
Entwicklung von Begleitmaterialien für die
Teilchenphysik-Masterclasses des „Netzwerk
Teilchenwelt“

Im Fach Physik

vorgelegt von Linda Kühlem

betreut durch Dr. Barbara Valeriani-Kaminski

Sommersemester 2015

Bonn, den 31.08.15

Ich versichere hiermit, dass die Bachelorarbeit mit dem Titel „Entwicklung von Begleitmaterialien für die Teilchenphysik-Masterclasses des „Netzwerk Teilchenwelt““ von mir selbst und ohne unerlaubte Hilfe selbstständig angefertigt wurde, dass sie noch an keiner anderen Hochschule zur Prüfung vorgelegen hat und dass sie weder ganz noch in Auszügen veröffentlicht worden ist. Die Stellen –einschließlich Tabellen, Karten, Abbildungen usw.- die andern Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall kenntlich gemacht.

Bonn, den 31.08.15

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangszustand

1.1 Teilchenphysik-Masterclasses – Erklärung, Ziele, Standardprogramm.....	4
1.2 Das Standardmodell der Teilchenphysik.....	5
1.3 Der ATLAS-Detektor.....	8
1.4 Das Programm MINERVA und der W-Pfad.....	11
1.5 Problemstellung und Zielsetzung.....	16
1.6 Theorie des Lernspiels.....	19

2. Spielentwicklung

2.1 Spielidee.....	20
2.2 Materialentwicklung.....	22
2.3 Erster Praxistest.....	24
2.4 Evaluation	
2.4.1 Fragestellung.....	26
2.4.2 Fragebogenentwicklung und Auswertung.....	27
2.4.3 Beobachtung und Rückmeldung.....	29
2.5 Überarbeitung	
2.5.1 Vorgenommene Änderungen.....	30
2.5.2 Deren Auswirkungen.....	31

3. Schlussbetrachtung

3.1 Fazit.....	32
3.2 Ausblick.....	33

4. Anhang

4.1 Nötige Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler.....	34
4.2.1 Erklärungsnotizen für die Spielleitung und wichtige Fragen im Spielverlauf.....	35
4.2.2 Wichtiges nach dem Spiel.....	35
4.3 Spielmaterial	
4.3.1 Spielanleitung.....	36
4.3.2 Ereigniszusammenstellung.....	38
4.3.3 Spielfeld	39
4.3.4 Spielkarten.....	40
4.3.5 Übersicht möglicher Ereignisse.....	42
4.3.6 Plakate.....	43
4.4 Evaluationsmaterialien	
4.4.1 Fragebogen.....	44
4.4.2 Grundausswertung.....	48
4.4.3 Beobachtungshilfe.....	51
4.4.4 Rückmeldungen (als grobe Mitschrift).....	52
4.5 WW-Histogramme.....	53

5. Verzeichnisse

5.1 Literaturverzeichnis.....	54
5.2 Abbildungsverzeichnis.....	56

Vorwort

Die Teilchenphysik ist ein Gebiet, das erst seit dem Schuljahr 2014/2015 in den Lehrplänen nordrheinwestphälischer Schulen verankert ist und das auch nicht zu dem gehört, was unter Allgemeinbildung verstanden wird. Dabei ist die Suche nach einer Erklärung der Zusammensetzung der Welt Jahrtausende alt und beschäftigt heute eine Vielzahl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern.

Die Masterclasses des „Netzwerk Teilchenwelt“ leisten einen Beitrag dazu, Schülerinnen und Schüler die Wichtigkeit der Grundlagenforschung zu vermitteln und Nachwuchs zu fördern. Diese überwiegend von Doktorandinnen und Doktoranden der Teilchenphysik gestalteten Workshops gefielen mir seit der ersten Begegnung damit; deshalb möchte ich die Möglichkeit nutzen, im Rahmen meiner Bachelorarbeit didaktisch aufbereitetes Begleitmaterial dazu zu entwickeln.

1. Ausgangszustand und Zielsetzung

1.1 Teilchenphysik-Masterclasses – Erklärung, Ziele, Standardprogramm

Am „Netzwerk Teilchenwelt“ beteiligen sich 26 Forschungsinstitute an 24 Standorten in ganz Deutschland, die Workshops und Experimente zur Astroteilchen- und Teilchenphysik anbieten. Durch Teilnahme an dem Basisprogramm aus flächendeckenden Masterclasses, das sind Projekttag für Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe, oder Einführungsveranstaltungen für Projektleiter und Lehrkräfte, besteht die Möglichkeit, sich für Workshops beziehungsweise Lehrerfortbildungen am CERN zu qualifizieren¹. Weiterhin können besonders engagierte jugendliche, an Projektwochen teilzunehmen. Forschungsarbeit für Lehrkräfte gehört auch zum Programm.

Ziel des Netzwerkes ist es dabei, Neugier und Interesse an Grundlagenforschung zu wecken und Wissenschaftsnachwuchs zu fördern. Dabei sollen direkter Kontakt zu Wissenschaftlern und „eigene nachhaltige und authentische Erfahrungen mit reellen experimentellen Daten“² in selbstständiger Betätigung der Schülerinnen und Schüler im Vordergrund stehen.

Im Weiteren soll es nur noch um die „Teilchenphysik-Masterclasses“ des Netzwerkes gehen.

¹ <http://www.teilchenwelt.de/das-projekt/ueber-uns/>, besucht am 23.07.15

² Prof. Dr. Michael Kobel, Projektübersicht „Netzwerk Teilchenwelt“, Institut für Kern- und Teilchenphysik, Technische Universität Dresden, 19.10.2009

Typischerweise hält dabei eine Doktorandin oder ein Doktorand der Teilchenphysik zunächst einen Vortrag an einer Schule³ über die Grundlagen des Fachgebiets, also das Standardmodell der Teilchenphysik. Dabei stehen die Urknalltheorie, dunkle Materie, Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen untereinander im Fokus. Anschließend bekommen die Schülerinnen und Schüler, ebenfalls in Form eines Vortrags und eventuell von Demonstrationsexperimenten und kurzen Filmen begleitet, eine Einführung in die Möglichkeiten der Teilchendetektion. Zentrales Beispiel ist bei den Bonner Masterclasses der ATLAS-Detektor, da mehrere Arbeitsgruppen des physikalischen Instituts an diesem Projekt mitarbeiten. Außerdem stehen dazu besondere Materialien für die Vermittlung der Vorgänge an Schülerinnen und Schüler bereit, um im Anschluss reelle Messdaten des Detektors auswerten zu können.

Für die Teilnahme an einer Masterclass sind keine besonderen Vorkenntnisse der Teilchenphysik nötig, allerdings ist ein gewisses Vorwissen von Vorteil, um dem einführenden Vortrag folgen zu können. Die teilnehmenden Gruppen an diesen Masterclasses sind daher meistens Physikkurse der gymnasialen Oberstufe oder vergleichbaren Kenntnisstandes. Die Schülerinnen und Schüler sind also 15 bis 19 Jahre alt und besitzen meistens ganz gute Vorkenntnisse, da Teilchenphysik in NRW inzwischen im Lehrplan steht. Üblich ist, dass sie vertraut sind mit Begriffen wie Lorentzkraft, Elektron, Photon (als Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung) und Elektronenvolt als Energieeinheit.

Außer Doktorandinnen und Doktoranden wirken beispielsweise auch Dozentinnen und Dozenten oder Studierende bei den Masterclasses als sogenannte „Vermittler“ mit. In Bonn finden jedes Jahr 10-15 Teilchenphysik-Masterclasses statt.

1.2 Das Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell umfasst alle bisher bekannten Elementarteilchen und drei der vier bekannten Wechselwirkungen: die starke, die elektromagnetische und die schwache. Es vereint die wesentlichen Erkenntnisse der Teilchenphysik.

Die Elementarteilchen lassen sich in verschiedene Gruppen aufteilen. Die Bosonen, in Abbildung 1 rot (oder gelb, zum Higgs-Boson folgt später mehr) markiert, sind sogenannte Austauschteilchen. Sie vermitteln die verschiedenen Wechselwirkungen. Bosonen haben einen ganzzahligen Spin. Dann ist da die große Gruppe der Teilchen, die Materie bilden. Es handelt sich um Fermionen, also Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$. Diese ist unterteilt in die Quarks (in Abb. 1 lila) und die Leptonen (in Abb. 1 grün), die wiederum jeweils zwei Teilchen in drei Generationen oder Familien beinhalten. Die erste Familie umfasst das up- und down-Quark (u, d) und aus der Gruppe der Leptonen das Elektron und Elektron-Neutrino (e^- , ν_e), die zweite das charm- und strange-Quark (c, s) und das

³ In Bonn finden die Masterclasses gelegentlich auch im Physikalischen Institut der Universität oder im Deutschen Museum Bonn statt

Myon und sein Neutrino (μ, ν_μ). Die dritte Familie besteht aus top- und bottom Quark (t, b), dem Tau und dem Tau-Neutrino (τ, ν_τ). Grundsätzlich gilt, dass sich die Ladungen der Teilchen in jeder Familie wiederholen, die Masse jedoch ansteigt. Stabil sind außerdem nur die Teilchen der ersten Familie, die anderen zerfallen oft in ihre Entsprechungen aus leichteren Familien.

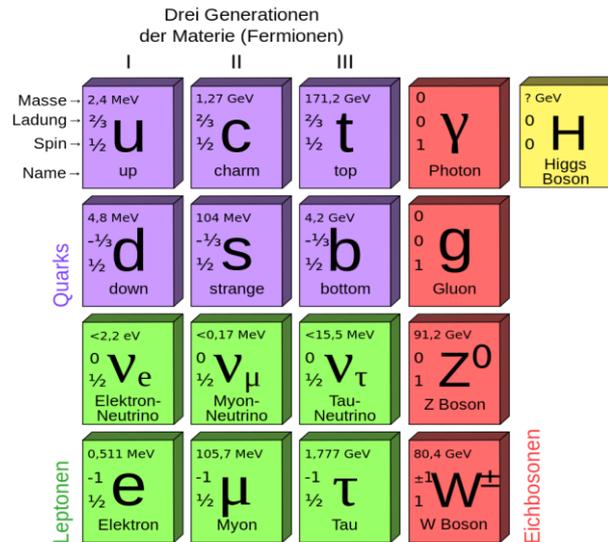


Abbildung 1: Das Standardmodell der Teilchenphysik⁴

Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit gleichem Spin und gleicher Masse, aber entgegengesetzten Ladungen.

Dabei geben die Ladungen eines Teilchens an, welchen Wechselwirkungen es unterliegt. Zur starken Wechselwirkungen gehört die Farbladung, die von Quarks und Gluonen, ihren Austauschpartikeln, getragen wird. Farbladungen müssen sich stets ausgleichen, deshalb kann ein Quark nie einzeln auftreten. Die elektromagnetische Wechselwirkung beeinflusst drei der Leptonen, nämlich Elektron, Myon und Tau sowie die Quarks – diese tragen interessanterweise gebrochenzahlige Ladungen von $+\frac{2}{3}$ oder $-\frac{1}{3}$. Ihr Austauschpartikel ist das masselose, ungeladene Photon. Die schwache Wechselwirkung hat gleich drei Austauschpartikeln: das elektrische neutrale Z-Boson und die W-Bosonen, die entweder eine positive oder negative elektrische Ladung tragen. Alle Materieteilchen unterliegen der schwachen Wechselwirkung, auch die Neutrinos, die in Bezug auf Farbladung und elektrische Ladung neutral sind.

Elementarteilchen können größere Teilchen bilden. Ein Beispiel sind die aus Quarks aufgebauten Hadronen. Wie schon erwähnt, treten Quarks nie einzeln auf, da die starke Wechselwirkung dies nicht zulässt. Dieser Effekt nennt sich Confinement. Hadronen bestehen entweder aus einem Quark und einem Antiquark oder drei Quarks, damit sich

⁴ <http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/files/2013/07/Standard Model of Elementary Particles-de.svg.png>, besucht am 18.08.2015

die Farbladungen ausgleichen; man kann entweder Farbe mit Antifarbe kombinieren oder die drei Farbladungen rot, blau und grün neutralisieren sich gegenseitig (man denke an Licht). Hadronen unterliegen natürlich auch der starken Wechselwirkung.

Bestimmte Größen bleiben bei den Wechselwirkungen immer erhalten. Dazu gehören die totale Energie und die elektrische Ladung.

Die Existenz des Higgs-Bosons folgt nicht direkt aus dem Standardmodell. Allerdings kann dieses allein nicht das Vorhandensein von Masse erklären. Der Higgs-Mechanismus geht von einem alles durchdringenden Higgs-Feld aus, mit dem die Teilchen unterschiedlich stark wechselwirken, wie es bei den anderen Wechselwirkungen auch der Fall ist. Dies würde dann die Massen der Teilchen erklären. Ein Beleg für die Korrektheit dieser Theorie sollte der Nachweis des sogenannten Higgs-Bosons sein, im Prinzip eine Schwingung des Higgs-Feldes. Im Juli 2012 konnte am CERN die Entdeckung eines Teilchens bestätigt werden, dessen Eigenschaften dem Higgs-Boson entsprechen⁵. Auffallend ist, dass das Higgs-Boson einen Spin von 0 hat, während alle anderen Bosonen im Standardmodell Spin 1 haben.

Dass die Suche danach Jahrzehnte ange dauert hat, liegt auch daran, dass das Higgs-Boson kein stabiles Teilchen ist; die Hauptursache ist allerdings, dass bisher ein Teilchenbeschleuniger mit ausreichend hoher möglicher Schwerpunktsenergie fehlte. Es zerfällt auf verschiedene Arten: Möglich ist zum Beispiel der Zerfall in zwei Photonen hoher Energie, weil das Higgs-Boson mit $125 \text{ GeV}/c^2$ relativ schwer ist. Oder der Zerfall in Quarks, zwei Z-Bosonen oder entgegengesetzt geladene W-Bosonen. Der letzte Zerfall wird in dieser Arbeit die wichtigste Rolle spielen.

Allerdings sind auch W-Bosonen instabil. Sie zerfallen zum Beispiel in Leptonenpaare. Für die Masterclasses interessant sind vor allem Zerfälle in eine der beiden leichteren Lepton-Familien, da Elektronen, Myonen und ihre Antiteilchen mit einem Teilchendetektor direkt nachweisbar sind. Ein Beispiel für ein solches Experiment wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

Es gibt jedoch Fragen, die das Standardmodell nicht beantworten kann. So erfüllt keines der enthaltenen Teilchen die Eigenschaften von dunkler Materie, die einen Großteil der Materie des Universums ausmacht. Außerdem ist die Gravitation nicht beschrieben. Diese Wechselwirkung spielt auf sehr kleinen Skalen, zum Beispiel auf Elementarteilchenebene, nur eine zu vernachlässigende Rolle. Im Alltag ist sie allerdings am präsentesten.

⁵ <http://home.web.cern.ch/topics/higgs-boson>, besucht am 27.08.2015

1.3 Der ATLAS-Detektor

Die Messdaten, die in den Teilchenphysik-Masterclasses in Bonn von den Schülerinnen und Schüler ausgewertet werden, stammen vom ATLAS-Detektor. Dabei handelt es sich um eines von vier Experimenten, die am Large Hadron Collider (LHC) der europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) in Genf zurzeit stattfinden und um eines von zweien, die unter anderem der Erforschung des Higgs-Bosons dienen (s. 1.2).

Das CERN dient der Grundlagenforschung und wird von 21 Mitgliedsstaaten gemeinsam betrieben. Der Name ist inzwischen eigentlich veraltet; heutiger Forschungsschwerpunkt ist nicht mehr die Kern- sondern die Teilchenphysik.

Der LHC ist der größte, energiereichste und leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt. In dem 27 km langen Beschleunigerring treffen Protonenstrahlen bei einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV aufeinander. Daran sind vier große Experimente der Teilchenphysik angesiedelt (s. Abb. 2).

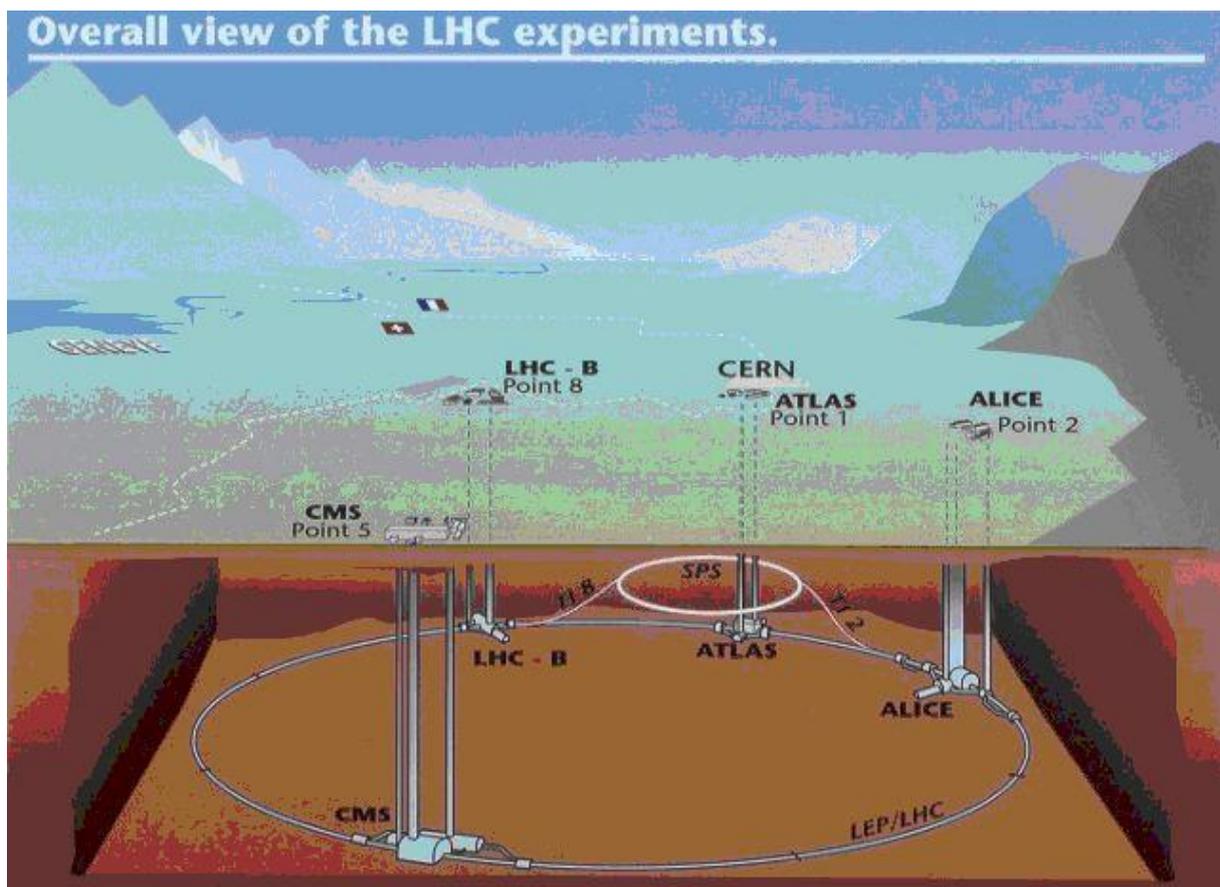


Abbildung 2: Der LHC mit den vier Experimenten⁶

⁶ <http://wigner.mta.hu/wignerdc/data/content/lhc.jpg>, besucht am 21.08.2015

Wie schon gesagt, wird an zwei der vier Detektoren unter anderem das Higgs-Boson erforscht. Es handelt sich um die Experimente ATLAS und CMS, beides Mehrzweckdetektoren, die außerdem bei der Suche nach dunkler Materie und weiteren Dimensionen eingesetzt werden. Man verwendete jedoch unterschiedliche technische Lösungen und betreibt die Experimente unabhängig voneinander, um eine höhere Verlässlichkeit der gewonnenen Daten zu gewährleisten, da aktuell nirgendwo sonst auf der Welt ein Experiment läuft, das vergleichbare Leistungen erzielen könnte.

Mit dem Experiment ALICE wird Quark-Gluon-Plasma untersucht. In dem Detektor kollidieren schwere Ionen, die dann dieses erzeugen. Solch ein Zustand mit stark wechselwirkender Materie bei hoher Energiedichte dürfte direkt nach dem Urknall geherrscht haben.

Das Experiment LHC-b wiederum erforscht das herrschende Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie anhand des b-Quarks.

Aus im nächsten Kapitel näher erläuterten Gründen soll hier der ATLAS-Detektor detaillierter vorgestellt werden.

ATLAS ist aus mehreren Schichten spezialisierter Detektoren aufgebaut, wie man in der Abbildung auf der nächsten Seite erkennt. Längs durch den in etwa zylindrischen Aufbau verläuft das Strahlrohr des Teilchenbeschleunigers. Darin kollidieren zwei gegenläufige Protonenstrahlen; der Detektor ist dazu da, bei der Kollision entstehende neue Teilchen zu registrieren und zu vermessen.

Die innerste Detektorschicht um das Strahlrohr herum besteht aus verschiedenen Spurdetektoren, die Spuren geladener Teilchen vermessen; da am gesamten ATLAS-Detektor ein starkes Magnetfeld (in Abbildung 3 sieht man die Lage der Magneten auch: Solenoid und Toroid Magnets), anliegt, lässt sich aus der Krümmung der Spuren geladener Teilchen der Impuls und aus der Krümmungsrichtung auch die Polung ihrer Ladung ablesen.

Ganz innen befindet sich der Pixeldetektor. Die mittlere Schicht bildet ein Silizium-Streifen-Detektor (SCT Tracker). Die äußerste Schicht der Spurdetektoren ist ein Transition Radiation Tracker (TRT Tracker), wiederum zusammengesetzt aus Übergangsstrahlungsdetektor und Driftkammer. Damit lassen sich auch Elektronen identifizieren.

Die nächste Schicht beinhaltet Kalorimeter, die die Energie von geladenen und neutralen Teilchen messen können, wobei jedes Teilchen darin einen Teilchenschauer auslöst, der dann detektiert wird. Dabei liegt das elektromagnetische Kalorimeter weiter innen (Liquid Argon Calorimeter). Es wird umschlossen von einem Hadronenkalorimeter (Tile Calorimeter). Dieses ist wesentlich größer, damit Hadronen darin ihre ganze Energie deponieren.

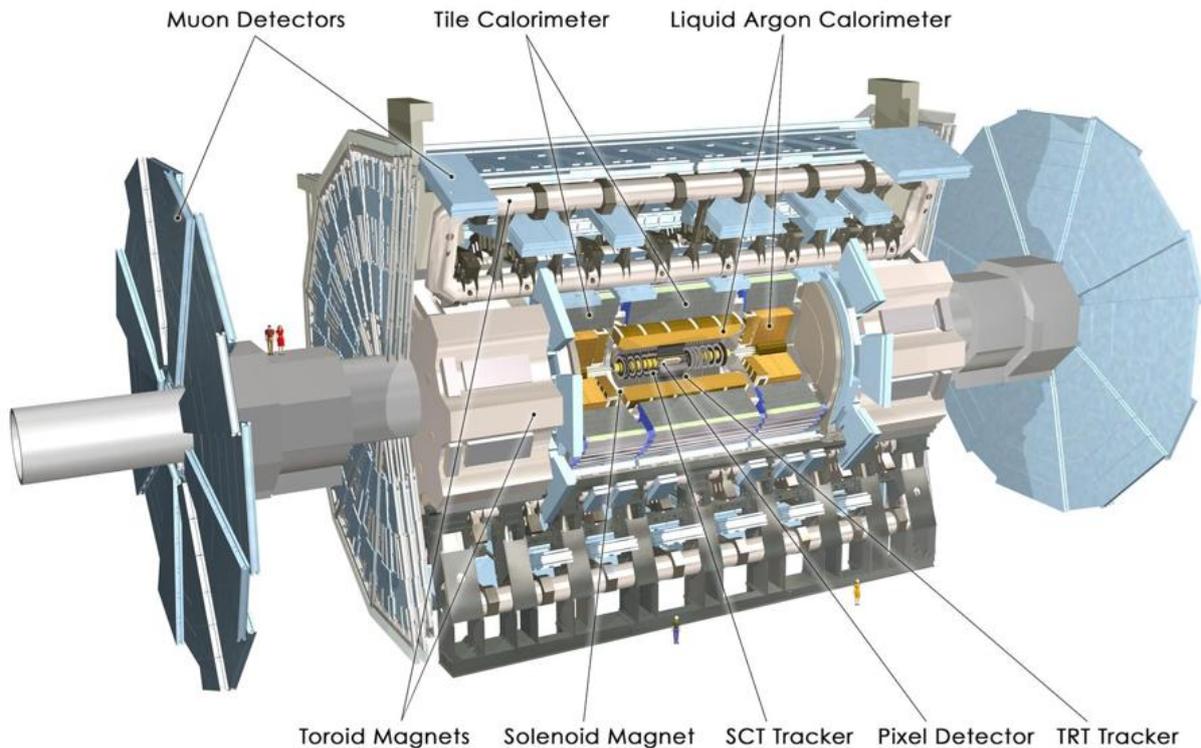


Abbildung 3: Aufbau des ATLAS-Detektors⁷

Ganz außen am Detektor befinden sich die Myonkammern, die eben auch nur diese detektieren, da fast alle anderen Teilchen in den Kalorimetern gestoppt werden. In drei Lagen sind hier MDT-Kammern (Monitored Drift Tube) angeordnet. Die an den Seiten des Detektors angebrachten Scheiben mit weiteren Detektoren sind besonders auffällig.⁸

Sämtliche Schichten wiederholen sich jeweils am linken und rechten Detektorende, damit auch unter sehr kleinen Winkeln Teilchen registriert werden können.

Ein Triggersystem sorgt dafür, dass nicht Daten aller Ereignisse gespeichert werden, sondern nur verwertbarer beziehungsweise potenziell interessanter. Trotzdem erhält man noch gigantische Datenmengen, darunter auch viel nicht Verwertbares.⁹

Zur Betrachtung der gespeicherten Ereignisse kann man die Software ATLANTIS nutzen, die eine intuitiver verständliche, grafische Darstellung liefert. Mithilfe von Werkzeugen hat man Zugang zu weiteren Daten, um die Bilder interpretieren zu können¹⁰.

⁷ http://atlas.physicsmasterclasses.org/zpath/files/img/highslide/ATLAS_detector_alles_mittel_EN.png, besucht am 11.08.2015

⁸ vgl. <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas#sct>, besucht am 18.08.2015

⁹ <http://www.atlas.ch/detector.html>, besucht am 22.07.15

¹⁰ <http://atlantis.web.cern.ch/atlantis/>, besucht am 22.07.15

1.4 Das Programm MINERVA und der W-Pfad

MINERVA¹¹ ist ein auf ATLANTIS basierendes Programm, das Schülerinnen und Schüler den Umgang mit ATLAS-Daten ermöglicht. Die Teilchenphysik-Masterclasses sollen den Schülerinnen und Schülern einen Einblick in die Methoden der Teilchenphysik und die Auswertung der Daten der Detektoren liefern. Auch die anderen Experimente am LHC, CMS, ALICE und LHC-b, haben Daten für solche Messungen zur Verfügung gestellt¹².

In den ATLAS-Daten für die Masterclasses ist sowohl die Suche nach möglichen Zerfällen von Higgs-Bosonen in W- als auch in Z-Bosonen vorgesehen, was als W- beziehungsweise Z-Pfad bezeichnet wird.¹³

Im Weiteren wird in dieser Arbeit allerdings nur der W-Pfad erwähnt, weil diese Messung in den Bonner Masterclasses durchgeführt wird. Dabei sucht man ausschließlich nach Ereignissen, in denen W-Bosonen entstanden sind.

Im LHC werden Protonen so stark beschleunigt, dass sie fast schon Lichtgeschwindigkeit erreichen. Wenn es dann zur Kollision kommt, wechselwirken nicht mehr die Protonen als Ganzes miteinander, sondern ihre Bestandteile. Protonen haben drei Valenzquarks, die so genannt werden, weil sie die Eigenschaften des Protons maßgeblich bestimmen. Zwei sind up-Quarks und das dritte ein down-Quark. Dazu kommen noch Gluonen und sogenannte Seequarks. Interessant für den W-Pfad sind Kollisionen, bei denen zwei Gluonen oder ein Gluon und ein Quark beteiligt sind. Im ersteren Fall können sowohl positiv als auch negativ geladene W-Bosonen erzeugt werden; die Chancen sind für beides gleich groß. In diesem Fall könnte auch ein Higgs-Boson entstehen, das dann in zwei entgegengesetzt geladene W-Bosonen zerfallen könnte.

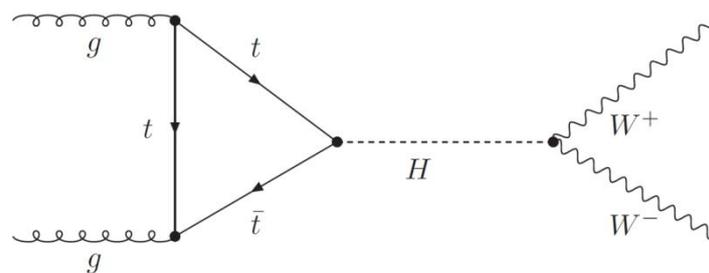


Abbildung 4: Grafische Darstellung der Erzeugung eines Higgs-Bosons mit anschließendem Zerfall in W-Bosonen¹⁴

Im zweiten Fall kann entweder ein up-Quark unter Aussendung eines W⁺-Bosons in ein down-Quark umgewandelt werden oder ein down in ein up, wobei ein W⁻ entstehen würde. Das ist möglich, weil die durch das Gluon gelieferte Energie ausreicht, um eines der sehr massereichen W-Bosonen zu erzeugen.

¹¹ <http://atlas-minerva.web.cern.ch/atlas-minerva/main.php?lang=en>, besucht am 09.06.2015

¹² <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-vermittler/#messungenlhc>, besucht am 21.08.2015

¹³ <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/index.htm>, besucht am 23.07.15

¹⁴ http://atlas.physicsmasterclasses.org/wpath_files/img/Feynman/Higgs.png, besucht am 23.08.2015

Aus theoretischen Berechnungen weiß man, dass in etwa 34% dieser Kollisionen der erste Fall eintritt und in 66% der zweite. Da doppelt so viele up- wie down-Quarks zur Verfügung stehen, erwartet man, dass etwa anderthalb mal so viele W^+ -Bosonen erzeugt werden wie W^- . Das soll auch das Ergebnis der Messung in den Masterclasses sein. Außerdem können Ereignisse mit zwei W -Bosonen untersucht werden. Diese Messung des Verhältnisses zwischen der Anzahl positiv und negativ geladener W -Bosonen ermöglicht es, die Struktur des Protons zu untersuchen.

Die meisten Ereignisse mit zwei W -Bosonen sind jedoch nicht auf Zerfälle von Higgs-Bosonen, sondern auf die direkte Erzeugung beider Teilchen zurückzuführen.

Die W -Bosonen zerfallen wie oben beschrieben aber direkt wieder; bei der Messung im W -Pfad sucht man deshalb nach den Spuren dabei entstehender Leptonen, die stabil genug sind, um nicht selbst wieder im Detektor zu zerfallen. Das sind Elektronen, Myonen, ihre Antiteilchen und die entsprechenden Partner unter den Neutrinos. Grafische Darstellungen dieser Ereignisse befinden sich im Anhang (s. 4.3.5). Diese Ereignisse werden mithilfe des Programms MINERVA untersucht.

Das Eventdisplay MINERVA ist zweigeteilt. Die grafische Ansicht zeigt je einen schematischen Quer- und Längsschnitt durch den Detektor und eine Abwicklung der Oberfläche des zylindrischen Kalorimeters, auf der die im Kalorimeter deponierten Energien als Säulen dargestellt sind.

In MINERVA ist der komplexe Aufbau von ATLAS vereinfacht dargestellt. In Abbildung 5 sieht man, dass die Struktur der innenliegenden Spurdetektoren, die hier einfach schwarz dargestellt sind, nur angedeutet wird. Das elektromagnetische Kalorimeter ist hellgrün dargestellt und das Hadronenkalorimeter in rot. Bei den Myonenkammern (blau) wird wieder der genauere Aufbau angedeutet.

Teilchenspuren in den Spurdetektoren sind als bunte Linien gezeigt, die Daten aus den verschiedenen Spurdetektoren sind also bereits zusammengeführt. Die Farbe der Linien richtet sich dabei nach der Energie des detektierten Teilchens, die aus der Krümmung berechnet wird, auch wenn diese für Menschen mit bloßem Auge oft kaum sichtbar ist.

Einträge in den Kalorimetern werden angezeigt, in dem die entsprechenden Detektorsegmente in der Grafik gelb gefärbt erscheinen. Das sieht man in der Abbildung sowohl oben links als auch im unteren Teil.

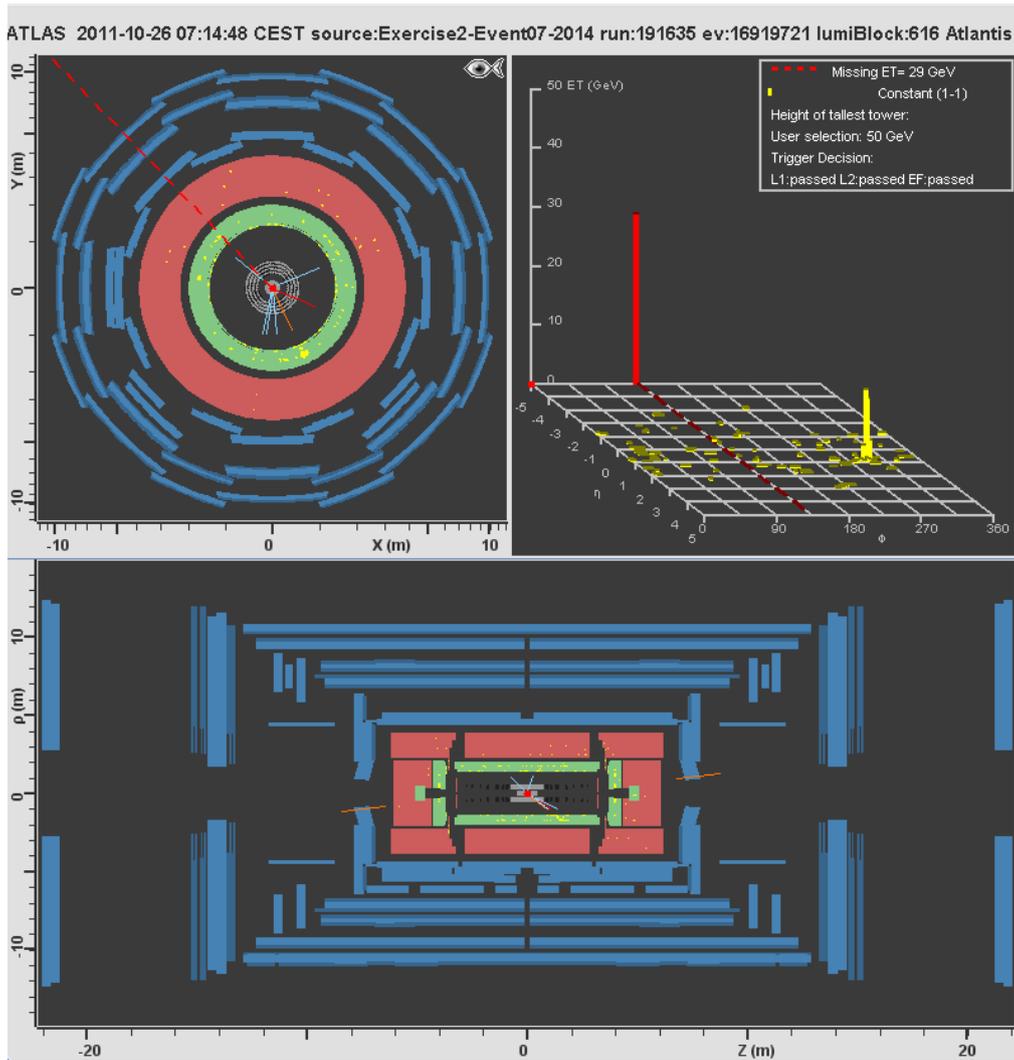


Abbildung 5: Grafische Ansicht von MINERVA¹⁵

Neutrinos kann man mit ATLAS nicht detektieren. Die Entstehung von Neutrinos in einem physikalischen Prozess kann man nur vermuten: dazu wird berechnet, in welche Richtung Energie fehlt. Vor der Kollision ist die Impulsrichtung natürlich gleich der Strahlrichtung, der Transversalimpuls ist null und die Transversalenergie auch. Da Impuls und Energie Erhaltungsgrößen sind, muss das auch nach der Kollision gelten. Deshalb addiert man die gesamte Energie im Kalorimeter alle Richtungen; ein Ungleichgewicht in der Energieverteilung kann dann auf nicht detektierte Teilchen zurückgeführt werden. Sie heißt schlicht Missing Transverse Energy, also fehlende Transversalenergie. Eine rot gestrichelte Linie zeigt sie in der Querschnittsansicht an (zum Beispiel in Abbildung 3 links oben), außerdem wird der Betrag in einem kleinen Fenster in der Grafikansicht angegeben (rechts oben: Missing ET, in diesem Fall 15 GeV). Fehlt signifikant viel Energie, deutet das darauf hin, dass ein Neutrino oder Antineutrino entstanden sein muss. Diese haben zwar nur eine kleine Masse, aber ihre kinetische

¹⁵ http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_lhcphysics3.htm, besucht am 11.08.2015

Energie fehlt natürlich auch in der Bilanz. Neutrinos und Antineutrinos kann man damit nicht unterscheiden.

Ein Elektron würde erst eine gekrümmte Spur in den inneren Spurdetektoren hinterlassen, die sich als bunte Linie zeigt, und dann im Elektromagnetischen Kalorimeter seine gesamte Energie abgeben, so dass die vom entstehenden Teilchenschauer betroffenen Komponenten dieses Detektors sich in der Grafiksicht statt grün gelb färben. Dies zeigt sich auch als Säule in dem Fenster rechts oben, in dem eine Abwicklung der Kalorimeteroberflächen mit dort deponierte Energie dargestellt wird. Ein Positron würde fast das gleiche Signal erzeugen, allerdings wäre seine Spur natürlich in die andere Richtung gekrümmt.

Myonen und Antimyonen unterscheiden sich von ihren Entsprechungen in der leichteren Familie dadurch, dass sie nicht ihre ganze Energie im Elektromagnetischen Kalorimeter verlieren. Sie gelangen bis in die Myonenkammern, wo sie wieder eine Spur hinterlassen (diese scheint immer orange zu sein).

Außerdem sieht man in MINERVA oft sogenannte Jets. Diese entstehen, wenn Quarks oder Gluonen emittiert werden. Aufgrund des bereits beschriebenen Confinements entstehen aus der Energie einzelner Quarks Quark-Antiquark-Paare, was eine Möglichkeit der Hadronenzusammensetzung ist (s. 1.2). Daher entsteht ein ganzes Bündel von Spuren: ein Jet. Bei Gluonen ist es so, dass sich ihre Energie in Masse, also Teilchen, umwandelt. Diese führen zu demselben Effekt.¹⁶ In den Jets können auch Elektronen, Myonen oder ihre Antiteilchen vorkommen.

Klickt man in der Grafiksicht auf eine Spur, erscheinen in der zweiten Ansicht weitere Informationen dazu. Besonders wichtig sind darunter die Ladung und der Impulsanteil senkrecht zum Teilchenstrahl (p_T). Dort findet sich auch ein Wert für die Isolation der Teilchen, damit die Schülerinnen und Schüler diese nicht per Augenmaß beurteilen müssen. Dies ist wichtig, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob ein Lepton zu einem Jet gehört oder getrennt davon entstanden sein dürfte. Außerdem zeigen sich bei starkem Zoom in Längs-oder Querschnittsansicht Ellipsen, die die Vertices (Knoten) andeuten, aus denen die Spuren stammen. Damit kann man eine Aussage darüber treffen, welche Teilchen gemeinsam entstanden sein müssen; dies ist besonders wichtig bei der Suche nach Ereignissen, die Kandidaten für Higgs-Bosonen sind, da diese in diesen Daten zum Beispiel erst in zwei W-Bosonen und darüber dann in insgesamt vier Leptonen zerfallen können.

¹⁶ Povh/Rith/Scholz/Zetsche: Teilchen und Kerne. Eine Einführung in die physikalischen Konzepte. 8.Auflage, Springer Verlag, Berlin und Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-68075-8, S.132

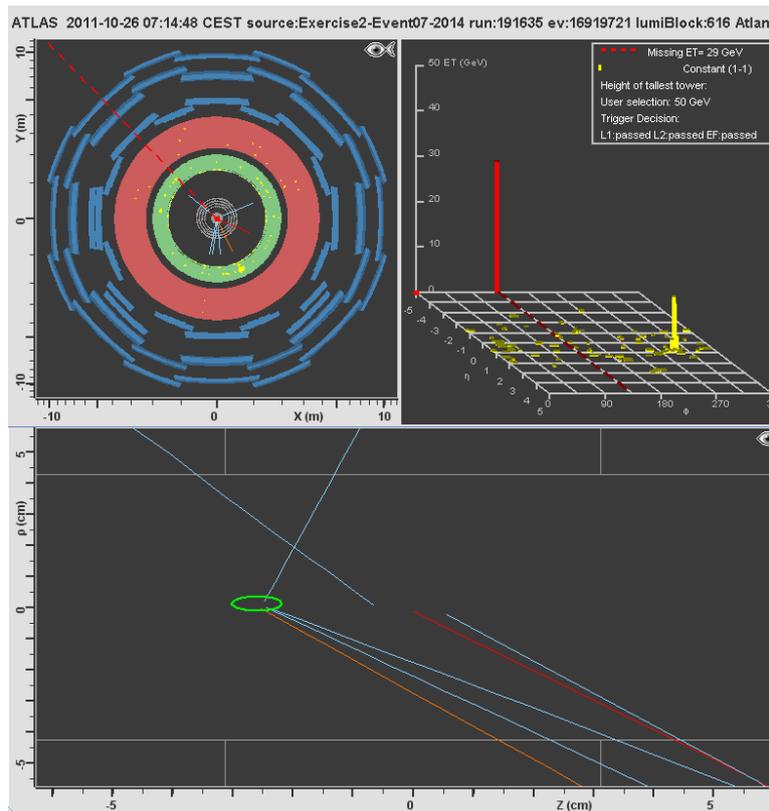


Abbildung 6: Das Ereignis ist das gleiche wie in Abbildung 5, aber der Zoom in der Längsschnittansicht zeigt, dass die beiden hochenergetischen Spuren (rot und orange) nicht aus demselben Vertex (grün) stammen

Um den Schülerinnen und Schülern den Umgang mit dem Programm beizubringen, stehen online Informationen und Übungen bereit¹⁷. Zunächst wird dort in Übung 1¹⁸ die Identifikation von einzelnen Teilchen im ATLAS-Detektor geübt. Dann folgt eine vermittlergeleitete Phase, in der die Methoden der Suche nach möglichen Higgs-Zerfällen über die Zerfallsprodukte und statistische Methoden vorgestellt werden, um anschließend in Übung 2¹⁹ die Identifikation von kompletten physikalischen Prozessen, Ereignisse genannt, mit Hilfe der Vermittler zu üben. Ihre Vermutungen können die Schülerinnen und Schüler selbst online überprüfen oder sich die Lösungen anzeigen lassen. Im Wesentlichen sind das die in Abschnitt 4.3.3 im Anhang aufgelisteten; allerdings wurde der Vollständigkeit halber ein Higgs-Zerfall mit nichtgleichartigen Leptonen als Endprodukte eingefügt und das erste Ereignis ist aus didaktischen Gründen kein Untergrundereignis²⁰ mehr.

Danach bekommen die Schülerinnen und Schüler meist paarweise jeweils einen Satz mit leicht aufbereiteten Daten des ATLAS-Detektors (Untergrundereignisse wurden reduziert, um Frustration zu vermeiden; dafür gibt es mehr Higgs-Kandidaten).

¹⁷ <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath.htm>, besucht am 23.07.15

¹⁸ http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_exercise1.htm, besucht am 18.08.2015

¹⁹ http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_exercise2.htm, besucht am 18.08.2015

²⁰ Ereignis, das nicht zur gesuchten Art gehört und verworfen werden kann

Diesen arbeiten sie durch, kreuzen in einer Tabelle²¹ dabei für jedes Ereignis ihre Einschätzung an, welchen Prozess sie gesehen haben, und am Ende werden alle Daten der Gruppe zusammengefasst²² und an der Statistik erklärt, wie man mit solchen Daten forscht. Die diesbezüglichen Ergebnisse des ATLAS-Experiments werden anschließend vorgestellt.

1.5 Problemstellung und Zielsetzung

Für die Schülerinnen und Schüler, die an einer Masterclass teilnehmen, sind mehrere Stunden fast ununterbrochenes Zuhören bei den Vorträgen extrem anstrengend, auch mangels Gewöhnung daran. Dabei wird sehr viel Wissen in die kurze Zeit gepackt, um den Schülerinnen und Schüler einen möglichst umfassenden Überblick über das Fachgebiet der Teilchenphysik zu geben.

Die Übungen am Computer und die anschließende Datenauswertung fordern anschließend volle Konzentration und sind auch durchaus anspruchsvoll. Zur Anschauung sei an dieser Stelle auf das unten gezeigte Flow-Chart²³ zur Kategorisierung von Ereignissen verwiesen (Abb. 7). Dieses Schema sollen die Schülerinnen und Schüler benutzen, um die Ereignisse zu kategorisieren.

Als allererstes wird dabei überprüft, ob ein signifikanter Teil der Transversalenergie fehlt, also die Energieverteilung eine Asymmetrie aufweist. Diese sogenannte „Missing Transverse Energy“ (MET) ist ein Hinweis auf die mögliche Entstehung eines Neutrinos oder Antineutrinos (s.1.4). Wenn kein solches Teilchen entstanden sein könnte, kann man ausschließen, dass ein W-Boson zerfallen ist.

Die Beschränkung auf genau ein oder zwei Leptonen, die aus dem gleichen Interaktionspunkt (Vertex) stammen, dient der Möglichkeit der Zuordnung der Spuren. Auch deshalb werden Ereignisse mit mehr als einem Jet aus diesem zum Untergrund gezählt. Welche Spuren aus demselben Vertex stammen, zeigt MINERVA beim Heranzoomen durch grüne Ellipsen an, die diese Spuren enthalten (s. Abb. 6).

Im nächsten Schritt wird ein Mindesttransversalimpuls p_T , also Impuls senkrecht zur Strahlachse, gefordert. Das rührt daher, dass Leptonen aus dem Zerfall von W-Bosonen, aufgrund der hohen Masse dieser, einen hohen Transversalimpuls haben.

²¹ <http://atlas.physicsmasterclasses.org/downloads/tallymarks-2015.pdf>, besucht am, 19.08.2015

²² http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/wpath_auswertung.php?language=3, besucht am 21.08.2015

²³ *Handout für Teilchenphysik-Masterclasses. ATLAS-Daten: W-Pfad (2015)*,
http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Vermittler/Handout_2015.pdf, besucht am 23.07.15, S.2

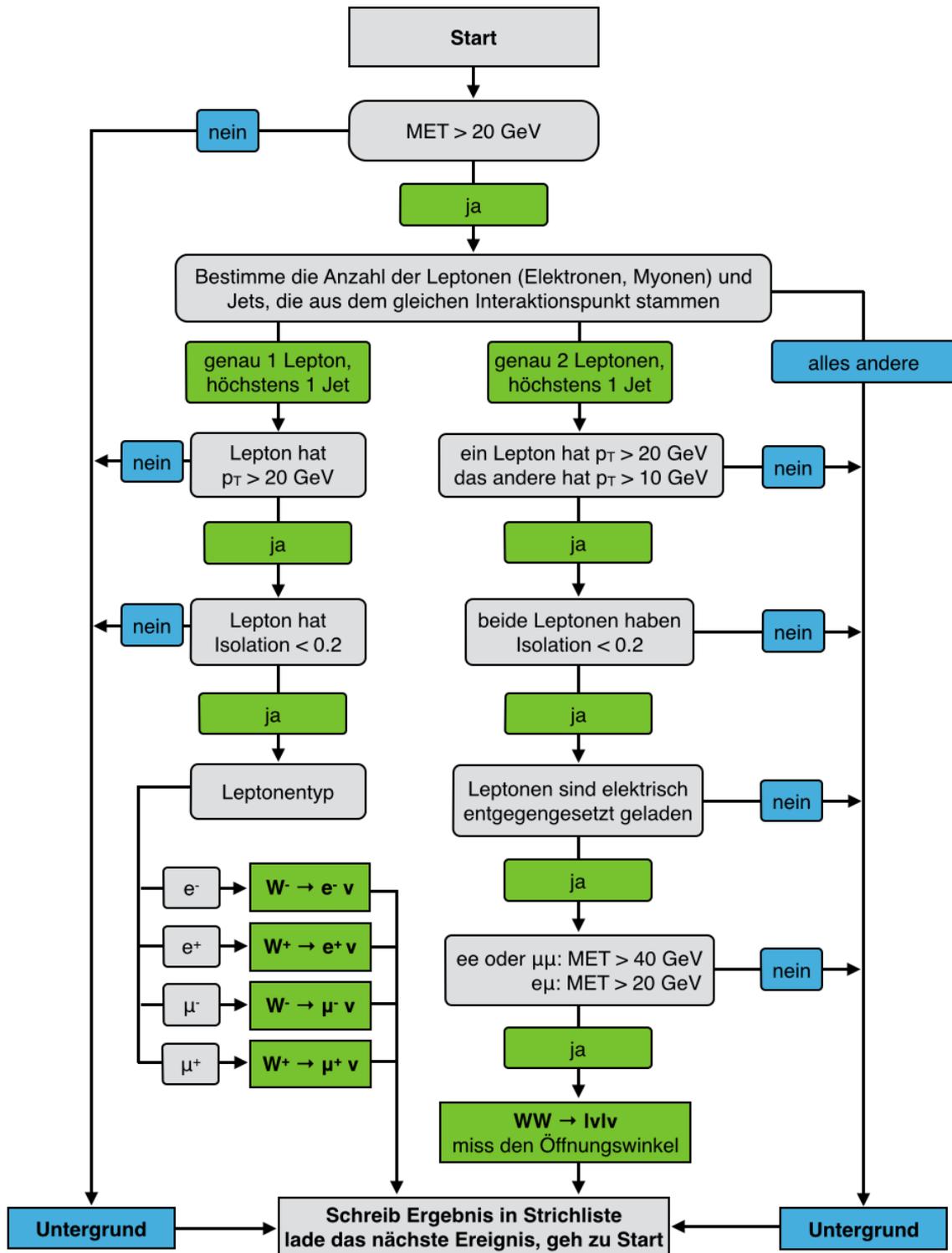


Abbildung 7: Flowchart zur Selektion von Ereignissen

Diese interessanten Leptonen müssen dann noch ausreichend gut isoliert von eventuellen Jets sein, um sicherzustellen, dass sie getrennt davon entstanden sind. Dazu sollte der Wert für die Isolation klein genug sein, nämlich unter 0,2. Das heißt, dass die

Transversalimpulse der umliegenden Spuren höchstens das 0,2fache des Transversalimpuls der Spur des Leptons betragen.²⁴

In dem Fall mit genau einem Lepton ist jetzt nur noch die Frage, um welches es sich handelt: Elektron, Positron, Myon oder Antimyon. Gibt es zwei, könnte das Ereignis ein Kandidat für einen Higgs-Zerfall sein. Dazu müssten die Leptonen aber eine entgegengesetzte Ladung aufweisen, da das Higgs-Boson elektrisch neutral ist.

Anschließend noch einmal angelegte Grenzen für die Missing Transverse Energy abhängig von der Gleichartigkeit der Leptonen sind in Simulationen optimiert worden.

Die am Ende erfolgende Messung des Öffnungswinkels zwischen den Spuren der Leptonen bei WW-Kandidaten wird deshalb durchgeführt, weil Higgs-Zerfälle gehäuft bei kleineren Öffnungswinkeln zwischen 0° und 90° erwartet werden.

Ereignisse, die diesen Kriterien nicht genügen, werden dem Untergrund zugeordnet (s.).

Diese Vorgehensweise ist für die Schülerinnen und Schüler relativ kompliziert und die dazu nötigen Erklärungen sind nicht nur anspruchsvoll, sondern auch ermüdend und ein wenig trocken. Beobachtungen zeigen, dass die Schülerinnen und Schüler bis zur Datenauswertung, die eigentlich der Höhepunkt der Veranstaltung ist, relativ erschöpft, still und träge sind.

Deshalb tauchte die Frage auf, ob man nicht mitten in der Veranstaltung ein Spiel zur Bewegung von Teilchen durch den ATLAS-Detektor machen könnte, wobei ein großes Bild des ATLAS-Querschnitts von MINERVA als Spielfläche dienen könnte.

Dadurch könnte man hoffentlich einen Großteil dieser Informationen anders vermitteln und den Ablauf auflockern.

Gleichzeitig erschien eine Verkürzung der Phase zur Erklärung des Programms wünschenswert. Zum Beispiel brauchen die Schülerinnen und Schüler für Übung 2 (die zur Identifikation der Ereignisse) sehr viel Zeit. Bis sie um Hilfe bitten, die dabei immer gebraucht wird, dauert es eine Weile, und es ist auch nicht optimal, allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern einzeln Hilfestellung zu geben, indem die Vermittler ihnen über die Schulter schauend erläutern, was sie am Bildschirm sehen beziehungsweise was zu tun ist, um eine sinnvolle Einordnung zu gewährleisten. Dazu kommt, dass man bei dieser Übung sozusagen schummeln kann, weil die Tabelle, in der man anklickt, für was für ein Ereignis man welches hält, Rückmeldung gibt, ob man richtig liegt. Es ist dadurch schwerer, festzustellen, wer wirklich verstanden hat, wie die Ereignisidentifikation funktioniert.

Ziel war es also, einmal weniger über die Detektion von Teilchen bei ATLAS erzählen zu müssen und vor allem die recht langwierige Phase der Übungen zu MINERVA deutlich zu verkürzen; dabei sollten gleichzeitig die Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit zu

²⁴ http://www.physicsmasterclasses.org/downloads/description_W-path_2015.pdf, besucht am 19.08.2015

selbsttätigem Handeln bekommen und für die anschließende Datenauswertung motiviert werden. Zusätzlich wäre es praktisch, schneller auf Verständnislücken reagieren zu können. Daraus ergab sich der Plan, ein Lernspiel zu entwickeln, das möglichst viel dieses Wissens transportiert und gleichzeitig die Kommunikation und die Lernatmosphäre verbessert.

1.6 Theorie des Lernspiels

An die Konstruktion eines Spiels, das der Wissensvermittlung dienen soll, gibt es einige Anforderungen, auch wenn dies hier keine vollständige Abhandlung dessen sein kann.

Zunächst müssen wie bei jeder Planung einer Unterrichtseinheit ein Lernziel und ein inhaltlicher Schwerpunkt festgelegt werden. Des Weiteren gilt es, den Kenntnisstand der Lernenden, die Lerngruppe sowie organisatorische Gegebenheiten zu berücksichtigen.

Die Methode selbst erfordert dann zunächst eine Modellbildung. Genau wie abstrakte Modelle muss ein Lernspiel die wesentlichen Eigenschaften der Realität abbilden. Gleichzeitig reduziert es die oftmals zu komplexe Wirklichkeit, um sie überschaubar zu machen. Es darf dabei vereinfachen, aber nicht grundsätzlich falsch sein. Ein gutes Modell ist stets erweiterbar.

Ein Lernspiel ist im Prinzip ein spielbares Modell. Dabei ist der Begriff „Spiel“ nicht exakt definierbar, aber es existieren ein paar notwendige Bedingungen, um eine Handlung als Spiel einschätzen zu können. Ein Spiel ist niemals Arbeit oder Ernstfall; es darf kein Leistungsdruck gegeben sein.

Zudem ist „das Erlebnis von Freude, Spaß und Vergnügen“²⁵ ein wesentliches Kriterium. Wenn dem Lernstoff ein direkter Bezug zur Lebenswelt der Jugendlichen fehlt, bietet es sich an, diese Spielfreude als extrinsische Motivation zu nutzen.

Andererseits müssen Spiel auch Anforderungen stellen, und zwar genau im richtigen Maße. Ein zu leichtes Spiel ist langweilig und es entsteht kein Spielfluss, genau wie bei einem, das zu kompliziert ist, um verstanden zu werden: um im Spiel etwas zu lernen, muss man bereits genug wissen, um die Information überhaupt begreifen und einordnen zu können.²⁶

Ein Lernspiel bot sich als verbindendes Element zwischen Vortrag und Messung in der Masterclass an: um die Schülerinnen und Schüler stärker zu motivieren und ihnen die komplexen Inhalte, die für die Datenauswertung notwendig sind, leichter vermitteln zu können (s. 1.5). Denn um sinnvoll mit den ATLAS-Daten umgehen zu können, muss wirklich verstanden worden sein, wie man aus dem Bild im Eventdisplay Rückschlüsse

²⁵ Walter Pfeifer, *Das Erwachsenenspiel. Eine pädagogische Standortbestimmung*. Dissertation, Westfälische Wilhelmsuniversität zu Münster, 1990, S.115

²⁶ Hans Scheuerl, *Das Spiel. Untersuchungen über sein Wesen, seine pädagogischen Möglichkeiten und Grenzen*. Band 1, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1990, ISBN 3-407-34045-1

auf das Ereignis zieht. Dazu ist es von Vorteil, wenn auftauchende Fragen und Unsicherheiten sofort bemerkt werden, was im Spiel eher der Fall ist als bei einem Vortrag.

Der einleitende Vortrag und das Lernspiel sollen sich dabei ergänzen; der wissenschaftlich orientierte erste Teil und der folgende handlungsorientierte bieten den Schülerinnen und Schülern verschiedene Zugänge und damit mehr Chancen auf einen erfolgreichen Lernprozess. Außerdem ist, wie weiter oben beschrieben, ein selbstständiges Aneignen von Wissen seitens der Schülerinnen und Schüler bei Masterclasses ausgesprochen erwünscht; aufgrund der starken Konzentration der Inhalte auf eine nur wenige Stunden umfassende Veranstaltung ist das aber schwierig. Durch Integration einer Spieleinheit wäre das zumindest etwas mehr der Fall.

Nicht zu Letzt bestand die Hoffnung, die Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit der Schülerinnen und Schüler würden durch ein wenig Bewegung und den Methodenwechsel verbessert.

2. Spielentwicklung

2.1 Spielidee

Das Spielgeschehen sollte möglichst das Zustandekommen der Detektorbilder so wie den Rückschluss auf das zugrundeliegende Ereignis durch die auswertende Person darstellen. Aufgrund des knappen Zeitrahmens sollte die Struktur des Spiels einfach und schnell zu überblicken sein, damit nicht zu viel Zeit mit Erklärungen verbracht wird und es schnell losgehen kann. An den Inhalt des Spiels und an die Komplexität des Spielgeschehens kann man jedoch höhere Anforderungen stellen.

Daher wurde folgende Spielidee entwickelt: Alle Schülerinnen und Schüler bekommen am Anfang einer Spielrunde eine Karte mit einem Hinweis auf eine Rolle darauf. Der Großteil der Gruppe erstellt daraufhin auf dem Spielfeld, das einen Querschnitt durch den ATLAS-Detektor darstellt, das Bild eines Ereignisses, wobei jede(r) das beiträgt, wozu ihn/sie seine/ihre Karte anhält. Wenn diese Gruppe fertig ist, sollen Schülerinnen und Schüler, die eine sie dazu anweisende Karte erhalten haben, erraten, was für ein Ereignis dargestellt wurde. Dieser Grobentwurf wurde dann Stück für Stück weiterentwickelt.

Zunächst sollten ja sinnvolle Ereignisse entstehen, die auch später so in der Messung am Computer vorkommen, um die Schülerinnen und Schüler darauf vorzubereiten. Um möglichst die Übung 2 (s. 1.4) am PC ersetzen zu können, kann man einfach genau die dort verwendeten benutzen. Für die Zusammenstellung ist dann jeweils ein Spielleiter oder eine Spielleiterin verantwortlich, der/die vor den Spielrunden passende Karten vorbereitet, aus denen die Spielerinnen und Spieler dann ziehen können.

Dass als Spielfeld gerade der Teil des MINERVA-Eventdisplays dienen sollte, der einen schematischen Querschnitt durch den ATLAS-Detektor darstellt, hat den Grund, dass diese Ansicht am meisten Informationen transportiert und gleichzeitig sehr gut intuitiv zu verstehen ist. In der Längsansicht fehlt zum Beispiel die grafische Veranschaulichung der Missing Transverse Energy.

Welche Teilchen von welchen Detektorschichten registriert werden, ist schwer zu merken. Daher sollte es eine Visualisierung geben. Dasselbe gilt für die beim W-Pfad interessanten Ereignisse, die in drei Kategorien unterteilt sind: W-Zerfälle, WW-Zerfälle und Untergrund. Auch dafür muss es eine Gedächtnisstütze geben.

Es bleibt noch das Problem, Informationen zu transportieren, die man in MINERVA durch Anklicken der Spuren erhält, wie etwa Ladung des Teilchens oder den Transversalimpuls. Beides lässt sich zwar aus der Krümmung der Spuren theoretisch berechnen, aber Leptonen, die höchstwahrscheinlich aus W- oder WW-Zerfällen stammen, haben eine so hohe kinetische Energie, dass die Krümmung ihrer Spuren in dem Eventdisplay kaum zu sehen ist. Als Lösung dafür bietet sich an, als Analogon zum Anklicken einfach die Nachfrage bei dem entsprechenden Spieler zu erlauben.

Eine erfolgreiche Spielrunde (erfolgreich: das Ereignis wurde korrekt erkannt) wird fotografiert, um das Ergebnis der „Messung“ zu „speichern“. Diese Fotos können den Gruppen auch als Erinnerung an die Masterclass zugeschickt werden. In Abb. 8 ist eines zu sehen, dass am 29.06.2015 im Deutschen Museum Bonn entstanden ist.



Abbildung 8: Beispiel für ein Foto nach einer erfolgreichen Spielrunde

2.2 Materialentwicklung

Der finanziell aufwendigste und auch ungewöhnlichste Teil des Spielmaterials ist das Spielfeld²⁷. Da an einer Masterclass oft um die zwanzig Schülerinnen und Schüler teilnehmen, muss dieses recht groß sein, wenn die Schülerinnen und Schüler darauf als Spielfiguren agieren können sollen. Dies ist aber extrem wichtig, um wirklich die ganze Gruppe auf einmal spielen lassen zu können, um nicht wieder Nachteile für die Kommunikation zwischen den Schülerinnen und Schüler in Kauf nehmen zu müssen.

Die Masterclasses in Bonn finden unter anderem auch in Kooperation mit dem Deutschen Museum Bonn statt, wo auch für die Teilchenphysik interessante Exponate stehen; an der Größe der für solche Veranstaltungen vorgesehenen Fläche ergab sich die erste Beschränkung. Da das Spielfeld mit einem PKW transportierbar bleiben sollte, wurde eine Größe von 4 m x 4 m auf zwei einzelnen Bahnen festgelegt. Die erste Materialidee, Teppich, schied aus Kosten- und Gewichtsgründen aus. Die schlussendlich bestellte LKW-Plane ist abwaschbar und die eingerollte Plane kann von einer Person getragen werden. Die Fertigung übernahm die „Werbemanufaktur medienkraftwerk“ in Euskirchen für 408,05€ inklusive Versandkosten. Die beiden einzelnen Bahnen werden aufgerollt in einer Pappröhre gelagert, um Knicke zu vermeiden und können bei Bedarf zusammengeklebt werden. Dabei erwies sich im Praxistest gewöhnliches Paketklebeband als zuverlässigste Lösung. Ein Reiß- oder Klettverschluss wäre möglich gewesen, allerdings hätte das stark aufgetragen und eine Stolperkante geschaffen.



Abbildung 9 : Im Deutschen Museum Bonn ausgelegtes Spielfeld bei einer Masterclass

²⁷ Das Motiv mit Legende befindet sich im Anhang, Abschnitt 4.3.3

Weiterhin musste Material angeschafft werden, das sich zur Darstellung der Teilchenspuren eignet. Die Spuren sollten gut sichtbar sein, biegsam und sauber zuzuschneiden. Aus dem letzten Grund wurde farbiges Gurtband statt Kampfsportgürteln gewählt. Das gibt es auch in mehreren Farben, was deshalb wichtig ist, weil in MINERVA die Farben der Spuren auf unterschiedliche Energien der Teilchen hinweisen. Die Einträge in den Kalorimetern werden einfach visualisiert, in dem sich die Spielerinnen und Spieler an die Stelle stellen; so kann man auch zuordnen, wer welche Spur gelegt hat. Für Beispiele stehen aber auch gelbe Pappkarten zur Verfügung.

Die Spielkarten²⁸ wurden entgegen erster Ideen nicht auf ein normales Blanko-Spielkartenset gedruckt, sondern auf normales Papier und dann laminiert. Das ermöglicht schnelle Änderungen am Spiel, ist sehr kostengünstig und bei Verlust einzelner Karten schnell wieder aufzustocken. Für den Entwurf wurde GeoGebra 5.0²⁹ verwendet, was für diese Zwecke völlig ausreicht und kostenlos zugänglich ist. Jede Karte ist 5 cm x 8 cm groß, so dass man sie gut in der Hand halten kann. In der Mitte befindet sich ein farbiger Kreis, wobei die Farben sich bei den Leptonen an den Plushies des „Subatomic Particle-Zoo“³⁰ orientieren. Es gibt fünf verschiedene Elementarteilchen in dem Kartensatz (Elektron, Positron, Myon, Antimyon, (Anti-)Neutrino), zwei für fast immer im Ereignis vorkommende Jets, Untergrund und nicht zuletzt ein bis zwei Karten, die mit „Teilchenfänger“ beschriftet sind. Wer diese Karte zieht, muss in der Spielrunde versuchen, das Ereignis zu identifizieren.

Auf den Karten für die Leptonen sind sowohl Name als auch Symbol des Teilchens vermerkt. Dabei gibt es nur eine Karte für (Anti-)Neutrinos, da diese nicht unterschieden werden können. Auf allen Karten bis auf die für Teilchenfänger ist außerdem ein Wert für den Transversalimpuls angegeben. Natürlich ist diese Angabe für (Anti-)Neutrinos nicht möglich, bei diesen kann man im Eventdisplay nicht einmal Teilchen, Antiteilchen und Anzahl dieser unterscheiden. Auf diesen Karten ist stattdessen ein Wert für die Missing Transverse Energy angegeben, der in der Realität über den Energieerhaltungssatz aus der vorliegenden Richtungsverteilung der Energie im Detektor berechnet wird und bei nicht vernachlässigbarer Größe auf Energieabtransport durch sehr schwach wechselwirkende Teilchen hindeutet – Neutrinos oder Antineutrinos.

Auf der Übersicht³¹ für die Teilchenfänger finden sich grafische Darstellungen der gesuchten Ereignisse, aufgeteilt auf die drei Kategorien Untergrund, W-Kandidaten und Higgs-Kandidaten. Diese Darstellungsart lernen die Schülerinnen und Schüler im einführenden Vortrag kennen.

²⁸ Siehe Anhang, Abschnitt 4.3.4

²⁹ <https://www.geogebra.org/>, besucht am 25.07.15

³⁰ <http://www.particlezoo.net/>, besucht am 24.07.15

³¹ Siehe Anhang, Abschnitt 4.3.5

Zum Material gehört auch ein Plakat³², das als Erinnerungshilfe für die Spielerinnen und Spieler und Spieler dient. Darauf ist vermerkt, wie sich welches Teilchen im Detektor bemerkbar macht. Es kann entweder gedruckt und aufgehängt werden oder man nutzt Beamer und Leinwand, was besser lesbar ist. Darauf sind die Begriffe möglichst in den im Spiel damit verknüpften Farben geschrieben, um die Orientierung zu erleichtern.

Ferner gehört natürlich eine Spielanleitung³³ dazu, außerdem eine Tabelle³⁴ für die Spielleitung, die auflistet, welche Karten in welcher Runde bereitzulegen sind (beispielhaft für 20 Spielende) und welche Art von Ereignis dargestellt wird. Diese Tabelle entspricht im Wesentlichen der Ereignisliste aus Übung 2.

Es gibt auch eine Liste³⁵ mit wichtigen Fragen, die im Spielverlauf geklärt werden sollten, meist durch Nachfragen an die Spielleitung.

2.3 Erster Praxistest

Das Spiel wurde zum ersten Mal am 29.06.15 bei einer Masterclass im Deutschen Museum Bonn ausprobiert. Sie fand im Rahmen der Bonner Schülerakademie Physik/Astronomie 2015³⁶ statt und war Programm des ersten Tages dieser Veranstaltung. Teilgenommen haben 22 Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe; es handelte sich um eine freiwillige Veranstaltung in den Sommerferien.

Vormittags gab es einen einführenden Vortrag und einen Rundgang durch das Museum zu interessanten Exponaten aus der Teilchenphysik. Nach dem Mittagessen wurde den Schülerinnen und Schüler noch grundlegendes zu Teilchendetektoren, insbesondere zu dem ATLAS-Detektor, vermittelt; danach ging es mit dem Spiel weiter.

Anschließend folgte die Datenauswertung. Die Schülerinnen und Schüler füllten danach einen Fragebogen zu dem Lernspiel aus und das Programm endete mit einem Quiz.

Dabei wurden die Online-Übungen 1 und 2 komplett aus dem üblichen Ablauf gestrichen.

Die Identifikation einzelner Teilchen, die sonst in Übung 1 gelernt werden soll, wurde anhand der Spielmaterialien im Plenum gezeigt. Darauf folgte eine Phase, in der noch einmal die Suche nach Higgs-Bosonen über ihre Zerfallsprodukte und statistische Methoden erklärt wurde. Außerdem berechneten die Schülerinnen und Schüler anhand eines Arbeitsblattes³⁷ das erwartete Verhältnis von W^+ - zu W^- -Bosonen.

³² Siehe Anhang, Abschnitt 4.3.6

³³ Siehe Anhang, Abschnitt 4.3.1

³⁴ Siehe Anhang, Abschnitt 4.3.2

³⁵ Siehe Anhang, Abschnitt 4.2.1

³⁶ <http://www.schuelerlabor.uni-bonn.de/veranstaltungen/bonner-schuelerakademie-physik-astronomie/2015>, besucht am 21.08.15

³⁷ Daniel Schmeier: *Das Verhältnis von W^+ zu W^- bei Proton-Proton-Kollisionen*

Die Ereignisse, die sonst in Übung 2 identifiziert werden sollten, wurden dann komplett im Eventdisplay-Spiel durchgegangen. Dafür standen etwa 45 Minuten zur Verfügung, obwohl von vornherein klar war, dass das eigentlich zu viel Zeit ist. Da es sich um den ersten Versuch handelte, wurde aber beschlossen, die ganze Dreiviertelstunde zu nutzen. Im Verlaufe des Spiels wurden zwei Dinge angepasst. Erstens gab es nach den ersten paar Minuten grundsätzlich zwei Teilchenfänger. Diese Alternative war bereits vorbereitet und angedacht. Da das Spielfeld immer ziemlich voll war, wurde außerdem ein „Joker“ eingeführt, der erlaubte, den gesamten Untergrund vom Feld zu schicken, wobei natürlich die Spielerinnen und Spieler auch die von ihnen ausgelegten Spuren mitnahmen. Vorher mussten die Teilchenfängerinnen oder Teilchenfänger erst nach der Ladung fragen, bevor sie Spielende zur besseren Übersichtlichkeit aussortieren durften.

Anschließend erfolgte nach einer Überleitung zu MINERVA die Datenauswertung. Das Ergebnis ist in Abb. 10 gezeigt.

Total	97	61	60	36	255	23
$\Sigma W^+ , \Sigma W^- $	$ W^+ $	157	$ W^- $	97	$ W^+ + W^- $	254
Ratio	$ W^+ / W^- $			1.62	\pm	0.21

Comparison with results of the ATLAS collaboration (from 2011):

Measurement of the $W \rightarrow \nu$ and $Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector^{*)} and Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow WW^*(*) \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay mode using 1.7 fb⁻¹ of data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV ^{**)}

^{*)} Authors: The ATLAS Collaboration (Submitted on 5 Dec 2011); <http://arxiv.org/abs/1109.5141.pdf>

^{**)} Authors: The ATLAS Collaboration (24 Aug 2011); ATLAS-CONF-2011-134

	$W \rightarrow \dots + \nu$				Background	WW cand.
	e^+	e^-	μ^+	μ^-		
Total	77885	52856	84514	55234	21930	469
$\Sigma W^+ , \Sigma W^- $	$ W^+ $	162399	$ W^- $	108090	$ W^+ + W^- $	270489
Ratio	$ W^+ / W^- $			1.50	\pm	0.03

Abbildung 10: Ausschnitt aus der Auswertungstabelle der Masterclass³⁸

Das von den Jugendlichen gemessene Verhältnis von 1,62 verträgt sich soweit gut mit dem Ergebnis von ATLAS von 1,5. In Abschnitt 4.5 im Anhang befinden sich auch die bei der Masterclass diskutierten WW-Histogramme zur Verteilung der Öffnungswinkel.

³⁸ <http://kjenje.web.cern.ch/kjenje/results/WpathAnalysis.php?institutID=48>, besucht am 25.08.2015

Aufgrund der zu geringen Anzahl an Ereignissen ist die erwartete Häufung von Ereignissen bei Winkeln unter 90° aber höchstens zu erahnen.

Nach der Messung füllten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer einen Fragebogen zu dem Lernspiel aus und die Veranstaltung schloss mit einem Quiz.

2.4 Evaluation

2.4.1 Fragestellung

Um ein Feedback über Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit des Lernspiels zu bekommen, sollten sich sowohl die Schülerinnen und Schüler äußern können als auch die Vermittlerinnen und Vermittler, Organisatorinnen und weitere Beobachterinnen und Beobachter der Veranstaltung, die mit den Masterclasses vertraut waren. Wissenschaftlicher und genauer wäre es gewesen, mit Vergleichsgruppen zu arbeiten. Leider ist das aber in diesem Fall nicht möglich, da man die Teilnehmerinnen und Teilnehmer einer Masterclass dazu in möglichst gleiche Gruppen aufteilen müsste, diese jedoch nicht vorher kennt. Selbst bei einer Schulklasse beziehungsweise einem Physikkurs müsste man sich auf die Urteilskraft der Lehrperson verlassen. Deshalb sollten die Meinungen der Schülerinnen und Schüler grob erfragt werden und der Vergleich über Beobachtungen von Leuten, die das normale Verfahren einer Masterclass gut kennen, erfolgen.

Da die Schülerinnen und Schüler eventuell Hemmungen haben könnten, ein mündliches Feedback zu geben, wurde beschlossen, ihre Befragung schriftlich abzuhalten. Um dies möglichst schnell und gezielt zu bewerkstelligen, wurden Fragebögen genutzt.

Die Beobachterinnen und Beobachter bekamen Zettel mit Fragen als Beobachtungshilfe³⁹, worunter aber keine standardisierten Beobachtungsbögen zu verstehen sind. Diese Zettel waren nur dazu gedacht, den Fokus der Beobachtung auf später zu beurteilende Aspekte zu richten.

Die Evaluation des Lernspiels erfolgte unter drei Gesichtspunkten: Der Brauchbarkeit der Methode in diesem Fall, des Lernerfolgs der Spielenden und der Qualität des Spiels. Überprüft werden sollte nämlich, ob es mithilfe dieses Lernspiels möglich ist, die Schülerinnen und Schüler genauso gut oder besser als mit einem längeren Vortrag und den Online-Übungen auf die Datenauswertung vorzubereiten und gleichzeitig die Lernatmosphäre zu verbessern.

³⁹ Siehe Anhang, Abschnitt 4.4.3

2.4.2 Fragebogenentwicklung und Auswertung

Da die Gruppe nicht besonders groß war, war von Anfang an klar, dass die Fragebögen nur ein grobes Stimmungsbild liefern sollten; für eine größere statistische Auswertung bräuchte man wesentlich mehr Datensätze. Für die Fragebogenerstellung heißt die kleine Gruppengröße aber nur, dass auch freie Fragen zu stellen möglich war, ohne dadurch die Auswertung zu sehr zu verkomplizieren.

Gerade in einer kleinen Gruppe, mit der man einen ganzen Tag verbringt, kann es in einer Befragung leicht zum Phänomen der sozial erwünschten Antworten kommen, zumal die Masterclass auch noch am ersten Tag der Schülerakademie stattfand und die Jugendlichen sich vielleicht scheuen könnten, sich schon negativ über einzelne Programmpunkte zu äußern.

Um dem entgegenzuwirken, wurde besonderer Wert auf die Anonymität der Fragebögen gelegt. Das Deckblatt wird beispielsweise nicht beschriftet, sondern zeigt einen einleitenden Text. In diesem werden die Schülerinnen und Schüler über den Zweck der Befragung informiert und um eine kritische, sorgfältige Rückmeldung gebeten. Auch die Korrektur einer Antwort ist hier erläutert, um Probleme bei der Auswertung zu vermeiden. Personenbezogene Daten zu erheben, die einen Rückschluss auf die ausfüllende Person erlaubt hätten, war ohnehin nicht nötig.

Außerdem sind die Fragen möglichst neutral formuliert, um die Schülerinnen und Schüler nicht zu manipulieren.

Bei der Erstellung von Fragebögen, die zumindest teilweise durch Ankreuzen beantwortet werden, muss sorgfältig ab gewägt werden, wie die Antwortmöglichkeiten aussehen sollen. Man könnte leicht auf die Idee kommen, bei der Befragung von Schülerinnen und Schüler würden sich Schulnoten anbieten. Tatsächlich ist es aber so, dass Schulnoten von 1 bis 6 zwar in gleiche Abstände von eins unterteilt sind, diese Abstände aber nicht als gleich groß war genommen werden.

Beispielsweise verläuft zwischen der 4 und der 5 die Bestehensgrenze, was den gefühlten Abstand zwischen der 4 und der 5 wesentlich größer macht als den zwischen einer 3 und einer 4. Damit erhobene Daten sind also absolut ungenau. Daher wurden Antwortmöglichkeiten verwendet, deren Abstufung laut einer Studie von den meisten Menschen als gleichmäßig empfunden wird⁴⁰. Wo diese nicht zur Frage passten, wurden sie vorsichtig abgeändert.

Um die oben genannte These zu überprüfen, müssen die gestellten Fragen messbare Merkmale der einzelnen Aspekte abdecken.

⁴⁰ Vgl Bernd Rohrmann: *Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung*, Zeitung für Sozialpsychologie, 1978, <http://people.f3.htw-berlin.de/Professoren/Pruemper/pdf/Antwortskalen.pdf>, besucht am 28.07.15

Um eine Aussage über den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler zu bekommen, sollen sie einschätzen, ob sie durch das Spiel die Vorgänge im Teilchendetektor bei einem Ereignis besser verstanden haben und ob es ihnen bei der Datenauswertung geholfen hat. Diese Fragen zielen zum einen auf Verständnis und zum anderen auf den Wissenstransfer ab.

Die Eignung der Methode soll beurteilt werden, indem zum einen nach der Nachhaltigkeit im Vergleich zu den anderen Programmpunkten dieses Tages (weil die als andere Methoden zeitnah stattfanden) gefragt wurde und zum anderen die Schülerinnen und Schüler entscheiden sollten, ob der Einsatz des Lernspiels bei weiteren Masterclasses empfehlenswert sei.

Zweigeteilt ist die Analyse der Qualität des Spiels. Einmal geht es um die Konstruktion des Spiels – reichte die anfängliche Erklärung, was müsste man an Erklärung, Material, Ablauf etc. verbessern? Auch der Zeitrahmen soll beurteilt werden. Auf der anderen Seite ist aber wichtig, ob das Spiel auch als solches empfunden wird. Daher ist es interessant, inwieweit es den Teilnehmerinnen und Teilnehmer auch Spaß macht.

Erstellt wurden die Fragebögen⁴¹ mit dem Programm GrafStat⁴² (Ausgabe 2015) von Uwe W. Diener, dessen Weiterentwicklung von der Bundeszentrale für politische Bildung gefördert wird und was auch Möglichkeiten zur Auswertung bietet. Sie sind unkompliziert gestaltet und durch Blockung möglichst übersichtlich. Eine Art Pre-Test mit Kommilitoninnen und Kommilitonen nach einem kurzen Probelauf des Spiels ergab, dass zur Beantwortung etwa zehn Minuten ausreichen – es gibt auch nur zwei freie Fragen, deren Beantwortung dann einen kurzen Text statt eines Kreuzes erfordert.

Alle Fragebögen wurden komplett ausgefüllt (und sind lesbar). Die Rückmeldungen sind überwiegend positiv. So schätzen 12 von 22 Schülerinnen und Schüler ein, sie hätten durch das Spiel die Vorgänge bei einem Ereignis im Teilchendetektor „ganz sicher“ besser verstanden, weitere 6 antworteten mit „ziemlich wahrscheinlich“, noch drei mit „vielleicht“ und nur einer mit „keinesfalls“. Allerdings findet sich in diesem Fragebogen neben der angekreuzten Antwort „keinesfalls“ eine Anmerkung, er/sie hätte das halt auch vorher schon verstanden.

Auch die Frage, ob ihnen das Spiel bei der Datenauswertung geholfen hätte, wurde vor allem mit „ziemlich wahrscheinlich“ (ca. 41%) und „ganz sicher“ (ca. 32%) beantwortet.

Eine ganz eindeutige Aussage gibt es zu der Frage, ob das Spiel bei zukünftigen Masterclasses eingesetzt werden sollte. Rund 90% bejahten dies.

Leider gibt es nur einen expliziten Vergleich zwischen den Methoden. „Am besten gefallen hat mir die Suche nach dem Befund des vorliegenden Datensatzes. Mitnehmen kann man von dem Spiel einiges, da es selbst zum interagieren einlädt und einem dadurch die Vorgänge bildlicher veranschaulicht, sodass man eine bessere Vorstellung

⁴¹ Siehe Anhang, Abschnitt 4.4.1

⁴² <http://www.grafstat.de/>, besucht am 11.05.15

der Auswertung erhält als durch Datensätze.“⁴³ Die Schülerinnen und Schüler äußerten, am besten gefallen an dem Spiel habe ihnen die Selbsttätigkeit, die Möglichkeit, ihr Wissen einmal anzuwenden, und die bildliche Darstellung. Mehrere gaben an, das Prinzip der Teilchendetektion durch das Lernspiel besser verstanden zu haben.

Die Erklärung des Spiels habe „so mittelmäßig“ bis „ganz sicher“ für das Verständnis des Spiels gereicht, finden alle bis auf eine Person. Dass knapp 73% den Zeitrahmen für „eher zu lang“ hielten, ist ziemlich eindeutig. In den Verbesserungsvorschlägen findet sich vor allem der Wunsch nach einer besseren Lösung für den Umgang mit Untergrund. Weitere Anregungen sind etwa die Gruppe zu teilen, das Spiel effizienter zu machen und ein zweites Neutrino einzuführen (das gab es allerdings).

Dass das Spiel zu lange gedauert hat und die Erklärung einige Schwachstellen hatte, deckt sich mit der eigenen Beobachtung. Auch, dass eigentlich zu viel Untergrund im Spiel war, das war sogar im Vorfeld schon aufgefallen; aus Gründen der Einfachheit habe ich aber zunächst von weiteren Spielregeln absehen wollen.

Ärgerlich war, dass das benutzte Klebeband nicht ordentlich gehalten hat und dass das Fotografieren erfolgreicher Spielrunden im allgemeinen Trubel an diesem Tag etwas untergegangen ist.

Dafür schien es so, als wären beinahe alle sehr engagiert bei der Sache. Rege Nachfragen zeugten von einer intensiven Auseinandersetzung mit der Thematik, was gerade im Vergleich zu der sonst eingesetzten Übung 2 positiv auffiel, da die Schülerinnen und Schüler da oft nur zögerlich Fragen stellen und vor den Laptops grübeln.

2.4.3 Beobachtung und Rückmeldung

Einen Tag nach der Masterclass wurden die Eindrücke der Beobachtenden gesammelt. Die Ergebnisse des Gesprächs sind hier sinnvoll zusammengefasst; die ursprünglichen Gesprächsnotizen befinden sich abgetippt im Anhang (s. 4.4.4).

Anscheinend ist nicht völlig klar gewesen, dass erst eine Beispieldarstellung als Ersatz für Übung 1 erfolgte, um dann wie gewohnt mit der Erklärung der Suche nach dem Higgs-Boson fortzufahren und das Spiel erst als Ersatz für Übung 2 zu spielen. Außerdem hätte man für die Beispiele die mit den passenden Particle Plushies (diese wurden anfangs verteilt) aufrufen können, um mit ihnen die auf der Leinwand gezeigten Regeln durchzugehen und dann wirklich für jedes Teilchen einzeln die Spuren legen (das Signal, das auf Neutrinos hindeutet, war zusammen mit dem eines Elektrons gezeigt worden), um Verwirrung bei den Schülerinnen und Schüler zu vermeiden. Auch müsste man einmal die ladungsabhängige Krümmungsrichtung der Spuren zeigen, auch wenn die Spuren später in MINERVA ziemlich gerade aussehen. An dieser Stelle könnte man

⁴³ Siehe Grundausswertung, Anhang Abschnitt 4.4.2 , 9. Datensatz

auch erwähnen, dass die Farben der Spuren an MINERVA angepasst wurden; da werden besonders hochenergetische Spuren orange und rot angezeigt, der Rest lila und türkis.

Am Material könnte man ein paar Veränderungen vornehmen. Auf der Übersichtskarte mit den Feynman-Diagrammen sollte ein Untergrund-Ereignis explizit als mögliche Lösung vermerkt sein. Außerdem würden Transversalimpulswerte auf den Spielkarten erlauben, einen Cut auf bestimmte Werte zu setzen wie in der Software auch.

Man muss darauf achten, dass das Teilchenfänger-Team laut und deutlich erklärt, wie die Entscheidung bei der Ereignisidentifikation zustande kommt. Um den Schülerinnen und Schüler dies zu erleichtern, wäre es gut, die erste Runde als „Expertenrunde“ zu spielen: eine Vermittlerin oder ein Vermittler hilft den Schülerinnen und Schülern, sich zurechtzufinden, der oder die andere übernimmt die Teilchenfängerrolle und macht das laute Denken beim Erraten vor.

Daher ist es auch ungeschickt, wenn das erste Ereignis zum Untergrund gehört, auch wenn das in Übung 2 auch so ist.

Allerdings habe das Spiel funktioniert: die Schülerinnen und Schüler waren viel motivierter bei der Messung als bei der bisherigen Vorgehensweise und das Ergebnis war der Datenauswertung vergleichbar.

Mit jeder Runde sei der Spielfluss besser geworden und man habe richtig gemerkt, wie die Spielenden immer mehr gelernt hätten. Dabei haben die Schülerinnen und Schüler sich rege ausgetauscht (zuvor kannte sich die Gruppe kaum).

2.5 Überarbeitung

2.5.1 Vorgenommene Änderungen

Zur besseren Strukturierung der Erklärung wird folgendes Vorgehen für geschickt erachtet: Der Spielleiter oder die Spielleiterin steckt eine Karte von jeder Sorte in den Beutel, aus dem später im Spiel auch die Karten gezogen werden. Dann zieht er oder sie auf dem Spielfeld nacheinander Karten, erklärt, was für ein Teilchen diese bezeichnen und macht vor, wie man mithilfe der Informationen auf Karte und Plakat das richtige Signal auslegt. Dabei werden die Karten auf die Spuren gelegt, damit die Schülerinnen und Schüler Zeit haben, sich das etwas besser einzuprägen und Fragen zu stellen. Danach werden noch die Spielregeln erklärt und dann kann das Spiel beginnen.

Diese Erklärungsstrategie hat sich bei einem Spiel mit Kommilitoninnen und Kommilitonen im Rahmen eines Imagefilmdrehs der Telekomstiftung als sehr effektiv erwiesen.

Auf den Übersichtskarten wurde zu den Feynman-Diagrammen geschrieben, um welche Kategorie von Ereignissen sich handelt, dazu auch explizit als dritte Kategorie „Untergrund“.

Auf den Spielkarten stehen jetzt auf den Karten für Leptonen, Jets und Untergrund Transversalimpulswerte beziehungsweise ein Wert für die fehlende Transversalenergie auf den (Anti-)Neutrino-Karten. Der Cut bei bestimmten Werten, woraufhin alle Spuren von Teilchen mit niedrigerem Transversalimpuls bzw. Missing Transverse Energy vom Spielfeld verschwinden müssen, wurde in die Spielregeln aufgenommen, genau wie die Expertenrunde.

Die Reihenfolge der Ereignisse wurde ein wenig umstrukturiert; am Anfang steht nun kein Untergrund mehr.

Eine zweite Spielrunde fand in einem Fachdidaktik-Seminar statt, nachdem schon die Spielkarten und -regeln sowie die Zerfallsübersichten angepasst worden waren. Dabei fiel stärker auf, dass viele Mitspielende mit dem Teilchenfänger-Team mitraten wollten.

Deshalb werden in Zukunft die Zerfallsübersichten für alle Teilnehmenden auf DIN A5-Papier ausgedruckt, die die Teilnehmerinnen und Teilnehmer dann behalten können.

2.5.2 Deren Auswirkungen

Die Änderungen haben das Spiel strukturierter und übersichtlicher gemacht. Sicher durch die Einführung von Cuts auf die Transversalimpulswerte auch ein bisschen anspruchsvoller, aber die Praxis hat gezeigt, dass das kein Problem ist; leider war dies im Vorhinein schwer exakt abzuschätzen. Gerade diese Änderung scheint auch einen positiven Einfluss auf das Verständnis der Auswertung der Daten zu haben.

Es ist auf jeden Fall sinnvoll, zwei Leute als Teilchenfänger einzusetzen, da diese sich dann austauschen können und auch weniger unsicher zu sein scheinen.

Das Lernspiel ist jetzt noch stärker an MINERVA angepasst, was sicherlich von Vorteil ist.

Die Rückmeldungen durch die Beobachterinnen und Beobachter nach den letzten Praxistests stützen diese Einschätzung; weitere Anpassungen sind demnach nicht nötig.

3. Schlussbetrachtung

3.1 Fazit

Für die Teilchenphysik-Masterclasses des Netzwerk Teilchenwelt, die den W-Pfad nutzen, wurde eine alternative Vorgehensweise zur Verbindung von Theorie- und Praxisteil entwickelt. Das entstandene Lernspiel kann die Erklärungen zum ATLAS-Detektor verkürzen und die Online-Übungen ersetzen, wie die Evaluation gezeigt hat. Allerdings muss man die Funktionen der zweiten Ansicht von MINERVA noch kurz vorstellen, bevor die Schülerinnen und Schüler am Rechner arbeiten; hier finden sich Werkzeuge, Einstellungen und Informationen. Außerdem fehlt im Spiel die Möglichkeit, zu untersuchen, ob Spuren aus dem gleichen Vertex stammen. Das war aus Platzgründen einfach nicht machbar und muss deshalb noch erläutert werden.

Der handlungsorientierte Ansatz erzwingt eine intensivere Auseinandersetzung mit dem Lernstoff und bietet die Möglichkeit zur Anwendung erworbenen Wissens. Ein Lernspiel beinhaltet darüber hinaus mehr Unterhaltung und Spaß, was dem Ziel der Nachwuchsgewinnung für die Teilchenphysik dienlich sein sollte. Der Methodenwechsel lockert den Ablauf auf; dabei bildet der Dreiklang aus Vortrag, Lernspiel und Datenauswertung eine gute Balance zwischen direktem Kontakt mit der Wissenschaft und didaktischer Aufbereitung der Lerninhalte.

Da die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Masterclass mit der Datenauswertung ebenso gut zurechtkamen wie sonst auch, kann man davon ausgehen, dass sie im Spiel ähnlich viel gelernt haben wie im herkömmlichen Verfahren. Um konkreter zu werden: das Ergebnis war ein Verhältnis von W^+ zu W^- -Bosonen von $1,62 \pm 0,21$, der vom ATLAS-Experiment ermittelte Wert betrug 2011 1.5 ± 0.03 (vgl. Abb. 10).

Während der Lernerfolg lediglich vergleichbar war, hatte das Lernspiel einen ausgesprochen positiven Einfluss auf die Motivation der Schülerinnen und Schüler und die Stimmung im weiteren Verlauf der Masterclass. Damit ist die früher aufgestellte These zumindest in einem Fall bestätigt worden. Dass bei einer Masterclass im Fachdidaktikseminar die gleichen Effekte sichtbar wurden, deutet darauf hin, dass sie tatsächlich auf das Lernspiel zurückzuführen sind und nicht auf andere Umstände, da fast ausschließlich andere Personen beteiligt waren.

Ein angenehmer Nebeneffekt waren die verbesserte Kommunikation in der Gruppe, da das Spiel viele Gesprächsanlässe bietet, und ein gutes Gruppenklima. Außerdem wird kein Internetzugriff der durch die Schülerinnen und Schüler genutzten Laptops benötigt.

Die Ausbaufähigkeit des Spiels ist durch die erfolgten Änderungen schon bewiesen worden, es kann jederzeit weiter angepasst werden, ist aber jetzt auf einem sehr vielversprechenden Stand und wird zumindest im Rahmen des aktuellen Projekts so belassen.

3.2 Ausblick

In Zukunft soll das Spiel bei den Masterclasses am Standort Bonn eingesetzt werden. Dazu wird es allen aktiven Vermittlerinnen und Vermittlern vorgestellt werden. Zwar ist die Zukunft des Deutschen Museums Bonn ungewiss, als Spielfläche eignet sich aber auch z.B. ein Schulfoyer.

Außerdem ist geplant, es im Netzwerk Teilchenwelt verfügbar zu machen, damit auch andere Institutionen im Netzwerk es nutzen können.

Eine Idee, um die Kosten zu senken, ist das Aufmalen der Spielfläche auf den Schulhof interessierter Schulen, an denen häufig Masterclasses stattfinden. Dazu könnte Kreide als temporäre Lösung genutzt werden oder Asphaltfarbe, wenn das Spielfeld bestehen bleiben soll. Ob das noch ausprobiert wird, ist allerdings noch nicht absehbar.

Interessant wäre auch, zu sehen, ob das Lernspiel auf lange Sicht praxistauglich ist, noch bisher übersehene Schwächen oder Stärken aufweist und ob es von anderen übernommen wird. Dies übersteigt allerdings den Rahmen dieser Bachelorarbeit. Auch zwei in naher Zukunft angedachte weitere Masterclasses werden wohl nicht mehr in die Bachelorarbeit aufgenommen werden; sollten dabei aber noch etwas von Interesse ergeben, wird es eventuell nachgereicht.

4. Anhang

4.1 Nötige Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler

Damit der Einsatz dieses Lernspiels überhaupt Sinn macht, sollten die Schülerinnen und Schüler über einige Vorkenntnisse verfügen. Dazu gehören Wissen über:

- Impuls
- Größenordnungen
- Elementare Grundzüge der Prinzipien von Statistik und Stochastik
- Modelle als Erkenntniswerkzeuge in der Physik
- Bewegung von geladenen Teilchen in Magnetfeldern
- Elektronenvolt als Energieeinheit

- Das Standardmodell der Teilchenphysik, besonders:
 - Leptonen und welche davon elektrische Ladung tragen
 - Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung
 - Zerfall von Higgs-Bosonen über den W-Kanal
 - Struktur eines Detektors für die Teilchenphysik
 - Messung der verschiedenen Eigenschaften eines Teilchens

Während die oberen Punkte zum klassischen Schulstoff gehören, wird der letzte meist erst im einführenden Vortrag einer Masterclass zur Sprache kommen. Dabei werden allerdings auch die meisten der erstgenannten Vorkenntnisse noch einmal angesprochen.

4.2 Erklärungsnotizen für die Spielleitung und wichtige Fragen im Spielverlauf

Bei der Vorstellung und Erklärung des Spiels sollten Sie ein paar Dinge erwähnen:

- Dass es sich um einen Ausschnitt aus dem Eventdisplay MINERVA handelt, der einen schematischen Querschnitt durch den ATLAS-Detektor darstellt
- Das Strahlrohr des Teilchenbeschleunigers würde senkrecht dazu verlaufen, durch den schwarzen Punkt in der Mitte
- Wie der Detektor von innen nach außen aufgebaut ist
- Neutrinos/Antineutrinos kann man nicht direkt messen
- Die Farbe der Spuren hängt von der Energie der Teilchen ab
- Warum „gute“ Spuren einen hohen Transversalimpuls haben müssen
- Die Krümmung der Spuren ist wegen der hohen Energie der Teilchen kaum sichtbar

Alles andere arbeiten Sie ab, indem Sie eine Karte jeder Sorte in den Beutel stecken, diese nacheinander ziehen und anhand des Plakats vormachen, was zu tun ist. Dabei erklären Sie den Schülerinnen und Schülern Ihr Vorgehen. Am besten lassen Sie die Spuren jeweils liegen und legen die Karte darauf. Als Platzhalter in den Kalorimetern dienen Ihnen die gelben Pappkarten.

Im Spielverlauf werden Ihnen einige Fragen gestellt werden, auf andere Aspekte sollten Sie gegebenenfalls hinweisen. Dazu gehören:

- Ununterscheidbarkeit von Neutrinos und ihren Antiteilchen
- Warum nur ein Jet zugelassen wird
- Die Bedeutung der Isolation einer Leptonenspur
- Warum die Leptonen entgegengesetzt geladen sein müssen, damit ein Ereignis zu den Higgs-Kandidaten gezählt werden kann
- Die Abgrenzung zwischen Missing Transverse Energy und der Energie von Neutrinos
- Der Öffnungswinkel zwischen Spuren von interessanten Leptonen

Nach dem Spiel sollte es eine kurze Überleitung zur Datenauswertung geben. Sie sollte enthalten:

- Gemeinsame Öffnung von MINERVA und Laden der Events
- Wo man welche Werkzeuge und Einstellungen findet und wie man diese benutzt
- Was es mit den Vertices auf sich hat
- Bestimmung des Winkels zwischen zwei Spuren

4.3 Spielmaterial

4.3.1 Spielanleitung

Spielanleitung für das Event-Display-Spiel

Material: „Spuren“, Karten, Zerfallsübersichten, Leinwand oder Plakat, Spielfeld, Beutel, evtl. Kamera

Kartensatz: Es gibt einen Teilchenfänger, je zwei e^- , e^+ , μ^- , μ^+ , ein Neutrino (könnten auch mehrere sein, also je eins pro Zerfall), Jets, und der Rest Untergrund. Auf den Karten steht das Teilchen mit Symbol und Namen oder die sonstige Rolle sowie ein Transversalimpuls

Plakat: muss groß genug sein, um von allen gelesen werden zu können. Hier ist aufgelistet, welche „Teilchen“(Schülerinnen und Schüler) wie mit dem „Detektor“ (Spielfeld) wechselwirken.

Spielfeld: Ausschnitt aus dem Eventdisplay MINERVA: schematischer Querschnitt durch den ATLAS-Detektor

Zerfallsübersichten: Feynman-Diagramme zu suchender Ereignisse, ca. A5-Format, die jede(r) bekommt

Spuren: farbige Gurtbandstücke, für die Jets zusammengeheftet

Durchführung: Zunächst muss eine Erklärung des Spiels erfolgen. Der/die SpielleiterIn platziert die Spuren für ein „Ereignis“ (eine Spielrunde) am Rand des Spielfelds. Jede(r) SchülerIn zieht eine Karte. Dabei sorgt der Spielleiter dafür, dass eine sinnvolle Kartenkonstellation vorliegt, die zum Beispiel den Zerfall eines Higgs-Bosons darstellen könnte.

Der/die TeilchenfängerIn hält sich die Augen zu und zählt bis ca. 20. Währenddessen legen die anderen entsprechend ihrer Rollen Spuren aus und stellen sich auf: Die Elektronen hinterlassen eine rote Spur in den Spurdetektoren (Mitte, schwarz) und verlieren dann im Kalorimeter (grün) ihre gesamte Energie, also bleiben da. Die Myonen legen Spuren in den inneren Spurdetektor, wechselwirken mit den Kalorimetern- da stehen sie also am Ende- und hinterlassen auch noch eine orange Spur in den Myonkammern. Wer eine Neutrinokarte gezogen hat, schleicht sich aus dem Spielfeld und hinterlässt eine rot gestrichelte Spur. Die Schüler(innen), die zum Untergrund gehören, dürfen Verwirrung stiften: sich in die Kalorimeter stellen oder kurze Spuren auslegen. Ein Jet hinterlässt ein Spurenbündel im inneren Spurdetektor und Einträge in den Hadronenkalorimetern. Dazu gehören eventuell mehrere Personen.

Damit die Schülerinnen und Schüler das nicht im Kopf behalten müssen, stehen dazu Stichpunkte auf dem Plakat oder werden mit einem Beamer auf eine projiziert.

Wenn der/die TeilchenfängerIn die Hände vom Gesicht nimmt, darf sich niemand sonst mehr bewegen. Seine/Ihre Aufgabe ist es nun, mithilfe der Übersichtskarte (Blatt mit Feynman-Diagrammen interessanter Zerfälle) herauszufinden, ob eines dieser Ereignisse vorliegt und wenn ja, welches. Fragt er/sie ein „Teilchen“ nach dessen Ladung, so muss es antworten.

Außerdem gibt es die Möglichkeit, einen „Cut“ auf den Impuls der Teilchen zu machen. Dazu sind Werte auf die Karten aufgedruckt. Wer unter dem vom Teilchenfänger geforderten Mindestimpuls liegt, muss das Feld räumen.

Liegt der/die TeilchenfängerIn richtig, und das muss unbedingt begründet werden, wird die „Messung“ gespeichert; der/die SpielleiterIn hält das fest, indem er/sie ein Foto macht.

Es empfiehlt sich, in der ersten Runde eine(n) Vermittlerinnen und Vermittler die Rolle des Teilchenfängers vormachen zu lassen, während eine zweite Lehrperson den Schülerinnen und Schüler helfen kann.

4.3.2 Ereigniszusammenstellung

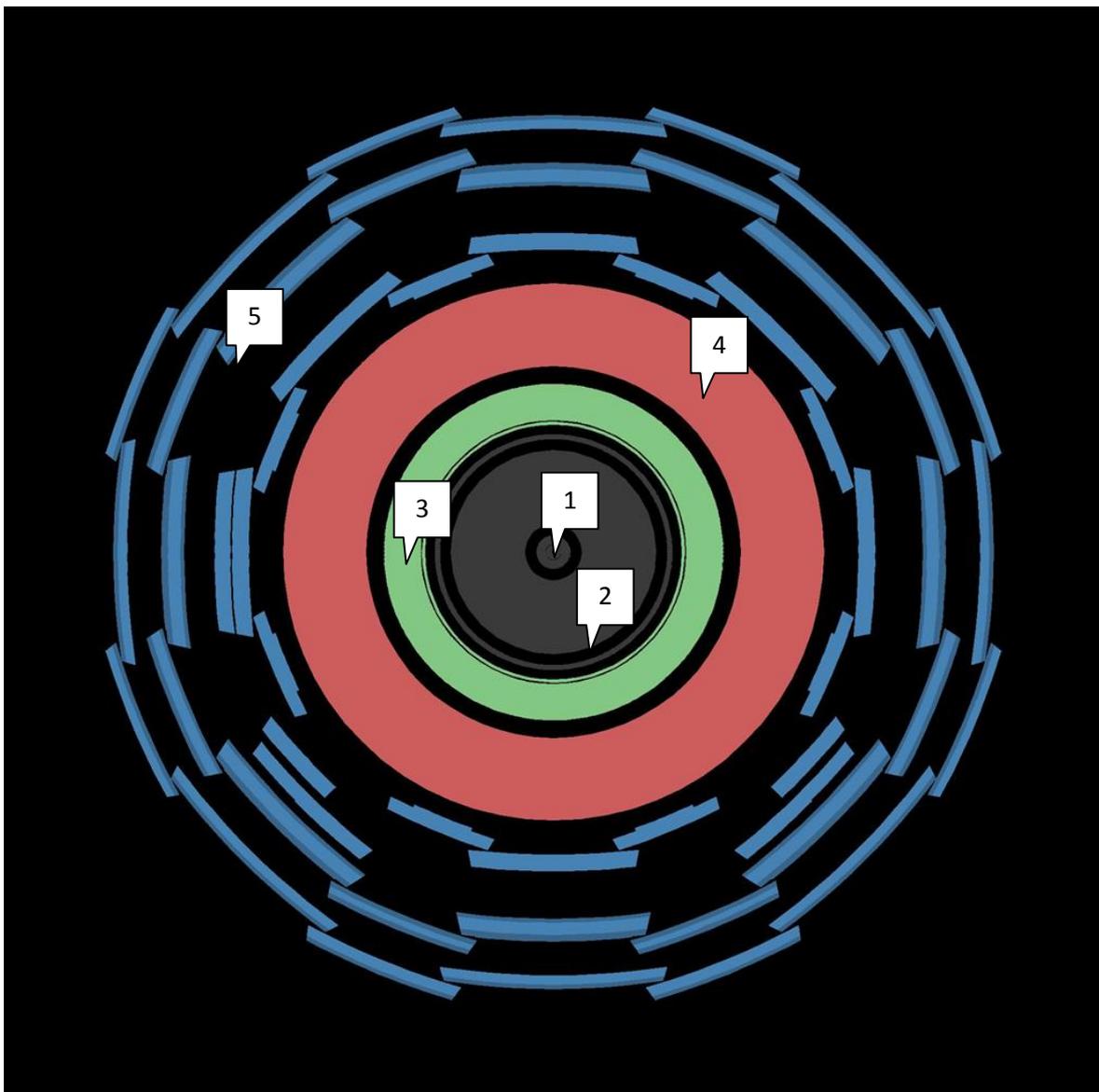
Kartenverteilung (für die Spielleitung)

Ereignis	Karten (bei 15 Schülerinnen und Schülern)
$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$	1 Jet, 1 (Anti-)Neutrino, 1 Myon, 10 Untergrund, 2 TF
$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$	1 Jet, 1 (Anti-)Neutrino, 1 Elektron, 10 Untergrund, 2 TF
Untergrund	2 Jets, 1 Elektron, 10 Untergrund, 2 TF
$W^+ W^- \rightarrow \mu^+ + \nu + \mu^- + \bar{\nu}$	1 Jet, 2 (Anti-)Neutrinos, 1 Myon, 1 Antimyon, 8 Untergrund, 2 TF
Untergrund	2 Jets, 2 (Anti-) Neutrino, 2 Positronen, 1 Antimyon, 7 Untergrund, 2 TF
$W^+ \rightarrow e^+ + \nu$	1 Jet, 1 (Anti-)Neutrino, 1 Positron, 10 Untergrund, 2 TF
$W^+ W^- \rightarrow e^+ + \nu + e^- + \bar{\nu}$	1 Jet, 2 (Anti-)Neutrinos, 1 Positron, 1 Elektron, 8 Untergrund, 2 TF
Untergrund	2 Jets, 1 (Anti-)Neutrino, 10 Untergrund, 2 TF
$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$	1 Jet, 1 (Anti-)Neutrino, 1 Myon, 10 Untergrund, 2 TF
$W^+ W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu} + e^+ + \nu$	1 Jet, 2 Neutrinos, 1 Myon, 1 Positron, 8 Untergrund, 2 TF

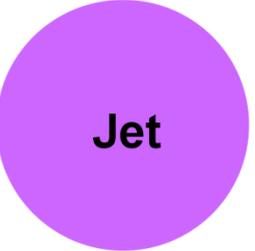
4.3.3 Spielfeld

Legende zum Bild:

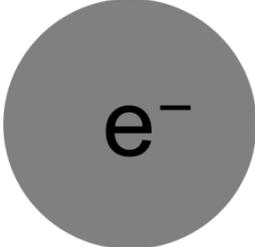
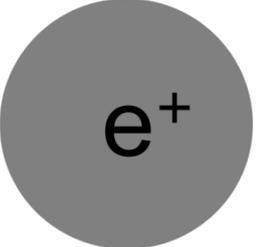
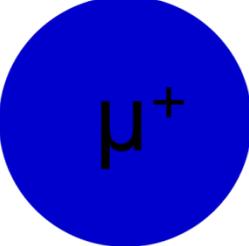
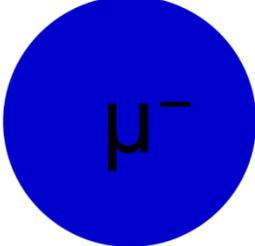
1. Strahlrohr
2. Spurdetektoren
3. Elektromagnetische Kalorimeter
4. Hadronenkalorimeter
5. Myonenkammern



4.3.4 Spielkarten

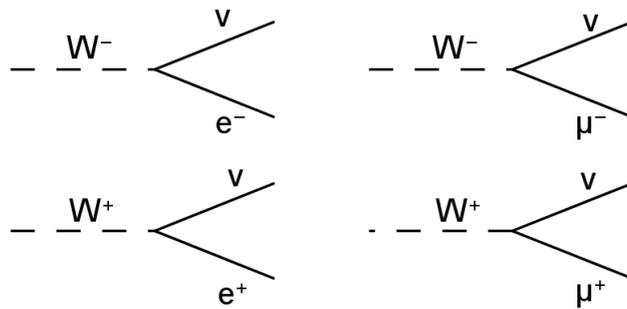
 <p>Teilchenfänger</p>	(Anti-)Neutrino  <p>V</p> <p>$ME_T = 34 \text{ GeV}$</p>	 <p>Jet</p> <p>$P_T = 11-23 \text{ GeV}$</p>	 <p>Jet</p> <p>$P_T = 10-15 \text{ GeV}$</p>
 <p>$P_T = 3 \text{ GeV}$</p>	 <p>$P_T = 5 \text{ GeV}$</p>	 <p>$P_T = 7 \text{ GeV}$</p>	 <p>$P_T = 1 \text{ GeV}$</p>

Die Spielkarten wurden für einen einfacheren Druck auf 75% ihrer ursprünglichen Größe verkleinert.

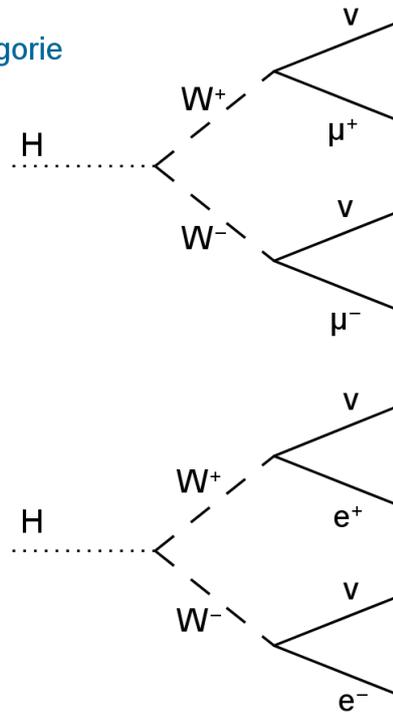
 <p>Teilchenfänger</p>	<p>(Anti-)Neutrino</p>  <p>ν</p> <p>$ME_T = 22 \text{ GeV}$</p>	<p>Elektron</p>  <p>e^-</p> <p>$P_T = 25 \text{ GeV}$</p>	<p>Positron</p>  <p>e^+</p> <p>$P_T = 31 \text{ GeV}$</p>
<p>Antimyon</p>  <p>μ^+</p> <p>$P_T = 45 \text{ GeV}$</p>	<p>Myon</p>  <p>μ^-</p> <p>$P_T = 37 \text{ GeV}$</p>	 <p>$P_T = 8 \text{ GeV}$</p>	 <p>$P_T = 2 \text{ GeV}$</p>

Interessante Ereignisse

1. Kategorie



2. Kategorie



Higgs-Zerfälle, bei denen ein Positron und ein Myon oder ein Elektron und ein Antimyon entstehen, gibt es natürlich auch.

3. Kategorie: Untergrund

4.3.6 Plakat

Teilchenspuren im Detektor

Geladene Teilchen:

- Rote oder orange Spuren in Spurdetektoren (innen)
- Energieabgabe im **Elektromagnetischen Kalorimeter**

Nur **Myonen**: **Spuren** in **Myonenkammern**

In Flugrichtung von **Neutrinos** fehlt Energie: - - - - -

Jet: Bündel von **Spuren**, Einträge in beiden **Kalorimetern**

Der Untergrund  stiftet Verwirrung (im Kalorimeter, mit kurzen Spuren...)

4.4 Evaluationsmaterialien

4.4.1 Fragebogen



Evaluation des Lernspiels zur Wechselwirkung von Teilchen mit dem ATLAS-Detektor

Hallo,

du hast im Rahmen einer Teilchenphysik-Masterclass an einem Lernspiel zu den Vorgängen im ATLAS-Detektor teilgenommen, dessen Entwicklung Teil meiner Bachelorarbeit ist.

Um eine Rückmeldung über die Eignung des Lernspiels zur Vorbereitung auf die abschließende Auswertung von ATLAS-Daten zu bekommen, möchte ich dich bitten, diesen Fragebogen sorgfältig und vor allem ehrlich auszufüllen. Die Erhebung erfolgt völlig anonym, also keine Angst vor negativen Antworten.

Es ist ganz wichtig für mich, dass du diesen Fragebogen ordentlich bearbeitest! Nur so bekomme ich sinnvolle Daten für die Auswertung des Projekts.

Bitte fülle den Fragebogen alleine aus und schreibe keinen Namen o. Ä. darauf. Danach legst du ihn einfach in die bereitliegende Mappe.

Bei den Fragen mit vorgegebenen Antwortmöglichkeiten ist immer nur eine anzukreuzen, bei freien Fragen hast du Platz für kurze Antworttexte. Wenn du Korrekturen vornehmen willst, male das alte Kästchen ganz aus und kreuze das gewünschte an.

Vielen Dank für deine Mitarbeit!

Heute hast du zuerst Vorträge über Teilchenphysik gehört, dann bei einem Lernspiel mitgemacht und anschließend Daten vom ATLAS-Detektor ausgewertet. Jetzt geht es um das Spiel.

1. Reichte die Erklärung am Anfang aus, um das Spiel zu verstehen?

- keinesfalls
- wahrscheinlich nicht
- vielleicht
- ziemlich wahrscheinlich
- ganz sicher

2. Hast du durch das Spiel die Vorgänge bei einem Ereignis im Teilchendetektor besser verstanden?

- keinesfalls
- wahrscheinlich nicht
- vielleicht
- ziemlich wahrscheinlich
- ganz sicher

3. Hat es dir geholfen, die Auswertung der Daten des ATLAS-Experiments zu verstehen?

- keinesfalls
- wahrscheinlich nicht
- vielleicht
- ziemlich wahrscheinlich
- ganz sicher

Im nächsten Teil geht es vor allem um die Atmosphäre während des Spiels.

4. Hat dich das Spiel neugierig auf die Messung gemacht?

- gar nicht
- kaum
- mittelmäßig
- ziemlich
- außerordentlich

5. Wie beurteilst du den Zeitrahmen für das Spiel?

- deutlich zu lang
- eher zu lang
- genau richtig
- eher zu kurz
- deutlich zu lang

6. Hat dir das Spiel Spaß gemacht?

- gar nicht
- kaum
- mittelmäßig
- ziemlich
- sehr

Zuletzt ist dein persönliches Urteil gefragt.

7. Was hat dir an dem Spiel am besten gefallen?

8. Würdest du den Einsatz des Spiels bei weiteren Masterclasses empfehlen?

- Ja
- Nein

Begründung:

9. Was müsste man verbessern? An der Erklärung, am Material, am Ablauf...?

4.4.2 Grundausswertung

Grundausswertung der Befragung:

1) Reichte die Erklärung am Anfang aus, um das Spiel zu verstehen?

gar nicht	1 (4,55%)
kaum	0 (0,00%)
so mittelmäßig	8 (36,36%)
fast	7 (31,82%)
ganz sicher	6 (27,27%)
<hr/>	
Summe	22
ohne Antwort	0

2) Hast du durch das Spiel die Vorgänge bei einem Ereignis im Teilchendetektor besser verstanden?

keinesfalls	1 (4,55%)
wahrscheinlich nicht	0 (0,00%)
vielleicht	3 (13,64%)
ziemlich wahrscheinlich	6 (27,27%)
ganz sicher	12 (54,55%)
<hr/>	
Summe	22
ohne Antwort	0

3) Hat es dir geholfen, die Auswertung der Daten des ATLAS-Experiments zu verstehen?

keinesfalls	1 (4,55%)
wahrscheinlich nicht	1 (4,55%)
vielleicht	4 (18,18%)
ziemlich wahrscheinlich	9 (40,91%)
ganz sicher	7 (31,82%)
<hr/>	
Summe	22
ohne Antwort	0

4) Hat dich das Spiel neugierig auf die Messung gemacht?

gar nicht	1 (4,55%)
kaum	6 (27,27%)
mittelmäßig	4 (18,18%)
ziemlich	9 (40,91%)
außerordentlich	2 (9,09%)
<hr/>	
Summe	22
ohne Antwort	0

5) Wie beurteilst du den Zeitrahmen für das Spiel?

deutlich zu lang	2 (9,09%)
eher zu lang	16 (72,73%)
genau richtig	4 (18,18%)
eher zu kurz	0 (0,00%)
deutlich zu kurz	0 (0,00%)
<hr/>	
Summe	22
ohne Antwort	0

6) Hat dir das Spiel Spaß gemacht?

gar nicht	1 (4,76%)
kaum	3 (14,29%)
mittelmäßig	8 (38,10%)
ziemlich	6 (28,57%)
sehr	3 (14,29%)
<hr/>	
Summe	21
ohne Antwort	1

7) Was hat dir an dem Spiel am besten gefallen? Wie viel nimmst du davon mit, verglichen mit Vortrag und Messung?

1. Es zwingt einen, sich mit den vermittelten Inhalten auseinanderzusetzen
2. Es hat Interesse erweckt
3. selbst aktiv, verschiedene Rollen (man ist selbst mal Teilchen, mal Beobachter), Man nimmt viel Wissen mit und kann es direkt anwenden
4. Mir hat am besten gefallen, dass wenn man wusste wo man hin musste, sich eindeutig einordnen konnte und gucken musste, welche Teilchen welche Spuren hinterlassen.
5. Ich fand es gut, dass jeder nachher wusste, in welcher Schicht welches Teilchen ihre Spur hinterlässt.
6. Körpereinsatz, Selbstständigkeit, Hilfekarten
7. man sollte sich nur auf die wesentlichen Ereignisse beschränken, praktische Analyse hilft für das weitere Vorgehen
8. Es war sehr interessant zu sehen, wie Leute das Spiel schnell verstehen oder nicht. Der Vergleich zwischen dem Zufall bei der Kartenauswahl und dem eigentlichen Experiment war interessant.
9. Am besten gefallen hat mir die Suche nach dem Befund des vorliegenden Datensatzes. Mitnehmen kann man von dem Spiel einiges, da es selbst zum interagieren einlädt und einem dadurch die Vorgänge bildlicher veranschaulicht, sodass man eine bessere Vorstellung der Auswertung erhält, als durch Vorträge.
10. Ich finde, dass das Spiel die Theorie gut, verständlich und dennoch einfach umgesetzt hat. Durch die praktische Aufgabe hat man die Abläufe im Detektor verinnerlicht und verstanden. Die Messung hat das ganze noch einmal abgerundet.
11. Am besten fand ich die Auswertung des "Teilchenfängers". Es ist gut das theoretische Wissen auch mal praktisch umsetzen zu können
12. Erklärungstafel hilft beim Anfang
13. Es hat Spaß gemacht, weil wir als Gruppe etwas gemacht haben. Jetzt verstehe ich die Werte bei der Messung in ATLAS besser
14. Ich habe ein besseres Verständnis für den ATLAS-Detektor bekommen.
15. Einzigartiges Spiel, sprich etwas, was man nicht jeden Tag "spielt"
16. Mir hat das Spiel gefallen, da ich bis jetzt den Detektor nicht verstanden habe und die Verbildlichung mir sehr geholfen hat.
17. An dem Spiel ist mir die Auswertung deutlicher geworden als zuvor, jedoch hatte ich immer noch Schwierigkeiten bei der richtigen Analyse
18. Gut hat mir gefallen, dass jeder seine Rolle begreifen musste, damit etwas sinnvolles entstehen konnte

19. Es zeigte, welche Kombinationen auftreten können
20. Als Untergrund faul rumstehen und nichts machen
21. Das Rätseln um die Spuren war interessant. Daraus wurde der Unterschied/die Besonderheiten der einzelnen Teilchen deutlich sowie auch Kriterien, die für den Untergrund sprechen
22. man war aktiv am Geschehen beteiligt

8) Würdest du den Einsatz des Spiels bei weiteren Masterclasses empfehlen?

Ja	19 (90,48%)
Nein	2 (9,52%)
Summe	21
ohne Antwort	1

9) Was müsste man verbessern? An der Erklärung, am Material, am Ablauf...?

1. Zusammenfassung am Ende von Maikes Vortrag der Hintergründe, Weniger Spieler pro Spiel
2. Das Spiel scheint oberflächlich
3. Evtl. weniger Durchgänge, da man oft die "Background"-Karte zieht und eine eher passive Rolle hat
4. Man müsste am Anfang evtl. nochmal genauer erklären wie sich die einzelnen Teilchen hinstellen müssen.
5. Zu viele "Background"-Karten und die Leute, die die immer gezogen hatten konnten nie die Lösung herausfinden.
6. als Beispiel vor dem Spiel direkt mit Personen auf dem Feld arbeiten, nicht nur mit dem Material, häufiges Ziehen von Untergrund-Karten -> Langeweile
7. Untergrundkarten waren viel zu zahlreich, zwei Neutrinos sollte es geben
Danke, dafür!
8. Vielleicht etwas kürzer und/oder das Spiel mit der Zeit komplexer machen; jeder sollte der der die Antwort findet sein müssen
9. Eventuell müsste die Erklärung zu Beginn etwas genauer erfolgen. Des Weiteren sollte man das Lernspiel ggf. mit weniger Schülern spielen, evtl. Aufteilung der Gruppe. Zudem sollten möglicherweise weniger "Background"-Karten im Spiel verteilt sein, da sie sowieso schnell aus dem Spiel sind, sodass dadurch auch eine Gruppenteilung möglich gemacht wird.
10. das Spiel sollte gekürzt werden, die Vorbereitung (Material etc.) war trotzdem gut. Eventuell müsste man das Spiel deutlicher erklären, sprich es hätte deutlicher gesagt werden müssen, welches Teilchen wohin muss.
11. Das Spiel effektiver gestalten, auch wenn sich interessante Ereignisse nicht so oft finden lassen.
12. Mehr nicht "Background"-Karten und kleinere Gruppen
13. Viel zu lange und zu viele Backgrounds
14. Bei jedem nochmal einzeln über die Schultern schauen und überprüfen, ob der Vorgang auch WIRKLICH verstanden wurde
- 15.
- 16.
17. Mehr klare Erklärung an ALLE (nicht nur Beobachter) wie man das Higgsteilchen findet, ein langfristiges Spielziel, nicht so lange spielen, weniger Störer bzw. weitere Aufgaben für Störer
18. Ich fand, dass es zu viele Störfaktor-Karten gab
19. Nur drei wichtige Kollisionen durchspielen
20. Nicht jede Person kommt als Teilchenjäger dran, alles andere ist zu langweilig
21. eine 2. Neutrinospur hinzufügen
nur die zweite Neutrinoschnur fehlte

4.4.3 Beobachtungshilfe

Beobachtungsschwerpunkte

Sind die Regeln klar formuliert?

Was wird Überflüssiges gesagt?

Verstehen die Schülerinnen und Schüler den Zusammenhang zwischen Spiel und Messung?

Was könnte man am Material/Materialeinsatz verbessern?

Im Vergleich zu einem Vortrag:

Sind die Schüler motivierter?

Kommt es zum Gedankenaustausch zwischen den Schülerinnen und Schüler?

Läuft die Messung anders? Inwiefern?

Verstehen die Schülerinnen und Schüler genauso viel wie bei einem Vortrag?

Was ging verloren?

Wo stockt der Ablauf?

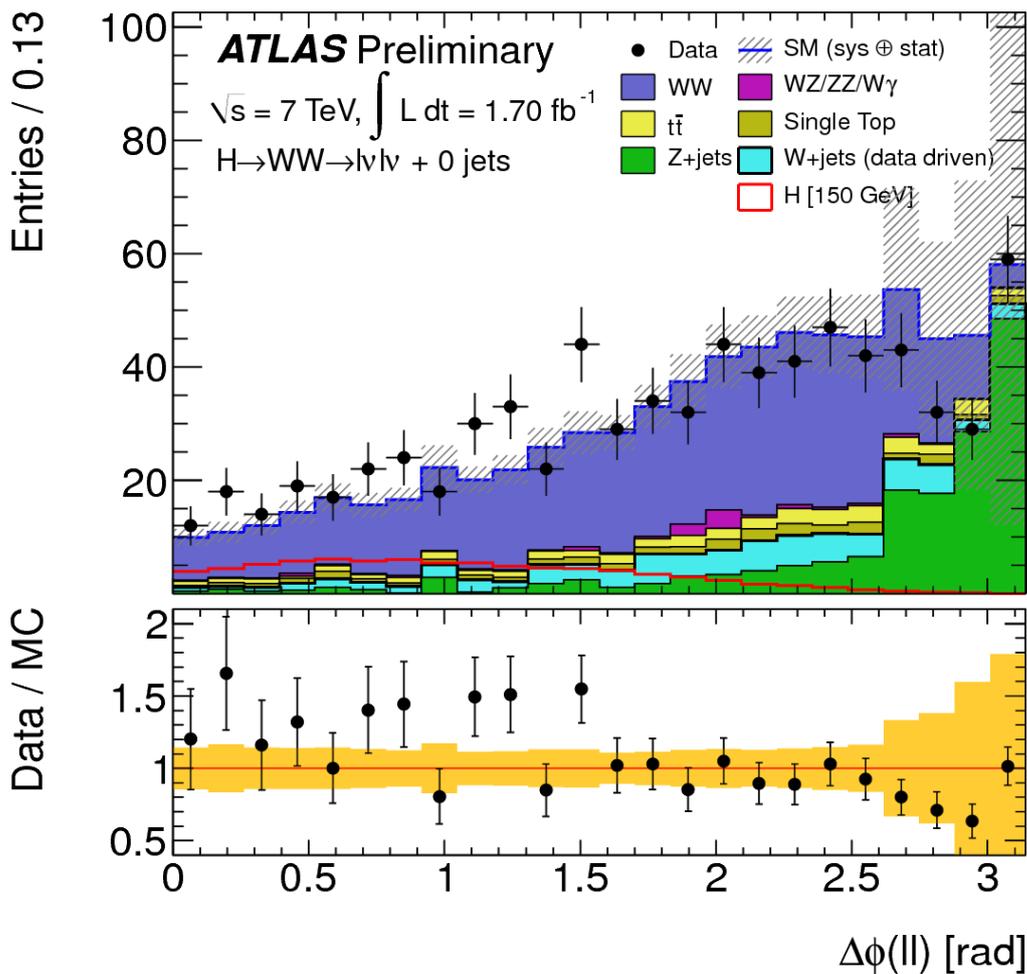
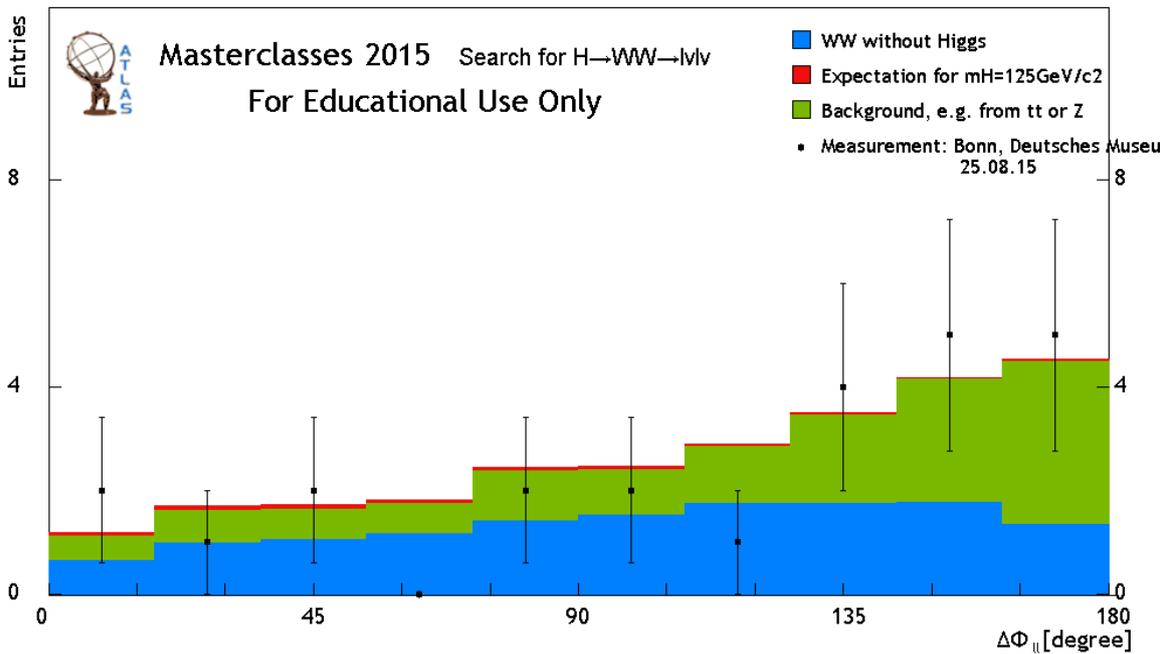
Ist der Zeitrahmen in Ordnung?

4.4.4 Rückmeldungen (als grobe Mitschrift)

- besser den Unterschied zwischen dem Ersatz für Übung 1 und Übung 2 kommunizieren
- erwähnen: Farben der Spuren sind an die Darstellung in MINERVA angepasst, hängen von der Energie der Spuren ab
- Die erste Runde als "Expertenrunde" gestalten: ein(e) Vermittlerinnen und Vermittler hilft den Schülerinnen und Schüler, sich zurechtzufinden, der/die andere spielt in der ersten Runde den Teilchenfänger und macht das "laut Denken" beim Raten vor
- evtl. die Leute mit den entsprechenden Plushies bei den Beispielen als Versuchspersonen aufrufen und mit ihnen die Regeln Stück für Stück durchgehen (Laserpointer!)
- Auf die Übersicht schreiben, dass es auch Untergrund gibt (als 3. Kategorie)
- Die Leute anweisen, sich nicht in die Karten schauen zu lassen, statt den Teilchenfänger zu bitten, die Augen zu schließen
- Teilchenfänger soll laut erklären und muss dazu angehalten werden
- Joker: PT-Schnitt oder nach PT fragen, dafür auf alle Karten Transversalimpulsweite schreiben
- Bei den Beispielen am Anfang alle Teilchen wirklich einzeln legen
- Ladungsabhängige Krümmung der Spuren zeigen
- Folie zur Überleitung auf MINERVA immer notwendig
- Nicht Untergrund als erstes Ereignis nehmen
- Braucht man noch eine Masterclass als Test für Verbesserungen? Dafür mal in der Fachdidaktik nachfragen

- Schülerinnen und Schüler waren viel motivierter bei der Messung
- Immer besserer Spielfluss
- Kommunikation zwischen Schülerinnen und Schüler hat gut funktioniert

4.5 WW-Histogramme⁴⁴



⁴⁴ <http://kijende.web.cern.ch/kijende/results/results.php?institutID=48&datum=>, besucht am 25.08.2015
 Gezeigt sind nur die Bilder zur Anschauung

5. Verzeichnisse

5.1 Literaturverzeichnis

Pädagogische und didaktische Fachliteratur

Wolfgang Einsiedler (Hrsg.): Aspekte des Kinderspiels. Pädagogisch-psychologische Spielforschung, Beltz Verlag, Weinheim und Basel, 1985, ISBN 3-407-54153-8

Hans Scheuerl: Das Spiel. Untersuchungen über sein Wesen, seine pädagogischen Möglichkeiten und Grenzen, Beltz Verlag, Weinheim, 1990, ISBN 3-407-34045-1

Bernd Rohrmann: Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung, Zeitung für Sozialpsychologie, 1978, <http://people.f3.htw-berlin.de/Professoren/Pruemper/pdf/Antwortskalen.pdf>, besucht am 28.07.15

Hartmut Wiesner, Horst Schecker, Martin Hopf: Physikdidaktik kompakt, Aulis Verlag, Hallbergmoos, 2015, ISBN 978-3-7614-2784-2

Markus Roos: Wissenschaftliches Arbeiten im Lehramtsstudium, Huber Verlag, Bern, 2011, ISBN 978-3-456-85006-1

Projekte der Teilchenphysik

<http://www.teilchenwelt.de/das-projekt/ueber-uns/>, besucht am 23.07.15

Prof. Dr. Michael Kobel: Projektübersicht "Netzwerk Teilchenwelt", Institut für Kern- und Teilchenphysik, Technische Universität Dresden, 19.10.2009

http://atlas.physicsmasterclasses.org/wpath_files/img/Feynman/Higgs.png, besucht am 23.08.2015

Povh/Rith/Scholz/Zetsche: Teilchen und Kerne. Eine Einführung in die physikalischen Konzepte. 8.Auflage, Springer Verlag, Berlin und Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-68075-8, S.132

<http://home.web.cern.ch/topics/higgs-boson>, besucht am 27.08.2015

<http://wigner.mta.hu/wignerdc/data/content/lhc.jpg>, besucht am 21.08.2015

<http://www.atlas.ch/detector.html>, besucht am 22.07.15

<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas#sct>, besucht am 18.08.2015

http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/files/2013/07/Standard_Model- of -Elementary_Particles-de.svg_png, besucht am 18.08.2015

<http://atlantis.web.cern.ch/atlantis/>, besucht am 22.07.15

<http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-vermittler/#messungenlhc>, besucht am 21.08.2015

http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/wpath_auswertung.php?language=3, besucht am 21.08.2015

<http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/WpathAnalysis.php?institutID=48>, besucht am 25.08.2015

<http://kjende.web.cern.ch/kjende/results/results.php?institutID=48&datum=>, besucht am 25.08.2015

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/index.htm>, besucht am 23.07.15

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath.htm>, besucht am 18.08.2015

http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_exercise1.htm, besucht am 18.08.2015

http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_exercise2.htm, besucht am 18.08.2015

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/downloads/tallymarks-2015.pdf>, besucht am 19.08.2015

http://www.physicsmasterclasses.org/downloads/description_W-path_2015.pdf, besucht am 19.08.2015

Handout für Teilchenphysik-Masterclasses. ATLAS-Daten: W-Pfad (2015),
http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/_Material_Vermittler/Handout_2015.pdf, besucht am 23.07.15, S.2

<http://www.particlezoo.net/>, besucht am 24.07.15

Software

<http://atlas-minerva.web.cern.ch/atlas-minerva/main.php?lang=en>, besucht am 09.06.2015

<http://www.grafstat.de/>, besucht am 11.05.15

<https://www.geogebra.org/>, besucht am 25.07.15

5.2 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Das Standardmodell der Teilchenphysik</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 2: Der LHC mit den vier Experimenten</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 3: Aufbau des ATLAS-Detektors.....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 4: Grafische Darstellung der Erzeugung eines Higgs-Bosons mit anschließendem Zerfall in W-Bosonen.....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 5: Grafische Ansicht von MINERVA</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 6: Das Ereignis ist das gleiche wie in Abbildung 5, aber der Zoom in der Längsschnittsansicht zeigt, dass die beiden hochenergetischen Spuren (rot und orange) nicht aus demselben Vertex (grün) stammen</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 7: Flowchart zur Selektion von Ereignissen</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 8: Beispiel für ein Foto nach einer erfolgreichen Spielrunde</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 9 : Im Deutschen Museum Bonn ausgelegtes Spielfeld bei einer Masterclass.....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 10: Ausschnitt aus der Auswertungstabelle der Masterclass</i>	<i>25</i>