

# MASTER-ARBEIT

IM FACH PHYSIK

LEHRAMTSBEZOGENER STUDIENGANG HÖHERES LEHRAMT AN GYMNASIEN

Analyse der Auswertung von ATLAS-Daten durch Jugendliche im  
Rahmen der Internationalen Masterclasses der Teilchenphysik  
2013

vorgelegt von

Julia Woithe

geboren am 03.12.1987 in Löbau

eingereicht am 29.07.2013

Erstgutachten: Prof. Dr. Michael Kobel

Zweitgutachten: Prof. Dr. Gesche Pospiech

## KURZZUSAMMENFASSUNG

---

Die Internationalen Masterclasses der Teilchenphysik bieten Jugendlichen ein Tagesprogramm aus Vorlesungen, Übungen und einer Messung mit Daten des ATLAS Detektors, um sie in Kontakt mit Teilphysik zu bringen. Im W-Pfad der Masterclasses werteten Jugendliche im Frühjahr 2013 an 45 Instituten in 18 Ländern erstmals echte Daten im Hinblick auf die Suche nach dem Higgs-Boson im Zerfallskanal  $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  aus, indem sie Teilchenkollisionen anhand von Ereignisbildern im Event Display MINERVA analysierten. Der Vergleich der Vorselektion der Daten und der Messergebnisse der Jugendlichen zeigt, dass weniger als die Hälfte der Ereignisse der Higgs-Suche von Jugendlichen richtig erkannt werden und die Messerfolge zwischen verschiedenen Instituten stark variieren. Eine Analyse der betreffenden Ereignisse offenbart, dass die Selektion im Event Display nicht mit denselben Kriterien wie die Vorselektion der Daten durchgeführt werden kann, weil sich die jeweils verwendeten Datenformate unterscheiden. Außerdem nutzen die Jugendlichen noch nicht ausreichend die verschiedenen Funktionen des Event Displays, die für die Datenanalyse unerlässlich sind. Die Auswertung eines Fragebogens zur Organisation und Durchführung der Internationalen Masterclasses bestätigt, dass vor allem der Zeitanteil für die Übungen und die Messung mit dem Erfolg der Messung zusammenhängen. Der Ausbau der vorbereitenden Übungen könnte die Messerfolge der Jugendlichen während der Masterclasses 2014 verbessern.

## ABSTRACT

---

The International Masterclasses of Particle Physics offer students a day program of lectures, exercises and a measurement with data from the ATLAS detector. This experience is supposed to bring them into contact with particle physics. In spring 2013, in the W-path of the Masterclasses students of 45 institutes in 18 countries evaluated for the first time real data from the search for the Higgs boson in the decay channel  $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  by analyzing particle collisions on the basis of event images in the event display MINERVA. The comparison of the preselection of the data and the results of the students shows that less than half of the events from the Higgs search are correctly identified by students. Besides there is a large variation between results of different institutes. An analysis reveals that for the selection in the event display different criteria have to be used as for the preselection of data, because of the different data formats that are used. In addition, students do not use the various functions of the event displays correctly, which are essential for data analysis. The evaluation of a questionnaire on the organisation and realisation of the International Masterclasses indicates that especially the proportion of time for the exercises and the measurement is associated with the success of the measurement. The expansion of the preparatory exercises could improve the results of the students during the Masterclasses 2014.

## INHALTSVERZEICHNIS

---

1.	Einleitung.....	1
2.	Internationale Masterclasses .....	3
2.1.	Konzept und Geschichte.....	3
2.2.	Interesse für die Wissenschaft wecken.....	3
2.3.	Einblick in wissenschaftliche Forschungsprozesse .....	4
2.4.	Zugang zu echten Daten aktueller Experimente .....	5
2.5.	Fundamentale Kräfte und Bausteine der Natur .....	6
2.6.	Der typische Tagesablauf einer Internationalen Masterclass .....	6
2.7.	Der W-Pfad der Internationalen Masterclasses 2013 in Zahlen.....	7
2.8.	Ausblick.....	7
3.	Die Teilchenphysik hinter den Masterclasses .....	8
3.1.	Das Standardmodell der Teilchenphysik.....	8
3.2.	Die Struktur des Protons.....	9
3.3.	Die Suche nach dem Higgs-Boson .....	12
3.4.	Produktion und Zerfall des Higgs-Bosons .....	13
3.5.	Transversaler Winkelabstand der geladenen Leptonen bei $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ .....	15
4.	Der ATLAS-Detektor am LHC .....	18
4.1.	Detektorkomponenten von ATLAS.....	19
4.2.	Das Triggersystem von Atlas.....	21
4.3.	Objekte und deren Rekonstruktion .....	21
4.4.	Das Koordinatensystem von Atlas .....	22
4.5.	Kinematik von Proton-Proton-Kollisionen.....	22
4.6.	Das Event Display MINERVA.....	24
4.7.	Datenselektion .....	26
4.7.1.	W- und Untergrund-Selektion.....	26
4.7.2.	WW-Selektion .....	27
4.7.3.	Übersicht über aktuell verwendete Atlas-Daten und Selektionskriterien .....	28
5.	Datenanalyse.....	30
5.1.	Higgs-Suche .....	30
5.1.1.	Probleme bei der WW-Identifikation.....	31
5.1.2.	Herkunft der Problemereignisse .....	33
5.1.3.	Überschreiten der nötigen Grenzwerte.....	35
5.1.4.	Änderung der Selektionskriterien für MINERVA .....	37
5.1.5.	Korrigierte Trefferquote .....	38
5.1.6.	Zusammenhang zwischen Trefferquote und Datenpaket .....	38
5.1.7.	Fälschlicherweise als WW-Kandidaten identifizierte Ereignisse.....	39

5.2.	Struktur des Protons .....	41
5.2.1.	Einfluss der Änderung der Selektionskriterien .....	41
5.2.2.	Gegenseitige Beeinflussung der Messaufgaben .....	42
5.3.	Expertenwissen .....	43
5.4.	Zusammenfassung der Datenanalyse .....	45
6.	Konzeption und Auswertung des Fragebogens .....	46
6.1.	Fragebogen zur Organisation der Internationalen Masterclasses 2013.....	47
6.1.1.	Zusammenhang zwischen Trefferquote und Vorlesungsdauer .....	48
6.1.2.	Zusammenhang zwischen Trefferquote und Übungs- bzw. Messzeit .....	49
6.2.	Fragebogen zum Ablauf der Übungen und Messung 2013.....	50
6.2.1.	Wissen der Tutoren zum Event Display.....	51
6.2.2.	Wissen der Jugendlichen zum Event Display MINERVA.....	52
6.2.3.	Nutzung der Website im W-Pfad.....	52
6.3.	Änderungsvorschläge für die Internationalen Masterclasses .....	54
6.4.	Zusammenfassung des Fragebogens .....	56
7.	Fazit.....	57
8.	Anhang.....	59
8.1.	Typische Probleme bei der Identifizierung von WW-Kandidaten.....	59
8.2.	Fragebogen .....	62
	Literaturverzeichnis .....	72

## 1. EINLEITUNG

---

Ein Proton verlässt im Molekülverband den Inhalt einer herkömmlichen Wasserstoffflasche. Schnell wird es von seinen Begleitern getrennt und elektrische Felder beschleunigen es in einem Linearbeschleuniger auf eine Geschwindigkeit, die bereits außerhalb unserer Vorstellungskraft liegt. Aus dem Linearbeschleuniger tritt das Proton in einen ersten Kreisbeschleuniger ein, der die Geschwindigkeit noch weiter erhöht. Zwei weitere Vorbeschleuniger folgen, bis das Proton endlich die nötige Geschwindigkeit hat, um in den riesigen Speicherring des LHC injiziert zu werden, der in einem 27 km langen Tunnel 100 m unter der Erdoberfläche gebaut wurde. Noch immer wird das Proton beschleunigt, zusammen mit 100 Milliarden anderen Protonen in einem 8 cm langen Paket. Schließlich ist die Endgeschwindigkeit erreicht und das Proton schafft mit 99,9999991 % der Lichtgeschwindigkeit mehr als 11000 Umläufe pro Sekunde. Das Paket wird jetzt auf einen Durchmesser von 16  $\mu\text{m}$  verengt und trifft schließlich gezielt ein zweites Protonpaket, das denselben Beschleunigungsprozess durchlaufen hat aber in entgegengesetzter Richtung im LHC kreist. Dabei finden nur 20 Kollisionen statt! Das entspricht etwa der gleichen Kollisionsrate, als wenn alle Ameisen der Welt in zwei Gruppen aufgeteilt 50-mal aufeinander zulaufen und sich dabei nur 2 Ameisen begegnen. Nur indem man 40 Millionen Teilchenpakete pro Sekunde aufeinandertreffen lässt, kann man die Zahl der Kollisionen auf 800 Millionen pro Sekunde steigern. Unter 3 Milliarden dieser Kollisionen gibt es schließlich eine Kollision, in der aus der Interaktion der inneren Bestandteile zweier Protonen etwas Neues entsteht, ein Teilchen, nach dem Physiker fast 50 Jahre lang gesucht haben, ein Higgs-Boson.<sup>1</sup>

Teilchenphysik ist spannend, nicht zuletzt wegen der unvorstellbar kleinen Ausmaße der Hauptakteure und der gigantischen Ausmaße der Beschleuniger und Detektoren, mit denen wir uns u. a. Antworten auf die Frage nach dem Ursprung des Universums erhoffen. Solche Fragen interessieren auch Jugendliche, wobei die Schule zurzeit wenige Möglichkeiten bietet, sich mit den elementaren Bausteinen der Welt und typischen Fragen der Teilchenphysik zu beschäftigen.

Hier setzten die Internationalen Masterclasses an: Einen Tag lang geben sie Jugendlichen die Möglichkeit, in die Welt der Teilchenphysik einzutauchen, etwas über die Theorie der Elementarteilchen zu lernen und über die Methoden der Teilchenphysiker, die den Bau 27 km langer Tunnel und 7000 t schwerer Detektoren einschließen. Schließlich werden die Jugendlichen selbst zu Detektiven und versuchen anhand von Ereignisbildern herauszufinden, welche Teilchen ihre Spuren im ATLAS-Detektor hinterlassen haben und ob möglicherweise Higgs-Bosonen unter diesen Teilchen waren.

---

<sup>1</sup> Dieser Abschätzung liegen die LHC Fakten aus [30] zugrunde, sowie die Annahme, dass es etwa  $10^{16}$  Ameisen auf der Erde gibt [45].

Bei den Ergebnissen der Jugendlichen im W-Pfad der Internationalen Masterclasses fiel in vergangener Zeit auf, dass es eine deutliche Abweichung von der zu erwartenden Anzahl an Ereignissen mit Higgs-Kandidaten und den tatsächlichen Messungen der Jugendlichen gibt mit einer großen Schwankungsbreite über die Teilchenphysik-Institute, die weltweit Masterclasses organisieren. Diese Diskrepanz soll im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden.

Zunächst werden die Unterschiede quantifiziert, indem für jedes Institut die Trefferquote für WW-Kandidaten erfasst wird. Eine Vermutung ist, dass sich die 6 verwendeten Datenpakete mit jeweils 1000 Ereignissen bezüglich des Schwierigkeitsgrades unterscheiden. Es wird daher nach schwer identifizierbaren Ereignissen und den Problemen bei der Identifikation gesucht. Da der W-Pfad der Masterclasses aus zwei verschiedenen Messaufgaben besteht, ist eine gegenseitige negative Beeinflussung der Messaufgaben denkbar und wird untersucht.

Eine andere Vermutung ist, dass sich die Unterschiede zwischen den Instituten auf die Organisation und Durchführung der Masterclasses vor Ort zurückführen lassen. Ein Fragebogen soll die Unterschiede in der Organisation erfassen und mögliche Zusammenhänge zeigen.

Für die Überprüfung dieser Hypothesen sind neben Kenntnissen zum Konzept der Internationalen Masterclasses auch Grundlagen zur Teilchenphysik und zum ATLAS-Detektor hilfreich, diese werden daher in den Kapiteln 2 bis 4 beschrieben. Kapitel 5 widmet sich der Datenanalyse und den Ergebnissen der Jugendlichen, Kapitel 6 beinhaltet die Auswertung des Fragebogens. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

## 2. INTERNATIONALE MASTERCLASSES

---

Die Internationalen Masterclasses der Teilchenphysik finden seit 2005 jährlich im Frühjahr statt, dieses Jahr vom 26. Februar bis zum 22. März. Jedes Jahr kommen mehrere Tausend Jugendliche an Teilchenphysik-Institute weltweit, um vor Ort an der Faszination Teilchenphysik teilzuhaben. Dabei nehmen sie an einem Programm teil, das speziell für Jugendliche entwickelt wurde und stetig evaluiert, aktualisiert und verbessert wird.

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Masterclasses beschrieben, deren Zielstellung sowie die Umsetzung und Evaluation der Ziele. Schließlich werden die Kennzahlen der diesjährigen Masterclasses zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Masterclasses gegeben.

### 2.1. KONZEPT UND GESCHICHTE

---

Eine Meisterklasse ist laut der Onlineversion des DUDENs eine „*Gruppe von Schülerinnen und Schülern (einer Kunstakademie oder Musikhochschule), die von einem namhaften Künstler, einer namhaften Künstlerin unterrichtet wird*“ [1]. Bei den Masterclasses der Teilchenphysik lernen Jugendliche zwischen 15 und 19 Jahren von authentischen Wissenschaftlern, z. B. Professoren, Postdocs oder Doktoranden der Teilchenphysik.

Diese Masterclasses wurden 1997 in Großbritannien ins Leben gerufen und hatten sich bereits 2005 über 18 verschiedene europäische Länder verbreitet, so dass 2005 über 3000 Jugendliche einen Tag an einem von 58 Instituten verbringen konnten und sich dabei vor Ort unter fachlicher Anleitung mit Teilchenphysik beschäftigt haben. Die *European Particle Physics Outreach Group* (EPPOG) organisierte dieses erste internationale zweiwöchige Programm mit den Zielen

- ❖ bei den Jugendlichen Interesse für die Wissenschaft zu wecken
- ❖ einen Einblick in wissenschaftliche Forschungsprozesse zu ermöglichen
- ❖ den Jugendlichen Zugang zu echten Daten aktueller Experimente zu ermöglichen
- ❖ die Fundamentalen Kräfte und Bausteine der Natur zu vermitteln [2]

Diese Ziele und deren Umsetzung werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

### 2.2. INTERESSE FÜR DIE WISSENSCHAFT WECKEN

---

Außerschulische Lernorte stellen anschauliche, authentische und sehr vielfältige Lerngelegenheiten dar. Dabei ist ein Ziel der Schülerlabore oder Universitäten, die Aktionen für Schüler anbieten, Interesse für die Wissenschaft zu wecken, um langfristig den Forschernachwuchs zu sichern. Eine erste Evaluation der Internationalen Masterclasses [2] hat unter anderem den Einfluss der Masterclasses auf das Interesse an Physik untersucht: 373 Mädchen und 825 Jungen zwischen 16 und 19 Jahren aus 18 Ländern füllten dazu Fragebögen aus. 82 % der Jugendlichen gefielen die Internationalen Masterclasses, dabei gab es keinen signifikanten Zusammenhang

zum Vorwissen der Jugendlichen und keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern. Es zeigten sich zudem ein Anstieg des allgemeinen Interesses an Physik durch die Teilnahmen an den Masterclasses und der Wunsch der Jugendlichen, mehr über moderne Physik im Schulunterricht zu erfahren.

### 2.3. EINBLICK IN WISSENSCHAFTLICHE FORSCHUNGSPROZESSE

Zu den Internationalen Masterclasses besuchen Jugendliche Forschungsinstitute in ihrer Nähe und lernen dabei auch den Arbeitsort von Wissenschaftlern kennen. Einige Institute organisieren neben den Messungen und Vorträgen auch Führungen durch Labore oder bieten beim gemeinsamen Mittagessen Gesprächsmöglichkeiten mit Wissenschaftlern.

Während der Messung bei den Internationalen Masterclasses analysieren die Jugendlichen echte Daten des ATLAS-Detektors, in dem sie sich Kollisionsereignisse als Ereignisbilder in einem Event Display anschauen, das die Signale der verschiedenen Detektorkomponenten grafisch umsetzt. Dabei basiert das von den Jugendlichen verwendete MINERVA Event Display [3] auf einer vereinfachten Version des Event Displays ATLANTIS, das von Physikern des ATLAS Experimentes verwendet wird und permanent in dessen Kontrollraum Live-Ereignisse zeigt (Abbildung 1). Auch wenn Datenanalysen heute eher auf Computeralgorithmen als auf Augenmaß beruhen, erleben die Jugendlichen dennoch einen Bestandteil des Forscheralltags.

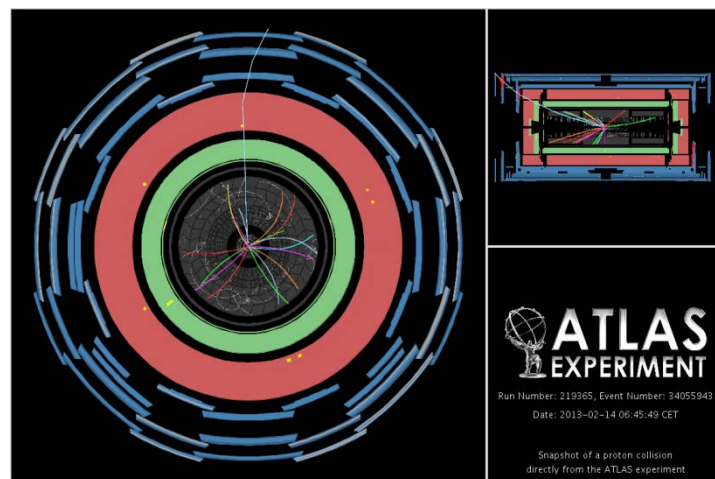


Abbildung 1 - Event Display von ATLAS (aus [4])

Dabei führt die Auswahl von echten Daten trotz klarer Analysekriterien immer wieder zu vielfältigen Interpretationsmöglichkeiten, die Anlass zu Diskussionen im 2er-Team oder mit dem begleitenden Tutor geben und verdeutlichen, wie komplex Experimente wie ATLAS sind und wie wichtig die Arbeit im Team dabei ist.

Neben Vorlesungen, computergestützten Übungen mit dem Event Display und schließlich einer eigenen Messung findet seit 2005 als Abschluss eines jeden Tages einer Internationalen Master-



class eine englischsprachige internationale Videokonferenz unter Leitung des CERN statt, um die Ergebnisse des Tages zu kombinieren und zu diskutieren [2]. Auch solche Videokonferenzen inklusive möglicher technischer Schwierigkeiten sind bei einer Kollaboration wie ATLAS Teil der Arbeit eines Wissenschaftlers und ein wichtiger Bestandteil im Forschungsprozess.

Nicht zuletzt erhalten die Jugendlichen einen Einblick in die Bedeutung von Statistik in der Teilchenphysik: Während eine Auswertung von 50 Ereignissen keinerlei Aussagen über das Wesen physikalischer Prozesse zulässt, kann durch die Kombination von Ergebnissen innerhalb eines Instituts oder besser noch über alle beteiligten Institute die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich verbessert werden, wobei Entdeckungen in der Teilchenphysik erst veröffentlicht werden, wenn die Datenmengen die Irrtumswahrscheinlichkeit, nur statistische Schwankungen zu sehen, auf den sehr geringen Wert von  $p = 0,00006 \%$  beschränken<sup>2</sup>.

#### 2.4. ZUGANG ZU ECHTEN DATEN AKTUELLER EXPERIMENTE

In den ersten Jahren der Internationalen Masterclasses wurden echte Daten des *Large Electron Positron Collider* (LEP) verwendet, dieser Speicherring für Elektronen und Positronen war von 1989 bis 2000 in Betrieb. OPAL, eines der Experimente am LEP untersuchte u. a. Zerfälle von Z-Bosonen und diese Messungen konnten die Jugendlichen während der Masterclasses nachempfinden.

Seit 2011 werden Daten von ATLAS verwendet, einem der Experimente am *Large Hadron Collider* (LHC), dem Nachfolgeexperiment des LEP. Es gibt zwei verschiedene Programme, die zu diesen Daten gestaltet wurden: Im W-Pfad steht das W-Boson im Mittelpunkt und mit ihm die Struktur des Protons und der Nachweis von Higgs-Bosonen, die in zwei W-Bosonen zerfallen. Im Z-Pfad wird nach Z-Bosonen gesucht und nach Higgs-Bosonen, die in zwei Z-Bosonen zerfallen.<sup>3</sup> Bei der Suche im W-Pfad wurden ab 2011 995 echte Ereignisse mit W-Kandidaten verwendet sowie künstlich untergemischte Untergrundereignisse und zusätzlich 5 simulierte Ereignisse mit Higgs-Bosonen im Zerfallskanal  $H \rightarrow WW \rightarrow ll\nu\nu$ . Bei den Internationalen Masterclasses 2012 standen 5750 echte W-Ereignisse künstlich mit Untergrundereignissen angereichert zur Verfügung sowie 250 simulierte WW-Ereignisse [5].

In diesem Jahr wurden erstmals 693 echte WW-Kandidaten (aufgenommen vom ATLAS-Detektor 2011) neben den bestehenden W-Kandidaten inklusive Untergrund analysiert. Dabei wurden im Vorfeld etwa  $1 \text{ fb}^{-1}$  ATLAS-Daten für die Verwendung bei den Masterclasses selektiert [6], Kriterien der Selektion und deren Ergebnisse werden in Kapitel 4.7 beschrieben.

---

<sup>2</sup> Das entspricht einem Konfidenzintervall von  $(-5\sigma, +5\sigma)$

<sup>3</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird im Folgenden nur noch der W-Pfad betrachtet.

## 2.5. FUNDAMENTALE KRÄFTE UND BAUSTEINE DER NATUR

---

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist eine Quantenfeldtheorie, die die Wechselwirkungen zwischen den bekannten Elementarteilchen beschreibt. Dabei ist diese Theorie sehr erfolgreich, bisher konnte sie in keinem Experiment widerlegt werden. Dennoch hat die Teilchenphysik bisher kaum den Weg in die Lehrpläne des Physikunterrichts gefunden, auch im Sächsischen Lehrplan für Gymnasien findet sich nur ein Lernbereich zur Atomphysik und dieser ist ausschließlich für den Leistungskurs vorgesehen [7]. Als mögliche Gründe des Mangels an Teilchenphysik in der Schule führen Hacker und Hilscher im Buch „*Physikdidaktik*“ [8] zum einen an, dass die Teilchenphysik ein relativ junger Teilbereich der Physik ist und es zudem kaum Möglichkeiten für Experimente im Physikunterricht gibt. Auch das mangelnde Wissen über Teilchenphysik seitens der Lehrkräfte könnte ein Hindernis sein. So kommt es, dass die Jugendlichen in der Regel erst in höheren Semestern eines Physikstudiums von den fundamentalen Bausteinen der Natur erfahren.

Jugendliche scheinen allerdings sehr empfänglich für Teilchenphysik zu sein und wünschen sich nach der Teilnahme an einer Masterclass sogar mehr moderne Physik im Unterricht, dies zeigen zumindest bisherige Evaluation in diesem Bereich [2], [9]. Fragen der Teilchenphysiker, wie „*Woraus bestehen wir?*“ und „*Wie ist das Universum entstanden?*“ faszinieren die Jugendlichen und mit neuen Erkenntnissen der Teilchenphysik kann sich ihnen eine ganz neue Welt eröffnen. Nicht zuletzt, weil die Geschichte des Standardmodells auch den Wunsch der Physiker erzählt, möglichst einfache, elegante Erklärungen zu finden und dabei Symmetrie und Ordnung in die Phänomene der Physik zu bringen.

## 2.6. DER TYPISCHE TAGESABLAUF EINER INTERNATIONALEN MASTERCLASS

---

Die Jugendlichen erleben einen sorgfältig geplanten Tag, der typischerweise mit Einführungsvorlesungen zu Teilchenphysik und Detektoren beginnt. Im Anschluss an eine Mittagspause und evtl. zusätzliche Führungen am jeweiligen Institut arbeiten die Jugendlichen in 2er-Teams in einem Computerpool: In der aktuellen Version des W-Pfades der Internationalen Masterclasses lernen die Jugendlichen zunächst, wie man mit Hilfe des ATLAS-Detektors und einer grafischen Umsetzung seiner Detektorsignale im Event Display verschiedene Teilchen anhand ihrer Signale erkennt. In einer ersten Übung analysieren die Jugendlichen idealerweise selbstständig vier Teilchensignaturen. Im Anschluss werden die jeweiligen Messaufgaben vorgestellt und der physikalische Hintergrund dazu erläutert. Bei der Messung betrachten die Jugendlichen dabei nicht nur einzelne Teilchen, sondern ganze Ereignisse mit einer Vielzahl von Detektorsignalen. Um den Umgang mit solchen Ereignissen zu üben, testen die Jugendlichen in einer zweiten Übung, ob sie zehn Beispielergebnisse richtig identifizieren können. Das Highlight des Tages bildet eine selbstständige Messung eines Teilpaketes echter ATLAS-Daten, bei der die Jugendli-

chen alles Gelernte anwenden. Als Abschluss des Tages findet eine Diskussion der Ergebnisse über eine Videokonferenz mit anderen Instituten weltweit statt.

## 2.7. DER W-PFAD DER INTERNATIONALEN MASTERCLASSES 2013 IN ZAHLEN

In der Zeit vom 26.02.2013 bis 21.03.2013 haben an 12 Tagen 45 Institute in 18 verschiedenen Ländern Masterclasses zum W-Pfad organisiert. Dabei haben die 64 Gruppen von Jugendlichen jeweils ein Datenpaket von 1000 Ereignissen analysiert. 629 Teilpakete mit je 50 Ereignissen wurden durch Jugendliche vermessen und die Ergebnisse zur Kombination mit anderen Instituten in eine Online-Tabelle eingetragen. Für eine weiterführende Analyse vor allem in Bezug auf die Ergebnisse der Higgs-Suche lassen sich die Eintragungen von 42 Gruppen an 35 Instituten verwerten, was 439 vermessenen Teilpaketen entspricht. Einige Institute haben nur die erste Messaufgabe zur Struktur des Protons bearbeitet und sind nicht auf die Higgs-Suche eingegangen, teilweise ließen sich auch keine Ereignisnummern zu den Daten zuordnen, was zum Abschluss der Daten für diese Arbeit führte.

## 2.8. AUSBLICK

Inzwischen wurde die EPPOG erweitert zur *International Particle Physics Outreach Group* (IPPOG) und Masterclasses finden an über 150 Instituten in 37 Ländern weltweit statt [10].

In Deutschland besteht zudem seit 2010 das Netzwerk Teilchenwelt, unter dem sich inzwischen 24 Institute aus ganz Deutschland zusammengeschlossen haben, um neben den jährlich stattfindenden Internationalen Masterclasses auch Teilchenphysik-Masterclasses in angepasster Form an Schulen zu organisieren. Darüber hinaus besteht für engagierte Jugendliche und Lehrkräfte die Möglichkeit, finanziert über das Netzwerk Teilchenwelt an Workshops am CERN teilzunehmen oder sogar in Projektwochen für Schüler bzw. Forschungsjahren für Lehrkräfte eigene Forschungsprojekte am CERN durchzuführen [11], [12].

### 3. DIE TEILCHENPHYSIK HINTER DEN MASTERCLASSES

---

Teilchenphysik, genauer Elementarteilchenphysik widmet sich der Erforschung und Beschreibung von elementaren Bestandteilen der Materie. Den heutigen Stand der Teilchenphysik spiegelt das Standardmodell wieder, dieses wird im Folgenden kurz vorgestellt. Des Weiteren wird in diesem Kapitel vor allem die Teilchenphysik hinter den Masterclasses betrachtet, also der Aufbau von Protonen und die Entdeckung der Quarks sowie die dominanten Produktions- und Zerfallsprozesse von W-Bosonen. Außerdem wird die Geschichte der Suche nach dem Higgs-Boson vorgestellt sowie dessen Produktions- und Zerfallsmechanismen. Schließlich wird das Erkennungskriterium des Higgs-Bosons im W-Pfad erklärt.

#### 3.1. DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

---

*„Das heutige Standard-Modell der Elementarteilchenphysik, wie es sich seit den 1970er Jahren herausgebildet hat, erreicht von einer – nach früheren Begriffen –fast unvorstellbar einfachen Grundlage aus eine nahezu vollständige und quantitative Beschreibung der elementaren Erscheinungen in der materiellen Welt.“ [13]*

Mit den unvorstellbar einfachen Grundlagen meint der Autor des obigen Zitates vermutlich die Anordnung der vielen im Laufe des frühen 20. Jahrhunderts entdeckten Teilchen in geometrischen Mustern und die Einführung von seltsamen Erhaltungsgrößen wie der „Strangeness“, um Zerfallsprozesse von Teilchen zu beschreiben und vorherzusagen. Aus diesen Grundlagen entwickelte sich eine sehr umfangreiche, mathematisch komplexe Theorie, eine Eichtheorie mit spontaner Symmetriebrechung: das Standardmodell.

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist eine Quantenfeldtheorie, die beschreibt, wie die elementaren Bausteine der Materie über fundamentale Wechselwirkungen interagieren. Dabei werden die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung vermittelt über deren jeweilige Austauscheteilchen. Fundamentale Objekte der Theorie sind Felder, deren Anregungszustände wir als Teilchen beobachten können (Abbildung 2).

- ❖ Die Anregungszustände des Fermion-Feldes  $\psi$  beschreiben alle elementaren Fermionen also Leptonen und Quarks als elementare Bausteine.
- ❖ Die elektroschwachen Eichfelder  $W_1, W_2, W_3$  und  $B$  bilden durch Linearkombination die beobachtbaren Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung  $W^+, W^-, Z^0$  sowie das Photon als Austauscheteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die Linearkombination der Eichbosonen der Symmetriegruppen  $SU(2)$  bzw.  $U(1)$  ist dabei nur durch deren spontane Symmetriebrechung möglich.

- ❖ Die Gluon-Felder  $G_a$  ( $a = 1, \dots, 8$ ) sind die Eichfelder der Symmetriegruppe  $SU(3)$ . Diese hat 8 Erzeugende und somit ein Oktett aus Gluonen als Eichbosonen der starken Wechselwirkung.
- ❖ Das Higgs-Feld  $\phi$  ist ein skalares Feld, das durch spontane Symmetriebrechung die Massen der Eichbosonen der elektroschwachen Wechselwirkung generiert und über die Yukawa-Kopplung die Masse der Fermionen erzeugt. Das Higgs-Feld impliziert die Existenz eines skalaren Teilchens, des Higgs-Bosons [14].

		Fermionen			Bosonen	
		1. Familie	2. Familie	3. Familie		
Quarks	u	Up 2 MeV/c <sup>2</sup>	c	Charm 1300 MeV/c <sup>2</sup>	t	Top 173 000 MeV/c <sup>2</sup>
	d	Down 5 MeV/c <sup>2</sup>	s	Strange 100 MeV/c <sup>2</sup>	b	Bottom 4200 MeV/c <sup>2</sup>
	e	Elektron 0,511 MeV/c <sup>2</sup>	$\mu$	Myon 106 MeV/c <sup>2</sup>	$\tau$	Tau 1777 MeV/c <sup>2</sup>
Leptonen	$\nu_e$	Elektron-Neutrino	$\nu_\mu$	Myon-Neutrino	$\nu_\tau$	Tau-Neutrino
	alle Neutrinos < 0,000 002 MeV/c <sup>2</sup>					
					$\gamma$	H
				Photon 0 MeV/c <sup>2</sup>	Higgs-Boson 126 MeV/c <sup>2</sup>	
				g	Eichbosonen	
				Gluon 0 MeV/c <sup>2</sup>		
				Z		
				Z-Boson 91 200 MeV/c <sup>2</sup>		
				$W^\pm$		
				W-Boson 80 400 MeV/c <sup>2</sup>		

Abbildung 2 – Teilchen im Standardmodell, Massen gerundet entnommen aus [15], [16]

Die Gravitation lässt sich bisher nicht als Quantenfeldtheorie beschreiben und ist daher nicht im Standardmodell enthalten, auf Teilchenebene sind Gravitationseffekte allerdings gegenüber den anderen Wechselwirkungen vernachlässigbar klein. Auch bei Fragen wie „Was ist dunkle Materie oder dunkle Energie?“ versagt das Standardmodell bisher, dennoch gilt diese Theorie als die am besten experimentell untersuchte Theorie.

### 3.2. DIE STRUKTUR DES PROTONS

Das griechische Wort *atomos* bedeutet „das Unteilbare“. Bereits in der griechischen Antike gab es Naturphilosophen, die sich die Vielfalt der Stoffe auf der Welt nur damit erklären konnten, dass alles was uns umgibt aus kleinsten unteilbaren Bestandteilen zusammengesetzt ist.

Der Atombegriff wurde durch Chemiker wie John Dalton wieder aufgegriffen, der erkannte, dass es zusammengesetzte Stoffe, wie Salze gibt und elementare Stoffe, wie Sauerstoff oder Wasserstoff, „welche noch nicht zerlegt wurden“. Dalton sagt weiterhin: „es wird keinesfalls behauptet, dass irgendeiner derjenigen Stoffe [...] unzerlegbar sei“ [17]. Dalton war an dem chemischen Verhalten der Atome interessiert und in welchem Verhältnis verschiedene Stoffe Verbindungen

eingehen, aber auch, wie sich die spezifische Masse von Atomen unterscheidet. Dabei verwendete er den Begriff Atom auch für zusammengesetzte Stoffe wie Wasser und meint eher die kleinste mögliche Stoffmenge.

Ernest Rutherford zeigte mit Streuexperimenten 1913, dass die Masse des Atoms sich im Wesentlichen auf einen sehr kleinen positiv geladenen Bereich, den Atomkern beschränkt. Spätestens seit Versuchen zur Kernspaltung ist bekannt, dass auch der Atomkern aus verschiedenen Bestandteilen zusammengesetzt ist. Akzeptiert man Neutronen und Protonen als Kernbausteine, dann vereinfacht sich das Periodensystem der Elemente ungemein, denn die über 100 verschiedenen Elemente lassen sich durch die unterschiedliche Zusammensetzung aus Kernbausteinen erklären.

Eine ähnliche Situation herrschte auch in der Mitte des 20. Jahrhunderts: Während man mit der Entdeckung des Neutrons durch Chadwick 1932 Proton, Neutron und Elektron für die elementaren Bausteine der Welt hielt, kamen 1937 das Myon, 1947 das Pion hinzu; es folgten Neutrinos, Kaonen, Lamda-Teilchen, Sigma-Teilchen, Omega-Teilchen und viele mehr. Durch Sortieren der Teilchen in verschiedene geometrische Muster konnte Murray Gell-Mann mit seinem „Eightfold Way“ 1961 eine gewisse Ordnung in den Teilchenzoo bringen. 1964 schlugen Gell-Mann und Zweig unabhängig voneinander noch elementarere Teilchen, die Quarks als Bausteine der bekannten Hadronen vor, die analog zum Periodensystem der Elemente die Vielzahl der unterschiedlichen nicht elementaren Teilchen erklären würden. Wieder waren es Streuexperimente, die den experimentellen Nachweis der Substruktur des Protons lieferten, ganz analog zum Streuexperiment von Rutherford (Abbildung 3) [14].

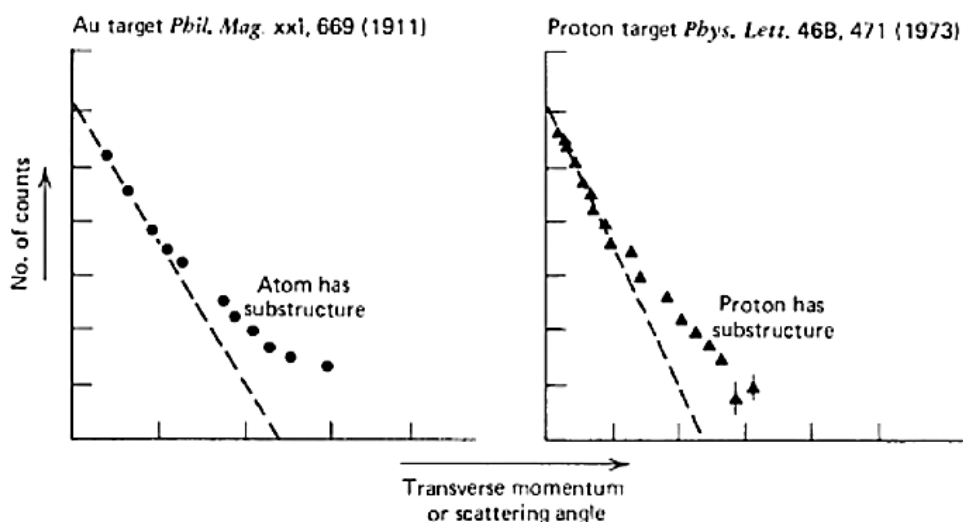


Abbildung 3 - (links) Die inelastische Streuung von Alpha-Strahlung an einem Goldtarget zeigt die Substruktur des Atoms. (rechts) Die inelastische Streuung eines Protonenstrahls an einem Protontarget zeigt die Substruktur des Protons, gestrichelt: jeweilige Erwartung ohne Substruktur (aus [18])

Auch während der Masterclasses beschäftigen sich Jugendliche im W-Pfad mit der Struktur des Protons. Bei genügend hoher Energie reagieren bei einer Kollision von Protonen am LHC nicht die Protonen als Ganzes, sondern wir erhalten Einblicke über Reaktionen der Bestandteile (*Partonen*) des Protons: der Quarks und Gluonen. Die drei Valenzquarks ( $uud$ ) sind im Proton umgeben von einem „See“ aus Gluonen und virtuellen Quark-Antiquark-Paaren, die aus Gluonen entstehen können (Abbildung 4), letztere werden daher als See-Quarks bezeichnet [19]. Die See-Quarks sind ein wichtige Bestandteile, um die Produktionsprozesse von W-Bosonen am LHC erklären.

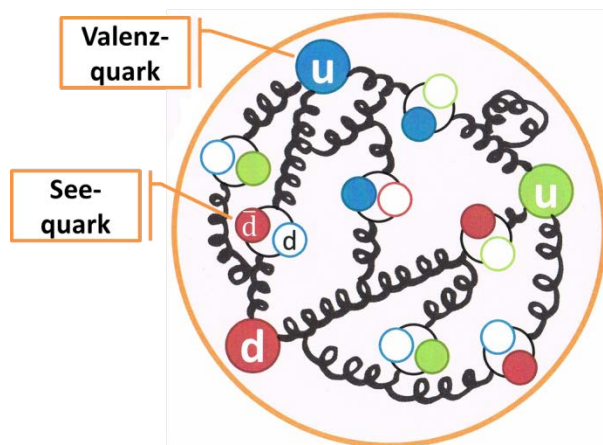


Abbildung 4 – Parton-Modell des Protons mit Valenz- und See-Quarks

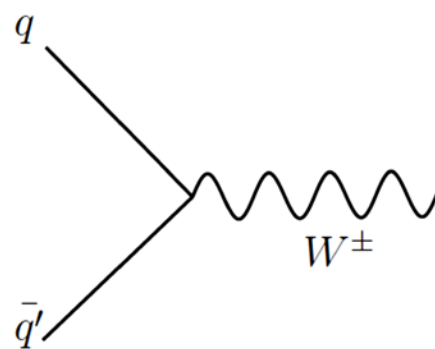


Abbildung 5 - Feynmandiagramm: Produktion von W-Bosonen durch Quark-Antiquark-Annihilation (aus [20])

Bei Proton-Proton-Kollisionen werden W-Bosonen hauptsächlich durch die Annihilation von Quark-Antiquark-Paaren produziert (Abbildung 5). Je nach Ladung der beteiligten Quarks entstehen dabei  $W^+$  oder  $W^-$ -Bosonen, die aufgrund ihrer geringen Lebensdauer nur durch ihre Zerfallsprodukte nachgewiesen werden können. Dominant sind vor allem Prozesse, in denen ein Valenz-Quark und ein See-Quark annihilieren, also  $u\bar{d} \rightarrow W^+$  bzw.  $d\bar{u} \rightarrow W^-$ . Da das Proton aus doppelt so vielen Up- wie Down-Quarks besteht, erwartet man, dass bei diesen Streuprozessen doppelt so viele  $W^+$ -Bosonen entstehen wie  $W^-$ -Bosonen, also ein Verhältnis  $R_{\pm} = \frac{|W^+|}{|W^-|} = 2$ . Allerdings sind auch Streuprozesse mit zwei See-Quarks möglich, z. B.  $c\bar{s} \rightarrow W^+$  bzw.  $s\bar{c} \rightarrow W^-$ . Diese Prozesse bringen W-Bosonen in gleicher Anzahl hervor und verändern zusammen mit Prozessen höherer Ordnung das Verhältnis  $R_{\pm}$  [20].

Die Messung der Produktionswirkungsquerschnitte für W und Z-Bosonen sowie des Verhältnisses von  $W^+$  zu  $W^-$ -Bosonen gilt als ein wichtiger Test des Standardmodells. In deren theoretische Vorhersage gehen unter anderen die Parton-Verteilungsfunktion ein sowie die Kopplungsstärken der Partonen an die Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung [21]. Der Nachweis von W-Bosonen erfolgt anhand der Zerfallsprodukte: W-Bosonen zerfallen zu 32,4 % leptonisch



d. h.  $W^+ \rightarrow l^+ + \nu$  bzw.  $W^- \rightarrow l^- + \bar{\nu}$  ( $l = e, \mu, \tau$  zu etwa gleichen Anteilen) und zu 67,6 % hadronisch also  $W \rightarrow q + \bar{q}'$  [15]. Für den Nachweis durch ATLAS interessant sind vor allem die leptonischen Zerfälle in Elektronen oder Myonen. Mit einer integrierten Luminosität von  $35 \text{ pb}^{-1}$  an ATLAS-Daten aus dem Jahr 2010 wurden im Myon- und Elektron-Zerfallskanal insgesamt 162 399  $W^+$  und 108 090  $W^-$  registriert, was ein Verhältnis  $R_{\pm} = 1,50$  ergibt [22].

Auch während der Masterclasses suchen die Jugendlichen in genau diesen Zerfallskanälen nach W-Bosonen. Dabei messen die Jugendlichen meist ein deutlich geringeres Verhältnis als aus dem Vergleich zur ATLAS Kollaboration zu erwarten wäre, 2013 lag es im Schnitt bei  $R_{\pm} = 1,23$ . Dennoch geht aus dem Ergebnis hervor, dass das Proton aus mehr Up- als Down-Quarks bestehen muss. Eine Analyse der Ursachen des gegenüber den Erwartungen geringen Verhältnisses folgt in Kapitel 5.2.

### 3.3. DIE SUCHE NACH DEM HIGGS-BOSON

---

Die Eichsymmetrien des Standardmodells erlauben eigentlich keine Massen für Eichbosonen bzw. Fermionen. Um 1964 wurde von verschiedenen Autoren unabhängig voneinander ein Mechanismus vorgestellt, der die elektroschwache Symmetrie bricht und damit Massenterme für deren Eichbosonen berücksichtigt. Der Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble-Mechanismus oder allgemein üblich Higgs-Mechanismus sagt dabei auch ein neues Teilchen, das Higgs-Boson voraus und damit eine Möglichkeit, diese Theorie zu überprüfen. Allerdings werden durch die Theorie keine Vorhersagen bezüglich der genauen Masse des Higgs-Bosons gemacht, was die Suche nach diesem Teilchen ausdehnte.

Bereits am *Large Electron Positron Colliders* (LEP), in dessen Tunnel nun der LHC eingerichtet wurde, hat man nach dem Higgs-Boson des Standardmodells gesucht, konnte aber zum Shutdown im Jahr 2000 nur einen großen Massenbereich ausschließen. Auch eine Suche am Tevatron des Fermilab in den USA hat nur einen kleinen Überschuss von  $\sim 1\sigma$  der aufgenommenen Daten im Vergleich zum zu erwartenden Hintergrund ohne Higgs-Boson im Massenbereich  $125 < m_H < 155 \text{ GeV}/c^2$  gefunden, mit Sicherheit konnte allerdings nur ein weiterer großer Massenbereich ausgeschlossen werden. Eine Kombination der LEP und Tevatron Daten schließt die Existenz eines Higgs-Bosons im Massenbereich  $m_H < 114,5 \text{ GeV}$  und  $156 < m_H < 177 \text{ GeV}$  mit einer statistischen Sicherheit von 95 % aus [23].

Die Detektoren CMS und ATLAS des LHC suchten seit März 2010 bei einer Schwerpunktsenergie von 7 TeV bzw. ab 2012 bei 8 TeV weiter im noch verbliebenen Massenbereich. Im Juli 2012 wurde schließlich die Entdeckung eines neuen Teilchens bekanntgegeben. Mit einer integrierten Luminosität von etwa  $4,8 \text{ fb}^{-1}$  bei 7 TeV und  $5,8 \text{ fb}^{-1}$  bei 8 TeV und der Kombination mehrerer Zerfallskanäle konnte mit einer Signifikanz von  $5,9 \sigma$  der Beweis für die Existenz eines neutralen



Bosons mit einer Masse von  $m = 126,0 \pm 0,4 (stat) \pm 0,4 (sys)$  GeV (gemessen von ATLAS) erbracht werden, das mit dem Higgs-Boson des Standardmodells kompatibel ist [16].

Nach dem Stand von ATLAS im März 2013 liegt der aktuelle Wert für die Masse des Higgs-Bosons bei  $m_H = 125,5 \pm 0,2 (stat) \pm 0,6 (sys)$  GeV, dabei wurden die Zerfallskanäle  $H \rightarrow \gamma\gamma$  und  $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$  kombiniert [24]. Auch der Bestimmung der genauen Quantenzahlen kommt man näher: Man erwartet für das Higgs-Boson Spin und Parität  $J^P = 0^+$ , die anderen möglichen Quantenzahlen  $0^-; 1^+; 1^-; 2^+$  können inzwischen mit einem Konfidenzlevel von 97,8 % ausgeschlossen werden [25].

### 3.4. PRODUKTION UND ZERFALL DES HIGGS-BOSONS

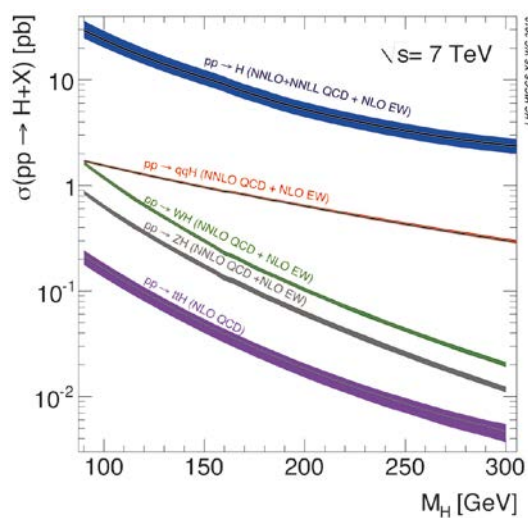


Abbildung 6 - Wirkungsquerschnitt bei der Produktion des Standardmodell Higgs-Bosons bei 7 TeV (aus [26])

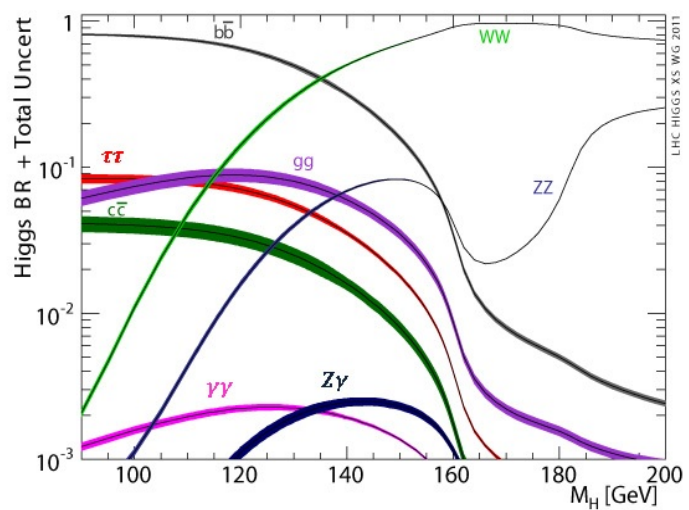


Abbildung 7 - Verzweigungsverhältnisse beim Zerfall des Standardmodell Higgs-Bosons (aus [26])

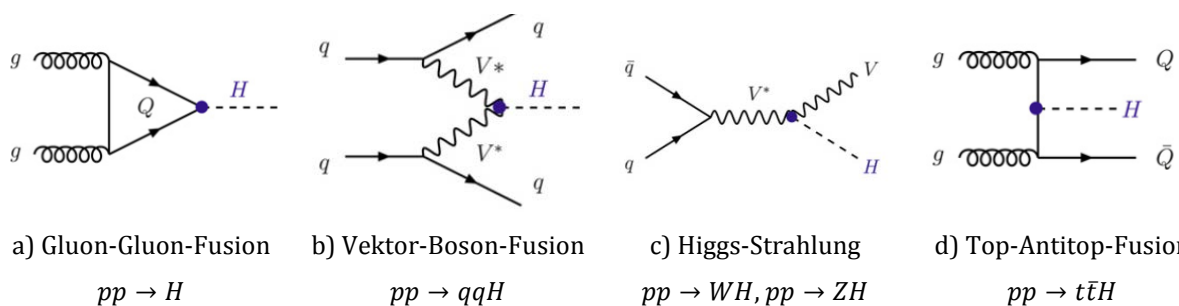


Abbildung 8 - Dominante Produktionsmechanismen des Standardmodell Higgs-Bosons bei Proton-Proton-Kollisionen (aus [27])

Am LHC können in verschiedenen Prozessen mit unterschiedlichen Wirkungsquerschnitten Higgs-Bosonen erzeugt werden (Abbildung 6). Die **Gluon-Gluon-Fusion** ist der dominante Prozess der Higgs-Produktion am LHC (Abbildung 8a). Das Higgs-Boson koppelt nicht direkt an Gluonen, allerdings ist eine Kopplung über eine intermediäre Quark-Schleife möglich. Prinzipiell sind alle Quarks oder sogar Leptonen in der Schleife denkbar, die stärkste Kopplung tritt aller-

dings zu Top-Quarks auf, da die Kopplung an das Higgs-Boson proportional zur Masse eines Teilchens erfolgt und damit schon die Kopplung an das Bottom-Quark deutlich unterdrückt wird. Wie die Masse der W- und Z-Bosonen offenbart, koppelt das Higgs-Boson stark an die Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung. Bei der **Vektor-Boson-Fusion** (Abbildung 8b) emittieren zwei Quarks jeweils ein W- oder Z-Boson, diese fusionieren und produzieren ein Higgs-Boson. Charakteristisch für diesen Prozess sind die zwei verbleibenden Quarks, die in Jets hadronisieren. Ein Higgs-Boson kann auch als **Higgs-Strahlung** (Abbildung 8c) von einem Vektor-Boson emittiert werden, das zuvor durch Quark-Antiquark-Annihilation entstanden ist. Ein vergleichsweise geringer Wirkungsquerschnitt entfällt auf die Produktion von Higgs-Bosonen durch **Top-Antitop-Fusion** (Abbildung 8d), hier annihilieren zwei See-Quarks unter Erzeugung eines Higgs-Bosons, Top-Quarks werden aufgrund der Kopplungsstärke an das Higgs-Boson wieder bevorzugt [28].

Das Higgs-Boson kann in verschiedenen Kanälen zerfallen, das Verzweungsverhältnis für die jeweiligen Kanäle hängt dabei stark von der Masse des Higgs-Bosons ab (Abbildung 7). Die für ATLAS interessantesten Zerfälle sind die folgenden:

- ❖ Das kleinste Verzweungsverhältnis besitzt der Kanal  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , nichtsdestotrotz ist dies ein sehr interessanter Kanal, da eine sehr genaue Rekonstruktion der Impulse sowie der Energieeinträge im Kalorimeter möglich ist und sich damit über die invariante Masse des Photonensystems sehr genau die Higgs-Masse bestimmen lässt (Abbildung 9). Problematisch ist der Untergrund von z. B. Pionen, die in zwei Photonen zerfallen [28].

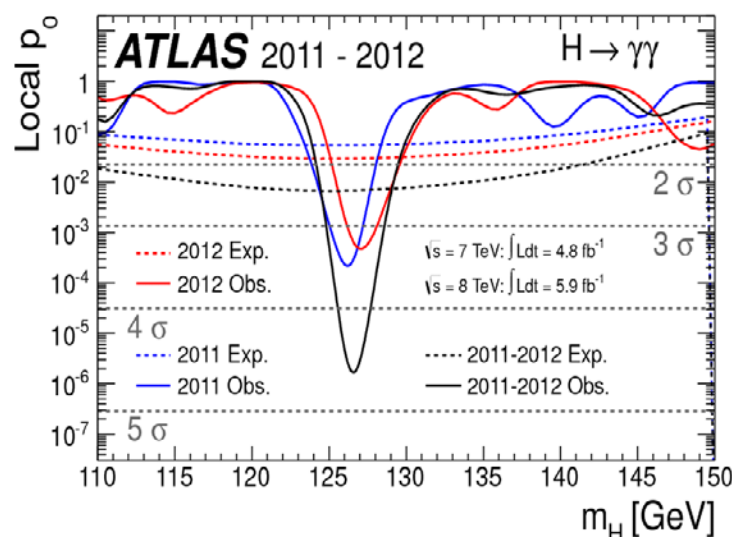


Abbildung 9 - Lokal beobachteter  $p$ -Wert als Funktion der Higgs-Masse, erwartete und beobachtete Werte für  $\sqrt{s}=7$  TeV (blau), 8 TeV (rot) und deren Kombination (schwarz) (aus [16])

- ❖ Auf dem Zerfall  $H \rightarrow ZZ$  beruht der Z-Pfad der Masterclasses. Vor allem wenn die beiden Z-Bosonen in insgesamt vier Leptonen zerfallen, kann die Masse des Higgs-Bosons sehr präzise rekonstruiert werden. Dieser Kanal wird auch der goldene Kanal genannt.
- ❖  $H \rightarrow W^+W^-$  hat für einen weiten Massenbereich die höchste Produktionsrate, allerdings ist es sehr schwer, die Higgs-Masse zu rekonstruieren, sobald die W-Bosonen unter Aussendung von Neutrinos leptonisch zerfallen. Der Untergrund dieses Prozesses beinhaltet nur elektroschwache Beiträge und ist daher gering. Interessant ist die Analyse der Winkelabstände der geladenen Leptonen aus den W-Zerfällen [28].

### 3.5. TRANSVERSALER WINKELABSTAND DER GELADENEN LEPTONEN BEI $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

Der letztgenannte Prozess  $H \rightarrow WW$  ist Grundlage für die Higgs-Suche im W-Pfad der Masterclasses. Im leptonischen Zerfallskanal  $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  erwartet man aufgrund des Spins des Higgs-Bosons, dass die beim Zerfall emittierten Leptonen den Wechselwirkungspunkt in derselben Richtung verlassen: Das Higgs-Boson hat als einziges bisher bekanntes Elementarteilchen einen Spin  $s = 0$ . Wegen Impulserhaltung müssen die beiden W-Bosonen im Ruhesystem des Higgs-Bosons in entgegengesetzte Richtungen emittiert werden. W-Bosonen sind Spin-1-Teilchen, wegen Drehimpulserhaltung müssen beide betrachtet aus dem Ruhesystem des Higgs-Bosons dieselbe Helizität besitzen, d. h. der Spin der W-Bosonen zeigt z. B. jeweils in Bewegungsrichtung (Abbildung 10a).

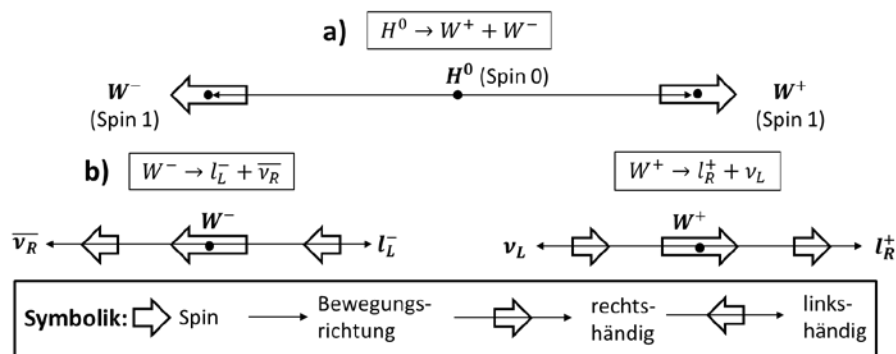


Abbildung 10 - Leptonischer Zerfall des Higgs-Bosons unter Berücksichtigung des Spins, a) Zerfall des Higgs-Bosons in zwei W-Bosonen b) leptonischer Zerfall der W-Bosonen

Das  $W^-$ -Boson zerfällt wegen Ladungserhaltung und Leptonenzahl-Erhaltung in ein linkshändiges negativ geladenes Lepton und ein rechtshändiges Anti-Neutrino. Das Lepton wird dabei bevorzugt entgegen seiner Spin-Richtung emittiert (Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung). Betrachtet man analog den Zerfallsprozess des  $W^+$ -Bosons, kann man erwarten, dass beide Leptonen in dieselbe Richtung emittiert werden (Abbildung 10b). Diese Tatsache bietet ein Kriterium, um Higgs-Ereignisse von anderen WW-Ereignissen sowie zusätzlichem Untergrund zu unterscheiden. Teilchenphysiker suchen also nach einem Überschuss an Daten

mit kleinen Winkelabständen in der Transversalebene zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Leptonen, der sich vom theoretischen Untergrund abhebt (Abbildung 11). Dabei besteht der Untergrund nicht nur aus WW-Ereignissen, durch die Fehldeutung von Leptonen aus Jets (*fake leptons*) kann z. B. ein Zerfall von nur einem W-Boson in Anwesenheit eines Jets zwei entgegengesetzt geladene Leptonen erzeugen, die als WW-Ereignis registriert werden. Auch das Z-Boson kann in zwei Leptonen zerfallen. Wird im Detektor zusätzlich ein fehlender Transversalimpuls registriert z. B. innerhalb eines Jets, zählt man auch solch ein Ereignis fälschlicherweise als WW-Ereignis.<sup>4</sup>

Während der Masterclasses stehen die Jugendlichen vor nahezu denselben Problemen: Auch sie suchen nach geeigneten Leptonen und messen bei den betreffenden Ereignissen den Winkel zwischen den Leptonen in der Transversalebene. Ihre Ergebnisse tragen sie in einer Online-Tabelle ein, so dass ein Histogramm generiert werden kann, das ihre Ergebnisse über einem geeignet normierten simulierten Untergrund zeigt und dabei auch die zu erwartende Verteilung der echten Higgs-Ereignisse anzeigen kann (Abbildung 12). Die Simulation des Untergrundes und der zu erwartenden Higgs-Ereignisse (Abbildung 13) wurde im Rahmen der WW-Ereignisselektion 2012 durch Constanze Hasterok durchgeführt [6] (siehe Kapitel 4.7.2).

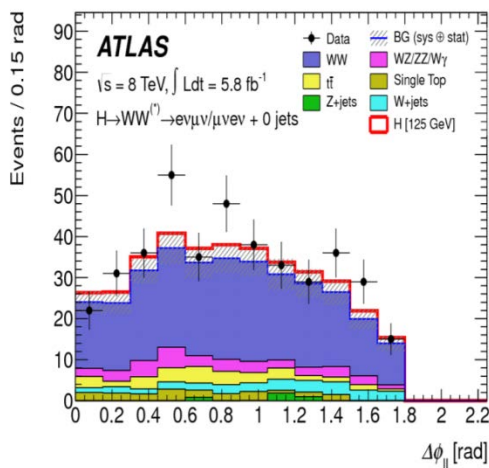


Abbildung 11 - Histogramm zum Winkelabstand  $\Delta\Phi_{||}$  der geladenen Leptonen inklusive Untergrund bei  $N=0$  Jets, ATLAS (aus [16])

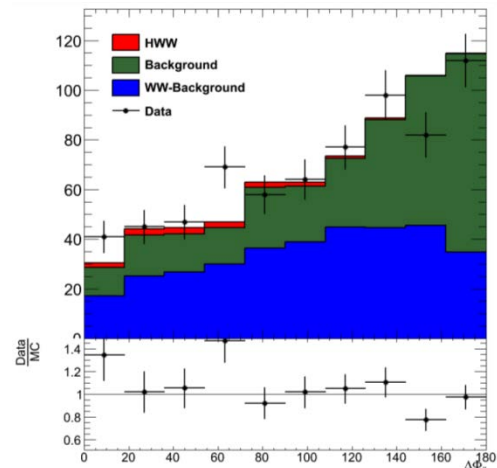


Abbildung 12 - Histogramm zum Winkelabstand  $\Delta\Phi_{||}$  der geladenen Leptonen für 693 WW-Kandidaten über simuliertem Untergrund bei  $m_H=125 \text{ GeV}/c^2$  (aus [6])

Aus Abbildung 14 geht hervor, dass die Ergebnisse der Jugendlichen mitunter schwierig zu interpretieren sind. Eine mögliche Ursache ist, dass deutlich weniger WW-Kandidaten als solche identifiziert werden, als zu erwarten wäre (Abbildung 13). Selbst die Kombination der Ergebnisse mehrerer Gruppen macht eine Interpretation oft nicht einfacher. Das Ziel der Internationalen Masterclasses, Jugendliche mit echten aktuellen Daten arbeiten zu lassen, bringt hohe

<sup>4</sup> Weitere relevante Untergrundprozesse werden in [6] beschrieben.

statistische Unsicherheiten mit sich und eine Reproduktion der ATLAS-Ergebnisse ist keinesfalls möglich oder sinnvoll. Dennoch waren die niedrigen Trefferquoten für WW-Ereignisse die Motivation dieser Arbeit und werden in Kapitel 5.1 analysiert.

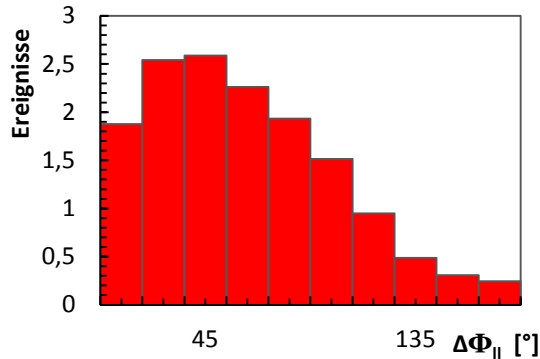


Abbildung 13 - Zu erwartende Anzahl an Higgs-Ereignissen bei 693 WW-Kandidaten unterteilt in 10 Bins des Winkelabstands  $\Delta\Phi_{ll}$  der geladenen Leptonen (MC-Simulation mit  $m_H=125 \text{ GeV}/c^2$  [6])

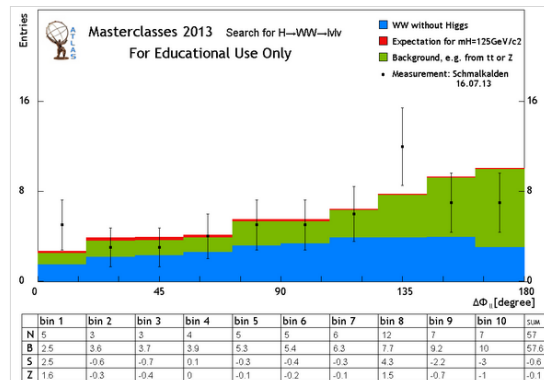


Abbildung 14 - zu erwartende Higgs-Ereignisse (rot) über simuliertem Untergrund bei  $m_H=125 \text{ GeV}/c^2$  (normiert) mit von Jugendlichen gemessenen Daten (aus [30])

## 4. DER ATLAS-DETEKTOR AM LHC

Der *Large Hadron Collider* (LHC) befindet sich in einem 27 km langen Tunnel in 45 bis 100 m Tiefe zwischen dem Genfer See und dem Juraergebirge. Nach einer Reihe von Vorbeschleunigern werden gegenläufige Protonenstrahlen in den LHC eingespeist und auf 99,9999991 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Jeder Protonenstrahl besteht dabei aus bis zu 2808 Teilchenpaketen (*bunches*), jedes Paket enthält im Mittel  $1,15 \cdot 10^{11}$  Protonen. Die Teilchenpakete sind einige Zentimeter lang, während ihre Ausdehnung transversal zum Strahl auf bis zu  $16 \mu\text{m}$  verengt wird, wenn sie an bestimmten Punkten zur Kollision gebracht werden und die Kollision dabei über riesige Detektorsysteme beobachtet und aufgezeichnet wird [29].

ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) ist eines dieser Detektorsysteme und eine der kompliziertesten Maschinen, die je gebaut wurden: 46 m lang, 25 m im Durchmesser, 7000 t schwer. Das Besondere an ATLAS ist sein toroidales Magnetfeld, das im Zentralbereich (*Barrel*) durch acht 25 m lange supraleitende Spulen erzeugt wird, die zylinderförmig um das Strahlrohr angeordnet sind. Im Bereich der Endkappen sorgen zwei weitere Spulensysteme für das dortige Magnetfeld [29].

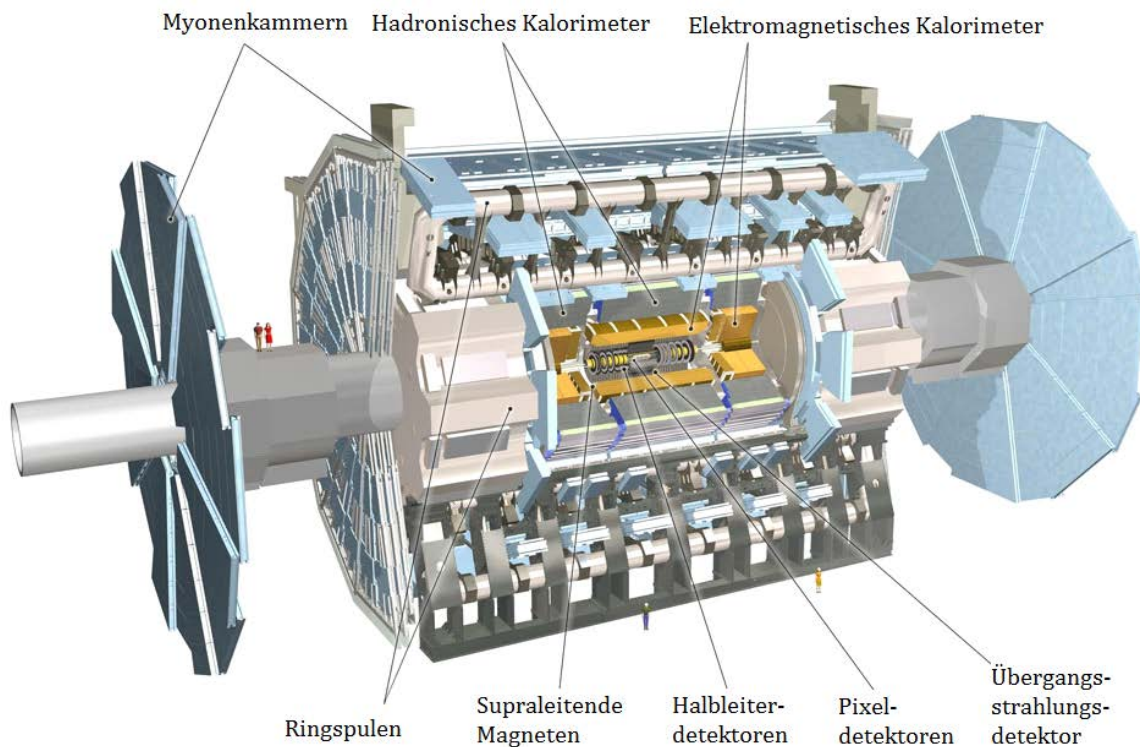


Abbildung 15 - ATLAS Experiment (aus [30])

Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Detektorkomponenten und das Triggersystem von ATLAS vorgestellt, außerdem der Weg der Daten im Rekonstruktionsprozess. Die verwendeten Zahlen und Fakten richten sich dabei nach [29], [31] und [21]. Nach einem kurzen Einblick in



das Koordinatensystem von ATLAS wird die für die Masterclasses relevante Kinematik von Proton-Proton-Kollisionen skizziert. Im Anschluss wird das Event Display MINERVA als eine grafische Veranschaulichung der Detektorsignale vorgestellt und dabei auch beschrieben, wie die Jugendlichen während der Masterclasses mit dem Event Display arbeiten. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Erläuterung der Selektion der ATLAS-Daten, welche die Jugendlichen aktuell im W-Pfad der Masterclasses analysieren.

#### 4.1. DETEKTORKOMPONENTEN VON ATLAS

Der innere Detektor des ATLAS-Detektors (Abbildung 16) besteht aus mehreren hochauflösenden Detektorkomponenten, alle befinden sich im 2 Tesla starken Magnetfeld des zentralen Solenoidmagneten, dessen Magnetfeld parallel zum Strahl liegt, so dass anhand der Spurkrümmung die Impulse aller geladenen Teilchen bestimmt werden können.

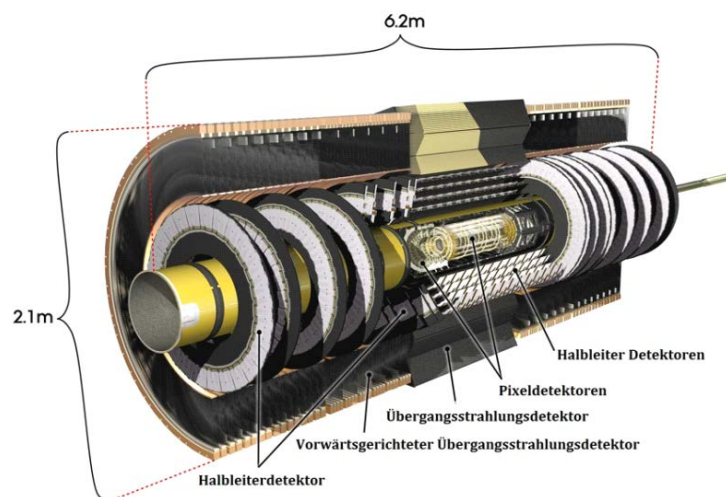


Abbildung 16 - Innerer Detektor von ATLAS (aus [30])

Nur  $\sim 5$  cm vom Zentrum des Strahlrohrs entfernt befindet sich die erste von drei konzentrischen zylindrischen Lagen des **Pixeldetektors**. Außerhalb des Zentralbereichs decken Scheiben aus Pixeldetektoren den Bereich der Endkappen ab. Mit insgesamt 80 Mio. Pixeln auf  $1,7 \text{ m}^2$  können Teilchenspuren mit einer Auflösung von  $14 \times 115 \mu\text{m}^2$  detektiert werden, dabei hinterlassen Teilchen in der Regel drei Signale beim Durchgang durch diesen ersten Subdetektor. Nach dem *Long Shutdown 1* (LS1) soll eine weitere Lage die Auflösung noch weiter verbessern.

Beim Durchgang durch den **Halbleiter-Spurdetektor** (*Semiconductor Tracker* SCT) hinterlassen die Teilchen weitere 8 Signale pro Spur, was ebenfalls zur Impulsmessung und zur Rekonstruktion des Wechselwirkungspunktes (*Vertex*) beiträgt. Dieser Silizium-Streifendetektor besteht aus 4088 zweiseitigen Modulen, die insgesamt eine Fläche von  $60 \text{ m}^2$  einnehmen. Diese verteilt sich auf vier zylindrische Doppel-Lagen, die letzte Lage befindet sich bei einem Radius von 52 cm.

Zentrales Element des **Übergangsstrahlungsdetektors** (*Transition Radiation Tracker* TRT) sind die insgesamt 300 000 gasgefüllten Driftröhren mit einem Durchmesser von 4 mm, in deren Mitte ein vergoldeter Wolfram-Draht als Anode fungiert. Zwischen den Röhren befindet sich ein Verbundwerkstoff aus Polypropylen und Polyethylen [32], so dass geladene hochrelativistische Teilchen, wie z. B. Elektronen  $> 1$  GeV an der Grenzschicht Übergangsstrahlung in Form von Photonen emittieren. Der Xenon-Anteil in den Driftröhren ist sensitiv für Photonen, sodass abhängig von der Teilchensorte ein höheres Signal gemessen wird, als nur durch Ionisation beim Durchgang durch die Driftröhren zu erwarten wäre. Durch den Einfluss der Übergangsstrahlung lassen sich Teilchen wie z. B. Elektronen und Pionen voneinander unterscheiden.

Das Kalorimeter-System von ATLAS misst die Energie sowohl geladener als auch neutraler Teilchen und ist somit die einzige Detektorkomponente, die z. B. Neutronen nachweisen kann. Wechselwirkungen der primären Teilchen mit Schichten aus Absorber-Materialien erzeugen einen Schauer sekundärer Teilchen, die von sensitiven Schichten detektiert werden. Dabei werden schließlich alle Teilchen außer Myonen und Neutrinos im Kalorimeter absorbiert.

Das **elektromagnetische Kalorimeter** befindet sich direkt außerhalb des Solenoidmagneten und ist durch einen akkordeonartigen Aufbau gekennzeichnet. Es nutzt abwechselnd geschichtet Blei als Absorber und flüssiges Argon als sensitives Material, das durch Ionisationsprozesse die Energie von hindurchfliegenden Teilchen misst. Schauer im elektromagnetischen Kalorimeter entstehen durch Paarerzeugung und Bremsstrahlung, dadurch werden vor allem Photonen, Elektronen und Pionen gestoppt und nachgewiesen, letztere durch den Zerfall in zwei Photonen.

Das **hadronische Kalorimeter** umschließt das elektromagnetische Kalorimeter. In ihm werden Hadronen detektiert, also Baryonen wie Protonen und Neutronen oder verschiedene Mesonen. Die Hadronen durchqueren Absorberschichten aus Stahl und schauern dabei auf, diese Teilchenschauer regen Szintillatorschichten an, die sich zwischen den Absorbern befinden. Das von den Szintillatoren emittierte Licht wird über Glasfaserkabel gesammelt und ausgelesen, aus der Lichtintensität kann man die Energie der Hadronen rekonstruieren. In den Endkappen kommt als hadronisches Kalorimeter ein Aufbau aus flüssigem Argon und verschiedenen Absorbermaterialien zum Einsatz.

Spuren von Myonen werden bereits im inneren Detektor gemessen, im Anschluss durchdringen sie die Kalorimeter ohne nennenswerte Energieverluste und sind damit die einzigen Teilchen neben Neutrinos, die den Detektor verlassen können. Für den Nachweis und eine genauere Impulsmessung umgibt die bisher beschriebenen Detektorkomponenten ein komplexes System aus Myonendetektoren, das **Myonspektrometer**. Für die Impulsmessung kommt das riesige toroidale Magnetfeld zum Einsatz, das auch die Spur hochenergetischer Myonen messbar



krümmt. Zusätzlich ist das Myonspektrometer mit einem eigenen Triggersystem ausgerüstet, da gerade hochenergetische Myonen ein Zeichen für interessante physikalische Prozesse sind.

#### 4.2. DAS TRIGGERSYSTEM VON ATLAS

---

Bei einer Luminosität von  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  werden etwa 20 Kollisionen erwartet, wenn sich zwei Pakete aus Protonen treffen (*bunch crossing*). Bei 40 Mio. *bunch crossings* pro Sekunde ergibt das etwa 1 Mrd. Kollisionen pro Sekunde, die im ATLAS-Detektor stattfinden. Ein einziges *bunch crossing* als Ereignis zu speichern benötigt etwa 1,5 MB Speicherbedarf [33], das heißt das Triggersystem muss mit Datenmengen von bis zu 60 TB pro Sekunde umgehen. Daher wird bereits vor dem Speichern eine Auswahl der interessantesten Ereignisse getroffen. Dies geschieht über das dreistufige Triggersystem: Der Level 1 Trigger ist ein Hardware-Trigger und filtert etwa 75 000 interessante Ereignisse pro Sekunde heraus. Dabei sucht der Kalorimeter-Trigger nach relevanten Einträgen im elektromagnetischen Kalorimeter und sortiert diese in bestimmte Kanäle (*Streams*) ein, z. B. den *EGamma-Stream* für alle Ereignisse, in denen höchstwahrscheinlich interessante Elektronen oder Photonen auftreten. Der Myontrigger sucht analog nach energiereichen Spuren im Myonspektrometer, die sich zum Kollisionsort extrapolieren lassen und übergibt diese in den *Myon-Stream* [21]. Den Level 2 Trigger, einen Software-Trigger, der über große Rechnerfarmen realisiert wird, passieren nur noch 2000 besonders interessante Ereignisse pro Sekunde, es werden z. B. genaue Kriterien an den Impuls der Teilchen gestellt. Nach dem Ereignis-Filter, der die Suche noch weiter spezifiziert, gibt es letztendlich „nur noch“ 200 Ereignisse pro Sekunde, diese werden dauerhaft gespeichert [29].

#### 4.3. OBJEKTE UND DEREN REKONSTRUKTION

---

Die Rohdaten (*RAW Data*), die durch das Triggersystem ausgewählt wurden, enthalten alle Informationen zu Spuren und Kalorimetereinträgen und durchlaufen diverse Bearbeitungsstufen: Transferiert in das zentrale Tier0-Computing-Center am CERN werden dort aus den Rohdaten physikalische Objekte wie Elektronen oder Myonen rekonstruiert und ESD (*Event Summary Data*, ca. 700 kByte/Ereignis) erzeugt, dieser Vorgang dauert etwa 24 h. Diese verhältnismäßig großen ESD werden in das weniger detailreiche Datenformat AOD (*Analysis Object Data*, ca. 150 kByte/Ereignis) konvertiert, hier werden u. a. die einzelnen Kalorimetereinträge nicht mehr gespeichert und damit das Speichervolumen auf etwa 20 % der ursprünglichen ESD reduziert. Eine weitere Reduzierung des Datenvolumens um 99 % erzielt man mit der Erzeugung von DPD (*Derived Physics Data*), die nur eine geringe Auswahl der Ursprungsdaten z. B. für gezielte physikalische Analysen wie die Selektion von Higgs-Kandidaten enthalten [34].

Das in Kapitel 4.6 beschriebene Event Display MINERVA arbeitet mit XML-files, die direkt aus ESD erzeugt werden und damit alle Informationen zu Kalorimetereinträgen und Spuren enthalten. Für die Zielstellung der Internationalen Masterclasses werden keine rekonstruierten Objek-

te dargestellt, sondern die Schüler erschließen sich selbstständig, wie eine Spur und zugehörige Detektorwechselwirkungen zu interpretieren sind.

#### 4.4. DAS KOORDINATENSYSTEM VON ATLAS

Für die spätere Orientierung im Event Display ist es nützlich, sich mit dem verwendeten Koordinatensystem zu beschäftigen. Durch die zylinderförmige Struktur des Detektors ist die Verwendung von Zylinderkoordinaten sinnvoll, die aus praktischen Aspekten um weitere physikalische Größen ergänzt werden.

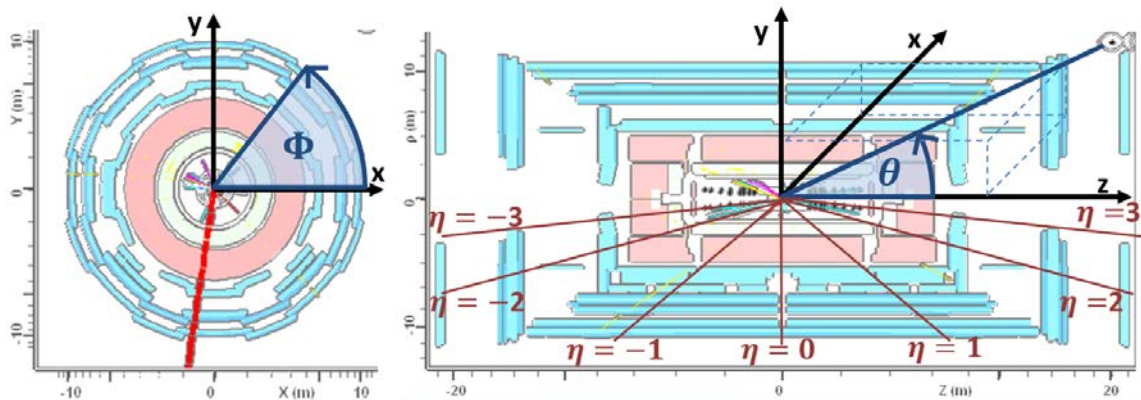


Abbildung 17 - Koordinatensystem von ATLAS, links: Querschnitt, rechts: Längsschnitt durch den Detektor

Die z-Achse definiert man über die Zylinderachse entlang des rechtshändigen Strahls ausgehend vom nominellen Wechselwirkungspunkt im Zentrum des Detektors. Die x-Achse zeigt zum Zentrum des LHC-Rings, die y-Achse vertikal nach oben. Für die Beschreibung von Teilchenspuren verwendet man den Azimutwinkel  $\Phi$  als Winkel in der  $xy$ -Ebene sowie die Pseudorapidität  $\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$  mit dem Polarwinkel  $\theta$  (Abbildung 17). Für Abstände zweier Spuren definiert man die Größe  $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\Phi)^2}$ . Der Jet-Rekonstruktionsalgorithmus *anti- $k_t$*  arbeitet z. B. typischerweise mit dem Radiusparameter  $\Delta R = 0,4$  [35], Spuren zweier Teilchen werden als isoliert voneinander betrachtet, wenn sie einen Abstand von z. B.  $\Delta R > 0,2$  zueinander haben.

#### 4.5. KINEMATIK VON PROTON-PROTON-KOLLISIONEN

In klassischen Kollisionen gilt neben der Erhaltung der Masse auch die Impulserhaltung, während die kinetische Energie nur bei elastischen Kollisionen erhalten ist. Auch in der relativistischen Betrachtung bleibt der Impuls erhalten und ist damit eine der wichtigsten Charakteristika der Teilchenspuren. Dabei beschränkt man sich auf den Impuls senkrecht zum Protonenstrahl, da nur hier die Anfangsbedingungen mit  $\vec{p}_T \approx 0$  bekannt sind. In Strahlrichtung kann durch die Substruktur der Protonen trotz bekannter Strahlenergie keine Aussage über den Anfangsimpuls getroffen werden, da z. B. einzelne Quarks oder Gluonen miteinander wechselwirken, die jeweils nur einen Teil des Gesamtimpulses tragen.

Summiert man alle Transversalimpulse nach der Kollision vektoriell auf, deutet eine Summe ungleich Null auf nicht registrierte Teilchen hin: Zum einen kann ein Detektorsystem wie ATLAS nur einen bestimmten Winkelbereich abdecken, Teilchen, die beinahe in Strahlrichtung wegfliegen, können nicht detektiert werden. Da diese Teilchen dann nur einen sehr geringen Transversalimpuls besitzen, stellen sie nur einen sehr kleinen Beitrag dar. Auch Teilchen, die auf die wenigen Störstellen (*cracks*) im Detektor treffen, werden nicht registriert. Zum anderen deutet ein fehlender Transversalimpuls auf die Produktion von Neutrinos hin, die den Detektor weitestgehend ohne Wechselwirkungen verlassen und dabei Impuls „wegtragen“. Der fehlende Transversalimpuls  $\vec{E}_T$  wird für Ereignisse ohne Myonen aus allen Energieeinträgen  $E_i$  des Kalorimeters berechnet

$$\vec{E}_T = - \sum_i \vec{p}_T^i = - \sum_i E^i \cdot \sin \theta_i \cdot \vec{n}_{i,\perp}$$

wobei  $\theta_i$  der Polarwinkel des  $i$ -ten Eintrages im Kalorimeter ist und  $\vec{n}_{i,\perp}$  der auf den Energieeintrag zeigende Einheitsvektor in der  $xy$ -Ebene. Weil Myonen nur einen geringen Teil ihrer Energie in den Kalorimetern hinterlassen, muss bei Ereignissen, die Myonen enthalten der fehlende Transversalimpuls um die Myonenimpulse korrigiert werden.

Im  $W$ -Pfad der Masterclasses kennzeichnet der leptonische Zerfall von  $W$ -Bosonen alle interessanten Prozesse und wegen der dabei produzierten Neutrinos, ist vor allem der Betrag des fehlenden Transversalimpulses ein wichtiges Suchkriterium. Da der fehlende Transversalimpuls aus Energieeinträgen des Kalorimeters berechnet wird, benutzt man häufig z. B. im Event Display MINERVA auch die Bezeichnung „fehlende Transversalenergie“ (*Missing Transverse Energy MET*).

Die Gleichsetzung von Energien und Impulsen in der Teilchenphysik verwirrt dabei nicht nur Jugendliche während der Masterclasses und ist nur im relativistischen Grenzfall zulässig: Impuls- und Energieerhaltung lassen sich in einer Schreibweise mit Vierervektoren zusammenfassen. Dabei ist das Skalarprodukt des Vierervektors  $\mathbf{p}$  mit sich selbst eine lorentzinvariante Größe und liefert die relativistische Energie-Impulsbeziehung:

$$\text{Mit } \mathbf{p} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} mc \\ \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \end{pmatrix} \text{ erhält man } \mathbf{p}^2 = \left(\frac{E}{c}\right)^2 - \vec{p}^2 = (mc)^2$$

oder in natürlichen Einheiten (also  $c = 1$ )  $E^2 - p^2 = m^2$ . Bei Teilchen sehr hoher Energie d. h.  $E \gg m$  vereinfacht sich die Beziehung zum relativistischen Grenzfall  $E \approx p$ . Bei Elektronen lässt sich diese Beziehung also auf Grund der geringen Masse häufig nutzen, bei den masselosen

Photonen in jedem Fall. Im Z-Pfad dagegen verwendet man die Energie-Impulsbeziehung, um die invariante Masse des Zerfallsprozesses und damit die Masse des Higgs-Bosons aus den Impulsen seiner Zerfallsprodukte zu berechnen.

#### 4.6. DAS EVENT DISPLAY MINERVA

Im Event Display werden die Signale der diversen Detektorkomponenten von ATLAS für ein Ereignis grafisch dargestellt. Ein Event Display von ATLAS ist ATLANTIS, während der Masterclasses verwenden Jugendliche im W-Pfad die leicht abgewandelte Version MINERVA (*Masterclass INvolving Event Recognition Visualised with Atlantis*). Da bei der Analyse der Ergebnisse der Jugendlichen in Kapitel 5 immer wieder auf Probleme in diesem Event Display verwiesen wird, folgt bereits hier eine ausführliche Beschreibung von MINERVA.

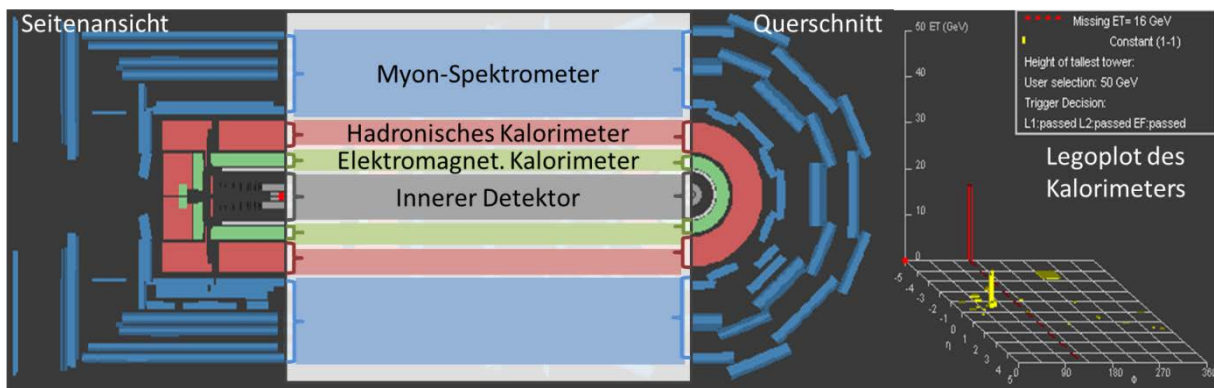


Abbildung 18 - Ansichten des ATLAS-Detektors im MINERVA Event Display

Das Event Display besteht aus drei Detektoransichten (Abbildung 18): Die Querschnittsansicht zeigt die Transversalebene, in der auch der fehlende transversale Impuls als rotgestrichelte Linie angezeigt wird. In der Querschnittsansicht wird nur ein Teil der Spuren angezeigt: Fliegt ein Teilchen eher in Vorwärtsrichtung des Detektors, wird es nur in der Seitenansicht dargestellt. Die Seitenansicht zeigt einen Längsschnitt durch den Detektor, durch Gedrückthalten der R-Taste der Tastatur im ZOOM-Modus lässt sich die projizierte Fläche um die z-Achse drehen. Wie auch in der Querschnittsansicht werden Spuren und Energieeinträge in den Kalorimetern z. T. farblich kodiert angezeigt. Die Energie der Teilchen ist schon über die Farbe der Spuren einschätzbar: Rote und orangefarbene Spuren deuten auf Spuren mit großem Transversalimpuls hin und sind daher für die Messaufgaben während der Masterclasses von besonderem Interesse. Klickt man auf eine Spur, werden weitere Informationen angezeigt, u. a. der genaue Transversalimpuls, die Koordinaten  $\eta$  und  $\Phi$ , die Impulskomponenten  $p_x, p_y, p_z$  sowie die Ladung des Teilchens, die aus der Art der Krümmung bestimmt wird. Klickt man nacheinander zwei Spuren an, während man die P-Taste der Tastatur gedrückt hält, wird zusätzlich der Winkel  $\Delta\Phi$  zwischen den Spuren in der Transversalebene ausgegeben sowie der Abstand  $\Delta R$ .

Ein wichtiges und von den Jugendlichen oft vernachlässigtes Hilfsmittel (siehe dazu Kapitel 5) ist das Energiehistogramm, das in Form eines Legoplots die Energieeinträge im Kalorimeter über den Bereich  $0 < \Phi < 360^\circ$ ,  $-5 < \eta < +5$  anzeigt, das heißt die Fläche des Histogramms entspricht der abgerollten Detektoroberfläche. Nur wenn einem z. B. negativ geladenen Teilchen ein deutlicher Energieeintrag im Histogramm des Kalorimeters zugeordnet werden kann und es im elektromagnetischen Kalorimeter gestoppt wird, handelt es sich um ein Elektron.

Jedes Teilchen hinterlässt beim Durchqueren der Detektorkomponenten eine charakteristische Signatur, die in Tabelle 1 für einige ausgewählte Objekte dargestellt ist. Während der Internationalen Masterclasses ist es Ziel von Übung 1 [30], einzelne Teilchen anhand ihrer Signaturen zu identifizieren um im weiteren Verlauf ganze Ereignisse richtig zu interpretieren.

Tabelle 1 - Charakteristische Signaturen verschiedener Teilchen im ATLAS-Detektor

Objekt	Innerer Detektor	Elektromagnet. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myon-Spektrometer	Objekt in der Querschnittsansicht des Event Displays
<b>Neutrino bzw. Antineutrino</b>	Keine Wechselwirkungen mit den Detektoren, rot gestrichelte Linie als fehlender transversaler Impuls				
<b>Photon</b>	-	deutlicher Energieeintrag	-	-	
<b>Elektron bzw. Positron</b>	Spur	deutlicher Energieeintrag	-	-	
<b>Myon bzw. Antimyon</b>	Spur	Geringer Energieeintrag	geringer Energieeintrag	Spur	
<b>Proton</b>	Spur	geringer bzw. kein Eintrag	Energieeintrag	-	
<b>Neutron</b>	-	-	Energieeintrag	-	
<b>Jet</b>	Bündel an Spuren	viele (kleinere) Einträge, fächerartig	viele (kleinere) Einträge, fächerartig	evtl. Spur eines Myon aus Jet	

Beherrschen die Teilnehmer der Masterclasses das Identifizieren von Teilchen, folgt eine Übung zur Identifikation von Ereignissen anhand vorgegebener Suchkriterien (siehe dazu Kapitel 4.7). Wichtig sind vor allem Ereignisse, die auf den leptonenischen Zerfall eines W-Bosons hindeuten und damit ein Lepton (Elektron oder Myon<sup>5</sup>) enthalten sowie einen großen fehlenden Transversalimpuls, der auf ein Neutrino schließen lässt. Ein mögliches Event Display zu einem solchen Ereignis zeigt Abbildung 19.

Bei der Higgs-Suche halten die Jugendlichen Ausschau nach Ereignissen, die sich als Zerfall zweier unterschiedlich geladener W-Bosonen aus demselben Wechselwirkungspunkt interpre-

<sup>5</sup> Taus haben eine so kurze Lebensdauer, dass sie nicht direkt nachgewiesen werden können.

tieren lassen, also nach zwei entgegengesetzt geladenen Leptonen, die demselben Wechselwirkungspunkt zuzuordnen sind und nach einem großen fehlenden Transversalimpuls durch zwei Neutrinos. Ein Beispiel dazu zeigt Abbildung 20.

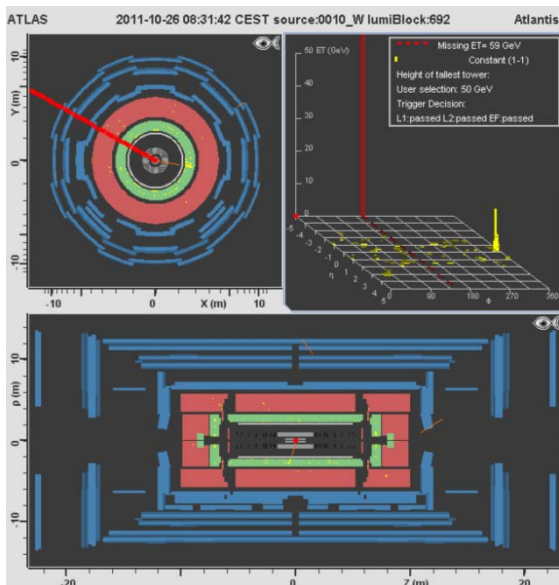


Abbildung 19 - Event Display zu einem möglichem W-Ereignis, Spuren mit einem Transversalimpuls  $< 15 \text{ GeV}$  wurden ausgeblendet

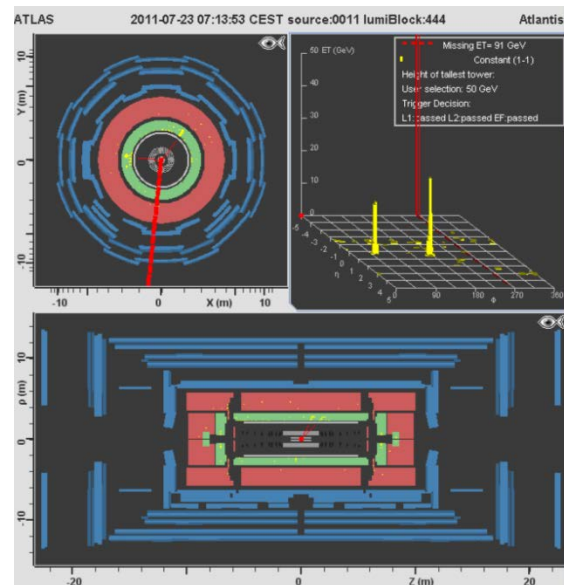


Abbildung 20 - Event Display zu einem möglichem WW-Ereignis, Spuren mit einem Transversalimpuls  $< 10 \text{ GeV}$  wurden ausgeblendet

Die Auswertung der Ergebnisse der Jugendlichen bei den Internationalen Masterclasses 2013 hat gezeigt, dass der sichere Umgang mit dem Event Display ausschlaggebend ist für den Erfolg der Messung (siehe dazu Kapitel 5).

## 4.7. DATENSELEKTION

Grundlage jeder physikalischen Analyse von ATLAS-Daten ist das Festlegen sinnvoller Suchkriterien, nach denen ein Computeralgorithmus über die Daten läuft. Analog dazu suchen die Jugendlichen während der Masterclasses per Auge anhand derselben Kriterien. In diesem Abschnitt werden daher die den verwendeten Daten zugrunde liegenden Selektionskriterien aufgelistet.

### 4.7.1. W- UND UNTERGRUND-SELEKTION

In ihrer Besonderen Lernleistung (BeLL) hat sich Julia Eckert 2011 mit der Selektion der W-Kandidaten beschäftigt [36]. Sie wendete dabei die zuvor durch Rene Schulz an simulierten Daten getesteten Kriterien [37] auf etwa  $1 \text{ pb}^{-1}$  reale Daten (aufgenommen vom ATLAS-Detektor 2010 in Periode E) an und variierte die Kriterien so, dass die Selektion des Datensatzes in etwa mit den theoretischen Vorhersagen für den LHC  $\frac{|W \rightarrow e\nu|}{|W \rightarrow \mu\nu|} \approx 1$ ,  $\frac{|W|}{|Z|} \approx 10$  übereinstimmt,



siehe dazu [22]. Zusätzlich wurden „Untergrundereignisse“ selektiert, die für die Messung durch Jugendliche unter die WW- Kandidaten und W-Kandidaten gemischt werden.

### Auswahl an Selektionskriterien für W-Kandidaten sowie Untergrundereignisse:

- ❖ Jet-Multiplizität:  $N_{\text{Jet}} < 5$
- ❖ Elektronen (bzw. Positronen)
  - Transversalimpuls der Elektronen:  $25 \text{ GeV} < p_{\text{T Elektron}} < 70 \text{ GeV}$
  - Abstand der Elektronen zu Jets:  $\Delta R_{\text{Elektron-Jet-Achse}} > 1,2$
  - Flugrichtung der Elektronen:  $\eta_{\text{Elektron}} < 2,5$
  - Transversalimpuls der Jets:  $25 \text{ GeV} < p_{\text{T Jet}} < 75 \text{ GeV}$
  - Gütekriterium an Elektronen: *medium*<sup>6</sup>
- ❖ Myonen (bzw. Antimyonen)
  - Transversalimpuls der Myonen:  $25 \text{ GeV} < p_{\text{T Myon}}$
  - Abstand der Myonen zu Jets:  $\Delta R_{\text{Myon-Jet-Achse}} > 1,2$
  - Flugrichtung der Myonen:  $\eta_{\text{Elektron}} < 2,7$
  - Transversalimpuls der Jets:  $15 \text{ GeV} < p_{\text{T Jet}} < 75 \text{ GeV}$
- ❖ Untergrundselektion
  - Fehlender Transversalimpuls:  $28 \text{ GeV} < MET < 43 \text{ GeV}$
  - Transversalimpuls der Jets:  $38 \text{ GeV} < p_{\text{T Jet}} < 75 \text{ GeV}$

Aktuell werden für die Internationalen Masterclasses ATLAS-Daten aus dem Jahr 2011 verwendet, die W- und Untergrundselektion wurde durch Christian Rudolph am IKTP Dresden nach den gleichen Kriterien, wie eben genannt, durchgeführt.

#### 4.7.2. WW-SELEKTION

Bei den Internationalen Masterclasses 2013 wurden zum ersten Mal echte ATLAS WW-Ereignisse für die Messungen der Jugendlichen verwendet. Dazu wurden  $1,154 \text{ fb}^{-1}$  der ATLAS-Daten von 2011 bei einer Schwerpunktsenergie des LHC von  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  verwendet. Diese Daten wurden 2012 durch Constanze Hasterok selektiert [6], u. a. durch die folgenden Kriterien:

- ❖ Anzahl an Spuren im primären Vertex:  $N \geq 3$
- ❖ Transversalimpuls des ersten Leptons (*leading lepton*):  $p_{\text{T}}^{\text{lead}} > 25 \text{ GeV}$
- ❖ Transversalimpuls des zweiten Leptons (*trailing lepton*):  $p_{\text{T}}^{\text{trail}} > 15 \text{ GeV}$

---

<sup>6</sup> Es gibt verschiedene Gütekriterien, die Elektronen als *loose*, *medium* oder *tight* kennzeichnen. Ein Unterschied zwischen *medium* und *tight* ist u. a., dass für *tight electrons* die Bremsstrahlungsverluste nicht zu hoch sein dürfen, es wird ein bestimmtes Verhältnis von im Kalorimeter gemessener Energie und Transversalimpuls der Spur  $E/p$  gefordert [46].

- ❖ fehlender transversaler Impuls:
  - $MET > 50$  GeV bei Leptonen gleicher Familie
  - $MET > 25$  GeV bei Leptonen aus unterschiedlichen Familien
- ❖ Jet-Multiplizität:  $N_{\text{Jet}} \leq 1$ 
  - H0-Bin: kein Jet mit  $p_T > 25$  GeV erlaubt
  - H1-Bin: genau ein Jet mit  $p_T > 25$  GeV
- ❖ Gütekriterium an Elektronen: *tight*
- ❖ Isolationskriterium:
  - Ein Lepton gilt als isoliert, wenn die Summe über die Transversalimpulse aller Spuren in einem Kegel von  $\Delta R < 0,2$  um das Lepton weniger als 10 % des Transversalimpulses des Leptons ausmacht.

Weitere Schnitte, wie ein  $Z \rightarrow \tau\tau$  Veto wurden ausgeführt, um Untergrundprozesse zu unterdrücken, spielen aber für die Messung der Jugendlichen keine Rolle. Parallel zur Selektion echter Daten wurden auch Daten simuliert, um die Menge an zu erwartenden Untergrundprozessen abschätzen zu können und in einem Histogramm den gemessenen Daten gegenüberzustellen.

#### 4.7.3. ÜBERSICHT ÜBER AKTUELL VERWENDETE ATLAS-DATEN UND SELEKTIONSKRITERIEN

Nach der Ergebnissen der Selektion der ATLAS-Daten sollten sich unter den 6000 Ereignissen, die für die Messung in 6 Datenpaketen zu jeweils 1000 Ereignissen zur Verfügung stehen, 693 WW-Kandidaten befinden, 1770 W-Kandidaten sowie 3537 Untergrundereignisse. Dabei sind die WW-Kandidaten nicht gleichmäßig verteilt, in den Datenpaketen 1 bis 3 finden sich überdurchschnittlich viele. Hintergrund ist, dass damit „genügend Statistik“ vorhanden ist, selbst wenn sich an einem Tag weniger als 6 Gruppen an den Internationalen Masterclasses beteiligen und möglicherweise nur drei Datenpakete ausgewertet werden können. Tabelle 2 zeigt die Verteilung der WW-Kandidaten über die 6 Datenpakete, das jeweils im Datenpaket zu erwartende Verhältnis von  $W^+$ - und  $W^-$ -Bosonen und die Anzahl an 2er-Teams von Jugendlichen, die 2013 Ereignisse aus diesem Datenpaket bearbeitet haben.

Die Zahlen in Tabelle 2 zeigen zum einen die unterschiedlichen Anzahlen an WW-Kandidaten; in Datenpaket 3 erwartet man fast dreimal so viele WW-Kandidaten wie in Datenpaket 4. Die Anzahl der pro Datenpaket bearbeiteten Teilpakete zeigt allerdings keine Häufung in den ersten drei Datenpaketen. Weiterhin variiert auch das Verhältnis der Anzahlen von  $W^+$ - und  $W^-$ -Bosonen, das für die erste Messaufgabe relevant ist.



Tabelle 2 - Verteilung der WW-Kandidaten über die 6 verwendeten Datenpakete, Verhältnis von  $W^+$  zu  $W^-$  Bosonen in den einzelnen Paketen und Anzahl an bearbeiteten Teilpaketen

Datenpaket	Anzahl WW-Ereignisse	$R_{\pm} = \frac{ W^+ }{ W^- }$	Anzahl an Schülergruppen, die 2013 Teilpakete aus diesem Datenpaket bearbeitet haben
1	138	1,24	127
2	179	1,72	109
3	165	1,51	82
4	64	1,39	102
5	71	1,34	88
6	76	- <sup>7</sup>	121
<b>Mittelwert</b>	115,5	1,46	105

Für die Jugendlichen wurden die Selektionskriterien für die beiden Messaufgaben in einem Flussdiagramm zusammengestellt (Abbildung 21), sie entsprechen den von der ATLAS Kollaboration verwendeten Werten in [22] und [38].

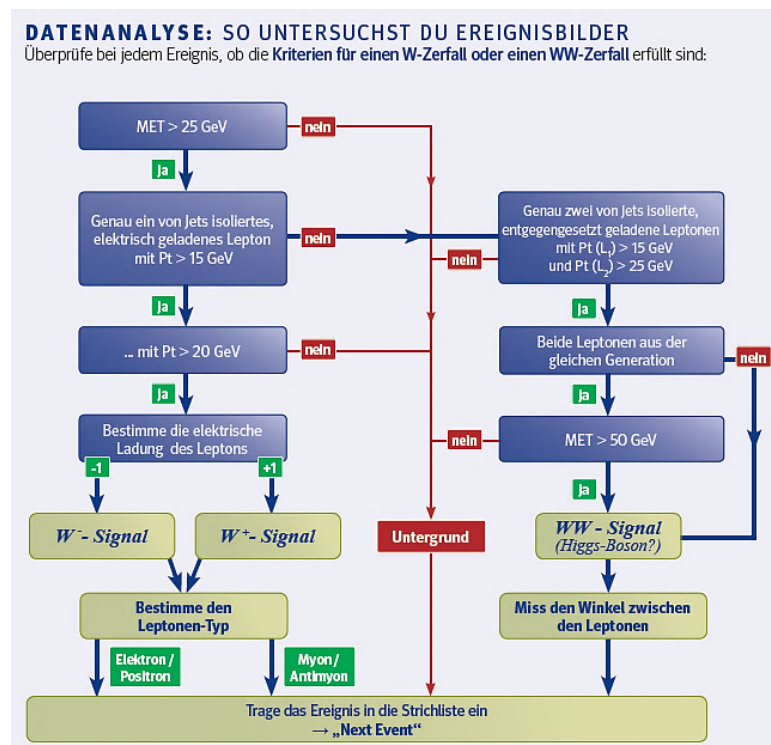


Abbildung 21 - Flussdiagramm zur Datenanalyse im  $W$ -Pfad inklusive der aktuellen Selektionskriterien (aus [39])

<sup>7</sup> Datenpaket 6 wurde noch nicht vollständig analysiert.

## 5. DATENANALYSE

---

Während der Internationalen Masterclasses 2013 wurden 439 Teildatenpakete mit jeweils 50 Ereignissen durch Jugendliche bearbeitet. Während einer Messung führen die Jugendlichen eine Strichliste ähnlich der in Abbildung 22 mit den jeweils gefundenen Ereignissen zu W-Kandidaten (Signal 1) und unterscheiden dort Zerfälle in Positronen, Elektronen, Antimyonen und Myonen. Für die zweite Messaufgabe, die Higgs-Suche (Signal 2), werden sowohl die Ereignisnummern notiert, als auch der Winkel  $\Delta\Phi_{ll}$  zwischen den geladenen Leptonen in der Transversalebene. Sonstige Ereignisse werden dem Untergrund zugeordnet. Die Ergebnisse der Teams werden zusammengetragen und in einer Online-Tabelle [30] erfasst, um sie mit den Ergebnissen der Gruppen an anderen Instituten zu kombinieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Eintragungen der Online-Tabelle analysiert und dabei vor allem die eingetragenen Ereignisnummern der Higgs-Suche mit den zu erwartenden Ereignisnummern abgeglichen. Zusätzlich wird aus der Messaufgabe zur Struktur des Protons das jeweils pro Gruppe gemessene Verhältnis  $R_{\pm} = \frac{|W^+|}{|W^-|}$  betrachtet.

Signal 1				Signal 2		Back-ground	Comment
$W \rightarrow \nu + \dots$		$W \rightarrow \nu + \dots$		$WW \rightarrow l\nu l\nu$	for WW: $\Delta\Phi_{ll}$		
$e^+$	$e^-$	$\mu^+$	$\mu^-$				

*Abbildung 22 – Kopfzeile einer Strichliste für die Messaufgaben im W-Pfad der Masterclasses*

Im diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Analyse für beide Messaufgaben getrennt vorgestellt. Um die Leistungen der Jugendlichen einordnen zu können, wurden jeweils 50 Ereignisse auch von 9 Doktoranden, Diplomanden bzw. Praktikanten des Instituts für Kern- und Teilchenphysik Dresden vermessen, alle Beteiligten hatten sich zuvor intensiv mit dem W-Pfad auseinandergesetzt z. B. während der Zeit als Tutor bei den Internationalen Masterclasses. Auch die Ergebnisse dieser „Experten“ werden vorgestellt. Den Abschluss bildet die Zusammenfassung der Datenanalyse und erste Folgerungen für zukünftige Masterclasses.

### 5.1. HIGGS-SUCHE

---

Bei der Higgs-Suche versuchen die Jugendlichen, mögliche Higgs-Bosonen über den Zerfallskanal  $H \rightarrow WW \rightarrow l^+ \nu l^- \bar{\nu}$  anhand zweier entgegengesetzt geladener Leptonen, die die in Kapitel 4.7.3 abgebildeten Selektionskriterien erfüllen, zu erkennen.

Vergleicht man die Ereignisse, die die Jugendlichen während der Internationalen Masterclasses in die Online-Tabelle eingetragen haben mit den Ereignissen, die durch die Selektion als WW-Kandidaten klassifiziert wurden, zeigt sich, dass die Schüler im Schnitt weniger als die Hälfte der computerselektierten WW-Kandidaten auch mit dem Auge als solche erkennen (Abbildung 23). Zusätzlich sieht man, dass die Trefferquote sehr stark zwischen den Gruppen variiert: Während

ein Viertel der Gruppen nur 4 % bis 32 % der WW-Kandidaten identifiziert, finden die Gruppen im oberen Viertel, zu denen auch die in Dresden und am CERN durchgeführten Messungen gehören, zwischen 60 % und 76 % der WW-Kandidaten. Dieser Befund deutet darauf hin, dass die Organisation und Durchführung der Masterclasses eine wichtige Rolle spielen könnten, wenn man davon ausgeht, dass die Jugendlichen im Allgemeinen ohne Vorwissen teilnehmen.

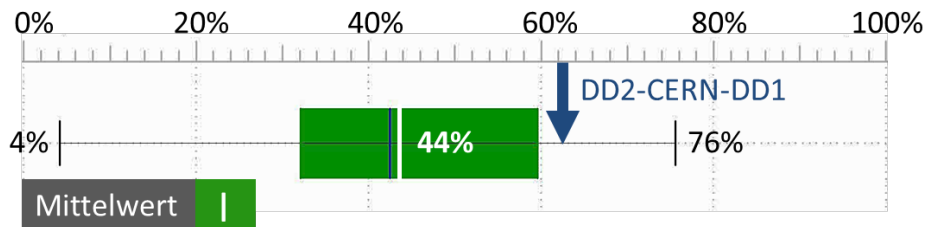


Abbildung 23 - Boxplot: Trefferquote der Jugendlichen für WW-Kandidaten gemittelt über eine Gruppe bzw. Institut, weiß: Mittelwert über alle Gruppen, durch Pfeil markiert: Trefferquote für die Gruppen aus Dresden (DD1&2) sowie CERN mit nahezu identischer Trefferquote

Eine Trefferquote von 100 % ist sicherlich nicht erreichbar oder anstrebenenswert, dennoch ist eine zu niedrige Trefferquote bedenklich: Zum einen zeigt sie, dass die Jugendlichen nicht vollständig verstanden haben, wie die Messaufgaben zu lösen sind. Zum anderen erschwert eine deutlich von der Selektion bzw. Simulation abweichende Messung die Interpretation der Ergebnisse: Das Histogramm über die Winkelverteilung der Leptonen muss entsprechend normiert werden, damit eine Abweichung vom zu erwartenden Untergrund sichtbar wird, mit geringerer Statistik wird auch das Ergebnis weniger deutlich. Nicht zuletzt muss man berücksichtigen, dass die Ereignisse, die nicht als WW-Kandidaten erkannt werden, zu einem gewissen Prozentsatz in die erste Messaufgabe zur Struktur des Protons eingehen und dort das Verhältnis  $R_{\pm} = \frac{|w^+|}{|w^-|}$  verfälschen (siehe Kapitel 5.2.2).

### 5.1.1. PROBLEME BEI DER WW-IDENTIFIKATION

Um herauszufinden, warum im Schnitt nur weniger als die Hälfte der WW-Kandidaten durch die Jugendlichen erkannt werden, wurden alle von mindestens zwei Teams<sup>8</sup> nicht erkannten WW-Kandidaten aufgelistet (621 Ereignisse) und nach deren Schwierigkeitsgrad sortiert: Dabei bedeutet ein Schwierigkeitsgrad von 1, dass 100 % der Jugendlichen, die dieses Ereignis bearbeitet haben, dieses nicht als WW-Kandidat identifiziert haben. Analog wurden Ereignisse mit Schwierigkeitsgrad 0 durch alle Jugendlichen erkannt. Dabei werden 316 Ereignisse als leicht erkennbar klassifiziert, d. h. mehr als die Hälfte der Teams konnte diese Ereignisse als WW-Kandidaten identifizieren, 134 als mittelschwer und 171 als schwer zu erkennen. Die letzte Kategorie setzt sich aus Ereignissen zusammen, die höchstens 20 % der Jugendlichen als WW-Kandidaten identifiziert haben.

<sup>8</sup> Ein Team entspricht einem Computerarbeitsplatz also in der Regel zwei Jugendlichen.

Alle Ereignisse mit einem Schwierigkeitsgrad größer als 0,5 wurden durch die Darstellung im Event Display MINERVA auf Stolpersteine untersucht, also Eigenschaften eines Ereignisses, die dessen Schwierigkeitsgrad beeinflussen. Dabei fiel auf, dass bei der Ereignisauswahl von 621 Ereignissen 130 der WW-Kandidaten von keinem einzigem Team gefunden wurden und 59 dieser Ereignisse als „nicht erkennbar“ eingestuft werden müssen, da die geforderten Grenzwerte<sup>9</sup> an Transversalimpuls bzw. fehlenden Transversalimpuls unterschritten wurden. Die nicht erkennbaren Ereignisse wurden zunächst für die weitere Analyse aussortiert und werden gesondert in Kapitel 5.1.3 diskutiert. Übrig bleiben 109 schwere sowie 117 mittelschwere Ereignisse (Tabelle 3).

*Tabelle 3 – Einteilung der WW-Kandidaten bei einer Auswahl von 621 Ereignissen, die von mindestens zwei 2er-Teams bearbeitet wurden, nach deren Schwierigkeitsgrad*

<b>Schwierigkeitsgrad SG</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Anzahl der Ereignisse</b>
$0,8 \leq SG \leq 1$ (aber erkennbar)	schwer	109
$0,5 < SG < 0,8$	mittelschwer	117
$SG \leq 0,5$	leicht	316
$SG = 1$ und nicht erkennbar	aussortiert	59

Die möglichen Ursachen, warum manche Ereignisse so selten richtig eingeschätzt wurden, lassen sich in 4 Kategorien einordnen, typische Events Displays zu der jeweiligen Ereigniskategorie sind im Anhang 8.1 dargestellt. Da die typischen Fehler etwa in gleichen Anteilen sowohl bei den schweren als auch bei den mittelschweren Ereignissen auftreten, wurden diese Gruppen von Ereignissen zusammengefasst.

- a) Bei 27 % der schweren und mittelschweren Ereignisse waren die Spur eines Leptons oder beider Leptonen in der Querschnittsansicht nicht zu sehen, da sie den ATLAS-Detektor nahe der Strahlachse durchquert haben. Diese Spuren lassen sich dennoch mit Hilfe der Seitenansicht und der Kalorimereinträge Teilchen zuordnen. Der Blick vieler Jugendlicher könnte aber möglicherweise zu sehr auf die Querschnittsansicht fokussiert sein und dabei den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Ansichten außer Acht lassen.
- b) Bei 253 der 693 vorselektierten WW-Kandidaten<sup>10</sup> treten mehr als zwei Spuren mit einem Transversalimpuls  $p_T > 10$  GeV auf. Nur mit Hilfe der Tools des Event Displays wie z. B. der Zoom-Funktion kann man in 140 dieser 253 Fälle erkennen, dass nur zwei Spuren tatsächlich demselben Wechselwirkungspunkt (Vertex) entstammen. Bei 24 % der schweren und mittelschweren Ereignisse lag eine solche Situation vor, bei der die Jugendlichen möglicher-

<sup>9</sup> siehe dazu Kapitel 4.7.2

<sup>10</sup> Um Aussagen über die Gesamtheit der WW-Kandidaten treffen zu können, wurden alle 693 Ereignisse im Event Display analysiert.

weise zu schnell und ohne hineinzuzoomen ein solches Ereignis als Untergrund erfasst haben.

- c) Nicht in allen Fällen lässt sich die Zahl der relevanten Spuren durch die Herkunft aus einem Vertex reduzieren. Bei 95 der 253 WW-Kandidaten mit mehr als 2 relevanten Spuren kann man nur durch Überprüfen der Isolation einige Spuren ausschließen, da sie z. B. innerhalb eines Jets liegen. 19 % der schweren und mittelschweren Ereignisse wiesen eine solche Problematik auf. Da bei den Masterclasses zurzeit kein einheitliches Kriterium für die Isolation eines Leptons verwendet wird, sondern Isolation per Augenmaß abgeschätzt wird, ist es sehr wahrscheinlich, dass hier ein Stolperstein für Jugendliche liegen könnte. Besonders problematisch ist die Arbeit mit Cuts auf den Transversalimpuls der Spuren, die im Event Display allgemein für alle Ereignisse eingestellt werden können, so dass niederenergetische Spuren ausgeblendet werden: Zwar vereinfacht sich so eine Teilchenkollision erheblich, allerdings kann man Jets dann nur noch anhand der Kalorimeter-Signatur erkennen, das charakteristische Bündel an Spuren wird nicht mehr angezeigt. Nur wenn sich die Jugendlichen Zeit nehmen, jedes Ereignis auch ohne Cuts zu betrachten, können sie Jets mit hoher Wahrscheinlichkeit erkennen und Leptonen aus Jets verwerfen.
- d) Myonen hinterlassen kaum Energie in den Kalorimetern, sondern lassen sich nur durch Spuren im Myonspektrometer nachweisen. In 10 % der schweren und mittelschweren Ereignisse handelt es sich um Kandidaten für den Zerfall von zwei W-Bosonen in Myon und Antimyon. Solche Ereignisse zeigen keine sichtbaren gelben Balken im Energiehistogramm der Kalorimeter, was für Jugendliche möglicherweise auf den ersten Blick ausreicht, um solche Ereignisse als Untergrund zu betrachten. Außerdem befindet sich das Myonspektrometer im äußeren Bereich von ATLAS, zoomt man zum Ursprungsort einer Spur, wird das Myonspektrometer gar nicht oder nicht mehr vollständig in den Ansichten des Event Display angezeigt und damit auch Spuren von Myonen ausgeblendet.

Alle bisher genannten Fehlerquellen lassen sich umgehen, wenn die Jugendlichen bereits vor der Messung ausreichend im Umgang mit dem Event Display geschult werden und typische Probleme thematisiert werden. In einem Fünftel der Problemereignisse ließ sich allerdings keine offensichtliche Fehlerquelle zuordnen.

### 5.1.2. HERKUNFT DER PROBLEMEREIGNISSE

Für die Vorselektion der WW-Kandidaten wurden nur Ereignisse zugelassen, in denen kein Jet oder höchstens ein Jet mit einem Transversalimpuls  $p_T > 25$  GeV auftritt. Nach der Anzahl der Jets unterscheidet man die Daten in zwei Gruppen: Zum H0-Bin gehören die 381 Ereignisse ohne Jet, im H1-Bin sind die übrigen 312 Ereignisse mit genau einem Jet. Ereignisse mit Jets stellen prinzipiell eine größere Herausforderung dar: Es gibt viele z. T. hochenergetische Spuren und

große Einträge in den Kalorimetern. Die Herausforderung bei den Messaufgaben besteht darin, alle zu einem Jet gehörenden Spuren durch Kriterien der Isolation auszuschließen. Daher könnte man vermuten, dass die Ereignisse, bei denen die Mehrzahl der Jugendlichen Schwierigkeiten hatte, vor allem aus dem H1-Bin stammen. Abbildung 24 zeigt die Verteilung der Ereignisse anhand des Schwierigkeitsgrades insgesamt sowie innerhalb der zwei Bins.

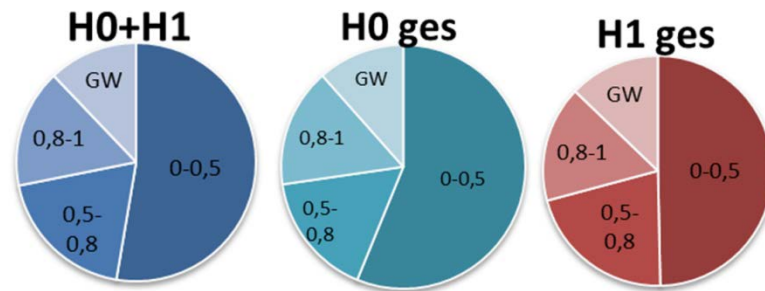


Abbildung 24 - Verteilung des Schwierigkeitsgrades<sup>11</sup> der WW-Kandidaten insgesamt (links), innerhalb des H0-Bins (mitte) und innerhalb des H1-Bins (rechts), der mit GW beschriftete Anteil kennzeichnet die Ereignisse, die die geforderten Grenzwerte unterschreiten

Tatsächlich hatten die Jugendlichen mit Jet-Ereignissen etwas mehr Probleme während Ereignisse ohne Jet etwas zuverlässiger identifiziert wurden. Die Unterschiede sind allerdings nicht so gravierend, als das man in Zukunft nur noch Ereignisse ohne Jets für die Messung zur Verfügung stellen sollte, um die Trefferquote der Jugendlichen zu erhöhen.

Zusätzlich zur Einteilung nach der Jet-Multiplizität kann man die Gruppierung der Daten durch das Triggersystem in verschiedene Streams aufgreifen (siehe Kapitel 4.2): Je nachdem, ob ein Ereignis vielversprechende Myonen oder Elektronen (bzw. Photonen) enthält, wird es durch das Triggersystem von ATLAS dem *Muon-Stream* oder den *EGamma-Stream* zugeordnet. Abbildung 25 zeigt die Verteilung der WW-Kandidaten auf die entsprechenden Streams.

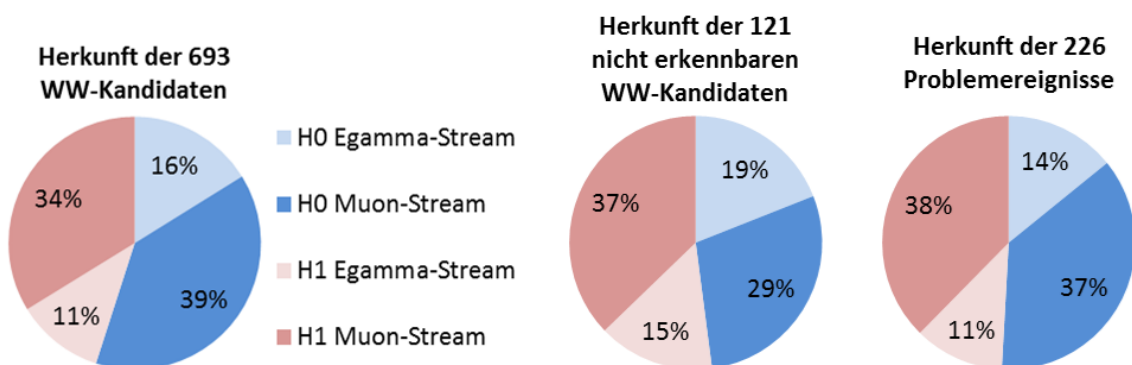


Abbildung 25 - Verteilung der Ereignisse der WW-Selektion nach Trigger-Streams und Jet-Multiplizitäts-Bins

<sup>11</sup> 0 – 0,5: leicht 0,5 – 0,8: mittel 0,8 – 1: schwer zu identifizieren GW: Grenzwerte unterschritten

Ein Großteil der 693 WW-Kandidaten zeigt keinen Jet, der *Muon-Stream* ist insgesamt stärker vertreten als der *EGamma-Stream*. Die gleiche Verteilung für alle nicht erkennbaren Ereignisse zeigt ein etwas anderes Bild: Die Mehrzahl der nicht erkennbaren Ereignisse sind Ereignisse mit Jet, im Vergleich zur Gesamtverteilung ist der Anteil des *EGamma-Streams* bei den nicht erkennbaren Ereignissen etwas höher, was vermutlich mit den Bremsstrahlungsverlusten der Elektronen bzw. Positronen zu erklären ist (siehe Kapitel 5.1.3). Die mittelschwer- und schwererkennbaren Ereignisse enthalten etwa zu gleichen Teilen keinen Jet bzw. genau einen Jet, verglichen mit der Gesamtverteilung sind Ereignisse mit Jets wie bereits in Abbildung 24 gezeigt etwas herausfordernder für Jugendliche. Sonst ähnelt die Verteilung der Problemereignisse der Gesamtverteilung und zeigt keine Häufung in einer der Kategorien.

### 5.1.3. UNTERSCHREITEN DER NÖTIGEN GRENZWERTE

Beim Analysieren der Situationen, die Jugendlichen die Suche nach WW-Kandidaten erschweren, fiel auf, dass manche Ereignisse laut Vorselektion alle Bedingungen erfüllen, die Messung im Event Display aber zeigt, dass z. B. der Transversalimpuls unter den geforderten Werten liegt. Infolgedessen wurden alle 693 WW-Kandidaten im Event Display in Bezug auf Transversalimpuls der Leptonen bzw. fehlenden Transversalimpuls, Winkel zwischen den Leptonen in der Transversalebene und Anzahl der Spuren mit einem Transversalimpuls  $p_T > 10 \text{ GeV}$  analysiert.

Tabelle 4 - Cutflow der Ereignisse der WW-Selektion bei einer Auswertung im Event Display MINERVA nach bisherigen Selektionskriterien

Cut	<i>ee, mm – Kanal</i>	<i>em – Kanal</i>	Gesamt
			693
$l^+l^-$ ( <i>genau 2 Leptonen</i> )	<b>227</b>	<b>442</b>	<b>669</b>
$MET > 50 \text{ GeV}$ bzw. $25 \text{ GeV}$	200	431	631
$p_T^{\text{lead}} > 25 \text{ GeV}$			606
$p_T^{\text{trail}} > 15 \text{ GeV}$			<b>572</b>

Die Zahlen in Tabelle 4 zeigen, dass bei 24 Ereignissen mehr oder weniger als zwei entgegengesetzt geladene (isolierte) Leptonen einem gemeinsamen Wechselwirkungspunkt entstammen. Es verbleiben 669 Ereignisse, dabei handelt es sich um 227 Ereignisse mit Elektron-Positron- bzw. Myon-Antimyon-Paare (*ee*- und *mm*-Kanal) sowie 442 Ereignisse mit Leptonen aus unterschiedlichen Familien (*em*-Kanal). Überprüft man die verbleibenden WW-Kandidaten auf den fehlenden Transversalimpuls, müssen weitere 38 Ereignisse aussortiert werden. Als letzter Schritt werden die Kriterien bezüglich des Transversalimpulses der Leptonen angewandt, womit nur noch 572 von ursprünglich 693 vorselektierten WW-Kandidaten auch im Event Display die

vorgegebenen Selektionskriterien erfüllen. 121 WW-Kandidaten können daher mit den bisherigen Kriterien durch Jugendliche nicht als solche erkannt werden.

Die Gründe für das Unterschreiten der Grenzwerte liegen in den verwendeten Datenformaten für Selektion und Event Display. Wie in Kap. 4.3 beschrieben, wird die physikalische Analyse mit physikalischen Objekten auf dem Datenformat DPD durchgeführt, während das Event Display auf ESD basierend nur Spuren und Kalorimereinträge ohne eine Rekonstruktion von Objekten zeigt. Dies führt zu nicht zu vernachlässigenden Unterschieden in den Spur-Charakteristika: Erst bei der Rekonstruktion der Elektronen bzw. Positronen werden Bremsstrahlungsverluste durch Hinzunahme der Kalorimereinträge berücksichtigt. Das bedeutet, dass der in MINERVA angezeigte Transversalimpuls einer Spur systematisch den Transversalimpuls eines Elektrons bzw. Positrons unterschätzt. Ein Einblick, wie stark die Effekte durch Bremsstrahlungsverluste sind, gibt das Gütekriterium für Elektronen: Für die WW-Selektion wurden ausschließlich Elektronen mit dem Gütekriterium *tight* verwendet (siehe Kapitel 4.7.2). Typische Grenzwerte für den Quotienten aus im Kalorimeter deponierter Energie und an der Spur gemessenen Transversalimpuls sind für diese Objekte  $0,7 < E/p < 5$  [40], d. h. im Extremfall unterschätzen die Jugendlichen im Event Display den Transversalimpuls eines Elektrons um 80 %, da das Elektron Bremsstrahlungsphotonen emittiert, während es sich im Magnetfeld des Solenoidmagneten bewegt. Dabei erwartet man für Elektronen ohne Bremsstrahlungsverluste aufgrund der geringen Masse einen Quotienten  $E/p \approx 1$ .

Bei Myonen spielt Bremsstrahlung durch die größere Masse der Teilchen keine große Rolle, allerdings treten hier andere Effekte auf: *Combined-Muon* Algorithmen zur Rekonstruktion von Myonen gehen von der Impulsmessung im Myonspektrometer aus und extrapolieren die dortige Spur zum inneren Detektor. Dabei werden Energieeinträge im Kalorimeter berücksichtigt und ein zu erwartender Spur-Transversalimpuls (*Track-PT*) für den inneren Detektor berechnet. Die Informationen aus dem Myonspektrometer werden mit Informationen aus dem inneren Detektor kombiniert, dabei wird je nach Energiebereich der Myonen und Auflösung der Spur der im inneren Detektor gemessene Wert für den Transversalimpuls oder der berechnete Wert aus der Extrapolation höher gewichtet und der Transversalimpuls des Myons (Muon PT) berechnet.<sup>12</sup> In Abbildung 26 ist der Quotient beider Transversalimpulse über dem Transversalimpuls aus dem inneren Detektor für etwa 100 Myonen aufgetragen. Vor allem bei Myonen mit einem Transversalimpuls  $p_T < 40$  GeV liegen die Messwerte des inneren Detektors deutlich unter den berechneten Transversalimpulsen der rekonstruierten Myonen, hier wird scheinbar die Messung des Myonspektrometers höher gewichtet.

---

<sup>12</sup> An dieser Stelle sei Christian Ruldolph (IKTP Dresden) für sein Expertenwissen zur Myonrekonstruktion gedankt.



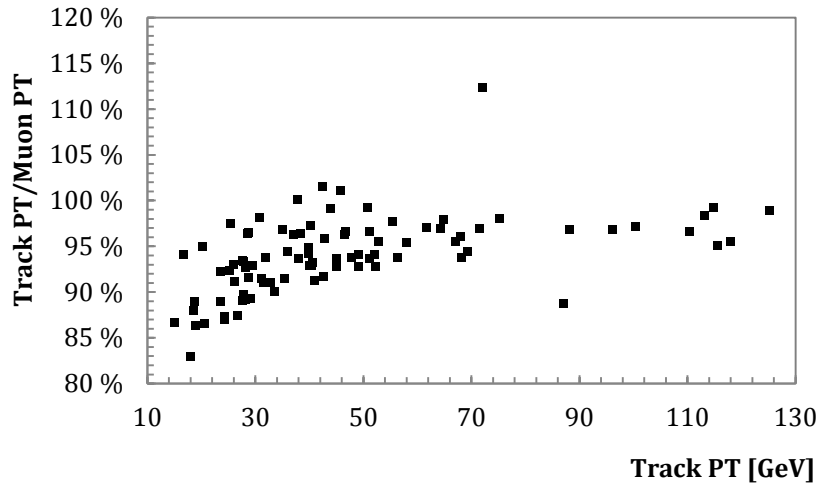


Abbildung 26 - Vergleich der Messung des Transversalimpulses im inneren Detektors (Track PT) und des Transversalimpulses des rekonstruierten Myons (Muon PT)

Ein unter- oder überschätzter Transversalimpuls hat dabei auch Auswirkung auf die Berechnung des fehlenden Transversalimpulses, was dessen Abweichung zu den Selektionskriterien erklärt.

#### 5.1.4. ÄNDERUNG DER SELEKTIONSKRITERIEN FÜR MINERVA

Wegen der systematischen Unterschätzung der Transversalimpulse innerhalb des Event Displays MINERVA erscheint es zweckmäßig, die Kriterien der Selektion für die Messung während der Masterclasses anzupassen. Verringert man die Anforderungen an Transversalimpuls und fehlenden Transversalimpuls gemäß den Werten in Tabelle 5, werden statt 121 nur noch 48 der vorselektierten WW-Kandidaten bei einer Analyse in MINERVA ausgeschlossen.

Tabelle 5 - Cutflow der Ereignisse der WW-Selektion bei einer Auswertung im Event Display MINERVA nach bisherigen Selektionskriterien und reduzierten Grenzwerten

	Cut	<i>ee, mm – Kanal</i>	<i>em – Kanal</i>	Gesamt
				693
	$l^+l^-$ (genau 2 Leptonen)	227	442	669
<b>bisher</b>	$MET > 50 \text{ GeV}$ bzw. $25 \text{ GeV}$	200	431	631
	$p_T^{\text{lead}} > 25 \text{ GeV}$			606
	$p_T^{\text{trail}} > 15 \text{ GeV}$			<b>572</b>
<b>neu</b>	$MET > 40 \text{ GeV}$ bzw. $20 \text{ GeV}$	219	438	657
	$p_T^{\text{lead}} > 20 \text{ GeV}$			651
	$p_T^{\text{trail}} > 10 \text{ GeV}$			<b>645</b>

### 5.1.5. KORRIGIERTE TREFFERQUOTE

Für die bereits erfolgte Messung während der Internationalen Masterclasses 2013 können die Selektionskriterien rückwirkend nicht mehr geändert werden. Daher wurden alle 121 WW-Kandidaten, die die geforderten bisherigen Grenzwerte nicht erfüllen von den zu erwartenden 693 Ereignissen aussortiert und die Trefferquote der Jugendlichen diesbezüglich korrigiert. Im Mittel werden nach dieser Korrektur etwa 54 % der WW-Kandidaten durch die Jugendlichen richtig erfasst. Die Spannweite der Trefferquote der teilnehmenden Gruppen bleibt sehr groß, selbst wenn man die um nicht auffindbare WW-Kandidaten korrigierte Trefferquote verwendet (Abbildung 27).

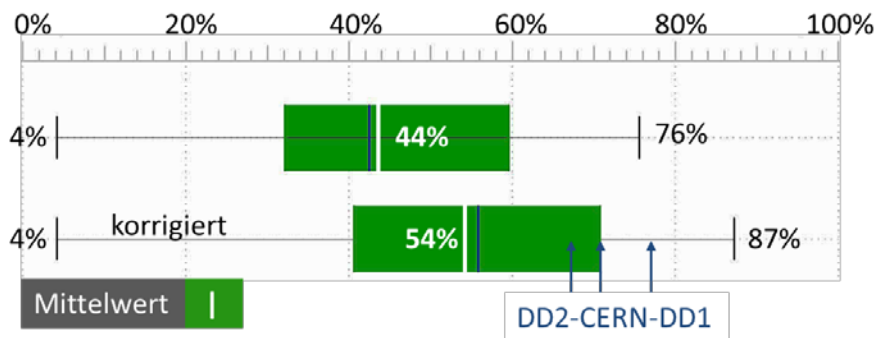


Abbildung 27 - Boxplot: Trefferquote bisher sowie korrigierte Trefferquote über alle Gruppen, durch Pfeile markiert: Gruppen aus Dresden (DD1&2) sowie CERN

### 5.1.6. ZUSAMMENHANG ZWISCHEN TREFFERQUOTE UND DATENPAKET

Eine mögliche Erklärung für die große Spannweite der Ergebnisse könnte in den Datenpaketen liegen, vielleicht enthalten einige Datenpakete besonders leichte oder schwer zu erkennende WW-Kandidaten. Daher wurden die mittleren Trefferquoten für jedes Datenpaket bestimmt und damit eine Rangfolge der Datenpakete bestimmt (Abbildung 28).

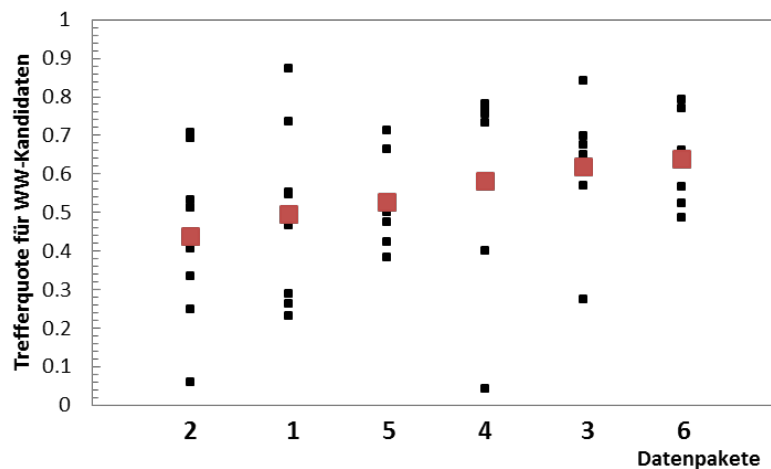


Abbildung 28 - Rangfolge der Datenpakete nach mittlerer Trefferquote für WW-Kandidaten (rot) sowie Ergebnisse für die Trefferquoten der Gruppen, die das jeweilige Paket bearbeitet haben

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen bearbeitetem Datenpaket und Trefferquote einer Gruppe besteht allerdings nicht, die Varianzen innerhalb eines Datenpaketes sind deutlich größer als die zwischen den Datenpaketen. Dennoch liegt die mittlere Trefferquote im Datenpaket 6 fast 50 % höher als die in Datenpaket 2. Das könnte bedeuten, dass im Datenpaket 2 dennoch mehr schwer zu erkennende Ereignisse liegen als im Datenpaket 6.

Der in diesem Kapitel definierte Schwierigkeitsgrad definiert sich darüber, wie oft ein WW-Kandidat als solcher identifiziert wurde und korreliert daher per Definition mit der Trefferquote für WW-Kandidaten. Ein objektives Kriterium für den Schwierigkeitsgrad eines Ereignisses ist aber schwer zu definieren, ein Zusammenhang zwischen Jet-Multiplizitäts-Bin und mittlerer Trefferquote innerhalb eines Datenpaketes besteht nicht. Auch die Anzahl der in einem Datenpaket vorhandenen Ereignisse mit mehr als zwei hochenergetischen Spuren steht nicht in Zusammenhang mit der mittleren Trefferquote in diesem Datenpaket. Da zwischen der besten Trefferquote im Datenpaket 2 und der besten Trefferquote in Datenpaket kein sehr großer Unterschied besteht, kann das bearbeitete Datenpaket nicht als Ursache für eine niedrige Trefferquote gelten, vielmehr sollte man nach der Ursache für die große Spannweite der Trefferquote über die einzelnen Institute suchen.

#### 5.1.7. FÄLSCHLICHERWEISE ALS WW-KANDIDATEN IDENTIFIZIERTE EREIGNISSE

439 Teildatenpakete mit jeweils 50 Ereignissen wurden während der Internationalen Masterclasses durch Jugendliche analysiert. In 50 Ereignissen erwartet man durchschnittlich 5,8 WW-Kandidaten, wobei die Anzahl unter den Datenpaketen aus den in Kapitel 4.7.3 beschriebenen Gründen variiert und hier keine Korrektur nicht erkennbarer WW-Kandidaten eingeht. Ein Team fand bei den diesjährigen Masterclasses im Schnitt 2,5 echte WW-Kandidaten, zusätzlich wurden auch 0,8 Ereignisse, die aus der W-Selektion bzw. der Untergrundselektion (UG) stammen, fälschlicherweise als WW-Kandidaten identifiziert. Insgesamt ergibt das 367 Fälle, wobei manche Ereignisse von bis zu drei Teams falsch erkannt wurden aber dennoch gesondert gezählt werden.

Abbildung 29 zeigt mögliche Ursachen dieser Fehlentscheidungen, wobei bei manchen Ereignissen mehrere Fehlerquellen möglich sind und im Folgenden nur jeweils die wahrscheinlichste<sup>13</sup> Fehlerquelle aufgeführt wird.

---

<sup>13</sup> Besonders zwischen Jets und fehlenden Kalorimetereinträgen (Fehlerursachen 2 und 3) besteht ein großer Überlapp. Zeigte ein Ereignis mehr als 3 Spuren mit Transversalimpulsen von jeweils  $> 10$  GeV wurde „Jet“ als Fehlerursache betrachtet, obwohl in solchen Ereignissen auch isolierte Spuren auftreten, die nur ausgeschlossen werden können, weil sie keinen Eintrag im elektromagnetischen Kalorimeter oder den Myonkammern zeigen.

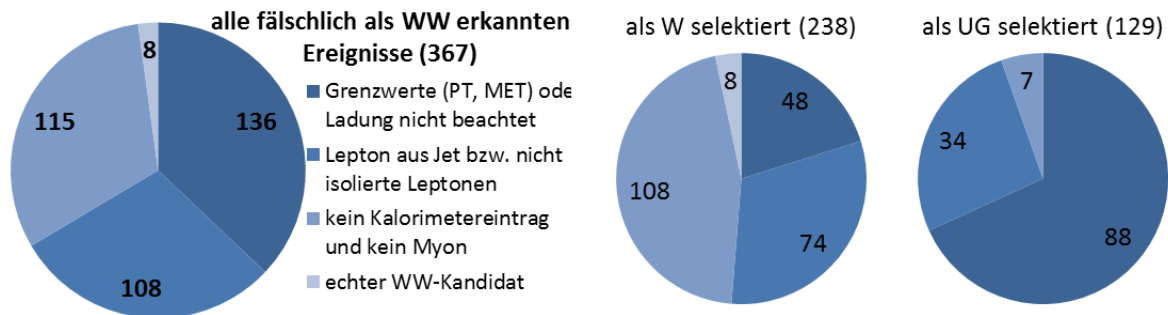


Abbildung 29 - Übersicht über fälschlicherweise als WW-Kandidaten identifizierte Ereignisse

Dabei treten drei typische Fehlerquellen zu etwa gleichen Anteilen auf:

- 1) In 136 Fällen wurden die vorgegeben Grenzwerte an den Transversalimpuls ( $p_T$ ) der Teilchen oder den fehlenden Transversalimpuls ( $MET$ ) nicht beachtet. Vor allem Ereignisse, die eigentlich aus der Untergrundselektion (UG) stammen (Abbildung 29 rechts), wurden durch diesen Fehler als WW-Kandidaten identifiziert.
- 2) In 108 Fällen wurden Leptonen aus Jets berücksichtigt oder generell nicht auf die Isolation der Leptonen geachtet. In den Ereignissen der W- und Untergrund-Selektion treten aufgrund der Selektion (siehe Kapitel 4.7.1) bis zu 4 Jets auf, so dass gerade das Kriterium der Isolation bei diesen Ereignissen von besonderer Bedeutung ist.
- 3) In den verbleibenden 115 Fällen treten Teilchen auf, die zwar Spuren im inneren Detektor hinterlassen aber keine oder kaum Energie im elektromagnetischen Kalorimeter hinterlassen und auch keine Wechselwirkung mit dem Myonspektrometer zeigen. Oft hinterlassen sie zusätzlich kleine Energiebeträge im hadronischen Kalorimeter, so dass es sich möglicherweise um Pionen, andere geladene Mesonen oder auch Baryonen handeln könnte. Diese Fehlerquelle ist dominant in den Ereignissen, die laut Selektion W-Kandidaten enthalten, denn bei diesen Ereignissen ist bereits ein geladenes Lepton enthalten. Nur eine Spur als Lepton fehlzudeuten ist wahrscheinlicher, als zwei Spuren falsch zu interpretieren.
- 4) In 8 Fällen (4 Ereignissen<sup>14</sup>) handelt es sich nach den vorgegebenen Suchkriterien tatsächlich um WW-Kandidaten.

Zusätzlich zu den genannten Fehlerquellen hätten die Schüler viele der Ereignisse als WW-Kandidaten ausschließen können, wenn die überprüft hätten, ob die Spuren demselben Vertex entstammen. Da bei diesen Ereignissen immer eine der anderen Fehlerquellen präsent war, taucht die Bedeutung des Vertices nicht separat auf, auch weil man typischerweise erst nach allen anderen Selektionskriterien zum Ursprungsort der Spuren zoomt.

<sup>14</sup> Ereignisnummern 240, 1031, 5975 und 3089, wobei letzteres nur bei einer Änderung der Grenzwerte für den Transversalimpuls des zweiten Leptons als WW-Kandidat erkannt werden könnte.

## 5.2. STRUKTUR DES PROTONS

Bei dieser Messaufgabe zählen die Jugendlichen die durch Proton-Proton-Kollisionen produzierten  $W^+$ - bzw.  $W^-$ -Bosonen über deren Zerfälle in Positronen oder Antimyonen bzw. Elektronen oder Myonen und Neutrinos. Aus dem Verhältnis  $R_{\pm} = \frac{|w^+|}{|w^-|}$  lassen sich Aussagen über die Anzahl an Up- und Down-Quarks im Proton treffen. Nach den bisher verwendeten Selektionskriterien suchen die Jugendlichen nach isolierten geladenen Leptonen mit einem Transversalimpuls  $p_T > 20$  GeV und einem fehlenden Transversalimpuls  $MET > 25$  GeV analog zu den von der ATLAS Kollaboration verwendeten Kriterien in [22]. Mit diesen Kriterien erwartet man für das Verhältnis einen Wert von etwa 1,5, zumindest ist das der von ATLAS gemessene Wert.

### 5.2.1. EINFLUSS DER ÄNDERUNG DER SELEKTIONSKRITERIEN

Aufgrund der in Kapitel 5.1.3 dargestellten Ergebnisse scheint es sinnvoll, die Suchkriterien zumindest für die Higgs-Suche zu ändern, so dass nun u. a. ein fehlender Transversalimpuls von 20 GeV statt bisher 25 GeV ausreicht. Um über die zwei Messaufgaben einheitliche Grenzwerte für den fehlenden Transversalimpuls zu verwenden wurde überprüft, welche Auswirkungen diese Änderung der Grenzwerte auf das Verhältnis  $R_{\pm}$  hat, indem alle Ereignisse der Datenpakete 1 bis 5 im Event Display MINERVA analysiert wurden<sup>15</sup>. In Tabelle 6 ist aufgeschlüsselt, wie sich die Datenpakete aus WW- und W-Kandidaten zusammensetzen und welches Verhältnis man mit verschiedenen Selektionskriterien erwartet. Zunächst stellt man fest, dass das Verhältnis  $R_{\pm}$  zwischen den Datenpaketen relativ stark variiert, im Mittel aber etwa mit dem zu erwartenden Wert von 1,5 übereinstimmt. Die Änderung des Grenzwertes für den fehlenden Transversalimpuls reduziert das Verhältnis im Schnitt um 6 % auf 1,38. Gleichzeitig erhöht sich die Zahl der relevanten Ereignisse durchschnittlich um 16 %.

*Tabelle 6 - Übersicht über Datenpakete 1-5 mit bisherigen und neuen Selektionskriterien*

Datenpaket	Anzahl WW-Kandidaten laut Selektion	Bisher: $MET > 25$ GeV		Neu: $MET > 20$ GeV	
		Anzahl W-Kandidaten	$R_{\pm} = \frac{ w^+ }{ w^- }$	Anzahl W-Kandidaten	$R_{\pm} = \frac{ w^+ }{ w^- }$
1	138	248	1,30	291	1,24
2	179	225	1,88	269	1,72
3	165	216	1,51	243	1,41
4	64	237	1,39	265	1,32
5	71	225	1,34	267	1,28
6	76	-	-	-	-
<b>Mittelwert</b>			<b>1,46</b>		<b>1,38</b>

<sup>15</sup> Vielen Dank an Konrad Jende (CERN) für das Beisteuern von 2000 ausgewerteten Ereignissen sowie Lukas Placzek (Gymnasium Dresden Klotzsche) für 500 Ereignisse.

Interessant ist auch der Vergleich der Anzahl von Zerfällen  $W \rightarrow e\nu$  und  $W \rightarrow \mu\nu$ : In den bisher analysierten vier Datenpakete misst man  $\frac{|W \rightarrow e\nu|}{|W \rightarrow \mu\nu|} = 1,05$  nach bisheriger Selektion und 1,08 nach neuen Selektionskriterien, was immer noch sehr gut zu den theoretischen Vorhersagen passt.

### 5.2.2. GEGENSEITIGE BEEINFLUSSUNG DER MESSAUFGABEN

Wird ein WW-Kandidat von Jugendlichen nicht als solcher erkannt, weil z. B. eines der beiden Leptonen nicht den geforderten Transversalimpuls besitzt, erfüllt dieses Ereignis meistens noch die Kriterien der Suche nach W-Bosonen in der Messaufgabe zur Struktur des Protons. Das bedeutet, dass bei den Internationalen Masterclasses 2013 viele der mit den aktuellen Suchkriterien nicht erkennbaren WW-Kandidaten stattdessen in die Ergebnisse des Verhältnisses  $R_{\pm}$  eingegangen sind. Da unter diesen Ereignissen kein Überschuss an  $W^+$ -Bosonen besteht, verringern sie systematisch das Verhältnis  $R_{\pm}$ , was möglicherweise den gegenüber den Erwartungen geringen Mittelwert von 1,23 während der diesjährigen Internationalen Masterclasses erklärt. Da nur für die Ergebniserfassung der Higgs-Suche Ereignisnummern notiert werden, lässt sich der Einfluss der fälschlicherweise als W-Kandidaten interpretierten WW-Kandidaten nicht quantifizieren. Einen Einblick in das mögliche Ausmaß der Beeinflussung bieten dennoch die Ergebnisse zweier Gruppen von Jugendlichen, die von ihrem Betreuer<sup>16</sup> gebeten wurden, während der Messung alle Ereignisnummern in die Strichliste einzutragen.

Die erste Gruppe bestand aus 10 Schülerpaaren, die am CERN an den Masterclasses teilnahmen und mit einer ausführlichen Strichliste gearbeitet haben. Innerhalb dieser Gruppe wurden 75 % der WW-Kandidaten, die alle Kriterien der Selektion auch im Event Display erfüllen als solche erkannt. Insgesamt wurden 31 WW-Kandidaten nicht als solche erkannt, stattdessen wurden 8 dieser 31 Ereignisse fälschlicherweise als  $W^+$ -Kandidaten erkannt, 12 als  $W^-$  und die restlichen wurden dem Untergrund zugeordnet. Dabei lagen die Ursachen der Fehlinterpretation nicht nur bei den nicht erfüllten Grenzwerten, sondern auch bei Problemen der Jugendlichen bei der Benutzung des Event Displays MINERVA wie z. B. der Bedeutung der Seitenansicht des Detektors. Innerhalb dieser Gruppe wurde ein Verhältnis  $R_{\pm} = 1,27$  gemessen. Streicht man die WW-Kandidaten aus der Messaufgabe zur Struktur des Protons, erhält man das deutlich höhere Verhältnis  $R_{\pm} = 1,42$ . Analog dazu ändert sich bei den Ergebnissen von 12 Teams von Jugendlichen, die in Dresden an den Masterclasses teilgenommen haben, das Verhältnis von 0,99 auf 1,09, wenn man für diese Messaufgabe nur Ereignisse aus der W-Selektion berücksichtigt. 3 der 8 WW-Kandidaten, die die Jugendlichen in Dresden als W-Kandidaten erfassten, unterschritten dabei die geforderten Grenzwerte, bei den restlichen 5 hatten die Jugendlichen vermutlich Probleme, die Isolation der Leptonen zu erkennen bzw. die Leptonen auch im Längsschnitt des

---

<sup>16</sup> Konrad Jende betreute während der Internationalen Masterclasses die betreffenden Gruppen am CERN bzw. in Dresden.

Detektors zu betrachten. Dabei hatte diese Gruppe eine Trefferquote von 90 % für (erkennbare) WW-Kandidaten, was gegen die Vermutung spricht, dass vor allem Gruppen mit niedrigen Trefferquoten für WW-Kandidaten eine starke Abweichung vom zu erwartenden Verhältnis  $R_{\pm}$  zeigen. Eine leichte Tendenz zu dieser Vermutung zeigt allerdings Abbildung 30, dort wurde für jede Gruppe der Quotient aus gemessenem  $R_{\pm}$  ( $R_{\text{ist}}$ ) und laut Datenpaket zu erwartendem  $R_{\pm}$  ( $R_{\text{soll}}$ ) bestimmt und über der jeweiligen Trefferquote für WW-Kandidaten aufgetragen. Gruppen mit höherer Trefferquote in der zweiten Messaufgabe zeigen eine nicht signifikante Tendenz zu besseren Ergebnissen in der ersten Messaufgabe, wobei die Werte sehr stark streuen.

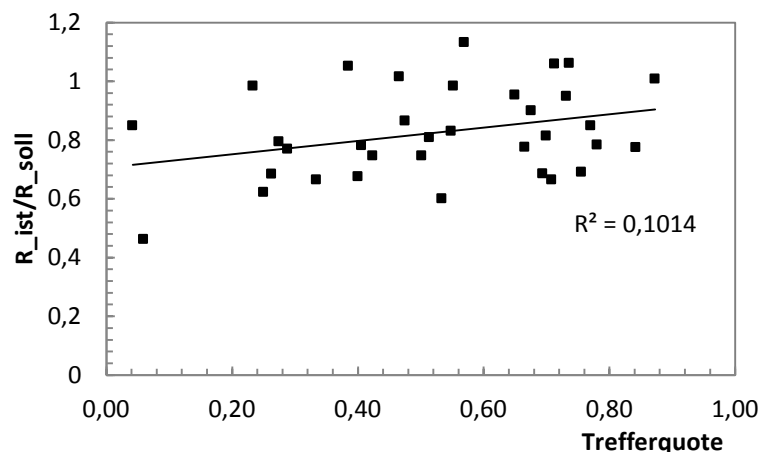


Abbildung 30 - Quotient aus gemessenem Verhältnis von  $W^+$  zu  $W^-$ -Kandidaten und nach Datenpaket zu erwartendem Wert über Trefferquote für erkennbare WW-Kandidaten für Datenpakete 1-5

### 5.3. EXPERTENWISSEN

Das Netzwerk Teilchenwelt ermöglicht die Durchführung von angepassten Teilchenphysik-Masterclasses an Schulen in Deutschland, diese Masterclasses werden weitestgehend von Doktoranden der Teilchenphysik durchgeführt. Das Institut für Kern- und Teilchenphysik Dresden ist der Sitz der Projektleitung und -koordination des Netzwerks Teilchenwelt, so dass viele der Doktoranden am Institut sehr vertraut mit dem  $W$ -Pfad der Masterclasses und dem Event Display MINERVA sind. Um vergleichen zu können, wie sich die Bearbeitung der Messaufgaben im  $W$ -Pfad durch Jugendliche von Experten unterscheidet, wurden 6 Doktoranden und eine Doktorandin gebeten, jeweils das Teilpaket 2C mit 50 Ereignissen zu analysieren. Dabei nutzten sie das gleiche Event Display, das auch die Jugendlichen verwendet hatten und gingen nach denselben Kriterien vor. Zusätzlich zu diesen Experten haben zwei Schülerpraktikanten<sup>17</sup> des Instituts diese Messung durchgeführt, diese hatten zuvor eine sehr ausführliche Einführung in die Teilchenphysik und die Funktionsweise des Event Displays erhalten.

<sup>17</sup> Lukas Placzek und Anton Lange, Gymnasium Klassenstufe 9



Unter den analysierten Daten befinden sich laut Selektion 10 WW-Kandidaten, darunter sind zwei, die die benutzten Grenzwerte unterschreiten. Erwartungsgemäß liegt die Trefferquote für WW-Kandidaten bei den Experten deutlich höher als bei den 7 Teams von Jugendlichen, die dasselbe Teilpaket während der Internationalen Masterclasses 2013 ausgewertet hatten (Abbildung 31).

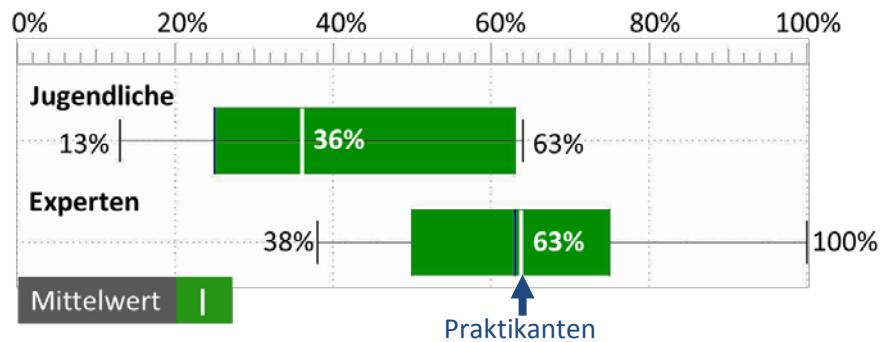


Abbildung 31 - Boxplot: korrigierte Trefferquote der Jugendlichen für WW-Kandidaten im Vergleich zur Trefferquote der Experten, durch Pfeil markiert: identische Trefferquote der beteiligten Praktikanten

Doch auch innerhalb der Expertengruppe variiert die Trefferquote stark: Während die Praktikanten nach entsprechender Vorbereitung 63 % der WW-Kandidaten erkannten, fanden die Doktoranden zum Teil nur 3 der 8 WW-Kandidaten. Allgemein unterliefen den Experten dieselben Fehler, wie den Jugendlichen: Elektronen wurden als Myonen identifiziert, da die Spuren im Myonspektrometer nicht beachtet wurden (möglicherweise weil zu weit hineingezoomt wurde). Ereignisse mit drei interessanten Spuren wurden als Untergrund eingestuft, ohne zu überprüfen, ob die Spuren demselben Vertex entstammen. Auffallend häufig wurden Leptonen ausgeschlossen, da sie per Augenmaß als nicht isoliert wahrgenommen wurden. In dieser Hinsicht waren die Experten wesentlich kritischer als die Jugendlichen.

Die Ergebnisse zeigen vor allem, dass nicht das Wissen über Teilchenphysik für eine erfolgreiche Messung maßgeblich ist, sondern hauptsächlich die Vorbereitung und die Übung im Umgang mit dem Event Display beim Analysieren von Ereignissen. Sonst ließe sich nicht erklären, dass Schüler der Klassenstufe 9 im Vergleich mit Doktoranden so gut abschneiden.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Auch hinter der Trefferquote von 100 % liegt die Erfahrung aus mehreren Tausend Ereignissen, die nicht durch Computeralgorithmen, sondern von Hand selektiert wurden.

#### 5.4. ZUSAMMENFASSUNG DER DATENANALYSE

---

Die im Vergleich zur Vorselektion der Daten geringe Anzahl an WW-Kandidaten, die Jugendliche während der Internationalen Masterclasses 2013 richtig identifiziert haben, lässt sich hauptsächlich durch zwei Faktoren erklären:

- 17 % der vorselektierten WW-Kandidaten unterschreiten bei einer Analyse im Event Display MINERVA die Selektionskriterien, Hintergrund ist der Unterschied zwischen den in der Vorselektion und MINERVA verwendeten Datenformaten. Eine mögliche Lösung ist das Herabsetzen der Grenzwerte für die Messung mit MINERVA, damit verschlechtert sich voraussichtlich das Ergebnis der Messaufgabe zur Struktur des Protons um etwa 6 %, wenn man für beide Messaufgaben einheitliche Kriterien für den fehlenden Transversalimpuls verwendet.
- Viele Fehlinterpretationen von Ereignissen entstehen, weil sowohl die Jugendlichen als auch die Experten die Funktionen des Event Displays nicht vollständig kennen und nutzen. Zu erkennen, ob Spuren demselben Vertex entstammen, ob Spuren als isoliert betrachtet werden können und zu wissen, wie die unterschiedlichen Ansichten des Event Display in Zusammenhang stehen, sind Grundlagen einer erfolgreichen Messung.

Bisher wird während der Masterclasses kein einheitliches Kriterium für die Isolation einer Spur verwendet, sondern im Allgemeinen per Augenmaß entschieden. Aus den Kriterien der WW-Selektion kann allerdings ein Kriterium an den Abstand  $\Delta R$  zweier Spuren abgeleitet werden, mit dem man quantifizieren kann, ob die relevante Spur als isoliert angesehen werden kann. Dieses Kriterium wird in Kapitel 7 vorgestellt.

Die Messaufgaben beeinflussen sich gegenseitig: Nicht erkannte WW-Kandidaten werden oft als W-Kandidaten erkannt, durch das Herabsetzen der Grenzwerte sollte sich dieses Problem erheblich verringern. W-Kandidaten werden durch zusätzliche Leptonen z. B. aus Jets als WW-Kandidaten identifiziert. Auch dieses Problem kann reduziert werden, indem ein eindeutiges Isolationskriterium vorgegeben wird und in den Übungen im Vorfeld der Messung der Umgang mit dem Event Display ausreichend vorbereitet wird.

## 6. KONZEPTION UND AUSWERTUNG DES FRAGEBOGENS

Verschiedene Faktoren in der Organisation und Durchführung der Masterclasses könnten die Trefferquote beeinflussen: Eine Vermutung liegt darin, dass vor allem die zur Verfügung stehende Zeit für Übungen und die Messung ausschlaggebend ist für eine erfolgreiche Messung. Möglicherweise beeinflusst auch das durch die Vorlesungen erlangte Vorwissen das Ergebnis oder die Betreuung während der Übungen und Messungen. Einen weiteren Hinweis, inwieweit die Organisation und Durchführung am Erfolg der Jugendlichen während der Messung beteiligt sein könnte, bietet der Vergleich der Ergebnisse innerhalb eines Institutes: 6 der 35 Institute haben zwei bzw. drei Internationale Masterclasses am selben<sup>19</sup> oder unterschiedlichen Tagen durchgeführt. Trägt man die Ergebnisse in der Trefferquote für WW-Kandidaten nach der Größe sortiert auf und nutzt dabei bei den genannten 6 Instituten jeweils den Mittelwert sowie die Standardabweichung über alle am selben Institut durchgeführten Masterclasses (Abbildung 32) kann man zwar deutliche Unterschiede in den Ergebnissen der Institute erkennen, die Standardabweichung innerhalb eines Instituts ist aber deutlich kleiner als die Standardabweichung über alle Institute. Dies rechtfertigt die Vermutung, dass auch die Organisation und Durchführung der Masterclasses Einfluss auf den Erfolg der Jugendlichen bei der Messung hat.

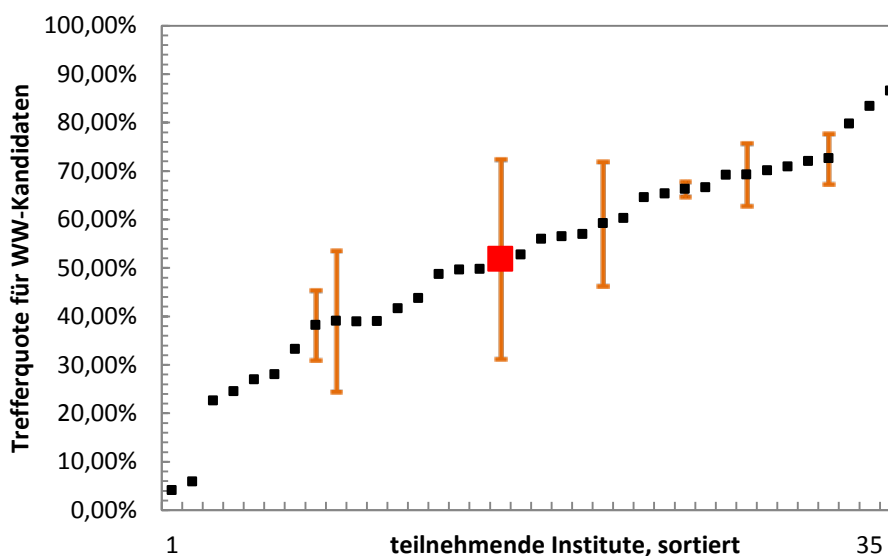


Abbildung 32 - Streuung der Ergebnisse der Trefferquote für WW-Kandidaten zwischen den Instituten. 6 Institute haben mehrere Masterclasses durchgeführt, dort ist der Mittelwert und die Standardabweichung eingezeichnet, rot: Mittelwert über alle Gruppen inklusive Standardabweichung

Um diese Einflussfaktoren zu untersuchen, wurde ein Fragebogen konzipiert, der sowohl die Organisatoren der Masterclasses einbezieht, als auch die Personen, die die Jugendlichen wäh-

<sup>19</sup> Das bedeutet, dass bei sehr großen Teilnehmerzahlen die Übungen und Messung in mehreren Gruppen stattfand, die Vorlesungen aber gemeinsam besucht wurden.

rend der Messung und Übungen betreut haben. Eine abgedruckte Version des Fragebogens findet sich in Anhang 8.2, die Online-Version in [41].

### 6.1. FRAGEBOGEN ZUR ORGANISATION DER INTERNATIONALEN MASTERCLASSES 2013

24 von 45 Organisatoren beteiligten sich an der Umfrage, dabei ergibt sich folgendes Bild der typischen Internationalen Masterclass 2013: Im Durchschnitt hörten die Jugendlichen etwa zwei Stunden lang einführende Vorträge, wobei der Fokus auf dem Standardmodell und dem ATLAS-Detektor lag aber auch sehr viele weitere Inhalte angesprochen wurden (Abbildung 33). Die Anzahl der Inhalte in Bezug zu den Vorgaben im Fragebogen aber auch in Bezug zu einer Auswahl der Inhalte, die in direktem Bezug zur Messung stehen (Zerfall von Higgs-Bosonen, Winkel zwischen den geladenen Leptonen, ATLAS, Spuranalyse, Event Display) korrelieren nicht mit der Trefferquote.

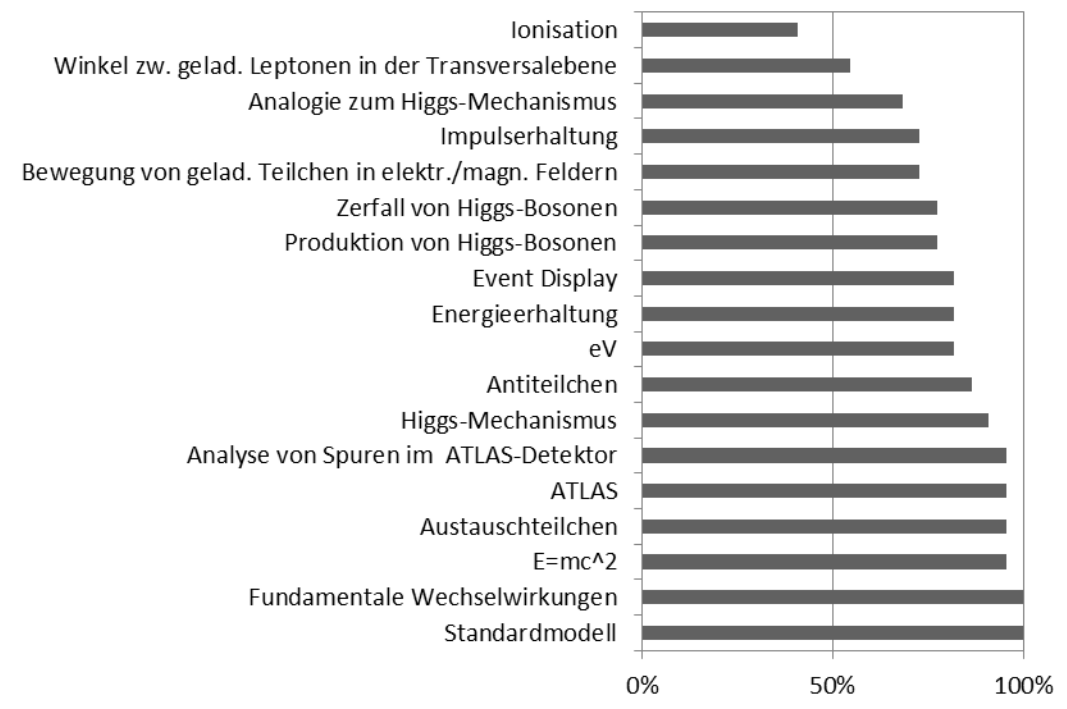
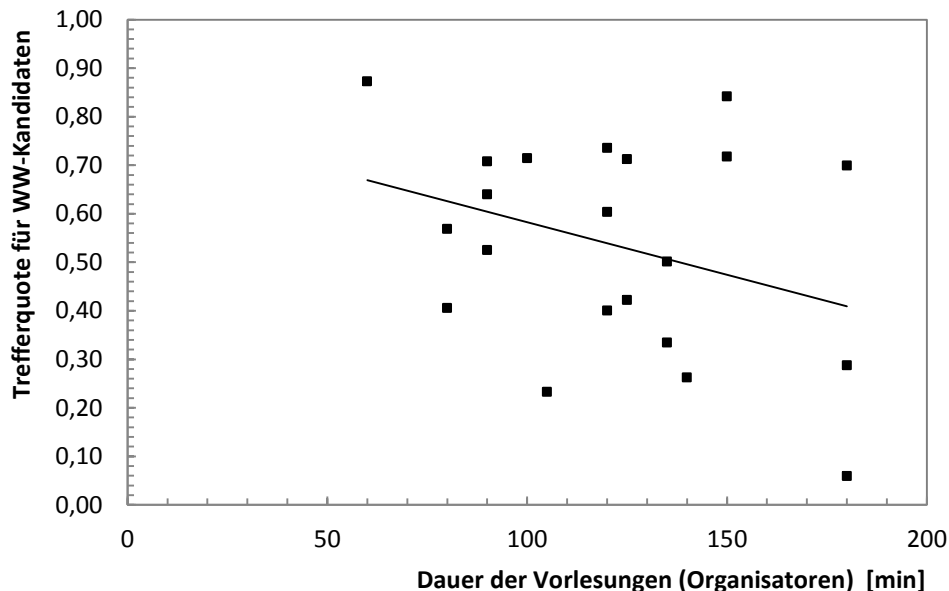


Abbildung 33 - Übersicht über prozentuale Nennung von Vorlesungsinhalten während der Internationalen Masterclasses 2013 (N=24)

Nach den Vorlesungen und z. T. Führungen durch die Institute oder Labore sowie einer Mittagspause verbrachten die Teilnehmer ebenfalls zwei Stunden in einem Computerpool mit Übungen zur Teilchenidentifikation (Übung 1), zur Ereignisidentifikation (Übung 2) und der Messung der ATLAS-Daten. Während der Messung fanden die Jugendlichen 54 % der „auffindbaren“ WW-Kandidaten. Hauptsächlich haben sich Gruppen bzw. einzelne Jugendliche angemeldet, nur in 30 % der Fälle nahmen ganze Klassen teil, vor allem in Frankreich, weil das dortige Schulsystem

keine Trennung einzelner Schüler aus dem Klassenverband vorsieht. Die Gruppierung der Teilnehmer korreliert dabei nicht mit der Trefferquote für WW-Kandidaten.

### 6.1.1. ZUSAMMENHANG ZWISCHEN TREFFERQUOTE UND VORLESUNGSDAUER



$$\rho = -0,24 \quad p = 0,29 \text{ (nicht signifikant)}$$

Abbildung 34 - Trefferquote für WW-Kandidaten in Abhängigkeit von der geplanten Dauer der Einführungsvorlesungen, Spearmans Rangkorrelationskoeffizient und zugehöriger  $p$ -Wert

Die Organisatoren der Internationalen Masterclasses wurden nach dem konkreten Tagesprogramm ihrer Masterclass gefragt, vor allem welche Zeit für einführende Vorlesungen eingeplant wurde und wie viel Zeit für Übungen mit dem Event Display und die Messung zur Verfügung stehen sollte. Trägt man die korrigierte Trefferquote der Higgs-Suche gegenüber der geplanten Zeit für Vorlesungen auf, sieht man eine leichte negative Korrelation (Abbildung 34). Da die Daten nach dem Shapiro-Wilk-Test [42] nicht normalverteilt sind, wird statt einer linearen Regression Spearmans Rangkorrelationskoeffizient  $\rho$  bestimmt. Mit  $\rho = -0,24$  liegt nur ein schwacher negativer Zusammenhang vor, testet man gegen die Nullhypothese, dass keine Korrelation vorliegt, erhält man einen  $p$ -Wert von  $p = 0,29$ , so dass mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Fehler 1. Art begangen wird und die Korrelation als nicht signifikant gilt. Dennoch liegt die Richtung der Korrelation im zu erwartenden Bereich: Der typische Tag einer Internationalen Masterclass ist für Jugendliche mit erheblichem inhaltlichen Input versehen, so dass gerade bei langen Vorlesung Ermüdungserscheinungen seitens der Jugendlichen zu erwarten sind. Die Evaluation der Internationalen Masterclasses 2007 [2] zeigte zwar eine hohe partielle Korrelation von 51 % zwischen der Wertschätzung der Masterclass und dem empfundenen Interessantheitsgrad der Vorlesungen, dieses Ergebnis lässt sich aber nicht mit den obigen Ergebnissen vergleichen, da eine hohe Wertschätzung nicht mit einer hohen Trefferquote zusammenhängen

muss. Nach diesen Ergebnissen sollte also genau abgewogen werden, ob der Fokus auf interessanten Vorlesungen oder der erfolgreichen Selbsttätigkeit der Jugendlichen liegt bzw. wie ein Mittelweg beide Ziele erfüllen kann.

### 6.1.2. ZUSAMMENHANG ZWISCHEN TREFFERQUOTE UND ÜBUNGS- BZW. MESSZEIT

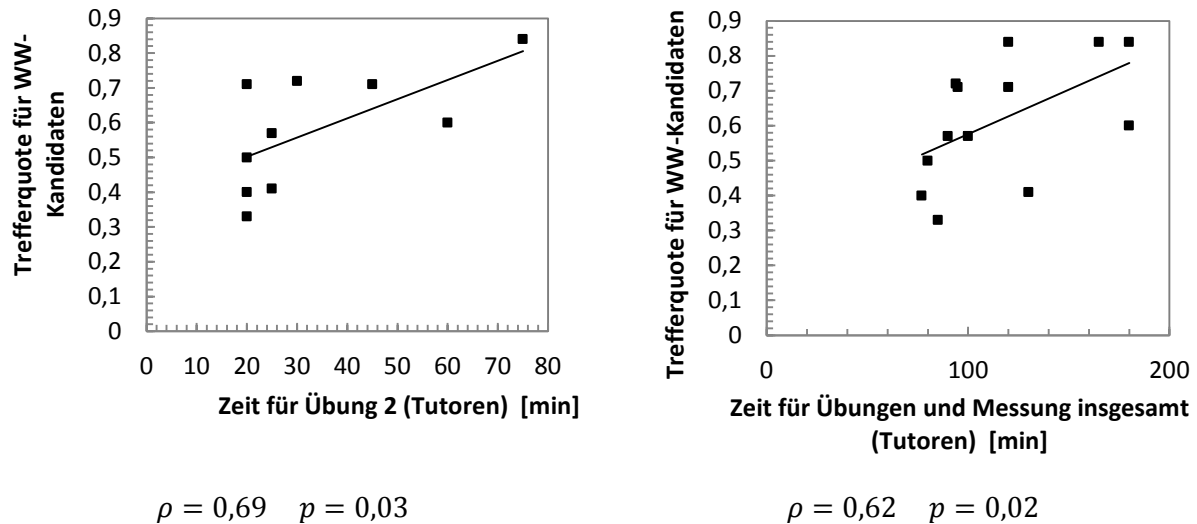


Abbildung 35 – Zusammenhang zwischen der von den Tutoren eingeschätzten Bearbeitungszeit für Übung 2 (links) sowie Übungs- und Messzeit insgesamt (rechts) und der Trefferquote für WW-Kandidaten, darunter: Spearmans Rangkorrelationskoeffizient und zugehöriger p-Wert. Beide Korrelationen sind signifikant mit einem Konfidenzlevel von 95 %.

Der Versuch, die laut Organisation geplante Zeit für Übungen und Messung gegenüber der Trefferquote aufzutragen, bringt keine signifikanten Resultate, die Werte streuen zu stark. Allerdings wurden zusätzlich die Tutoren gefragt, wie viel Zeit ihrer Schätzung nach für die einzelnen Übungen sowie für die Messung zur Verfügung stand. Die geschätzte Zeit für Übung 2 bzw. für Übungen und Messung insgesamt wich zum Teil deutlich von der laut Organisation geplanten Zeit ab und korreliert stark mit der Trefferquote, wenn man Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten für die nicht normalverteilten Größen berechnet (Abbildung 35). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Evaluation per Fragebogen aus organisatorischen Gründen erst etwa 6 Wochen nach den Internationalen Masterclasses erfolgte, so dass die Tutoren sehr weit zurückdenken mussten und die genannten Zeiten möglicherweise nicht besonders zuverlässig sind. Zusätzlich dazu kann keine eindeutige Zuordnung zwischen Trefferquote und Übungs- bzw. Messzeit getroffen werden, da sich z. T. mehrere Tutoren eines Instituts am Fragebogen beteiligten und die Zeiten unterschiedlich einschätzten. In diesen Fällen wurden alle Antworten separat behandelt, was durch doppelte Werte der zugehörigen Trefferquote Ungenauigkeiten bei der Bildung einer Rangfolge für Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten mit sich bringt.

Andererseits werden Vorlesungszeiten häufig überzogen, so dass die gesamte Tagesplanung in Verzug gerät und damit die realen von den geplanten Zeiten abweichen können.

Tabelle 7 - Reduzierte Korrelationsmatrix inklusive Stichprobengröße, Rangkorrelationskoeffizient, und p-Wert des Signifikanztests, fett: signifikante Korrelationen

Korrelationen zwischen ... und		Trefferquote	
		Spearman's Rangkorrelationskoeffizient $\rho$	p-Wert
Trefferquote	$N = 21$		
Dauer der Vorlesungen (Organisation)	$N = 21$	$\rho = -0,24$	$p = 0,29$
Zeit für Übung und Messung (Organisation)	$N = 21$	$\rho = +0,13$	$p = 0,57$
Zeit für Übung 1 (Tutoren)	$N = 12$	$\rho = +0,37$	$p = 0,24$
Zeit für Übung 2 (Tutoren)	$N = 10$	<b><math>\rho = +0,69</math></b>	<b><math>p = 0,03</math></b>
Zeit für Messung (Tutoren)	$N = 14$	$\rho = +0,33$	$p = 0,25$
Zeit für Übungen und Messung (Tutoren)	$N = 13$	<b><math>\rho = +0,62</math></b>	<b><math>p = 0,02</math></b>
Differenz aus Zeit für Übungen und Messung (Organisation) und (Tutoren) („Zeitverzug“)	$N = 13$	$\rho = -0,42$	$p = 0,15$

Tabelle 7 fasst alle interessanten Korrelationen zusammen: Die bereits in Abbildung 35 dargestellten signifikanten<sup>20</sup> Zusammenhänge zeigen eine starke Korrelation zwischen der Zeit für die vorbereitenden Übungen und die Messung und der Trefferquote für WW-Kandidaten. Vor allem die ausführliche Durchführung und Besprechung von Übung 2 steht scheinbar in Zusammenhang mit einer erfolgreichen Messung. Die restlichen Zusammenhänge sind nicht signifikant und weisen zudem nur kleine Effektstärken auf. Interessant ist nichtsdestotrotz die Zeitdifferenz zwischen der von der Organisation vorgegebenen Zeit für Übungen und Messung und der Zeit, die die Tutoren dafür angegeben haben: Ein Zeitverzug bringt tendenziell schlechtere Messergebnisse bei der Higgs-Suche mit sich.

## 6.2. FRAGEBOGEN ZUM ABLAUF DER ÜBUNGEN UND MESSUNG 2013

Ein weit ausführlicherer Teil des Fragebogens richtet sich an die Tutoren, dazu sollen hier alle Doktoranden, Diplomanden und weitere Mitarbeiter eines Instituts zählen, die die Schüler während der Übungen und der Messung betreut haben oder angeleitet haben. 15 Tutoren haben sich am Fragebogen beteiligt. Die geringe Zahl könnte der Tatsache geschuldet sein, dass der Fragebogen erst mehrere Wochen nach den Internationalen Masterclasses 2013 verschickt werden konnte. Der Versuch einer Korrelation der Ergebnisse des Fragebogens mit der Trefferquote des jeweiligen Instituts ist hier im Allgemeinen nicht möglich, da oft mehrere Tutoren für eine Gruppe von Jugendlichen verantwortlich waren und somit keine direkte Zuordnung möglich ist. Dennoch zeigt die Auswertung interessante Ergebnisse: Im Mittel steht ein Betreuer für 9 Teilnehmer zur Verfügung, 40 % der Tutoren hatte dabei bisher keine Erfahrung als Tutor, im Schnitt verbrachten aber alle Tutoren etwas 2,5 h mit der Vorbereitung auf die Masterclasses in

<sup>20</sup> Signifikant mit einem Konfidenzniveau von 95 %.



Form von Treffen mit den Organisatoren und anderen Tutoren, Studium des Handout oder Besprechung der Software. Nur 2 der 15 Tutoren gaben an, den Tutorenguide [43] für den W-Pfad nicht genutzt zu haben.

### 6.2.1. WISSEN DER TUTOREN ZUM EVENT DISPLAY

Während der Analyse der Events, die für Schüler schwierig zu identifizieren waren, ergaben sich einige typische Probleme mit dem Event Display. Um herauszufinden, wie die Tutoren mit diesen Problemen umgehen würden, wurden sie gebeten, auf die folgenden hypothetischen Schülerfragen zu antworten und anzugeben, ob eine solche Frage auch während der Internationalen Masterclasses auftrat.

- ❖ **"If I don't clearly see any yellow bar in the calorimeter view, is this event always a Background event?"**
  - 75% der Antworten erklärte vollkommen richtig, dass Myonen nur geringe Energieeinträge in den Kalorimetern hinterlassen und die Ereignisse also nicht ohne weiteres dem Untergrund zugeordnet werden können.
  - 40 % gaben an, dass eine solche Frage während ihrer Tutorentätigkeit auftrat.
- ❖ **"Why are some tracks visible in the side view and not in the cross-sectional view?"**
  - 79% der Befragten erklärten hier, dass in der Querschnittsansicht zum großen Teil nur Spuren dargestellt werden, die mit dem Zentralbereich (Barrel) des ATLAS-Detektors wechselwirken. Fliegt ein Teilchen mit einem kleinen Winkel zur Strahlachse, wird es in der Querschnittsansicht nicht dargestellt, daher ist es wichtig immer beide Ansichten zu betrachten. Ein Befragter gab an, dass er keine Antwort auf diese Frage wüsste und sich selbst auch darüber gewundert hatte. Zusammen mit den Ergebnissen der Auswertung des Expertenwissens (Kapitel 5.3) wird hier ein deutlich, dass die Probleme, die die Jugendlichen haben, sich z.T. durchaus auch auf Doktoranden verallgemeinern lassen.
  - 80 % gaben an, dass eine solche Frage während ihrer Tutorentätigkeit auftrat.
- ❖ **"How can I be sure that two tracks are coming from the same vertex?"**
  - Indem man die Zoom-Funktion benutzt und die Spuren zurück zum Wechselwirkungspunkt verfolgt, kann man feststellen, ob beiden Spuren denselben Ursprung haben, das sehen auch 93 % der Befragten so.
  - 67 % gaben an, dass eine solche Frage während ihrer Tutorentätigkeit auftrat.
- ❖ **"How can I be sure that a track is isolated from Jets?"**
  - 13 der 14 Antworten beschreiben, wie man Isolation in MINERVA erkennen kann: Dabei empfehlen 10 Tutoren per Augenmaß nach benachbarten Spuren zu schauen, die einen relativ hohen Transversalimpuls haben. Nur 3 gaben den Tipp, eine Abstandsmessung über die Größe  $\Delta R$  durchzuführen und Spuren innerhalb eines bestimmten Abstandes zu

berücksichtigen. Hier zeigt sich, dass die Tutoren zwar Wissen, was Isolationskriterien sind, aber oft kein eindeutiges Kriterium für die Anwendung in MINERVA kennen.

- 73 % gaben an, dass eine solche Frage während ihrer Tutorentätigkeit auftrat.

❖ **“Which values are important to decide whether the event is a WW candidate or not?”**

- Alle Tutoren hatten die Grenzwerte noch im Kopf oder hätten auf das Handout verwiesen.
- 53 % gaben an, dass eine solche Frage während ihrer Tutorentätigkeit auftrat.

Dass sich die Jugendlichen während der Messung mit diesen Fragen konfrontiert sehen, bestätigen auch die Tutoren. Viele Tutoren wissen sehr gut über MINERVA und die Ereignisidentifikation Bescheid, bei einigen Punkten zeigen sich aber sogar bei den Tutoren Unsicherheiten: Die Bedeutung der Seitenansicht des Detektors unterschätzen einige, auch über die Kalorimeter-Signatur von Myonen besteht nicht 100-prozentige Klarheit.

### 6.2.2. WISSEN DER JUGENDLICHEN ZUM EVENT DISPLAY MINERVA

Die Tutoren wurden gebeten, auf einer Skala von 0 bis 6 einzuschätzen, inwieweit die Jugendlichen die Funktionen und physikalischen Variablen des Event Displays MINERVA verstanden haben. Dabei bedeutet 1 „überhaupt nicht verstanden“ und 6 „vollständig verstanden“, 0 „nicht verwendet“. Die durchschnittlich höchsten Punktzahlen vergaben die Tutoren für die „Zoom-Funktion“ (5,2), die „Ausgabe der Ladung“ (5,2) und die „Bedeutung der verschiedenen Ansichten“ (5,1). Die niedrigste Punktzahl erhielt „Erkennen, ob Spuren isoliert von Jets sind“ (2,8) gefolgt von der „Benutzung der vergrößerten Seitenansicht um Vertices zu unterscheiden“ (3,5). Mit den beiden letztgenannten Problemen werden zwei der typischen Fehlerquellen von Jugendlichen und auch Experten (siehe Kapitel 5.3) bei der Messung beschrieben.

### 6.2.3. NUTZUNG DER WEBSITE IM W-PFAD

Die auf die Messung vorbereitenden Übungen 1 und 2 sowie die Auswertung und Kombination der Messwerte erfolgen über die Website des W-Pfades [30]. Diese Website gliedert sich in 5 Abschnitte (Abbildung 36), die vielfältige Informationen zum LHC, ATLAS-Detektor, dem Event Display und zu den physikalischen Inhalten der Masterclasses enthalten:

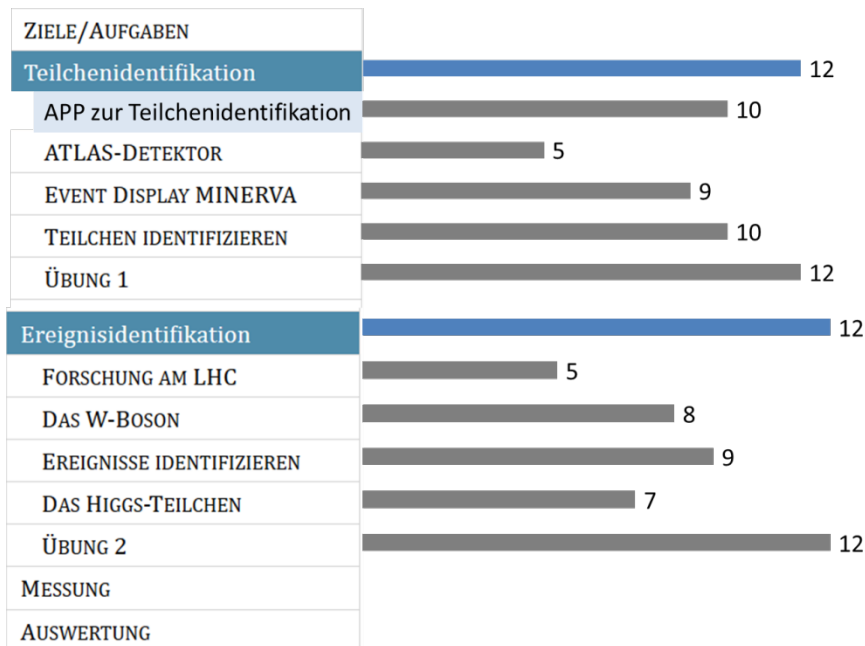


Abbildung 36 - Struktur der Website [30] inklusive Angabe, wie viele der 13 befragten Tutoren welchen Teil während der Internationalen Masterclasses genutzt haben, die App zur Teilchenidentifikation befindet sich auf der Startseite zur Teilchenidentifikation und wurde daher nachträglich in die Struktur eingepasst

In Teil **Ziele/Aufgaben** werden zunächst die Zielstellung der Messung und der Ablauf der Vorbereitung auf die Messung skizziert. Im Abschnitt **Teilchenidentifikation** können die Jugendlichen zunächst an der APP zur Teilchenidentifikation simulieren, welche Spuren und Signale z. B. Elektronen, Positronen oder Neutronen beim Durchfliegen des ATLAS-Detektors in den einzelnen Detektorkomponenten hinterlassen. Weitere Details zum Detektor und ein Video zum Thema finden sich im Teilabschnitt ATLAS-DETEKTOR. Im darauf folgenden Teilabschnitt gibt es eine Einführung in das EVENT DISPLAY MINERVA, im Anschluss wird als Vorbereitung der Übung 1 in TEILCHEN IDENTIFIZIEREN erläutert, wie Teilchen anhand ihrer Signaturen im Event Display MINERVA identifiziert werden. Den Abschluss des Abschnitts Teilchenidentifikation bildet ÜBUNG 1, in der die Jugendlichen auch Feedback für ihre Leistungen im Teilchen-Identifizieren erhalten.

Der dritte Abschnitt ist der **Ereignisidentifikation** gewidmet: Zunächst gibt es Informationen zur FORSCHUNG AM LHC und zu Produktions- und Zerfallsmechanismen von W-Bosonen im Teilabschnitt DAS W-BOSON. Im Teil EREIGNISSE IDENTIFIZIEREN werden Screenshot von Event Displays zu verschiedene Ereignissen erklärt, im Anschluss erläutert der Teilabschnitt DAS HIGGS-TEILCHEN Produktion und Zerfall des Higgs-Bosons. Den Abschluss des Abschnitts bildet wieder eine Übung mit Kontrollmöglichkeit, ÜBUNG 2. In den letzten beiden Abschnitten finden sich Software und Daten für die **Messung** sowie ein Tool zur **Auswertung** der Messung.

Die Ergebnisse des Fragebogens zeigen, dass die Website während der Masterclasses durch 12 von 13 Befragten ausführlich genutzt wird: Besonders die Übungen und die APP zur Teil-

chenidentifikation erfreuen sich großer Beliebtheit unter den Tutoren. „Textlastigere“ Teilabschnitte aber auch das in die Website eingebundene Video zum ATLAS-Detektor werden seltener verwendet, vermutlich auch, weil der physikalische Hintergrund zur Messung bereits in den Einführungsvorlesungen vermittelt wurde und nur wenig Zeit zur Verfügung steht.

### 6.3. ÄNDERUNGSVORSCHLÄGE FÜR DIE INTERNATIONALEN MASTERCLASSES

Am Ende des Fragebogens ist Platz für weitere Kommentare und Vorschläge zur Verbesserung der Masterclasses, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

- Das Handout [39] und der darin enthaltene *Decision Tree* zur Ereignisidentifikation finden großen Gefallen, denn damit können die Jugendlichen die Selektionskriterien schrittweise abarbeiten.
- Es besteht der Wunsch, ein Isolationskriterium vorzugeben, denn gerade hier sehen viele ein großes Problem für Jugendliche. Wobei ein Teilnehmer angab, dass gerade das Isolationskriterium nicht vorgegeben werden sollte, da die gesamte Messung bereits sehr „rezeptartig“ abgearbeitet wird und zumindest bei der Isolation ein Einblick in das wahre Wesen einer Datenanalyse gewährt wird.

Ein solches Isolationskriterium lässt sich aus den Selektionskriterien der WW-Selektion und dem Parameter  $\Delta R$  ableiten und wird in Kapitel 7 vorgestellt. Möglicherweise wird der „Rezeptcharakter“ der Messung damit noch verstärkt, allerdings kann immer noch diskutiert werden, wie der Grenzwert für  $\Delta R$  festgelegt wird, was ein authentisches Problem der Teilchenphysiker darstellt. Per Augenmaß über die Isolation zu entscheiden lässt möglicherweise an der falschen Stelle zu viel Raum für Interpretationen und gibt eher den falschen Einblick eines wissenschaftlichen Forschungsprozesses.

- Da mehrere Institute besonders bei der Messung Zeitprobleme hatten, wird vorgeschlagen, die Zeit für die Vorlesungen zu reduzieren und die Zeit für Übungen und Messungen zu erhöhen. Ein Institut hat aus diesen Gründen nur die erste Messaufgabe bearbeitet.

Die Kombination der Ergebnisse der Datenanalyse mit den Ergebnissen des Fragebogens bestätigt, dass wenig Zeit für Übungen und die Messung problematisch ist. Da die Higgs-Suche für die Jugendlichen sicherlich noch spannender ist, als herauszufinden, wie das Proton aufgebaut ist, spart man durch Weglassen der zweiten Messaufgabe aber an der falschen Stelle Zeit.

- Zwei der Befragten fänden eine Trennung der Messaufgaben sinnvoll.

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen, dass sich die Messaufgaben gegenseitig negativ beeinflussen, dennoch ist eine Trennung schwierig umzusetzen und das Weglassen einer Messaufgabe aus den gerade beschriebenen Gründe ebenfalls nicht wünschenswert. Der Grad der gegenseiti-

gen Beeinflussung lässt sich vermutlich erheblich reduzieren, wenn der Umgang der Jugendlichen mit dem Event Display sicherer wird und die Selektionskriterien geändert werden.

- Viele Kommentare machten deutlich, dass der W-Pfad mit seinen Messaufgaben und den physikalischen Inhalten (auch im Vergleich zum Z-Pfad) als schwer zu erklären empfunden wird. Es wird vorgeschlagen, einfachere Ereignisse zu verwenden, in denen weniger Spuren bzw. nur ein Wechselwirkungspunkt in einer weiter vereinfachten Version von ATLANTIS betrachtet werden. Das folgende Zitat verdeutlicht eine eher pessimistische Sicht auf den vermittelten Inhalt der Masterclasses:

*“In the video conference afterwards it was clear the students didn't really understand the results. They liked the identification part, however.”*

Der Anspruch vieler Physiker, gegenüber Jugendlichen die Hintergründe eines Phänomens vollständig zu erklären, ist sehr hoch. Doch selbst ohne zu wissen, was der Spin eines Teilchens ist, kann man Jugendlichen erklären, dass man Higgs-Ereignisse von Untergrundereignissen unterscheiden kann, weil diese sich in der Winkelverteilung der geladenen Leptonen unterscheiden. Die Masterclasses haben nicht das Ziel, die Jugendlichen in Teilchenphysik auszubilden, sondern lediglich einen Einblick zu geben und bei den Jugendlichen Interesse zu wecken, so dass diese möglicherweise im Physikstudium die konkreten physikalischen Hintergründe der Messung lernen. Für dieses Ziel ist es ein guter Anfang, wenn den Jugendlichen das Messen Spaß gemacht hat. Dennoch sollte vor und nach der Messung Zeit sein, um zu diskutieren, was die Messung motiviert und wie die Ergebnisse interpretiert werden können.

Auch die Forderung nach einfacheren Ereignissen steht im Widerspruch mit dem Ziel der Internationalen Masterclasses, den Zugang zu echten Daten zu ermöglichen. Der Reiz liegt gerade darin, die gleichen Daten und das fast gleiche Event Display als ein Analysewerkzeug der Teilchenphysiker zu verwenden.

- Einer der Tutoren gab zu bedenken, dass die physikalischen Hintergründe der Messung nirgendwo erklärt werden und es damit schwer für Tutoren außerhalb der Teilchenphysik ist, sich in das Thema einzuarbeiten.

Bisher geht der Guide für Tutoren tatsächlich kaum auf teilchenphysikalische Hintergründe ein und erhöht somit den Vorbereitungsaufwand für neue Tutoren. Da nicht immer Doktoranden der Teilchenphysik die Messungen betreuen, ist es möglicherweise sinnvoll, den Guide um entsprechende Informationen zu erweitern.

- Immerhin 3 der Kommentare beinhalteten keinerlei Verbesserungsvorschläge oder bedankten sich stattdessen für die vereinfachte MINERVA Version.

#### 6.4. ZUSAMMENFASSUNG DES FRAGEBOGENS

---

Auch wenn der Rücklauf der Fragebögen vor allem von Seiten der Tutoren nicht optimal ausfiel, zeigt seine Auswertung interessante Erkenntnisse. Da die erfassten Größen nicht normalverteilt sind, können signifikante Zusammenhänge zur Trefferquote für WW-Kandidaten nur durch die Verwendung eines Rangkorrelationskoeffizienten bestimmt werden.

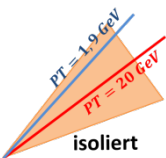
Die Organisation der Masterclasses fiel an den einzelnen Standorten nur geringfügig unterschiedlich aus, wobei unterschiedliche Foki auf dem Anteil an Vorlesungen zu Teilchenphysik, der Vorstellung des Instituts bzw. den Übungen und der Messung lagen. Anhand der Ergebnisse des Fragebogens und der Datenauswertung ist eine leichte Tendenz zu erkennen, dass die unterschiedlichen Ziele nicht alle gleichzeitig erreicht werden können, sondern Zeit für längere Einführungsvorlesungen auf Kosten der Messerfolge der Jugendlichen geht. Vor allem die für Übung 2 tatsächlich zur Verfügung stehende Zeit begünstigt scheinbar die Erfolge bei der Messung. Möchte man also die Ergebnisse der Jugendlichen bei den Messaufgaben verbessern, muss mehr Zeit zum Üben zur Verfügung stehen, vor allem um auf die typischen Probleme der Jugendlichen mit dem Event Display einzugehen.

Während der Computerarbeitszeit wird die zum W-Pfad gehörende Website ausgiebig genutzt, vor allem für die eingebetteten Übungen. Die Tutoren zeigen ein gutes Gespür für die Probleme der Jugendlichen bei der Datenanalyse und bestätigen die Problemfelder, die sich aus der Datenanalyse ergeben haben. In einigen Punkten besteht auch unter den Experten Klärungsbedarf. Als ein großes Problem wird die didaktische Rekonstruktion der physikalischen Inhalte empfunden. Der Versuch, Jugendlichen ohne Vorwissen die in Kapitel 3 und 4 dargestellten Grundlagen vollständig innerhalb eines Tages zu vermitteln, kann natürlich nicht gelingen. Viele der Betreuer scheinen dieser Menge an Inhalten eher hilflos gegenüberzustehen und brauchen möglicherweise Tipps, welche Inhalte in welchem Umfang in verständlicher Weise erklärt werden können.

## 7. FAZIT

Die Datenanalyse bestätigt eine vergleichsweise niedrige Trefferquote für WW-Kandidaten. Diese kann nicht mit Unterschieden zwischen den Datenpaketen erklärt werden, auch wenn sich die Datenpakete deutlich z. B. in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Die Messaufgaben beeinflussen sich tatsächlich in nicht zu vernachlässigendem Ausmaß gegenseitig, eine Trennung der Messaufgaben ist aber prinzipiell nicht nötig, wenn man allgemein die Ergebnisse der Jugendlichen verbessert unter anderem durch eine Änderung der Selektionskriterien, wie in Tabelle 8 vorgeschlagen. Damit steht eine hohe Zahl an WW-Kandidaten trotz des Unterschreitens der bisher verwendeten Selektionskriterien für die Messung zur Verfügung.

*Tabelle 8 - Gegenüberstellung bisheriger Selektionskriterien und eines Vorschlages für neue Selektionskriterien, fett: geänderte Werte*

	<b>bisher</b>	<b>neu</b>
<b><math>W^+ / W^-</math> Signal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>MET &gt; 25</math> GeV</li> <li>▪ Genau ein von Jets isoliertes, elektrisch geladenes Lepton mit <math>p_T &gt; 20</math> GeV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>MET &gt; \mathbf{20}</math> GeV</li> <li>▪ Genau ein von Jets isoliertes, elektrisch geladenes Lepton mit <math>p_T &gt; 20</math> GeV</li> </ul>
<b>WW Signal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Genau zwei von Jets isolierte, entgegengesetzt geladene Leptonen mit <math>p_T(L_1) &gt; 15</math> GeV und <math>p_T(L_2) &gt; 25</math> GeV</li> <li>▪ <math>MET &gt; 25</math> GeV für Leptonen unterschiedlicher Familien</li> <li>▪ <math>MET &gt; 50</math> GeV für Leptonen der gleichen Familie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Genau zwei von Jets isolierte, entgegengesetzt geladene Leptonen mit <math>p_T(L_1) &gt; \mathbf{10}</math> GeV und <math>p_T(L_2) &gt; \mathbf{20}</math> GeV</li> <li>▪ <math>MET &gt; \mathbf{20}</math> GeV für Leptonen unterschiedlicher Familien</li> <li>▪ <math>MET &gt; \mathbf{40}</math> GeV für Leptonen der gleichen Familie</li> </ul>
<b>Isolationskriterium</b>		<p>Ein Lepton gilt als isoliert, wenn keine hochenergetischen* Spuren in einem Kegel von <math>\Delta R &lt; 0,2</math> liegen.</p> <p>*hochenergetisch:  <math>p_T(\text{Spur}) &gt; 10\% \cdot p_T(\text{Lepton})</math></p>

Das Isolationskriterium beinhaltet im Gegensatz zur Selektion nicht die Summe über alle Spuren innerhalb eines Kreiskegels, sondern nur eine Spur. Die Erfahrung aus der Datenanalyse zeigt aber, dass diese Vereinfachung ausreichend ist. Möglicherweise wäre es sinnvoll, das Isolationskriterium in das Event Display MINERVA einzuarbeiten, so dass bei einer Winkelmessung neben dem Winkel  $\Phi$  und der Größe  $\Delta R$  auch ausgegeben wird, ob die höher energetische Spur aufgrund des genannten Kriteriums als isoliert von der zweiten angeklickten Spur zu betrachten ist. Somit wird den Jugendlichen zwar eine interessante Entscheidung abgenommen, die Jugendlichen aber auch nicht noch stärker im Umgang mit dem Event Display gefordert, wobei einer der typischen Fehler in der Datenanalyse mit MINERVA in der Problematik der Isolation von Spuren liegt.



Dass das Event Display eine Herausforderung darstellt, zeigen auch die anderen typischen Stolpersteine der Jugendlichen beim Analysieren von Ereignissen: Die Bedeutung der Seitenansicht und des Legoplots werden unterschätzt, Myonen selten erkannt, weil die Myonenkammern bei einer hereingezoomten Detektoransicht nicht mehr sichtbar sind. Zusätzlich wird oft vergessen zu kontrollieren, ob zwei Spuren demselben Vertex entstammen und ob eine Spur im inneren Detektor überhaupt mit Einträgen im elektromagnetischen Kalorimeter bzw. einer Spur im Myonspektrometer kombiniert werden kann. Da viele dieser Fehlerursachen nicht nur die Jugendlichen sondern auch die Experten betrifft, lohnt es sich, diese explizit zu thematisieren, z. B. während der Übung 2 bzw. im Tutorenguide, letzterer könnte um einige physikalische Grundlagen der Messaufgaben sowie eine mögliche didaktische Rekonstruktion dieser Grundlagen ergänzt werden.

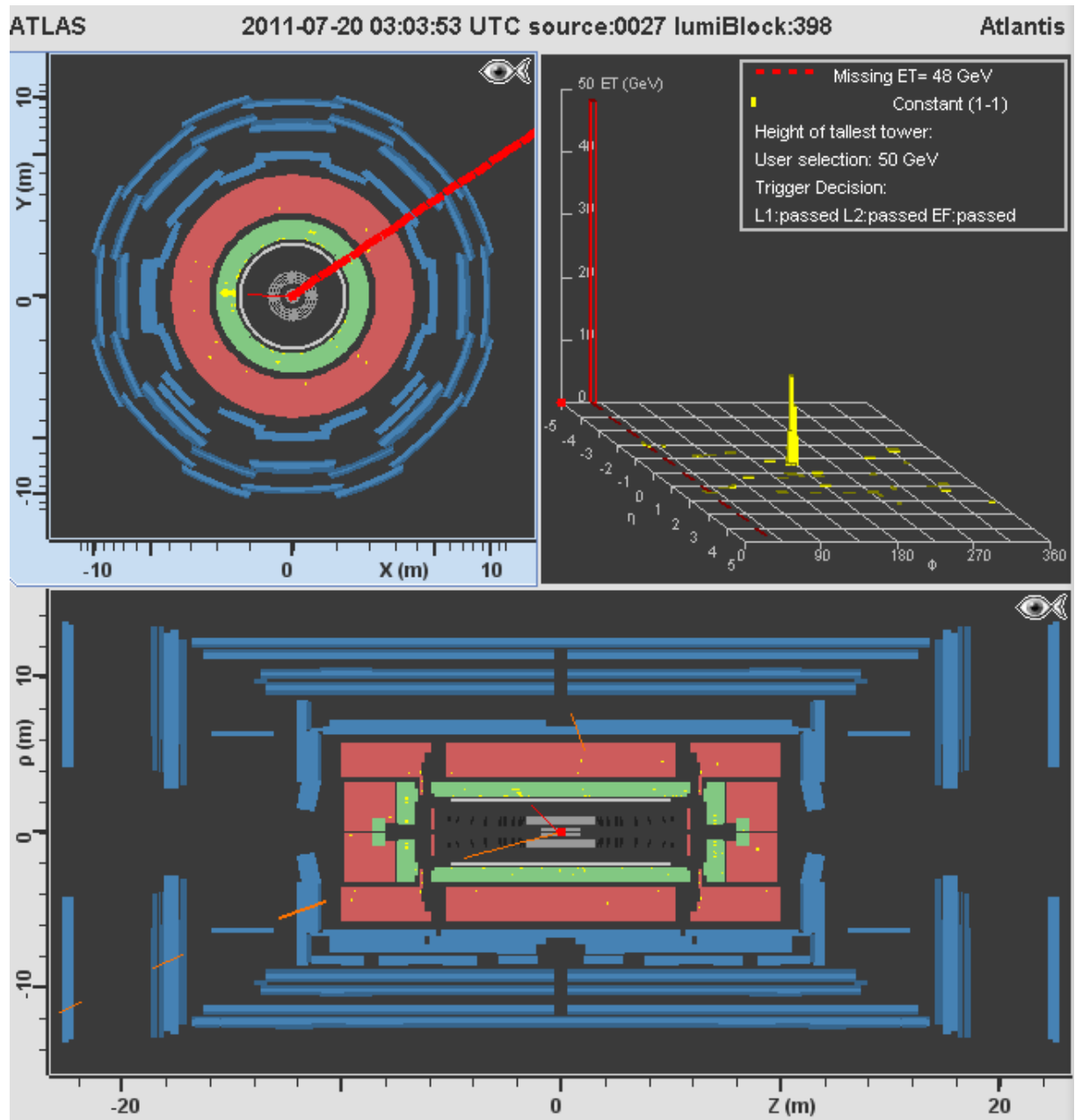
Die Ergebnisse des Fragebogens verstärken die Vermutung aus der Datenanalyse, dass die Unterschiede in Organisation und Durchführung der Masterclasses am jeweiligen Institut einen großen Einfluss auf die Messergebnisse der Jugendlichen haben: Lange Vorlesungen oder gar Zeitverzug stehen in Zusammenhang mit vergleichsweise wenigen richtig identifizierten WW-Kandidaten. Vor allem die Umsetzung der Übungen ist von zentraler Bedeutung für eine erfolgreiche Messung. Inwieweit der Fokus auf interessanten Vorlesungen oder der Messtätigkeit der Jugendlichen liegen sollte bzw. wie man es schaffen kann beide Zielstellungen der Internationalen Masterclasses umzusetzen, bleibt zu diskutieren.

Die Physik des LHC ist komplex und lässt sich nicht auf Schulniveau erklären. Die Masterclasses haben dies allerdings auch nicht zum Ziel, ebenso wenig sollen Ergebnisse der ATLAS Kollaboration möglich genau reproduziert werden. Vielmehr sollen die Jugendlichen einen Einblick in die Welt der Teilchenphysik bekommen inklusive typischer Probleme im Forschungsprozess der Physiker, um das Interesse an Physik zu wecken. Dieses Ziel erreicht man womöglich auch, wenn die Jugendlichen viele der Ereignisse nicht richtig identifizieren aber trotzdem Spaß an der Messung haben. Nichtsdestotrotz können einige Veränderungen an den Masterclasses die Trefferquoten sicherlich verbessern, ohne dass das Erlebnis einer Teilnahme an den Internationalen Masterclasses der Teilchenphysik gemindert wird.

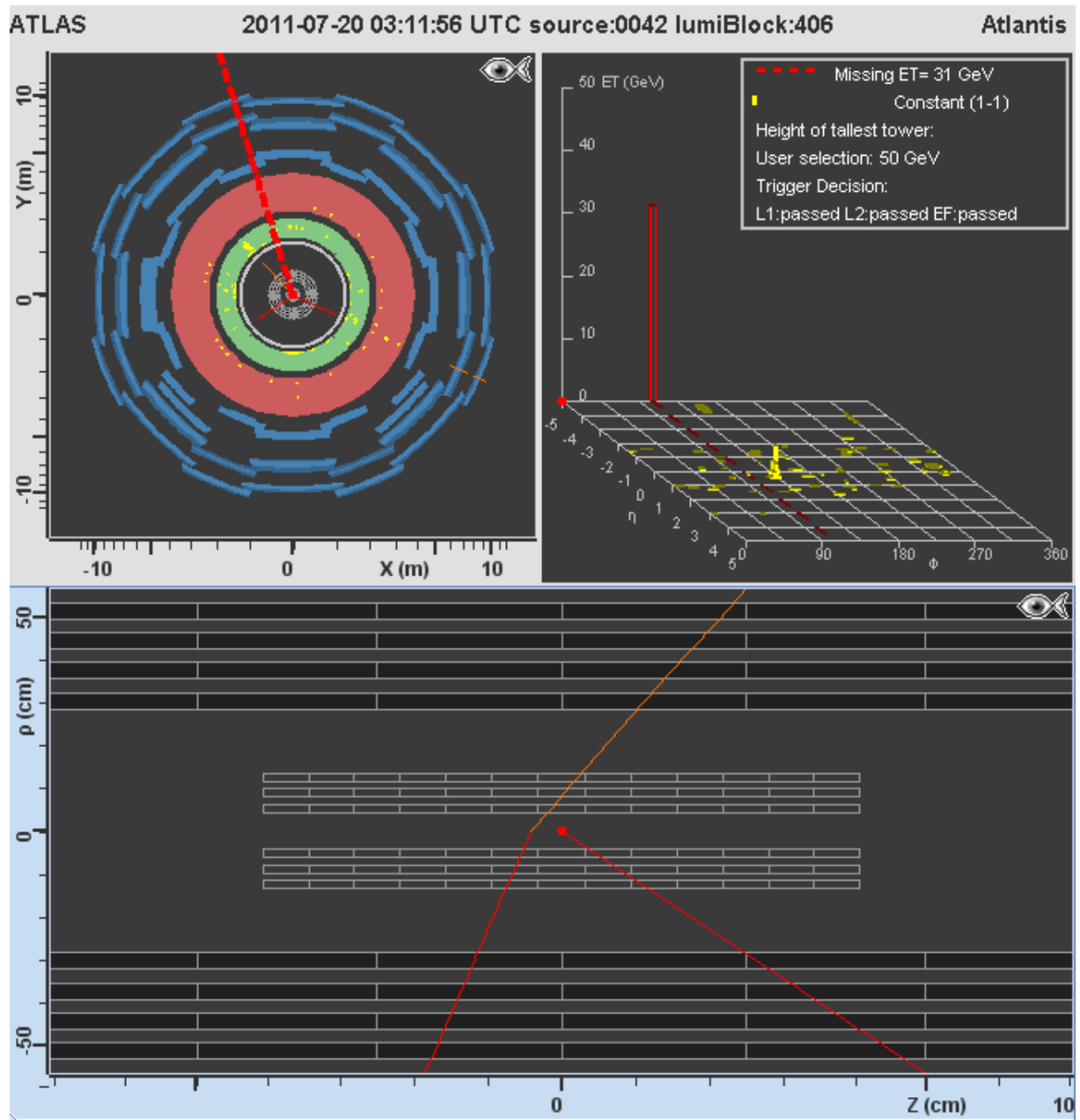
## 8. ANHANG

### 8.1. TYPISCHE PROBLEME BEI DER IDENTIFIZIERUNG VON WW-KANDIDATEN

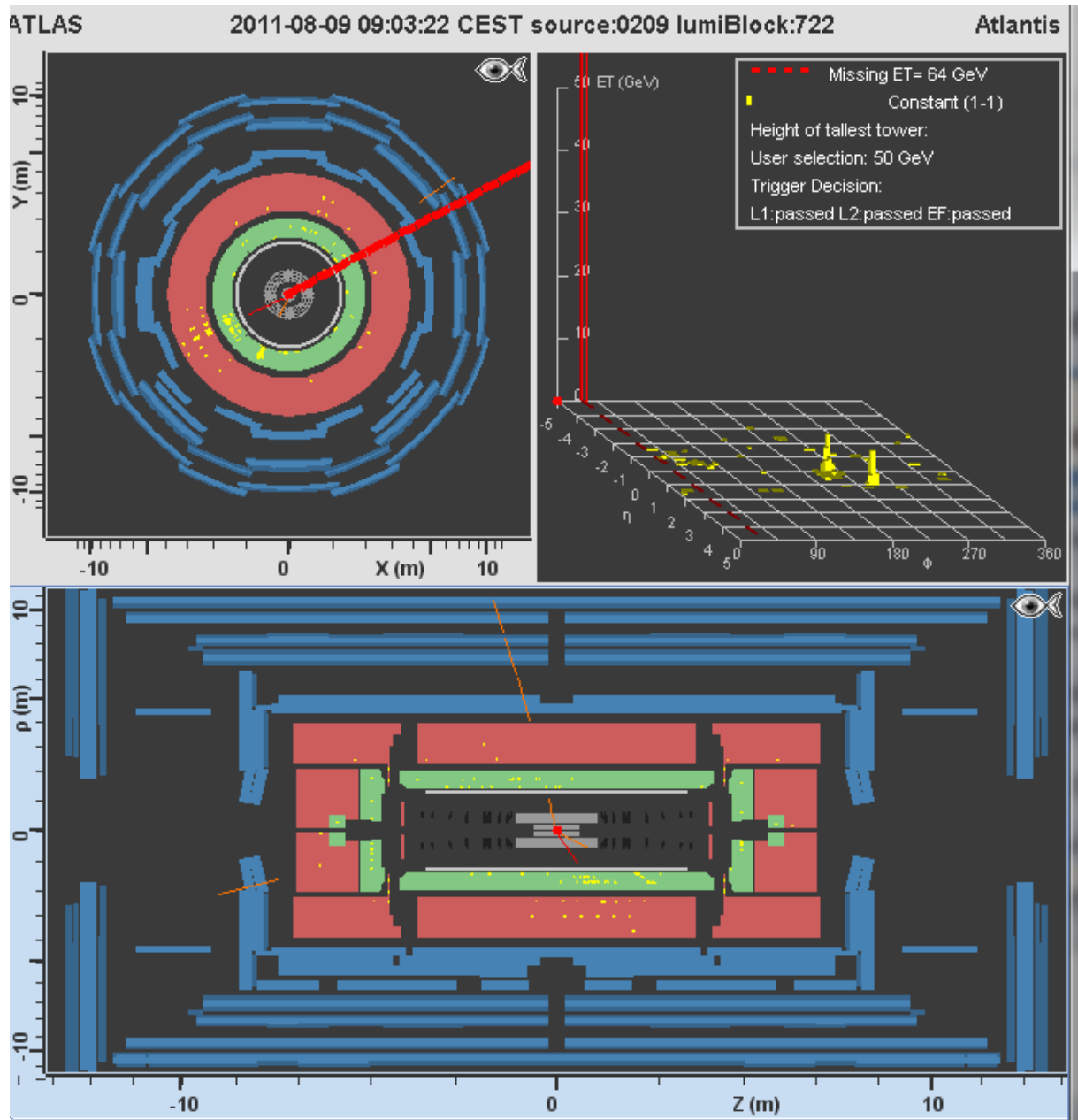
- a) Ein Teil der Spuren in nicht in der Querschnittsansicht sondern nur im Längsschnitt durch den Detektor sichtbar.



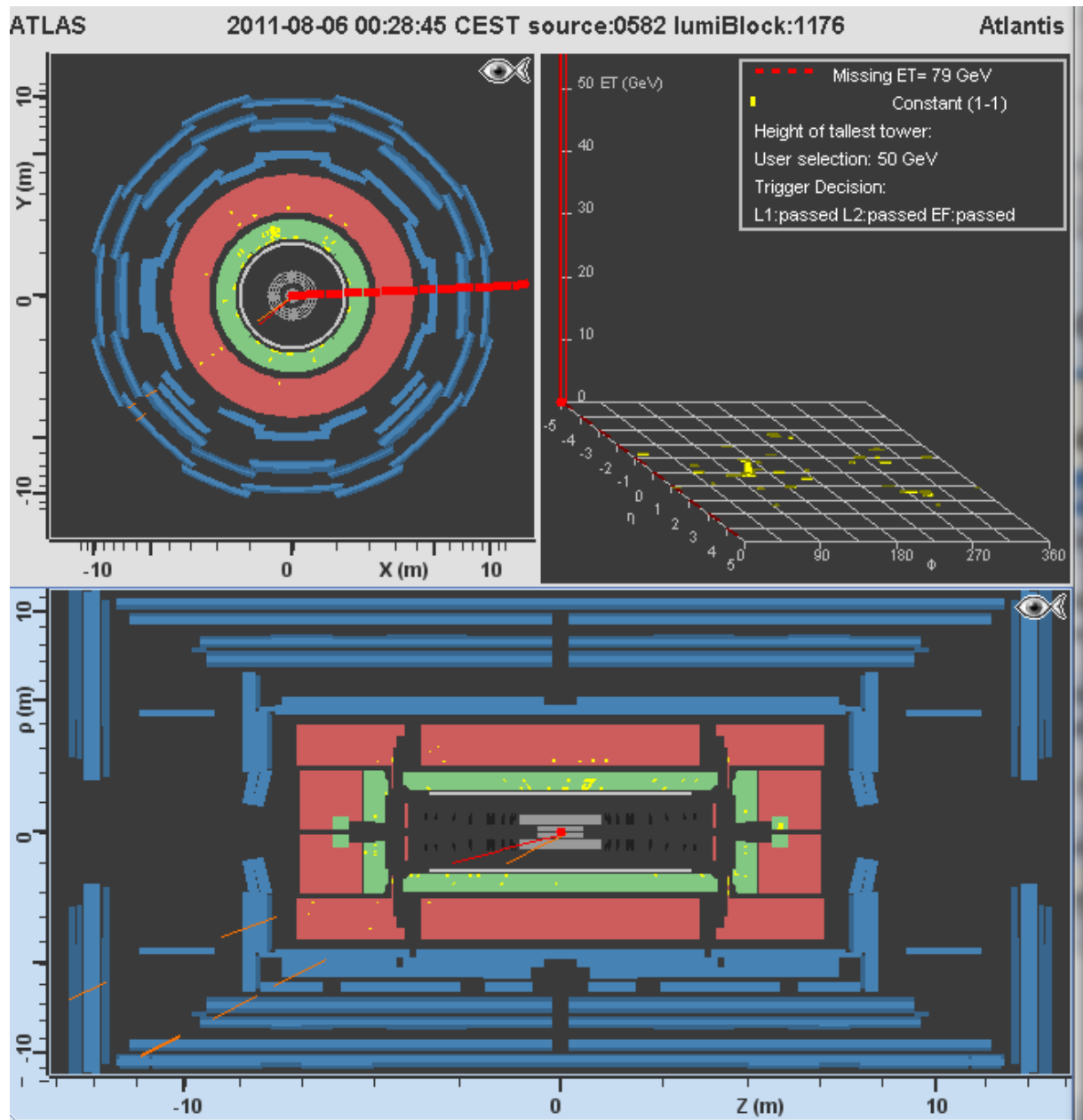
b) Es sind mehr als zwei interessante Spuren zu sehen, erst durch Zurückverfolgen zum Wechselwirkungspunkt erkennt man genau zwei Spuren.



- c) Es sind mehr als zwei interessante Spuren zu sehen, erst durch Überprüfen der Isolation bleiben genau zwei Spuren übrig.



- d) Der Zerfall von W-Bosonen in Myon und Antimyon hinterlässt keinen Eintrag im Energiehistogramm des Kalorimeters, nur durch Spuren im Myonspektrometer kann man diese Ereignisse richtig einordnen.



## 8.2. FRAGEBOGEN

erstellt mit Google Drive, siehe auch [41]

## Realisation of International Masterclasses in March 2013

Hi, my name is Julia Woithe and I am working on my master's thesis at TU Dresden under supervision of Michael Kobel about the interpretation of ATLAS-data by students in the context of the W-path of the International Masterclasses 2013.

During the measurement students had two tasks: The first one was identification of W decays, the second one identification of Higgs candidates. The students' results from the Higgs search showed a large variability with respect to the expectation.

In the framework of my master's thesis I plan to evaluate the factors which influence the "hit rate" in recognizing Higgs-events, e.g. differences between the data samples or events, that are hard to identify. Another possible factor is the preparation of the students: Normally students listen to talks in the morning and proceed with an introduction to the identification of particles by analysing their tracks with the help of the Event Display (Exercise 1). Afterwards students try out the software by themselves identifying 10 events in Exercise 2. After this preparation pairs of students start their Measurement and analyse 50 ATLAS-events.

In order to get an overview of the realisation of your Masterclass it would be of great help if you take 15 minutes to think back to the day of your Masterclass and answer the following questions. Since detailed questions concerning the measurement address more to the tutors, please forward this link to persons involved in tutoring.

Your answers will be helpful in improving the next measurement!  
Thanking you in anticipation,

Julia Woithe

PS: Since the editing time for my thesis is limited to 4 months, please answer by 21/05/2013.

\* **Erforderlich**

1. **Your institute and location:** \*

---

2. **Did you ... ?** \*

If you did both, organise the Masterclass AND coach students as tutor, please fill out the questionnaire twice.

*Markieren Sie nur ein Oval.*

- organise the Masterclass *Weiter mit Frage 3*  
 coach students as tutor *Weiter mit Frage 10*

*Weiter mit Frage 3*

### General questions about the organisation

---

3. **Date(s) of your Masterclass(es):** \*

(e.g. 11/03/2013)

---

4. **Total number of participants:**

---

5. **How many International Masterclasses have been organised before at your institute?**

*Markieren Sie nur ein Oval.*

- This year was the first time.
- 1-2
- more than 2

6. **The students participating in your Masterclass did register mostly as**

*Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.*

- whole classes
- groups of students
- individuals

7. **Please describe the detailed schedule of your Masterclass-Day. I am especially interested in the duration of talks, exercises and the measurement.**

It is also possible to send the schedule per mail to: [julia.woithe@mailbox.tu-dresden.de](mailto:julia.woithe@mailbox.tu-dresden.de) or leave a download-link.

---

---

---

---

---

## Preparation through talks

---

I am especially interested in the amount the talks refer to the following measurement. If you leave a download link of the slides of the given talk (or send them per mail to [julia.woithe@mailbox.tu-dresden.de](mailto:julia.woithe@mailbox.tu-dresden.de)), I would analyse the content by myself.

8. **download-link for slides of the given talks:**

---



9. **If this is not possible, please mark which of the following topics have been discussed.**

*Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.*

- electronvolt eV
- ionisation
- movement of electrically charged particles in electric and magnetic fields
- conservation of momentum
- conservation of energy
- $E=mc^2$
- standard model
- antiparticles
- fundamental interactions
- force carrier particles
- Higgs mechanism
- analogy of Higgs mechanism
- production of H
- decay of H
- angle between the 2 electrically charged leptons in transverse plane in the  $H \rightarrow l\nu l\nu$  decay channel
- ATLAS detector
- analysis of particle tracks in the different components of the ATLAS detector
- event display

### Questions about the measurement

First of all, thank you for coaching the students during their measurement, this is maybe the time students will remember the most!

Every tutor has his own way to explain and I don't think there is a best way especially in explaining particle physics to students. But maybe we could learn, which ways are working very well and which are the main difficulties for students. Therefore it would be of great help if you try to remember your experiences during the International Masterclasses in March.

Feel free to write down your own ideas at the end of the questionnaire!

*Weiter mit Frage 47*

10. **Date(s) of your Masterclass(es): \***

(e.g. 11/03/2013)

---

11. **How many tutors were there to coach how many students?**

(e.g. 2 tutors for 30 students)

---

12. **How often have you been a Masterclass tutor before?**

*Markieren Sie nur ein Oval.*

- This year was my first time as tutor.
- 1-2
- more than 2

13. **Was there a preparation for tutors? If so, in what form?**  
(e.g. training, meeting, handout, ...)

---

---

---

---

---

14. **Did you read the ATLAS W path guide for tutors?**  
[http://physicsmasterclasses.org/downloads/guide\\_ATLAS\\_W\\_2013\\_v2.pdf](http://physicsmasterclasses.org/downloads/guide_ATLAS_W_2013_v2.pdf)  
*Markieren Sie nur ein Oval.*

- yes  
 no

15. **If so, did you study the solutions of Exercise 2 on pages 11-21?**

---

16. **How much time did you approximately spend on the preparation?**

---

### Explaining particle physics ...

The first analysis of the results showed, that there are a few typical problems with the use of the Event Display. The following questions might be asked by students during their measurement, how would you answer?

17. **Student 1: "If I don't clearly see any yellow bar in the calorimeter view, is this event always a Background event?"**

---

---

---

---

---

18. **Did a question of this kind occur among your students?**  
*Markieren Sie nur ein Oval.*

- yes  
 no

19. **Student 2: "Why are some tracks visible in the side view and not in the cross-sectional view?"**

---

---

---

---

---

20. **Did a question of this kind occur among your students?**

*Markieren Sie nur ein Oval.*

yes

no

21. **Student 3: "How can I be sure that two tracks are coming from the same vertex?"**

---

---

---

---

---

22. **Did a question of this kind occur among your students?**

*Markieren Sie nur ein Oval.*

yes

no

23. **Student 4: "How can I be sure that a track is isolated from Jets?"**

---

---

---

---

---

24. **Did a question of this kind occur among your students?**

*Markieren Sie nur ein Oval.*

yes

no

25. **Student 5: "Which values are important to decide whether the event is a WW candidate or not?"**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

26. **Did a question of this kind occur among your students?**

*Markieren Sie nur ein Oval.*

- yes
- no

27. **Do you remember other typical questions?**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

28. **There are a lot of functions and physical variables in the Event Display that can be used to identify events. Please estimate the degree of understanding by your students on a scale of 1-6 for the following features:**

*Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.*

	0 - not used	1 - not understood at all	2	3	4	5	6 - understood completely
meaning of different views	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
MET	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
PT-cuts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zoom	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
output of electric charge	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
output of opening angle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
enlarged side view to distinguish vertices	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
identify whether tracks are well isolated from Jets	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Exercise 1 (identifying particles)**

in reference to [http://kjen.de/web.cern.ch/kjen.de/en/wpath\\_teilchenid1.htm](http://kjen.de/web.cern.ch/kjen.de/en/wpath_teilchenid1.htm) (or

[http://atlas.physicsmasterclasses.org/en/wpath\\_teilchenid1.htm](http://atlas.physicsmasterclasses.org/en/wpath_teilchenid1.htm))

29. **Did you use the website of the W-Path?**

\_\_\_\_\_

30. **If so, which subitems were used?**

*Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.*

- Particle Identification APP ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_teilchenid1.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_teilchenid1.htm))
- ATLAS detector ..... (<http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/atlas.htm>)
- The Event Display Minerva ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_teilchenid2.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_teilchenid2.htm))
- Identifying Particle ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_teilchenid3.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_teilchenid3.htm))
- Exercise 1 ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_exercise1.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_exercise1.htm))

31. **What was the format of Exercise 1?**

*Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.*

- interactive tutor-class dialog
- talk
- work in pairs
- individual work
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

32. **What evaluation of the exercise was done?**

*Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.*

- discuss every event
- answer open questions
- none
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

33. **Which version of the Event Display did you use?**

*Markieren Sie nur ein Oval.*

- simplified
- original
- I don't know the difference.

34. **Could you estimate how long Exercise 1 did take?**

\_\_\_\_\_

## Exercise 2 - Identifying Events

in reference to [http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_ereignis.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_ereignis.htm) (or [http://atlas.physicsmasterclasses.org/en/wpath\\_ereignis.htm](http://atlas.physicsmasterclasses.org/en/wpath_ereignis.htm))

35. **Did you use the website of the W-Path?**

\_\_\_\_\_

**36. If so, which subitems were used?**

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Research at the LHC ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_lhcphysics1.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_lhcphysics1.htm))
- W particle ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_lhcphysics2.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_lhcphysics2.htm))
- Identifying Events ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_lhcphysics3.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_lhcphysics3.htm))
- Exercise 2 ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_exercise2.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_exercise2.htm))
- Higgs particle ..... ([http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath\\_higgs.htm](http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath_higgs.htm))

**37. What was the format of Exercise 2?**

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- interactive tutor-class dialog
- talk
- work in pairs
- individual work
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

**38. What evaluation of the exercise was done?**

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- discuss every event
- answer open questions
- none
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

**39. Could you estimate how long Exercise 2 did take?**

\_\_\_\_\_

**Measurement - Analysis of 50 ATLAS-events****40. How many students have been in your group?**

\_\_\_\_\_

**41. Which data sample did your group analyse? \***

(e.g. 1A-1K, 4)

\_\_\_\_\_

**42. Before starting the Measurement: Was there a summary of the tasks of the Measurement and the needed information?**

\_\_\_\_\_

**43. If so, which topics were discussed?**

*Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.*

- production of  $W^+W^-$
- decay of  $W^+W^-$
- production of H
- decay of H
- background processes
- criteria for signal event
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

**44. How long did the summary approximately take?**

\_\_\_\_\_

**45. To german institutes: Did the students use the handout including the decision tree?**

[http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/Material\\_Lehrkraefte/WPfad2013\\_Handout.pdf](http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/WPfad2013_Handout.pdf)

\_\_\_\_\_

**46. Could you estimate how much time the students had to analyse their data sub sample of 50 events?**

\_\_\_\_\_

### Further Ideas

**47. Is there anything you would like to change in the exercises or the measurement to improve the Masterclasses?**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### Thank you very much for your time and suggestions!

Don't forget to submit your answers.

Bereitgestellt von  




## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] „Duden,“ Bibliographisches Institut GmbH, 2013. [Online]. Available: [www.duden.de](http://www.duden.de). [Zugriff am 06 07 2013].
- [2] K. E. Johansson, M. Kobel, D. Hillebrandt und K. Engeln, „European particle physics masterclasses make students into scientists for a day,“ *Physics Education* 42, pp. 636-644, November 2007.
- [3] „MINERVA,“ CERN Web Services, [Online]. Available: <http://atlas-minerva.web.cern.ch>. [Zugriff am 01 07 2013].
- [4] A. Experiment, „ATLAS LIVE,“ [Online]. Available: <http://atlas-live.cern.ch/>. [Zugriff am 06 07 2013].
- [5] K. Jende, „Usage of ATLAS Data in International Masterclasses, German Netzwerk Teilchenwelt,“ in *ATLAS Week Outreach Parallel Session*, 2012.
- [6] C. Hasterok, „Higgs --> WW Selection at 7 TeV for the international Masterclasses,“ in *ATLAS W path (Guide for tutors)*, 2012.
- [7] Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport, *Lehrplan Gymnasium Physik*, Dresden, 2004/2007/2009/2011.
- [8] E. Kircher, R. Girwidz und P. Häußler, *Physikdidaktik*, Heidelberg, 2010.
- [9] M. Kobel, „High School students' exposure to modern particle physics,“ *europysics news*, pp. 108-110, Mai/Juni 2003.
- [10] „International Particle Physics Outreach Group (IPPOG),“ [Online]. Available: <http://ippog.web.cern.ch/>. [Zugriff am 02 07 2013].
- [11] K. Gedigk, A. Glück und M. Kobel, „Netzwerk Teilchenwelt - Ein mobiler Lernort für Teilchenphysik,“ *PdN Physik in der Schule Heft 2*, pp. 29-33, 2011.
- [12] „Netzwerk Teilchenwelt - Quarks, Elektronen und Co,“ [Online]. Available: <http://www.teilchenwelt.de>. [Zugriff am 15 07 2013].
- [13] J. Bleck-Neuhaus, *Elementare Teilchen - Moderne Physik von den Atomen bis zum Standard-Modell*, Heidelberg, 2010.
- [14] D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, Weinheim, 2008.
- [15] J. Behringer et al. (Particle Data Group), *Phys. Rev. D86* <http://pdg.lbl.gov>, p. 010001, 2012.
- [16] ATLAS Collaboration, „Observation of a new particle in the search for the Standard Model

- Higgs boson," *Physics Letters B* 716, pp. 1-29, 2012.
- [17] J. Dalton, „Kap IV: Von den einfachen oder elementarischen Stoffen,“ in *Ein neues System des chemischen Theiles der Naturwissenschaft Band 2*, Berlin, 1813.
- [18] F. Halzen und A. D. Martin, „Quarks and Leptons,“ p. 17, 1984.
- [19] J. Steinberger, *Learning about particles - 50 privileged years.*, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [20] V. I. Martinez Outschoorn, *Measurement of the Charge Asymmetry of W Bosons Produced in pp Collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV with ATLAS Detector*, Dissertation Harvard University, 2011.
- [21] ATLAS Collaboration, „Measurement of the  $W \rightarrow l\nu$  and  $Z/\gamma^* \rightarrow ll$  production cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV with the ATLAS detector,“ *arXiv:1010.2130v1 [hep-ex]*, 2010.
- [22] ATLAS Collaboration, „Measurement of the inclusive  $W^{+-}$  and  $Z/\gamma^*$  cross sections in the  $e$  and  $\mu$  decay channels in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV with the ATLAS detector,“ *arXiv:1109.5141v3 [hep-ex]*, 2011.
- [23] CDF, D0 Collaborations und Tevatron New Phenomena, Higgs Working Group, „Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard Model Higgs Boson Production with up to 8.6 fb<sup>-1</sup> of Data,“ *arXiv:1107.5518 [hep-ex]*, 2011.
- [24] ATLAS Collaboration, „Combined measurements of the mass and signal strength of the Higgs-like boson with the ATLAS detector using up to 25 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data,“ ATLAS-CONF-2013-014, 5 März 2013. [Online]. Available: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults>.
- [25] ATLAS Collaboration, „Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data,“ *arXiv:1307.1432 [hep-ex]*, pp. 1-30, submitted 04.07.2013.
- [26] LHC Higgs Cross Section Working Group (HXSWG). [Online]. Available: [https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections#Latest\\_plots](https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections#Latest_plots). [Zugriff am 08 07 2013].
- [27] A. Djouadi, „The anatomy of electroweak symmetry breaking Tome I: The Higgs boson in the Standard Model,“ *Physics Reports Volume 457, Issues 1–4*, pp. 1-216, 2008.
- [28] T. Plehn, „Lectures on LHC Physics,“ in *Lecture Notes in Physics 844*, Berlin Heidelberg, 2012.
- [29] The ATLAS Experiment © 2011 CERN, „ATLAS Fact Sheet,“ [Online]. Available: [http://www.atlas.ch/fact\\_sheets.html](http://www.atlas.ch/fact_sheets.html). [Zugriff am 2013].
- [30] „International Masterclasses - Hands on Particle Physics,“ 2013. [Online]. Available: <http://kjende.web.cern.ch/kjende/en/wpath.htm>. [Zugriff am 16 07 2013].
- [31] „ATLAS Experiment,“ [Online]. Available: <http://atlas.ch/>. [Zugriff am 15 06 2013].
- [32] U. Egede, *The search for a standard model Higgs at the LHC and electron identification using transition radiation in the ATLAS tracker*, Lund University, Dissertation, 1997.

- [33] G. Lehmann et al, The DataFlow System of the ATLAS Trigger and DAQ, Proceedings from the CHEP03 conference, arXiv:cs/0306101v1 [cs.SE]: California, 2003.
- [34] Köneke, K. (for the ATLAS Collaboration), „A new data format for the commissioning phase of the ATLAS detector,“ *Journal of Physics: Conference Series* 219, p. 032047, 2010.
- [35] M. Cacciari , G. P. Salam und G. Soyez, „The anti-k<sub>t</sub> jet clustering algorithm,“ *arXiv:0802.1189 [hep-ph]*, 2008.
- [36] J. Eckert, „Datenauswahl von W- und Z-Zerfällen vom ATLAS-Detektor des LHCs für die Masterclasses,“ *Besondere Lernleistung (BeLL) am BSZ für Technik und Wirtschaft Riesa*, 2011.
- [37] R. Schulz, „Vorselektion von Ereignismengen für die Messung von W- und Z-Bosonen im LargeHadron Collider an Schülerforschungstagen und Vergleich zwischen Simulation und realen Daten,“ *Wissenschaftliche Arbeit im Fach Physik, TU Dresden*, 2011.
- [38] ATLAS Collaboration, „Search for the Higgs Boson in the  $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$  Decay Channel in pp Collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV with the ATLAS Detektor.,“ *Phys Rev Lett* 108, pp. 111802-111820, arXiv:1112.2577v3 [hep-ex] 2012.
- [39] Teilchenwelt-Team, „Handout für Teilchenphysik-Masterclasses, ATLAS-Daten W-Pfad (2013),“ [Online]. Available: [http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/Material\\_Lehrkraefte/WPfad2013\\_Handout.pdf](http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/WPfad2013_Handout.pdf). [Zugriff am 22 07 2013].
- [40] ATLAS Collaboration, „Measurement of the top quark pair production cross section with ATLAS in pp collisions at 7 TeV,“ ATLAS-CONF-2011-034, 2011. [Online]. Available: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2011-034/>.
- [41] J. Woithe, „Realisation of International Masterclasses in March 2013,“ 07 05 2013. [Online]. Available: <https://docs.google.com/forms/d/111uAhv4CpO1xqjK7EfxeM4A0CSy-wv6FYBHHjIb4sTk/viewform>.
- [42] D. Wollschläger, Grundlagen der Datenanalyse mit R: Eine anwendungsorientierte Einführung, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [43] U. Bilow, C. Hasterok , K. Jende, M. Kobel und C. Rudolph, „ATLAS W path (Guide for tutors),“ 2013. [Online]. Available: [http://physicsmasterclasses.org/downloads/guide\\_ATLAS\\_W\\_2013\\_v2.pdf](http://physicsmasterclasses.org/downloads/guide_ATLAS_W_2013_v2.pdf). [Zugriff am 01 06 2013].
- [44] ATLAS Collaboration, „Electron performance measurements with the ATLAS detector using the 2010 LHC proton-proton collision data,“ *Eur. Phys. J. C* 72, arXiv:1110.3174v2 [hep-ex], p. 1909, 2012.
- [45] ScienceBlogs, „Fermi-Probleme: Wieviele Ameisen gibt es auf der Welt?,“ 2013. [Online]. Available: <http://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2010/09/14/fermi-probleme-wieviele-ameisen-gibt-es-auf-der-welt/>. [Zugriff am 27 07 2013].

