehler, sortiert nach Fehlercode und Halbkammer für Supermodul XIII, Run 2919, zur Lokalisierung des Fehlers 13.

Lokalisierung des Fehlers ausschließt. Verdeutlicht ist dies in den Abbildungen 35, die die Verteilung des Fehlers 13 in den MCMs der Halbkammer fünf, Stapel drei zeigt. Die Daten hierfür stammen aus dem Run 2919.

Der Fehler taucht, wie der Fehlercode bereits andeutet, in der AdcMask auf. In den durch die Debug-Informationen ausgegebenen AdcMasks ist der Zähler, der angibt, wie viele ADC-Kanäle Daten senden sollen, immer um eins höher als die Anzahl der in der Maske gesetzten Bits. Der Zähler selber wird im Assembler-Code des MCMs berechnet. Die Berechnung kann daher nicht auf mögliche Fehler untersucht werden. Die Suche nach der Fehlerquelle kann also keine genaueren Ergebnisse liefern. Da alle Fehler aus einem ROB stammen wäre eine fehlerhafte Übertragung der Daten von dem ROB aus eine mögliche Erklärung. Dies kann beispielsweise durch eine defekte Verbindungsbrücke oder durch einen Bitflip verursacht werden. In einem solchen Fall kann, falls nötig, das fehlerhafte ROB ausgetauscht werden.

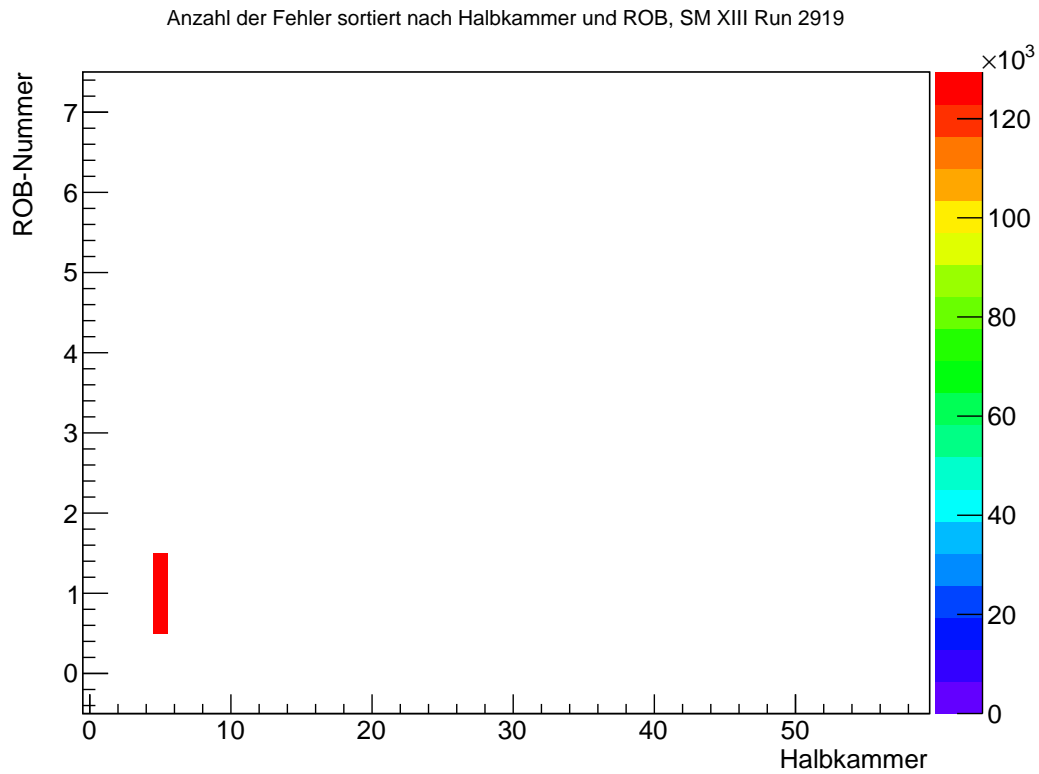


Abbildung 34: Häufigkeit der Fehler, sortiert nach ROB und Halbkammer für Supermodul XIII, Run 2919, zur Lokalisierung der Fehler 13 und 14.

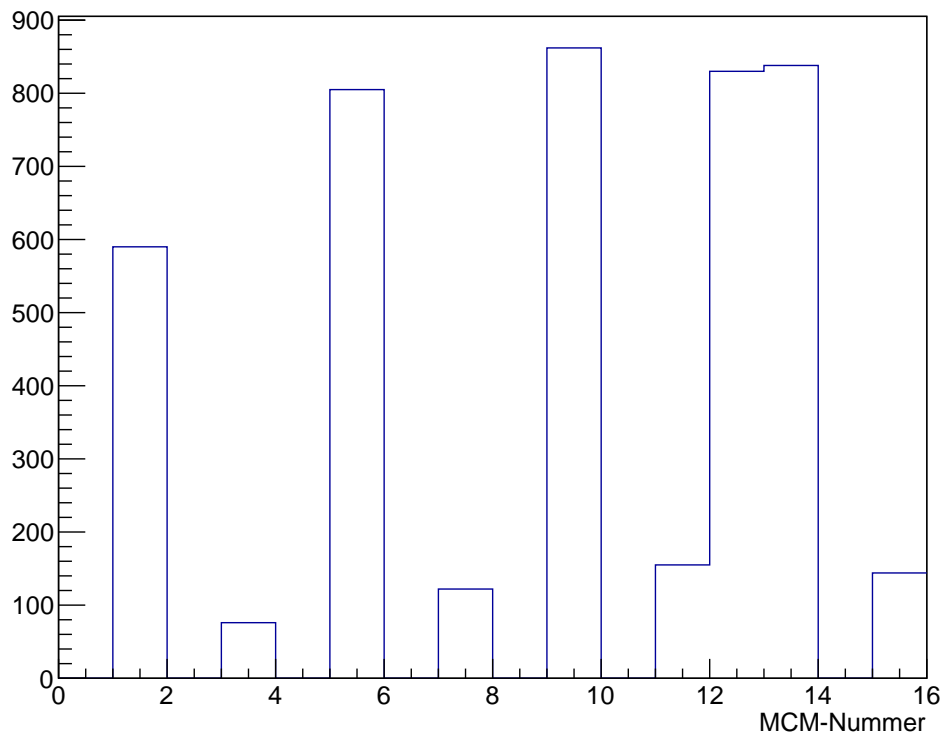


Abbildung 35: Verteilung des Fehlers 13 in den MCMs der Halbkammer fünf, Stapel drei. Die Daten stammen aus Run 2919 des Supermoduls XIII

Fehler 14 – `kAdcCheckInvalid`

Der Fehler 14 gehört zu den MCM-Fehlern, die bis auf ADC-Ebene genau bestimmt werden können. Zur Analyse wurde auch hier der Run 2919 des Supermoduls XIII genutzt. Wie in Abbildung 33 zu sehen ist, tritt auch dieser Fehler in diesem Run nur in einer Halbkammer und nach Abbildung 34 auch nur in dem selben ROB wie Fehler 13 auf. Genau wie beim Fehler 13 kann die Position des Fehlers aber nicht genauer bestimmt werden, da sich auch hier aus der Verteilung des Fehlers weder in den MCMs, noch in den ADCs ein Muster erkennen lässt (vgl. Abbildungen 36). Da aber sowohl Fehler 13 als auch Fehler 14 im selben ROB auftreten kann davon ausgegangen werden, dass es sich um einen Fehler in der Übertragung des ROB, beispielsweise in der Verbindung vom Board-Merger zum Halbkammer-Merger handelt.

Verbleibende Fehler

Da die Analyse eines einzelnen Fehlers zuweilen sehr zeitaufwendig ist konnten im Rahmen dieser Diplomarbeit leider nicht alle Fehler analysiert und die Fehlerursachen gefunden werden.

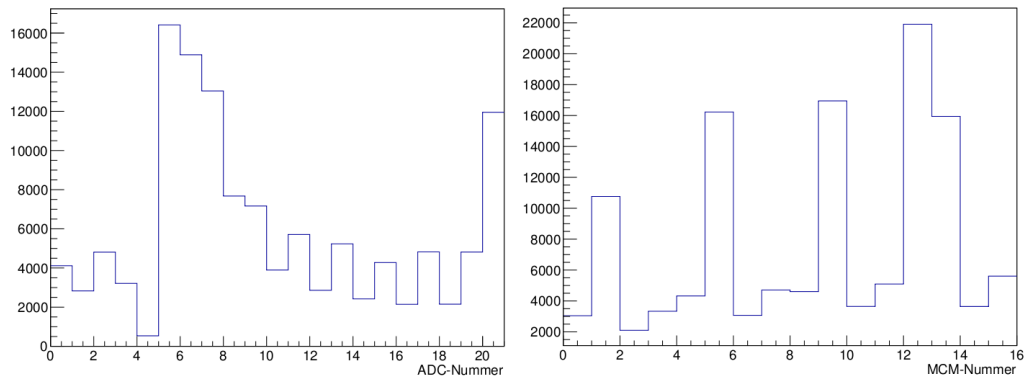


Abbildung 36: Verteilung des Fehlers 14 in den MCMs (link) und ADCs (rechts) des Stapels drei, Halbkammer fünf, in Supermodul XIII. Die Daten stammen aus Run 2919.

Die in den bisher untersuchten Runs entdeckten Fehler 2 (*kEvCntMismatch*), 8 (*kHCcheckFailed*), 9 (*kPosUnexpec*), 15 (*kAdcDataAbort*), 16 (*kAdcChannelsMiss*) und 17 (*kMissMcmHeaders*) konnten während der Bearbeitungsphase der Diplomarbeit leider nicht ausreichend analysiert werden. Die Analyse dieser Fehler sollte aber in naher Zukunft durchgeführt werden um Informationen über mögliche Fehlerquellen zu erlangen.

8. *Analyse der Fehler*

9. Zusammenfassung und Ausblick

ALICE ist eines der vier großen Experimente am LHC mit dem Ziel, das Quark-Gluon-Plasma zu untersuchen, dass bei Blei-Blei-Kollisionen entsteht. Der TRD, ein Subdetektor des ALICE-Experiments, ist ein gasgefüllter Übergangsstrahlungsdetektor, der der Separation von hochenergetischen Elektronen und Pionen dient, die Spurrekonstruktion der Teilchen vervollständigt und zusätzlich als schneller Trigger fungiert, um die Aufzeichnung physikalisch relevanter Ereignisse zu starten. Der TRD besteht aus 540 einzelnen Modulen, in denen geladene Teilchen mit Hilfe von Kathodenpads detektiert werden. Diese Pads werden in Gruppen zu je 18 Pads von, in Multi-Chip-Modulen (MCM) verbauten, Analog-Digital-Wandlern (ADC) ausgelesen. An den Rändern solcher Gruppen kann es zu unerwünschten Nebeneffekten kommen, die die Trigger-Funktionalität des TRD beeinträchtigen können. Aus diesem Grund werden Pads an den Rändern der MCMs von jeweils zwei ADCs ausgelesen. Die Verstärkung der Pad-Signale sollte für die Online-Datenanalyse in allen ADCs möglichst gleich sein. Für ADCs, die einfach ausgelesene Pads auslesen, wurden bereits Methoden zur Kalibrierung entwickelt, die relative Verstärkung zweier ADCs, die das gleiche Pad auslesen, wurde bislang allerdings nicht berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine Methode entwickelt, die relative Verstärkung zweier ADCs, die ein gemeinsames Kathodenpad auslesen, zu bestimmen. Dazu wurde zunächst gezeigt, dass jeder ADC eine Grundlinie besitzt, die vor der Bestimmung der relativen Verstärkung aus den Messwerten heraus gerechnet werden muss. Da die meisten Pads während eines Ereignisses nicht getroffen werden und nur die Grundlinie mitsenden, ergibt diese sich für die Beispieldaten des Supermoduls XIII aus dem Mittelwert aller aufsummierten ADC-Werte zu 293,6. Nachdem die Grundlinie berechnet wurde, konnte sie von den aufsummierten Werten der ADCs und der Schatten-ADCs abgezogen werden und die Verstärkung der Schatten-ADCs relativ zu der der ADCs bestimmt werden. Anhand eines Histogramms wurde beispielhaft deutlich gemacht, dass die Abweichung der beiden ADCs überwiegend im Bereich von 10% liegt. Als Mittelwert aller Schatten-ADC-Paare ergab sich eine durchschnittliche relative Verstärkung von 1,002 mit einer Standardabweichung von 0,066. Eine Abweichung der ADC-Werte voneinander von 5% bedingt eine Steigerung der Elektroneneffizienz von 3,24 – 3,36%. Aus diesem Grund wird angeraten, die Abweichungen der Verstärkungen von ADC und Schatten-ADC eines doppelt ausgelesenen Pads bei zukünftigen Messungen am CERN zu berücksichtigen.

Da Supermodule nach ihrem Einbau am CERN nicht jederzeit repariert oder gar ganze Kammern ausgetauscht werden können, ist es wünschenswert, Hardware bedingte Fehler möglichst vor dem Transport nach Genf zu beheben. Zu diesem Zweck wurde im zweiten Teil dieser Diplomarbeit eine Methode vorgestellt, um Hardwarefehler beim Zusammenbau eines TRD-Supermoduls an der WWU Münster frühzeitig zu erkennen und, wenn möglich, die Fehlerquellen zu beseitigen. Zunächst wurden dazu die Daten des TRD beschrieben und an einem Beispiel erklärt, wie die einzelnen Datenworte zu analysieren sind. Anschließend wurden verschiedene mögliche Fehler erläutert, die mit Hilfe der AliROOT-Klasse *AliTRDrawStream* aus

9. Zusammenfassung und Ausblick

den Daten des TRD herausgesucht werden können. Die Methode zum Auffinden der Fehlerquellen beinhaltet zwei Makros. Mit einem der Makros kann die – je nach Fehler-Ebene – genaue Position des Fehlers herausgefunden und graphisch dargestellt werden. Zusätzlich können mit diesem Makro Informationen aus den Debug-Nachrichten gezogen werden, die ebenfalls vom *AliTRDrawStream* zur Verfügung gestellt werden. Mit dem zweiten Makro können die Datenworte des Datenstroms ausgelesen werden, was die bitweise Analyse der Daten ermöglicht. Mit Hilfe dieser beiden Makros wurde am Beispiel des Fehlers 7 (*kHCmismatch*) in den Daten des Runs 1520 des Supermoduls VI veranschaulicht, wie die Daten auf Fehler hin zu analysieren sind. Dabei wurde deutlich, dass eine definitive Fehlerursache bei bereits am CERN eingebauten Supermodulen nachträglich nicht immer bestimmt werden kann. Es konnten aber Vermutungen angestellt werden, die beim Zusammenbau zukünftiger Supermodule berücksichtigt werden sollten, sollte der Fehler nochmals auftreten.

Außerdem wurden mehrere andere Fehler untersucht, wie zum Beispiel der Fehler 11 (*kTPmismatch*), der vermutlich auf falsche Konfiguration des Supermoduls zurückzuführen ist, oder der Fehler 13 (*kAdcMaskInconsistent*), bei dem die Grenzen der Fehleranalyse, mangels Zugriff auf den Assembler-Code des MCMs, deutlich wurden. Auch wenn die Fehleranalyse bei der Untersuchung bisheriger Runs keine exakten Fehlerursachen hervorbringen konnte sollte sie dennoch in Zukunft verwendet werden, um Supermodule frühzeitig auf Hardwarefehler zu überprüfen.

A. Anhang

Supermodul	Run-Nr.	Datei	Datum	eingebaute Module
II(rebuild)	1743	000	05.02.2009	15
II(rebuild)	1751	000	10.02.2009	15
II(rebuild)	1754	000	11.02.2009	20
II(rebuild)	1759	000	13.02.2009	25
II(rebuild)	1770	000	18.02.2009	30
VI	1400	1A	05.12.2008	25
VI	1420	1A	17.12.2008	30
VI	1425	1A	18.12.2008	30
VI	1426	1A	18.12.2008	30
VI	1469	1A	18.12.2008	30
VI	1520	1A	19.12.2008	30
VI	1597	1A	19.12.2008	30
VI	1606	1A	22.12.2008	30
VI	1610	1A	22.12.2008	30
VII	2030	1A	08.06.2009	5
VII	2066	1A	12.06.2009	10
VII	2079	1A	19.06.2009	20
VII	2111	1A	30.06.2009	30
VII	2112	1A	30.06.2009	30
VII	2117	1A	02.07.2009	30
VII	2149	1A	07.07.2009	30
VII	2218	1A	16.07.2009	30
VII	2223	1A	17.07.2009	30

Tabelle 20: Die untersuchten Dateien der Supermodule 06 und 07. Die Anzahl der eingebauten Module bezieht sich auf den Zeitpunkt, an dem der Run gestartet wurde.

Supermodul	Run-Nr.	Datei	Datum	eingebaute Module
VIII	2303	0.1	19.11.2009	5
VIII	2304	0.1	23.11.2009	5
VIII	2306	0.1	03.12.2009	5
VIII	2307	0.1	03.12.2009	5
VIII	2308	0.1	03.12.2009	5
VIII	2318	0.1	10.12.2009	10
VIII	2319	0.1	10.12.2009	10
VIII	2327	0.1	15.12.2009	10
XI	2709	0.1	28.10.2010	15
XI	2712	0.1	04.11.2010	20
XI	2720	0.1	22.11.2010	30
XI	2723	0.1	23.11.2010	30
XI	2730	0.1	24.11.2010	30
XI	2736	0.1	24.11.2010	30
XII	2749	0.1	22.02.2011	10
XII	2766	0.1	21.06.2011	30
XII	2767	0.1	21.06.2011	30
XII	2768	0.1	21.06.2011	30
XII	2769	0.1	21.06.2011	30
XII	2770	0.1	21.06.2011	30
XII	2771	0.1	29.06.2011	30
XII	2885	0.1	29.07.2011	30
XII	2886	0.1	29.07.2011	30
XII	2887	0.1	01.08.2011	30
XII	2894	0.1	08.08.2011	30
XIII	2909	0.1	10.11.2011	30
XIII	2917	0.1	11.11.2011	30
XIII	2918	0.1	14.11.2011	30
XIII	2919	0.1	15.11.2011	30

Tabelle 21: Die untersuchten Dateien der Supermodule 08, 11, 12 und 13. Die Anzahl der eingebauten Module bezieht sich auf den Zeitpunkt, an dem der Run gestartet wurde.

	1743	1751	1754	1759	1770
# Events	490	328	975	246	196
# Module	15	15	20	25	30
0 – kUnknown					
1 – kLinkMonitor	20	30			388
2 – kEvCntMismatch		1 824		6 084	
3 – kNonTrdEq					
4 – kStackHeaderInvalid					
5 – kInvalidDetector					
6 – kNoDigits					
7 – kHCmismatch					
8 – kHCcheckFailed					
9 – kPosUnexpec		3 528		936	
10 – kTPmodeInvalid					
11 – kTPmismatch	255 360	384 758	127 680	510 720	611 520
12 – kNtimebinsChanged					
13 – kAdcMaskInconsistent					
14 – kAdcCheckInvalid				44 445	
15 – kAdcDataAbort					
16 – kAdcChannelsMiss					
17 – kMissMcmHeaders					
18 – kMissTpData					
19 – kCRCmismatch					

Tabelle 22: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul II(rebuild)

	1400	1420	1425	1426	1469
# Events	4 605	26 980	11 360	35 365	
# Module	25	30	30	30	30
0 – kUnknown					
1 – kLinkMonitor					
2 – kEvCntMismatch		1	274 294	25 873	2
3 – kNonTrdEq					
4 – kStackHeaderInvalid					
5 – kInvalidDetector					
6 – kNoDigits					
7 – kHCmismatch				35 364	61 121
8 – kHCcheckFailed					
9 – kPosUnexpec			45 871	28 938	
10 – kTPmodeInvalid					
11 – kTPmismatch	26 880	1 823	2 910	2 971	1 470
12 – kNtimebinsChanged					
13 – kAdcMaskInconsistent			416	2 383	
14 – kAdcCheckInvalid			13 081	2 383	
15 – kAdcDataAbort					
16 – kAdcChannelsMiss					
17 – kMissMcmHeaders				35 363	61 120
18kMissTpData					
19 – kCRCmismatch					

Tabelle 23: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul VI, erster Teil

	1520	1597	1606	1610
# Events	777	777	10 043	172
# Module	30	30	30	30
0 – kUnknown				
1 – kLinkMonitor				437
2 – kEvCntMismatch			247 954	
3 – kNonTrdEq				
4 – kStackHeaderInvalid				
5 – kInvalidDetector				
6 – kNoDigits				
7 – kHCmismatch	775	775	10 041	171
8 – kHCcheckFailed				1
9 – kPosUnexpec			4 9711	810
10 – kTPmodeInvalid				
11 – kTPmismatch	133 560	133 560	11 357	739 200
12 – kNtimebinsChanged				
13 – kAdcMaskInconsistent			188	
14 – kAdcCheckInvalid			4 167	154 290
15 – kAdcDataAbort				
16 – kAdcChannelsMiss				
17 – kMissMcmHeaders	774	774	10 040	
18 – kMissTpData				
19 – kCRCmismatch				

Tabelle 24: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul VI, zweiter Teil

	2030	2066	2709	2111	2112
#Events	8 283	374	3 206	154 811	165 737
# Module	5	10	20	30	
0 – kUnknown					
1 – kLinkMonitor	60	7 400			
2 – kEvCntMismatch				311	624
3 – kNonTrdEq					
4 – kStackHeaderInvalid					
5 – kInvalidDetector					
6 – kNoDigits					
7 – kHCmismatch					
8 – kHCcheckFailed					
9 – kPosUnexpec				330	622
10 – kTPmodeInvalid					
11 – kTPmismatch			383 040		739 200
12 – kNtimebinsChanged					
13 – kAdcMaskInconsistent				1 039	2 276
14 – kAdcCheckInvalid				3 082	4 024
15 – kAdcDataAbort				4	9
16 – kAdcChannelsMiss				17	33
17 – kMissMcmHeaders				4	9
18 – kMissTpData					
19 – kCRCmismatch					

Tabelle 25: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul VII, erster Teil

	2112	2117	2149	2218	2223
# Events	165 737	143	169 429	10 543	164 836
# Module	30	30	30	30	30
0 – kUnknown					
1 – kLinkMonitor				1	115 887
2 – kEvCntMismatch	624	863	2 081		
3 – kNonTrdEq					
4 – kStackHeaderInvalid					
5 – kInvalidDetector					
6 – kNoDigits					
7 – kHCmismatch					1
8 – kHCcheckFailed					1
9 – kPosUnexpec	622	1 856	131		
10 – kTPmodeInvalid					
11 – kTPmismatch	739 200				
12 – kNtimebinsChanged					
13 – kAdcMaskInconsistent	2 276				
14 – kAdcCheckInvalid	4024	98 970			
15 – kAdcDataAbort	9	174			
16 – kAdcChannelsMiss	33	178			
17 – kMissMcmHeaders	9	183			
18 – kMissTpData					
19 – kCRCmismatch					

Tabelle 26: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul VII, zweiter Teil

	2303	2304	2306	2307
#Events	424	531	4 192	6 584
# Module	5	5	5	5
0 – kUnknown				
1 – kLinkMonitor			41 860	65 780
2 – kEvCntMismatch				
3 – kNonTrdEq				
4 – kStackHeaderInvalid				
5 – kInvalidDetector				
6 – kNoDigits				
7 – kHCmismatch	2 100	2 640		
8 – kHCcheckFailed				
9 – kPosUnexpec				
10 – kTPmodeInvalid				
11 – kTPmismatch				
12 – kNtimebinsChanged				
13 – kAdcMaskInconsistent				
14 – kAdcCheckInvalid				
15 – kAdcDataAbort				
16 – kAdcChannelsMiss				
17 – kMissMcmHeaders				
18 – kMissTpData				
19 – kCRCmismatch				

Tabelle 27: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul VIII, erster Teil

	2308	2318	2319	2327
#Events	396	9 192	15 504	3 813
# Module	5	10	10	10
0 – kUnknown				
1 – kLinkMonitor	10	20	310 000	7 6140
2 – kEvCntMismatch	9 984			
3 – kNonTrdEq				
4 – kStackHeaderInvalid				
5 – kInvalidDetector				
6 – kNoDigits				
7 – kHCmismatch				
8 – kHCcheckFailed	1 536			
9 – kPosUnexpec				
10 – kTPmodeInvalid				
11 – kTPmismatch				
12 – kNtimebinsChanged				
13 – kAdcMaskInconsistent				
14 – kAdcCheckInvalid	338 295			
15 – kAdcDataAbort				
16 – kAdcChannelsMiss				
17 – kMissMcmHeaders				
18 – kMissTpData				
19 – kCRCmismatch				

Tabelle 28: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul VIII, zweiter Teil

	2709	2712	2720	2723	2730	2736
# Events	324	272	140	163 471	118 670	233 123
# Module	15	20	30	30	30	30
0 – kUnknown						
1 – kLinkMonitor	48	96				
2 – kEvCntMismatch						
3 – kNonTrdEq						
4 – kStackHeaderInvalid						
5 – kInvalidDetector						
6 – kNoDigits						
7 – kHCmismatch	318	265	136	163 469	118 669	23 3122
8 – kHCcheckFailed						
9 – kPosUnexpec						
10 – kTPmodeInvalid						
11 – kTPmismatch						
12 – kNtimebinsChanged						
13 – kAdcMaskInconsistent						
14 – kAdcCheckInvalid						
15 – kAdcDataAbort						
16 – kAdcChannelsMiss						
17 – kMissMcmHeaders	317	264	135			
18 – kMissTpData						
19 – kCRCmismatch						

Tabelle 29: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul XI

	2769	2770	2885
# Events	723	765	12 775
# Module	10	30	30
0 – kUnknown			269 925
2 – kLinkMonitor			
3 – kEvCntMismatch			
4 – kNonTrdEq			
5 – kStackHeaderInvalid			
6 – kInvalidDetector			
7 – kNoDigits			
8 – kHCmismatch	722	762	
9 – kHCcheckFailed			
10 – kPosUnexpec			7 156
11 – kTPmodeInvalid			
12 – kTPmismatch			
13 – kNtimebinsChanged			
14 – kAdcMaskInconsistent			6
15 – kAdcCheckInvalid			220 8790
16 – kAdcDataAbort			
17 – kAdcChannelsMiss			
18 – kMissMcmHeaders			
19 – kMissTpData			
kCRCmismatch			

Tabelle 30: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul XII, erster Teil

	2886	2887	2894
# Events	13 215	13 216	13 251
# Module	30	30	30
0 – kUnknown	83 162	82 725	81 398
2 – kLinkMonitor			
3 – kEvCntMismatch			
4 – kNonTrdEq			
5 – kStackHeaderInvalid			
6 – kInvalidDetector			
7 – kNoDigits			
8 – kHCmismatch			
9 – kHCcheckFailed			
10 – kPosUnexpec	305	206	432
11 – kTPmodeInvalid			
12 – kTPmismatch			
13 – kNtimebinsChanged			
14 – kAdcMaskInconsistent	206	18	
15 – kAdcCheckInvalid	274 540	274 540	144 990
16 – kAdcDataAbort			
17 – kAdcChannelsMiss			
18 – kMissMcmHeaders			
19 – kMissTpData			
kCRCmismatch			

Tabelle 31: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul XII, zweiter Teil

	2909	2917	2981	2919
# Events	13 571	233 689	1 58144	338 734
# Module	30	30	30	30
0 – kUnknown				
1 – kLinkMonitor				
2 – kEvCntMismatch	84 496			
3 – kNonTrdEq				
4 – kStackHeaderInvalid				
5 – kInvalidDetector				
6 – kNoDigits				
7 – kHCmismatch				
8 – kHCcheckFailed				
9 – kPosUnexpec	95		16	
10 – kTPmodeInvalid				
11 – kTPmismatch				
12 – kNtimebinsChanged				
13 – kAdcMaskInconsistent	1 086	5 287	2 231	4 422
14 – kAdcCheckInvalid	78 042	88 027	67 025	124 970
15 – kAdcDataAbort				
16 – kAdcChannelsMiss				
17 – kMissMcmHeaders				
18 – kMissTpData				
19 – kCRCmismatch				

Tabelle 32: Die Anzahl, wie oft ein Fehler aufgetreten ist, sortiert nach Run- und Fehler-Nr für Supermodul XIII

Abkürzungsverzeichnis

ADC Analog-Digital-Converter

ALICE A Large Ion Collider Experiment

ATLAS A Toroidal LHC Apparatus

CDH Common Data Header

CERN Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

CMS Compact Muon Solenoid

CRC Prüfsummen, engl.: Cyclic Redundancy Check

CTP Central Trigger Processor

DAQ Data Aquisition

DDL Detector Data Link

DCS-Board Detector Control System-Board

EMCal Electro-Magnetic Calorimeter

GDC Global Data Collector

GTU Global Tracking Unit

HC Halbkammer

HMPID High Momentum Particle Identification Detector

ITS Inner Tracking System

LDC Local Data Concentrator

LEP Large Electron-Positron Collider

LHC Large Hadron Collider

LHCb Large hadron Collider beauty

LSB Lowest Significant Bit

LVDS Low Voltage Differential Signaling

MCM Multi-Chip-Modul

MGRPC Vielschicht-Widerstandsplattenkammer

MSB Most Significant Bit

ORI Optical Readout Interface
PASA Preamplifier/Shaper
PHOS Photon-Spektrometer
QCD Quantenchromodynamik
QED Quantenelektrodynamik
QGP Quark-Gluon-Plasma
RHIC Relativistic Heavy Ion Collider
ROB Readout Board
ROT Readout Tree
RVMN Raw Version Major Number
SH Stack Header
SIU Source Interface Unit
SIW Stack Index Word
SCSN-Bus Slow Control Serial Network-Bus
SMH Supermodule Header
SMIW Supermodule Index Word
SMU Supermodule Unit
STH Stack Tracking Header
STIW Stack Tracking Index Word
SRAM Static RAM
TDC-Word Trailer Data Content Word
TGU Trigger Generation Unit
TIW Trailer Index Word
TMU Track Matching Unit
TOF Time of Flight-Detektor
TPC Time Projection Chamber
TP Tracklet Processor

TPP Tracklet Preprocessor
TRD Transition Radiation Detector
TRAP Tracklet Processor
TrigH Trigger Header
TrigIW Trigger Index Word

Literatur

- [Alb10] B. Albrecht, *Gain Calibration of ALICE TRD Modules Using Cosmic Ray Data*,
Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2010
- [ALI04] ALICE Collaboration, *ALICE: Physics Performance Report, Volume 1*,
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 1517-1764, 2004
- [ALI06] ALICE DAQ Project, *ALICE DAQ and ECS User's Guide*,
CERN, Januar 2006
- [ALI09] A. Andronic, *ALICE TRD - Picture Gallery*,
2009, <http://www-alice.gsi.de/trd/gallery/index.html>, aufgerufen am 27.12.2012
- [And03] A. Andronic, *The ALICE Transition Radiation Detector*,
2003, http://www-alice.gsi.de/trd/transp/trd_alice.pdf, aufgerufen am 04.01.2013
- [Ang05] V. Angelov et al., *ALICE TRAP User Manual*,
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2005
- [Ang07] V. Angelov *PASA and ADC v.s. Pad Column numbering*,
2007, http://wiki.kip.uni-heidelberg.de/ti/TRD/index.php/File:ROB_MCM_numbering.pdf, aufgerufen am 14.01.2013
- [Ani11] J. Anielski, *Entwicklung eines Triggersystems zum Testen und Kalibrieren der Supermodule des ALICE-TRD*,
Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2011
- [ATL10] ATLAS Collaboration, *ATLAS Fact Sheet*,
2010, <http://www.atlas.ch/fact-sheets-1-view.html>, aufgerufen am 03.11.2012
- [ATL12] ATLAS Collaboration, *Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC*,
Physics Letters B 716, Nr. 1, 2012
- [Bai09] Raphaëlle Bailhache, *Calibration of the ALICE Transition Detector and a study of Z-Boson and heavy quark production in pp collisions at the LHC*,
Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2009
- [Ber02] C. Berger, *Elementarteilchenphysik*,
Springer, Berlin Heidelberg New York, 2002
- [BMS07] P. Braun-Munzinger, J. Stachel, *The quest for the quark-gluon plasma*,
Nature 448: 302-309, 2007

- [Car98] Jean-Luc Caron, *Overall view of the LCH experiments*,
CERN Document Server, 1998, <http://cdsweb.cern.ch/record/841555>,
aufgerufen am 03.11.2012
- [CER08] CERN Communication Group, *CERN faq – LHC the guide*,
CERN, 2008,
- [CER08a] *The LHC experiments*,
CERN, 2008,
<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/LHCExperiments-en.html>,
aufgerufen am 05.12.2012
- [CER08b] *The Z factory*,
CERN, 2008,
<http://public.web.cern.ch/public/en/research/lep-en.html>, aufgerufen
am 21.12.2012
- [CHH08] European Organization for Nuclear Research, *CERN History Highlights*,
CERN, 2008,
<http://public.web.cern.ch/public/en/about/History-en.html>, aufgerufen
am 30.11.2012
- [CMS12] CMS Collaboration, *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV
with the CMS experiment at the LHC*,
Physics Letters B. 716, Nr. 1, 2012,
- [CRK11] J. de Cuveland, F. Rettig, S. Kirsch, *ALICE TRD DAQ Data Format*,
15. Juni 2011
- [Cuv03] J. de Cuveland, *Entwicklung der Spurrekonstruktionseinheit für den
ALICE Übergangsstrahlungsdetektor am LHC (CERN)*,
Diplomarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2003
- [Dem04] Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 4*,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2010
- [EFK04] D. Evans, S. Fedor, I. Králik, JT. Jones, P. Jovanovic, A. Jusko, R.
Lietava, L. Sándor, J. Urbán, O. Villalobos Baillie, *ALICE Trigger System*,
University of Birmingham, 2004
- [Ems10] David Emschermann, *Construction and Performance of the ALICE
Transition Radiation Detector*,
Doktorarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2010
- [Ent09] David d’Enterria, *Jet quenching*,
Springer Verlag, 2009, <http://arxiv.org/abs/0902.2011>

- [ESA00] V. Egorytchev, V. Saveliev, S.J. Aplin, *Particle identification via transition radiation and detectors*,
Nucl. Inst. Meth. A453 (2000) 346-352
- [Grz03] B. Grzadkowski, J. Pliszka, J. Wudka, *Triviality and stability limits on the Higgs boson mass in effective theories*,
Acta Phys. Polon. B34, 2003
- [Hah03] H. Hahn et al., *The RHIC design overview*,
Nucl. Instr. Meth. A499 (2003) 245-263
- [Hes11] Benjamin Andreas Heß, *Online Electron Identification for Triggering with the ALICE Transition Radiation Detector*,
Diplomarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2011
- [KB04] C. Klein-Bösing, *Production of Neutral Pions and Direct Photons in Ultra-Relativistic Au + Au Collisions*,
Doktorarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2004.
- [Kle08] J. Klein, *Commissioning of and Preparations for Physics with the Transition Radiation Detector in A Large Ion Collider Experiment at CERN*,
Diplomarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2008
- [Kwe09] MinJung Kweon, *The Transition Radiation Detector for ALICE at LHC*,
Nucl. Phys. A 830 (2009) 535c-538c
- [NA50] NA50 Collaboration, *Evidence for deconfinement of quarks and gluons from the J/ψ suppression pattern measured in Pb-Pb collisions at the CERN-SPS*,
Physics Letters B, 477:28-36, 2000
- [OAA07] K. Oyama, C. Adler, V. Angelov, D. Emschermann and C. Lippmann, *ALICE TRD Raw Data Format Specification*,
28. Dezember 2007
- [PDG10] K. Nakamura et al. (Particle Data Group),
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 37 075021, 2010
- [PRSZ09] Povh, Rith, Scholz, Zetsche, *Teilchen und Kerne*,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [Ret07] F. Rettig, *Entwicklung der optischen Auslekette für den ALICE-Übergangsstrahlungsdetektor am LHC (CERN)*,
Diplomarbeit, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007
- [TM07] P.A. Tipler, G. Mosca, *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*,
Spektrum, Akad. Verl., Berlin [u.a.], 2007
- [TPC00] ALICE Collaboration, *TPC Technical Design Report*,
CERN/LHCC 2000-001, ALICE TRD 7, 7.1.2000

- [TRD01] ALICE TRD, *Technical Design Report*,
CERN/LHCC 2001-021, ALICE TRD 9, 3.10.2001
- [Web07] C.Weber, *UrQMD Animations*,
Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2007
<http://th.physik.uni-frankfurt.de/~weber/CERNmovies/index.html>,
aufgerufen am 14.11.2012
- [Wes09] U. Westerhoff, *The FEE Server Control Engine of the ALICE-TRD*,
Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009
- [Wil04] A. Wilk, *Elektronen-Pionen-Separation im ALICE TRD*,
Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2004
- [Wul09] E.S. Wulff, *Position Resolution and Zero Suppression of the ALICE TRD*,
Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009
- [YHM05] K. Yagi, T. Hatsuda, Y. Miyake, *Quark-Gluon-Plasma: From Big Bang to little Bang*,
Cambridge University Press, Cambridge, 2005

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einigen Leuten für die Unterstützung während meines Studiums und in der Phase, in der diese Arbeit entstanden ist, danken.

Als erstes bedanke ich mich bei Prof. Dr. Johannes P. Wessels für die Möglichkeit, die Diplomarbeit in seiner Arbeitsgruppe zu schreiben, für die Möglichkeit, an der DPG-Tagung in Mainz teilzunehmen und für die Möglichkeit, einen kleinen Beitrag zu einem der bedeutendsten wissenschaftlichen Experimente unserer Zeit leisten zu können.

Anschließend möchte ich mich bei Prof. Dr. Christian Weinheimer für die Übernahme der Zweitkorrektur bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Thomas (Tom) Dietel für die gute Betreuung, für die Unterstützung während der knappen eineinhalb Jahre, für die Korrektur meiner Arbeit und für die leider viel zu oft benötigte Geduld, wenn es mal wieder zu (teilweise banalen) Problemen bei der Programmierung oder zu Verständnisproblemen der physikalischen und technischen Hintergründe kam.

Außerdem bedanke ich mich bei der Arbeitsgruppe Wessels, mit der ich nicht zuletzt in Mainz einige angenehme und lustige Stunden verbracht habe. Besonders erwähnt seien hier Annika Passfeld, Linus Feldkamp und Uwe Westerhoff, die mir oft weitergeholfen haben, sowohl bei Computer- als auch bei Motivationsproblemen.

Meinen Bürokollegen Florian Schepers, Michèle Neumann, Chris Sterthues und Manuel Pérez Mayo danke ich für die nette Atmosphäre, Tipps und Ratschläge, interessante und witzige Gespräche und Ablenkungen von der eigentlichen Arbeit.

Für eine tolle bisherige Zeit in Münster und die ein oder andere (mehr oder weniger physikalische) Diskussion inner- und außerhalb diverser Münsteraner Gaststätten danke ich Stephan, Tobi, Jan, Martin, Philip und Matze. Jan gebührt außerdem zusätzlicher Dank für die Durchsicht meiner Arbeit.

Ein besonders dickes Dankeschön für die Ablenkung vom Studiumsstress und das Kontrastprogramm zur Physik, sei es in Ahlen, Bielefeld, Paderborn oder Winterberg, geht an Schnubbi, Stella, Schwabbel, Dafit, Dennis, Patti, Michi, Markus, Jakob, Julius, Bussi und alle die, die ich eventuell vergessen habe.

Last but not least danke ich meiner Familie und vor allem meinen Eltern, Siegfried und Christiane, für die finanzielle Unterstützung, für's mit-Rat-und-Tat-zur-Seite stehen und für die offenen Arme und Ohren, die immer für kleine und große Probleme da waren.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und Zitate kenntlich gemacht habe.

Münster, Februar 2013

Lukas Britt