

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05H2012 - ATLAS: Physik auf der TeV-Skala (BMBF-FSP 101)

Zuwendungsempfänger: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Projektleitung: Prof. Dr. Klaus Desch
E-Mail: desch@physik.uni-bonn.de
Förderkennzeichen: 05H12PD2
Förderzeitraum: 01.07.2012 - 30.06.2015

Thema: Verbundprojekt 05H2012 - Physik mit dem ATLAS-Experiment
(BMBF-FSP 101): Proton-Proton-Kollisionen mit dem ATLAS
Experiment: Analyse, Betrieb und weiterer Ausbau

Zuwendung: 2.027.877,60 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: brock@physik.uni-bonn.de
Zusätzlicher Name: Ian Brock

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	CERN	LHC	ATLAS
Diplomarbeiten:	2		
Dissertationen:	8		
Habilitationen:	1		
Publikationen:	11		
Konferenzbeiträge:	22		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	10		
Masterarbeiten:	8		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 31.12.2015 13:40 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

05 H12PD2 – BN-PN 00160206

Zuwendungsempfänger: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Projektleitung: Prof. Dr. Klaus Desch, Prof. Dr. Ian C. Brock
Zeitraum: 1. Juli 2012 – 30. Juni 2015

Verbundprojekt: FSP 101 - ATLAS; Untersuchung von Proton-Proton-Kollisionen mit dem ATLAS-Experiment

Zusammenfassung

Die Arbeitsgruppen von I.C. Brock und K. Desch an der Universität Bonn haben in der Förderperiode 2012–2015 ihre Forschungsarbeiten am ATLAS-Experiment im Rahmen des FSP-101 erfolgreich fortgesetzt. Die Aktivitäten der Arbeitsgruppen lagen weiterhin in den drei Bereichen Betrieb des Detektors, Entwicklung von neuen Analysewerkzeugen und Datenanalyse.

Die Arbeiten beim Detektorbetrieb mit dem Schwerpunkt Innendetektor/TRT konzentrierten sich auf den Abschluss der Datennahme des Run 1, die Vorbereitung auf den Run 2 sowie das Wiederanfahren des Detektors bei 13 TeV. Die Verantwortung der Gruppe liegt weiterhin beim Online-Monitoring des TRT und des Innendetektors.

Bei der Entwicklung von neuen Analysewerkzeugen ist die Arbeitsgruppe führend bei der Entwicklung von Algorithmen, die auf dem *Particle-Flow* Prinzip beruhen. Im Bereich der Rekonstruktion von τ -Leptonen wurde eine neue Rekonstruktionsmethode („Substruktur“) entwickelt. Im Bereich der Rekonstruktion von Jets wurde die *Particle-Flow*-Rekonstruktion wesentlich weiterentwickelt und in die offizielle ATLAS-Software integriert.

Die Schwerpunkte in der Datenanalyse sind die Top-Quark-Physik und die Suche nach Supersymmetrie. In der Top-Quark-Physik wurden wichtige Beiträge zur Messung der Top-Quark-Masse, zur Messung der Einzel-Top-Produktion und zur Suche nach neuer Physik geleistet. Im Bereich der Suche nach Supersymmetrie war die Arbeitsgruppe führend bei den Suchen in Endzuständen mit τ -Leptonen. Ebenso wurden Fortschritte bei der globalen Interpretation der SUSY-Suchen erzielt. In beiden Bereichen wurde mit der Vorbereitung der Run-2-Analysen begonnen.

1 Kurzdarstellung des wissenschaftlichen Umfeldes

Der Large Hadron Collider LHC und seine vier großen Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb haben in den Jahren 2012–2015 wesentlichen Fortschritt in der Erforschung der Physik der kleinsten Teilchen erreicht. Die Entdeckung eines Higgs-Bosons im Juli 2012 fand weltweit größte Beachtung und führte 2013 zur Verleihung des Physik-Nobelpreises an François Englert und Peter Higgs. Doch auch über die Entdeckung des Higgs-Bosons hinaus haben die Experimente herausragende Forschungsergebnisse erzielt. Diese Ergebnisse basieren auf der erfolgreichen Zusammenarbeit von tausenden von Physikerinnen und Physikern weltweit. Das Projekt über das hier berichtet wird fand im Rahmen des vom BMBF geförderten FSP-101 „ATLAS-Experiment“ statt. Neben dem Betrieb des ATLAS-Detektors wurde auch die stetige Weiterentwicklung von Analyse-Werkzeugen und -Methoden sowie die eigentliche Analyse der Daten gefördert. Die Förderperiode 2012–2015 über die hier berichtet wird war geprägt vom Abschluss der Datennahme in 2012 bei 8 TeV, dem Abschluss der Analysen mit Run-1-Daten, der Vorbereitung des Detektors auf den Betrieb im Run 2 bei 13 TeV sowie dem erfolgreichen Wiederbeginn der Datennahme 2015.

2 Wichtigste Arbeiten und Projekt-Ergebnisse

Die Arbeitsgruppen von I.C. Brock und K. Desch haben in der Förderperiode 2012-2015 ihre Forschungsarbeiten am ATLAS-Experiment im Rahmen des FSP-101 erfolgreich fortgesetzt. Die Aktivitäten der Arbeitsgruppen lagen weiterhin in den drei Bereichen

- Betrieb des Detektors,
- Entwicklung von neuen Analysewerkzeugen,
- Datenanalyse.

Die Arbeiten beim Detektorbetrieb mit dem Schwerpunkt Innendetektor/TRT beinhalteten vor allem auf die erfolgreiche Beendigung der Datennahme des Run 1 bis Ende 2012, die Vorbereitung des Detektors auf den Run 2 sowie in 2015 das erfolgreiche Wiederaufstarten des Detektors und der Beginn der Datennahme bei 13 TeV. Die Verantwortung der Gruppe liegt weiterhin beim Online-Monitoring des TRT und des Innendetektors.

Bei der Entwicklung von neuen Analysewerkzeugen ist die Arbeitsgruppe führend bei der Entwicklung von Algorithmen, die auf dem *Particle-Flow*-Prinzip beruhen. Dieses Prinzip, bei dem versucht wird, eine optimale Kombination der verschiedenen Detektorkomponenten für eine Messung zu verwenden wurde in zwei Bereich signifikant weiterentwickelt: im Bereich der Rekonstruktion von τ -Leptonen wurde eine neue Rekonstruktionsmethode („Substruktur“) entwickelt, in der offiziellen ATLAS-Software für Run 2 zur Verfügung gestellt und mit Daten validiert. Im Bereich der Rekonstruktion von Jets wurde von I. Brock eine ATLAS-Arbeitsgruppe ins Leben

gerufen, die *Particle-Flow*-Rekonstruktion wesentlich weiterentwickelt hat und, vor allem im Bereich niederenergetischer Jets zu einer deutlichen Verbesserung der Jet-Energie-Auflösung führt. Diese Rekonstruktionsmethode wurde ebenfalls in die offizielle ATLAS-Software integriert.

Bei der Analyse der Daten stand für den Großteil der Förderperiode der Abschluss der Run-1-Analysen im Zentrum. Schwerpunkte der Arbeitsgruppe sind hier weiterhin die Top-Quark-Physik und die Suche nach Supersymmetrie. In der Top-Quark-Physik wurden wichtige Beiträge zur Messung der Top-Quark-Masse, zur Messung der Einzel-Top-Produktion und zur Suche nach neuer Physik in Top-Produktion durch *flavour changing neutral currents* erzielt, die zu mehreren ATLAS-Publikationen geführt haben. Im Bereich der Suche nach Supersymmetrie war die Arbeitsgruppe führend in der Veröffentlichung der Suchen in Endzuständen mit τ -Leptonen sowie Beiträgen zu den *legacy papers* der ATLAS-SUSY-Arbeitsgruppe, in welchen die Ergebnisse von Run 1 zusammengefasst wurden. Ebenso wurden deutliche Fortschritte bei der globalen Interpretation der SUSY-Suchen erzielt, die im erstmaligen Ausschluss des „Constrained Supersymmetric Standard Model“ (CMSSM) auf dem 90%-Konfidenzniveau führten. In beiden Bereichen wurde mit der Vorbereitung der Run-2-Analysen begonnen.

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe führten in der Förderperiode insgesamt zu sieben ATLAS-Veröffentlichungen sowie vier weiteren Veröffentlichungen von Gruppenmitgliedern in referierten Journalen. Während der Förderperiode wurden insgesamt eine Habilitation, acht Doktorarbeiten, 10 Master- und Diplomarbeiten und 10 Bachelorarbeiten erfolgreich abgeschlossen.

2.1 Beiträge zum Detektorbetrieb und Computing

2.1.1 Detektorbetrieb

Die Arbeitsgruppe beteiligt sich durch Arbeiten vor Ort am CERN am Betrieb des Inneren Detektors, insbesondere des TRT. Die Verantwortung der Arbeitsgruppe liegt im Bereich des Online-Monitorings, sowohl in der Endphase von Run 1 in 2012 als auch seit 2015 im Run 2. Dazwischen wurden wichtige vorbereitende Arbeiten für Run 2 durchgeführt.

Bis zum Ende von Run 1 war ein Postdoktorand On-call-Experte für das *Online-Monitoring* des Innendetektors. Er erstellte in der Folge eine umfangreiche ATLAS-interne Dokumentation zum *TRT online monitoring*, um ein erfolgreiches Wiederanfahren des Monitorings im Run 2 zu ermöglichen. Er hat die Arbeitsgruppe zum Juni 2013 verlassen. Zur Vorbereitung des TRT- und Inner-Detector-Betriebs im Run 2 wurde im Mai 2014 ein neuer Postdoktorand eingestellt. Er ist dauerhaft CERN-basiert und für die Abdeckung der Gruppenverantwortung für das TRT-Online-Monitoring zuständig. Er hat die Online-Monitoring-Software wieder in Betrieb genommen und notwendige Änderungen für Run 2 implementiert. Er war in den verschiedenen Kampagnen zur Wiederinbetriebnahme von ATLAS (Milestone-Runs) für das Monitoring zuständig und hat sich ebenfalls in die verschiedenen Schichtaufgaben eingearbeitet. Mit Beginn des Run 2 in 2015 konnte der TRT wieder erfolgreich betrieben werden.

Im Laufe des Run 1 haben sich beim TRT Gaslecks entwickelt, die vermutlich durch strahlungsinduzierte Bildung von Ozon entstehen. Diese Lecks führen zwar derzeit nicht zu einer Beeinträchtigung der Detektorperformance, allerdings führen sie zu einem auf Dauer nicht tolerierbaren Verlust von Xenon. Daher wurde untersucht, wie sich die Elektronidentifikation mittels Übergangsstrahlung (TR) verändert, wenn einige Teile des TRT künftig mit einer Argon-basierten Gasmischung statt des teuren Xenon betrieben werden. Da Argon einen geringen Absorptionsquerschnitt für TR-Photonen aufweist, tragen die mit Argon betriebenen Teile nicht mehr zur Elektronidentifikation bei, während die Funktionsfähigkeit als Spurdetektor voll erhalten bleibt. In einer Simulationsstudie (*Qualification Task*) wurde quantitativ untersucht, wie sich die Elektronidentifikation für verschiedene Szenarien für die Gasbefüllung des Detektors verhält. Es stellte sich heraus, dass im sog. baseline-Szenario (1 Barrel-Modul und 2 Endkappenmodule mit Argon befüllt) eine nur marginale Erhöhung der Myon-Effizienz bei konstanter Elektroneffizienz ergibt. Sollte es allerdings nötig werden, auch ein zweites Barrelmodul mit Argon zu befüllen (worst-case Szenario), ist eine Erhöhung der Myon-Effizienz um einen Faktor 3-5 im Barrelbereich zu erwarten. Als Alternativen werden derzeit auch Krypton-basierte Gasmischungen untersucht, die noch eine gute Photoneffizienz aufweisen, aber nicht so teuer wie Xenon sind. Die Qualifikations-Studie wurde Ende 2014 abgeschlossen und wurde in einer internen Note dokumentiert. In 2015 wurde der TRT erfolgreich im baseline-Szenario betrieben ohne signifikante Einbußen in der Performance.

Weitere Beiträge zum Detektorbetrieb wurden in Form von *Qualification Tasks* durchgeführt. Es wurde eine webbasierte Steuerung, zur Unterstützung der TRT-Experten implementiert. Speziell die automatisierte Kontrolle der TRT-Kalibrierung und der Status-Daten-Upload sind äußerst hilfreich. Weiterhin wurde an der Pflege des TRT-Offline-Monitoring gearbeitet. Mehrere Verbesserungen wurden eingebaut. Das System wurde auch so erweitert, dass getrennte Histogramme gibt für Detektorkanäle (straws) mit Xenon-Gasmischung und mit Argon-Gasmischung erstellt werden.

Die Arbeitsgruppe leistete auch wesentliche Beiträge zum Schichtbetrieb. Im Run 1 waren zwei Wissenschaftler als *ATLAS Run Manager* wochenweise für die Koordination des Betriebs des gesamten ATLAS-Detektors verantwortlich. Zwei Postdoktoranden übernahmen zahlreiche Schichten als ATLAS-Schichtleiter.

Desweiteren war eine Wissenschaftlerin als *Data Quality Convenor* zuständig für die Organisation des Offline Monitoring. Eine wesentliche Aufgabe ist hierbei die Erstellung der Liste guter Runs, die für die Analyse verwendet werden können und die detaillierte Informationen über Probleme einzelner Detektor-Komponenten (*defects*) enthalten. Der reibungslose Betrieb dieser Aufgaben ist wesentlich dafür, dass vorläufige ATLAS-Ergebnisse, insbesondere zu den Messungen zum Higgs-Boson, sehr schnell möglich waren. Nur so konnten z. B. auf der HCP-Konferenz im November 2012 bereits Ergebnisse mit 13 fb^{-1} präsentiert werden.

2.1.2 Computing

Von Okt. 2012 bis Juni 2014 war ein Wissenschaftler einer der beiden Koordinatoren für die zentrale Monte-Carlo-Produktion in ATLAS.

Der Betrieb des Bonner Tier-3-Zentrum ist wesentlich für die Analysearbeiten der gesamten Bonner ATLAS-Gruppen. Die Koordination des Betriebs wurde 2012-2013 von einem Postdoktoranden, anschließend bis zum Ende der Förderperiode von einem weiteren Postdoktoranden durchgeführt. Diese Arbeiten bilden eine wesentliche Grundlage für die zahlreichen Beiträge der Arbeitsgruppe zu den physikalischen Ergebnissen, die weiter unten berichtet werden. Es wurden wesentliche Verbesserungen in der Netzwerkstruktur, der Zuverlässigkeit des Clusters bei Stromausfällen und im Monitoring implementiert. Ebenso wurde eine Neubeschaffung von Hardware für das Tier-3 vorbereitet. Hierzu wurden auch Studien zu alternativen Filesystemen (insb. Hadoop) durchgeführt. Ein Großgeräteantrag zur Neubeschaffung/Ersatz des alternden existierenden Clusters ist für 2016 vorgesehen.

2.2 τ -Rekonstruktion und -Identifikation

τ -Leptonen sind aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer nur durch Rekonstruktion ihrer Zerfallsprodukte zu identifizieren. Insbesondere die Zerfälle in Hadronen sind schwierig zu unterscheiden von Hadron-Jets aus QCD-Prozessen. Die Arbeitsgruppe engagiert sich seit langem in der Rekonstruktion von τ -Leptonen in ATLAS, sowohl in der Wartung und Charakterisierung der Standard-Rekonstruktionsmethode sowie durch die Entwicklung eines alternativen Rekonstruktionsansatzes, der insbesondere darauf abzielt, verschiedene τ -Zerfallsmodi voneinander zu separieren (Substruktur).

In der Förderperiode 2012–2015 ist es der Arbeitsgruppe in enger Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppe von J. Dingfelder gelungen, ein komplett neues, auf Substruktur basierendes Rekonstruktionspaket in ATLAS zu etablieren und zu validieren. Für Run 2 steht dieses Paket nun für Physikanalysen zur Verfügung.

Ein Hochschulassistent der Arbeitsgruppe ist Koordinator der Substruktur-Aktivitäten in der ATLAS-Tau-Arbeitsgruppe und Contact-Editor einer ATLAS-Veröffentlichung zur neuen τ -Rekonstruktion. Diese Veröffentlichung befand sich zum Ende der Förderperiode im Editorial-Board-Prozess und wurde auf den Sommerkonferenzen 2015 erstmals öffentlich vorgestellt. Eine Reihe von Abschlussarbeiten hatten die τ -Rekonstruktion zum Thema.

Ein zentraler Algorithmus ist der PanTau-Algorithmus. Dieser wurde dahingehend erweitert, dass die multivariaten Diskriminanten für drei verschiedene in ATLAS entwickelte Substruktur-Rekonstruktionen (*eflowRec*, *cell-based*, *cluster-based*) angewandt werden können. Die ATLAS-Tau-Working-Group hatte im Herbst 2013 beschlossen, die Kombination *cell-based* plus PanTau als baseline für die Run-2-Tau-Rekonstruktion zu verwenden. In der Folge wurde der Algorithmus in die ATLAS-Software für Run 2 implementiert, die eine wesentliche Änderung des Datenmodells (xAOD) beinhaltet (Doktorarbeit).

Zwei Masterarbeiten (2012, 2014) befassten sich mit der Validierung der Rekonstruktion mit Run-1-Daten. Es wurde ein detaillierter Daten-Monte-Carlo-Vergleich für die Modellierung der Input-Variablen sowohl der τ -Rekonstruktion (TauRec) als auch der Substruktur-Rekonstruktion (PanTau+cellbased) erstellt. Hierzu wurden $Z \rightarrow \mu^+ \mu^- + \text{jet}$ - Ereignisse selektiert, in denen der Jet als τ fehlidentifiziert wird. Insgesamt ergab sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung von Daten und Simulation. Diese Ergebnisse bilden einen wichtigen Beitrag zur ATLAS-Publikation zur Rekonstruktion der τ -Substruktur.

Die τ -Substruktur-Rekonstruktion war auch Thema einer in 2014 abgeschlossenen Bachelorarbeit. Der Student analysierte simulierte Datensätze von $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ Ereignissen sowie von isolierten neutralen Pionen, die mit den neuen Substruktur-Algorithmen rekonstruiert wurden. Er hat die Position neutraler Pionen im Kalorimeter extrapoliert und validiert und gezeigt, dass mit der neuen Rekonstruktionsmethode die Rekonstruktionseffizienz nur noch schwach vom Abstand der Pionen abhängt und auch die Positionsauflösung bei geringen Pion-Abständen noch hoch ist. Die Energieauflösung verschlechtert sich leicht für Pionen, die weniger als 6 Kalorimeter-Zellen voneinander entfernt sind und höchstens um einen Faktor 2 für nahe beieinander liegende Pionen.

2.3 Physik-Analysen mit τ -Substruktur-Information

Eine der Hauptmotivationen für τ -Substruktur-Rekonstruktion ist die Möglichkeit, die Polarisationsabhängigkeit der verschiedenen τ -Zerfallskanäle auszunutzen, um die mittlere Polarisation einzelner τ -Leptonen oder Polarisationskorrelationen von τ -Paaren zu messen. Zwei wichtige Anwendungen hiervon sind die Analyse der τ -Polarisation in $Z \rightarrow \tau\tau$ -Terfällen und die Messung der CP-Quantenzahlen des Higgs-Bosons in $H \rightarrow \tau\tau$ -Zerfällen. Diese Aktivitäten wurden 2014 deutlich verstärkt.

In einer Bachelorarbeit wurden erste Studien zu Tau-Polarisations-sensitiven Observablen durchgeführt.

Eine Masterarbeit beschäftigte sich mit der ersten Messung der τ -Polarisation in $Z \rightarrow \tau\tau$ -Zerfällen. Diese Messung liefert einen unabhängigen Zugang zur Messung des elektroschwachen Mischungswinkels und stellt eine exemplarische Anwendung der τ -Substruktur-Rekonstruktion dar. Als sensitive Observable für die mittlere τ -Polarisation wird das Verhältnis $\Upsilon = E_{\text{charged}}/E_{\text{visible}}$ verwendet. Die ATLAS-Publikation dieser Messung mit Run-1-Daten war zum Ende der Förderperiode in Vorbereitung.

In einer Bachelorarbeit wurde zunächst eine Methode zur Rekonstruktion der CP-Eigenschaften des Higgs-Bosons in $H \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \rho^+ \nu_\tau \rho^- \bar{\nu}_\tau$ untersucht. Die Methode wurde ursprünglich für den ILC konzipiert. Als sensitive Observable wird die Akoplanarität der ρ -Zerfallsebenen verwendet. Da hierzu insbesondere die exklusive Rekonstruktion der beiden neutralen Pionen nötig ist, lässt sich die Methode nur durch die entwickelte Tau-Substruktur-Rekonstruktion anwenden. Es wurde gezeigt, dass sich auf simulierten Signal-Datensätzen tatsächlich eine gewisse Sensitivität erzielen lässt. Bis zu einer tatsächlichen Messung ist jedoch noch viel Arbeit zu leisten. Nach dieser vielversprechenden ersten Studie wurde damit begonnen, realistische Methoden zur Messung

der CP-Quantenzahlen zu untersuchen und die entsprechenden Analysen für Run 2 vorzubereiten. Hierbei findet eine enge Zusammenarbeit mit der Theorie (RWTH Aachen) statt.

Die Gruppe hat weiterhin Beiträge zu den allgemeinen Aufgaben der τ -Rekonstruktion und deren Validierung geleistet, insbesondere ist sie verantwortlich für den *Tau Run Time Tester*. Der *Tau Run Time Tester* ist eine nächtlich laufende Diagnose-Software, die Probleme mit der Tau-Rekonstruktions-Software durch Software-Updates frühzeitig aufklären soll.

2.4 Particle-Flow

Ein Postdoktorand hat in der ATLAS Particle-Flow-Software *eFlowRec* umfangreiche Verbesserungen an der Code-Struktur durchgeführt. Dadurch wurden hauptsächlich zwei Ziele erreicht. Zum einen konnte die Laufzeit der Software durchschnittlich um einen Faktor 7 reduziert werden. Zum anderen ist die Software jetzt erheblich flexibler als vorher, was es ermöglicht einige Studien durchzuführen, die vorher nur schwer möglich gewesen wären. Zusätzlich wurden im Zuge der Arbeiten eine Reihe von Fehlern im Programm gefunden und behoben. Als *Authorship Qualifikation* hat eine Doktorandin die Verbesserungen der Laufzeit durch entsprechende Messungen unterstützt so wie regelmäßige Validierungen der jeweils neuesten Versionen der Software durchgeführt. Ein Doktorand hat auch eine Testumgebung geschaffen, in der man sowohl Studien mit Ntupeln machen kann, als auch den neuen Code für *eFlowRec* entwickeln kann, ohne Athena direkt laufen lassen zu müssen. Dieser Doktorand hat die Gruppe Ende September 2014 verlassen, um eine Stelle in der Software Industrie aufzunehmen. Eine Doktorandin hat im März ihre *Authorship Qualifikation* im Particle-Flow Bereich abgeschlossen. Seit September 2014 setzt ein weiterer Doktorand das *refactoring* des Pakets im Rahmen seiner *Authorship Qualifikation* fort. Es hat weitere strukturelle Verbesserungen in dem Code gemacht. Unter anderem, ist es jetzt möglich eine Spur mit mehreren Cluster im Kalorimeter in der ersten Phase von *eFlowRec* zu verknüpfen. Dadurch hoffen wir, dass die Subtraktion der geladener Energie verbessert wird.

Ab Februar 2014, hat eine Doktorandin im Rahmen ihrer *Authorship Qualifikation* das *matching* zwischen geladenen Spuren und Cluster in den Kalorimeter studiert und verschiedene Maße für das Verknüpfen der beiden ausprobiert. Es hat sich herausgestellt, dass bei kleinen Clustern die Unsicherheit in der Position zu gering war. Eine entsprechende Verbesserung wurde studiert und in *eFlowRec* eingebaut. Diese Doktorandin hat in 2015 weiter an die Jet/ETmiss Software gearbeitet und zu verschiedenen Studien für die Run-2-Daten wichtige Beiträge geliefert. Eine weitere Doktorandin haben ebenfalls für ihre *Authorship Qualifikation* an Particle-Flow gearbeitet. Bei ihr ging es hauptsächlich darum, die Subtraktion der Energie im Kalorimeter zu optimieren.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde das neue Extrapolations-Tool studiert. Dieses Werkzeug wurde von der ATLAS-Tracking-Gruppe für Run 2 entwickelt und bietet mehrere Verbesserungen an. Die Änderungen haben auch Konsequenzen für Particle-Flow. Bis auf ein paar Probleme, die inzwischen verstanden wurden, konnte er zeigen, dass das neue Tool deutlich besser funktioniert als das alte.

Die Ergebnisse aller Studien wurden im September 2014 im Rahmen der „ATLAS Hadronic Calibration Workshop“ in München präsentiert und diskutiert. Es wurde dort entschieden, den

Particle-Flow-Algorithmus für die Run 2-Daten in 2015 anzuwenden. In Sommer 2015 wurde eine erste offizielle Kalibration von Jets mit dem Particle-Flow von der ATLAS Jet/ETmiss Gruppe durchgeführt. Bis Anfang 2016 sollen die systematischen Fehler für Particle-Flow-Jets zur Verfügung stehen. Damit wird es erstmals möglich sein, Particle-Flow-Jets in Physikanalysen zu verwenden.

Im Mai 2015 wurde eine neue Postdoktorandin in der Gruppe eingestellt. Sie wird unter anderem an einer verbesserten Subtraktion der geladenen Energie im Kalorimeter arbeiten. Eine Veröffentlichung des Algorithmus, der Studien und der Ergebnisse ist für die erste Hälfte von 2016 geplant. Mehrere Mitglieder der Gruppe tragen hierzu bei. Seit Mai 2015 ist I. Brock Co-Convenor der Particle-Flow-Gruppe.

2.5 Top-Quark-Physik

Multivariate Methoden

Ein Doktorand hat seine Dissertation im Herbst 2012 abgegeben und erfolgreich verteidigt. Er hat verschiedene neue multivariate Methoden entwickelt, die man bei Datenanalysen verwenden kann. Um die Methoden besser mit bestehenden Methoden vergleichen zu können, hat er eine *supervised* Methode entwickelt, mit der er gezielt Signal von Untergrund trennt. Die Methode hat er bei der ACAT-Konferenz im September 2011 vorgestellt und sie ist sowohl in arXiv als auch in den Konferenzbeiträgen dokumentiert. Er hat auch eine dritte Regressions-Methode entwickelt, die es erlaubt, sehr schnell eine Parametrisierung von Daten in mehreren Dimensionen durchzuführen. Er hat schließlich die Methoden angewendet, um zu versuchen, ein Signal im Wt -Kanal zu extrahieren. Die beste Methode zeigt eine ähnliche Trennkraft wie NeuroBayes. Die Weiterentwicklung der Methoden wurde bei der ACAT-Konferenz in 2013 vorgestellt und ist auch in den Proceedings veröffentlicht worden.

Top-Quark Massenmessung

Eine Studierende hat zusammen mit einer Hochschulassistentin den kompletten Datensatz aus dem Jahr 2011 studiert, mit dem Ziel, eine Messung der Top-Quark-Masse anhand des transversalen Impulses des Leptons aus dem W -Boson-Zerfall durchzuführen. Die Studien mit hoher Statistik zeigten, dass die Verteilungen des Lepton-Transversalimpulses zwischen Daten und Simulation keine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Verschiedene Methoden zur Bestimmung des Multijet-Untergrundes wurden untersucht, um zu sehen, ob das Problem daher rührte. Die Schnitte auf Leptonen und Jets wurden optimiert, um die systematischen Unsicherheiten zu reduzieren. Im Laufe des Jahres 2012 stellte sich aber heraus, dass es notwendig ist, neue Monte-Carlo-Datensätze mit einem anderen Generator (POWHEG+PYTHIA statt MC@NLO + HERWIG) zu verwenden. Anschließend ist diese Methode mit einer Messung der Top-Quark-Masse aus der B -Hadron Zerfallslänge kombiniert worden. Diese Kombination wurde hauptsächlich an der TU Dortmund durchgeführt. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse war in Vorbereitung und ein ATLAS

Editorial Board hatte seine Arbeit aufgenommen, wobei I. Brock einer der Autoren der internen Dokumentation und Veröffentlichung war. Der Dortmunder Doktorand hat aber eine Stelle in der Industrie aufgenommen, bevor die Veröffentlichung zu Ende gebracht werden konnte. Die Gruppe aus der LMU, München plant die Analyse mit den Daten aus dem Jahr 2012 wieder aufzunehmen.

I. Brock war Convenor der Top-Massen-Gruppe von Oktober 2011 bis März 2013.

Einzelne Top-Quark-Produktion

Die Gruppe untersucht weiterhin die elektroschwache Produktion von einem t -Quark zusammen mit einem W -Boson (Wt -Kanal). Die Studien konzentrieren sich auf dem *lepton+jets*-Kanal, bei dem ein W -Boson leptonisch und das andere hadronisch zerfällt. Ein Doktorand untersuchte in seiner Dissertation die Daten aus dem Jahr 2011. Die systematischen Unsicherheiten und der große Untergrund aus $t\bar{t}$ -Ereignissen machen die Extraktion eines Signals extrem schwierig. Vor allem die systematischen Unsicherheiten auf der Jetenergieskala spielen eine große Rolle. Die Analyse wurde abgeschlossen und seine Dissertation wurde im Januar 2015 eingereicht. Eine Signifikanz von etwa 1.5σ für ein Wt -Signal wird erwartet. Die Fertigstellung der Dissertation wurde verzögert, weil der Doktorand die Verantwortung für das Bonner Rechnercluster nach dem Weggang des bislang verantwortlichen Postdoktoranden Ende 2013 übernommen hat.

Eine NRW *Scholarship plus* Stipendiatin der Arbeitsgruppe hat im Oktober 2012 ihre Masterarbeit abgegeben. Schwerpunkt ihrer Analyse war die Untersuchung des Zwei-Jet-Bins, in der auch ein signifikanter Teil der Wt -Ereignisse zu finden ist. Seit Dezember 2012 ist sie Doktorandin in der Gruppe und arbeitete zuerst weiter an der Wt -Analyse.

Eine weitere Doktorandin hat im Oktober 2012 in der Gruppe angefangen. Für ihre Masterarbeit hat sie verschiedene Studien durchgeführt, um Signal von Untergrund besser zu trennen. Der Schwerpunkt der Analyse lag auf der Trennung zwischen $t\bar{t}$ -Ereignissen und Wt -Ereignissen. Sie hat sowohl einen kinematischen Fitter, *KLFFitter*, als auch verschiedene Ereignistopologien studiert. Vielversprechend ist die Unterscheidung zwischen Ereignissen, in denen das Top-Quark hadronisch und leptonisch zerfällt.

Ein weiterer Doktorand untersucht die Daten aus dem Jahr 2012. Der Wt -Wirkungsquerschnitt ist bei 8 TeV höher als bei den 7 TeV und der Untergrund aus W +jets Ereignisse sollte niedriger sein. Da die ATLAS Jetenergie Kalibration in den 2012-Daten anders ist als bei den 2011-Daten und der *Pile-Up* höher ist, waren sorgfältige Untersuchungen notwendig, um die Daten zu verstehen. Er untersuchte zuerst im Detail die *Truth*-Information, um besser zu verstehen, wie man Signal von Untergrund trennen kann. Mit einer Verschmierung der Variablen ist er in der Lage, auch die systematischen Unsicherheiten zu studieren, ohne die gesamte Analysekette laufen zu lassen. Damit kann er deutlich schneller Variablen finden und untersuchen, die weniger abhängig von den Unsicherheiten sind. Durch geschickte Auswahl von Variablen, ein exzellentes Verständnis der Auswirkung von systematischen Unsicherheiten und die höhere Statistik sollte es möglich sein, eine Signifikanz von über 3σ zu erreichen.

Ein neuer Doktorand ist der Gruppe im Herbst 2013 beigetreten und hat seine Dissertation im April 2014 angefangen. In den ersten Monaten hat er die Wt -Produktion im dileptonischen Kanal, wo beide W -Boson leptonisch zerfallen, angeschaut, um ein besseres Gefühl für die Unterschiede in den systematischen Unsicherheiten zwischen dem Lepton+Jets und dem dileptonischen Kanal zu bekommen. Das Thema für seine Dissertation wird die Wt -Produktion mit den Run-2-Daten sein.

In einer Doktorarbeit wird in Kooperation mit der Universität Wuppertal an der Entfaltung verschiedener differentieller t -Kanal Wirkungsquerschnitte bei der Einzel-Top-Quark-Produktion. Die Analyse benutzt die Daten aus dem Jahr 2012. Die Gruppe aus Wuppertal misst den Wirkungsquerschnitt in einem kinematischen Bereich, der sowohl für die rekonstruierten Teilchen als auch für Simulationen bzw. theoretische Rechnungen definiert werden kann. Die Methode reduziert die Unsicherheiten, die aus der Extrapolation zu dem kompletten kinematischen Bereich führen. Um die Messungen noch leichter mit Rechnungen zu vergleichen, werden sie entfaltet. Man hat damit die Möglichkeit, Vorhersagen für die differentiellen Wirkungsquerschnitte mit den Daten zu vergleichen, auch wenn keine Monte-Carlo-Simulation für die Rechnung vorhanden ist. Eine Veröffentlichung der Analyse ist in Vorbereitung und ein Editorial Board ist eingesetzt worden.

Eine Doktorandin wird die Run-2-Daten verwenden, um nach tZ -Produktion zu suchen. Langfristiges Ziel ist es, die tH -Produktion zu messen. Theorie-Rechnungen sagen einen sehr kleinen Produktionsquerschnitt für diesen Prozess vor. Allerdings ist dies nur der Fall, wenn das Higgs-Boson genau die Kopplungen im Standardmodell hat. Bei der Analyse arbeiten wir zusammen mit den Gruppen aus Oklahoma State University und Wuppertal.

Suche nach neuer Physik in der Top-Quark-Produktion

Ein Doktorand hat seine Dissertation zur Suche nach Signalen für *flavour changing neutral currents* (FCNC) bei der Produktion von t -Quarks im August 2012 erfolgreich verteidigt. Die Ergebnisse wurden zuerst in 2011 bei Konferenzen gezeigt und sind Bestandteil einer ATLAS-Veröffentlichung, die Anfang 2012 bei Physics Letters erschienen ist.

Ein weiterer Doktorand hat die Analyse weiterentwickelt und sucht nach *flavour changing neutral currents* (FCNC) bei der Produktion von t -Quarks in den Daten vom Jahr 2012. Im Laufe der Analyse wurden diverse Studien durchgeführt, um die Messung präziser zu machen, vor allem im Bereich der Multijet-Untergund. Die neue Obergrenze ist fast einen Faktor zwei besser als die Veröffentlichung mit den Daten aus 2011. Die Analyse wurde von der ATLAS Kollaboration inzwischen genehmigt. Die Ergebnisse wurden auf der EPS 2015 in Wien präsentiert und die Veröffentlichung ist fast fertig.

In einer Masterarbeit wurde die Verwendung der Matrixelementmethode für Messungen mit Top-Quarks bei ATLAS untersucht. Solche Methoden wurden sehr erfolgreich am Tevatron angewendet. Sie hat zuerst Untersuchungen zur Top-Quark-Masse gemacht, um die Methode und die Programme zu validieren. In der Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Methode gut funktioniert. Die Arbeit wurde weitergeführt mit der Suche nach $t\bar{t}$ -Resonanzen. Mit Hilfe einer Rechnung einer Doktorandin der RWTH Aachen konnte sie testen, ob es möglich wäre, einen angeregten

Gluon-Zustand $g^{(2)}$ in einem *minimal universal extra dimensions* Modell zu finden. Sie konnte zeigen, dass die Matrixmethode für solche Studien verwendet werden kann und gute Ergebnisse liefert, obwohl die benötigte Rechenzeit bei Matrixmethoden sehr groß ist.

Im Rahmen einer Masterarbeit war es geplant, die verschiedenen statistischen Werkzeuge zu untersuchen, mit denen man Obergrenzen setzen kann. Diese Studien wurden im Rahmen der Suche nach vektorartigen Quarks, die nach Wt zerfallen, durchgeführt. Solche Quarks können sowohl links- als auch rechtshändige Kopplungen haben. Die Analyse wurde deutlich erweitert, weil Gruppen aus MSU (Michigan State University) (dilepton-Kanal) und HU Berlin (einzel Lepton-Kanal), eine Gruppe suchte, die die Kombination der Analysen durchführen konnte und Obergrenzen für die Kombination setzte. Eine Veröffentlichung der Analyse steht inzwischen kurz vor dem Abschluss. Ein Doktorand ist verantwortlich für die Abschnitte über die statistischen Methoden, sowohl für die interne Dokumentation als auch für die Veröffentlichung. Zwei Doktoranden der Arbeitsgruppe werden Autoren der Veröffentlichung sein, obwohl sie ihre *Authorship Qualification* noch nicht abgeschlossen haben.

2.6 Suche nach Supersymmetrie

2.6.1 Suche in τ -Endzuständen

Die Suche nach supersymmetrischen Teilchen in der Arbeitsgruppe konzentriert sich auf Endzustände mit τ -Leptonen. Aufgrund der großen Yukawa-Kopplung der τ -Leptonen könnten deren skalare Partner eine wichtige Rolle bei der Suche nach Supersymmetrie spielen. Dies liegt daran, dass die Mischung der rechts- und links-chiralen Partner von der Yukawa-Kopplung abhängt und daher in der dritten Generation große Effekte zu erwarten sind. Eine Konsequenz hiervon könnte sein, dass das leichtere skalare Tau das leichteste Slepton ist.

Die Arbeitsgruppe gehört zu den führenden in ATLAS bei dieser Suche. Seit Juli 2014 ist ein Doktorand der Arbeitsgruppe Co-Convenor der „SUSY with tau leptons“ Arbeitsgruppe. Die Arbeitsgruppe ist verantwortlich für drei der vier Endzustände in denen die Suche durchgeführt wird: zwei hadronisch zerfallende Tau-Leptonen, ein hadronisch zerfallendes Tau-Lepton und ein Myon und ein hadronisch zerfallendes Tau-Lepton und ein Elektron. Die abschließende Analyse der Daten aus 2011 wurde im Okt. 2012 in Eur. Phys. J. veröffentlicht. Auf Basis dieser Veröffentlichung wurde im Sept. 2013 eine Doktorarbeit abgeschlossen. Ein anderer Doktorand der Arbeitsgruppe war einer der Editoren dieser Veröffentlichung und hat die vorläufigen Ergebnisse auf der ICHEP2012 in Melbourne für die ATLAS-Kollaboration präsentiert.

Nach der Veröffentlichung der 7 TeV-Daten aus 2011 stand die Analyse der Daten von 2012 im Vordergrund. Im März 2013 wurden die vorläufigen Ergebnisse im Kanal mit zwei hadronisch zerfallenden Tau-Leptonen für den gesamten 2012er Datensatz erstmals publiziert und in Moriond 2013 vorgestellt. Neben der Interpretation in GMSB kam eine Interpretation in mSUGRA und eine Interpretation in „natural Gauge Mediation“ (nGM) sowie ein Szenario mit R-Paritäts-Verletzung hinzu. Im Bereich mittlerer und großer $\tan\beta$ konnten in GMSB gluinos unterhalb von 1,4 TeV ausgeschlossen werden (1,2 TeV bei der kombinierten Analyse im 2011er Datensatz). Die Analyse

der Kanäle mit einem Elektron/Myon, einem hadronischen τ -Lepton, Jets und fehlender Transversalenergie wurde von einem Doktoranden weitergeführt. Drei der vier Suchkanäle wurden in unserer Arbeitsgruppe durchgeführt. Ein Doktorand war einer der drei Editoren der Publikation, die im September 2014 bei JHEP erschienen ist.

Ein Postdoktorand hat zusätzlich zu den τ -basierten Suchen zur SUSY-Suche in Endzuständen mit Photonen und fehlender Transversalenergie beigetragen, was die Abdeckung der GMSB-inspirierten Suchen komplettiert. Die Ergebnisse wurden 2013 in Phys. Rev. D veröffentlicht.

2.6.2 Simplified Models

Neben der exemplarischen Interpretation der Suchen in spezifischen SUSY-Modellen hat die Arbeitsgruppe die Interpretation mit Hilfe sog. *simplified models* vorangetrieben. Ziel ist hier eine deutlich reduzierte Modellabhängigkeit der Suche. Hierzu wurde eine systematische Untersuchung der für die LHC-Phänomenologie relevanten MSSM-Parameter in SUSY-Kaskadenzerfällen durchgeführt. Ziel ist es, mit einer möglichst geringen Anzahl von Parametern möglichst allgemeine SUSY-Szenarien beschreiben zu können. Für alle wesentlichen SUSY-Kanäle mit τ -Leptonen (Stau-Paarproduktion, Chargino-Paarproduktion mit τ -Leptonen im Zerfall, Squark/Gluino-Produktion mit τ -Leptonen im Zerfall) wurden die relevanten und verborgenen Parameter im Detail studiert und Vorschläge für die Interpretation zukünftiger Suchen gemacht. In der Arbeit wurde exemplarisch eine Interpretation der existierenden Suchen in diesen *simplified models* durchgeführt (Masterarbeit).

2.6.3 Legacy Paper

Die ATLAS-SUSY-Gruppe hat damit begonnen, zwei zusammenfassende Veröffentlichungen, („legacy paper“), zu erstellen, bei denen sowohl für spezifische Modelle als auch für das sog. phänomenologische MSSM (pMSSM) möglichst alle ATLAS-SUSY-Suchen kombiniert bzw. zusammengefasst werden um ein abschließendes globales Bild der SUSY-Suchen im Run 1 zu erhalten. Ein Doktorand hat für die τ -basierten Endzustände maßgeblich an diesen Veröffentlichungen mitgewirkt. Zum Ende der Förderperiode waren diese beiden Veröffentlichungen weit fortgeschritten im Editorial-Board-Prozess und wurden im Juli bzw. August 2015 zur Veröffentlichung bei JHEP eingereicht, wo sie im Oktober 2015 erschienen sind.

2.6.4 SUSY-Suche im Run 2

In 2014 wurde mit der Vorbereitung der SUSY-Suchen im Run 2 begonnen. In einer Bachelorarbeit wurde untersucht, wie die aktuelle Suche im Kanal mit zwei hadronischen Tau-Leptonen angepasst werden muss, um den zu erwartenden härteren Triggerbedingungen im Run 2 gerecht zu werden. Es hat sich gezeigt, dass der härtere Trigger voraussichtlich keinen großen Einfluss auf die erwartete Erweiterung des sensitiven Bereichs der Analyse hat. In einer weiteren Bachelorarbeit wurde, ausgehend von einer kleinen beobachteten Diskrepanz im Elektron-Kanal in der

nGM-Signalregion, untersucht, ob eine schlechte Modellierung der $e \rightarrow \tau$ -Fehlerkennungsrate die Ursache sein könnte. Es zeigte sich jedoch, dass dies wohl nicht der Fall ist. Mit dem Beginn des Run 2 zeigte sich gegen Ende der Förderperiode, dass die Datenqualität und der Zustand der Analysesoftware erheblich schneller vorankommt als dies bei Run 1 der Fall war. Es konnten sehr schnell teilweise auch komplexe Kontrollplots angefertigt werden, die erstaunlich gute Übereinstimmungen der Daten mit der Simulation zeigten. Es ist damit zu rechnen, dass für Moriond 2016 erste Ergebnisse der SUSY-Suchen in τ -Endzuständen im Run 2 fertiggestellt sein werden.

2.6.5 Suche nach SUSY mit Verletzung der R-Parität

Die Suche nach leptonischen Endzuständen (inklusive τ -Leptonen) in R-paritätsverletzenden SUSY-Modellen (RPV) mit Stau als leichtestem SUSY-Teilchen wurde die Zusammenarbeit mit der Bonner Theoriegruppe weitergeführt. Eine Diplomarbeit wurde im Mai 2013 abgeschlossen. Hier wurde versucht, *simplified models* für R-paritätsverletzende SUSY zu entwickeln. Eine Doktorarbeit mit den ersten ATLAS-Ergebnissen zu R-paritätsverletzender no-scale mSugra wurde im Oktober 2014 erfolgreich abgeschlossen.

2.6.6 Interpretation der Suchen in globalen Fits

Die Studien zur Interpretation der LHC-SUSY-Suchen in Kombination mit weiteren SUSY-sensitiven Observablen mit Hilfe von globalen Fits mit dem Programm `Fittino` wurde während der gesamten Förderperiode fortgeführt. Diese Arbeiten finden in enger Zusammenarbeit mit experimentellen und theoretischen Gruppen in Bonn (Theorie), DESY, Dresden, Göttingen, Aachen (Theorie), Würzburg (Theorie) statt.

Ein konsistenter globaler Fit unter Berücksichtigung der Higgs-Entdeckung gestaltet sich aufwändiger als ursprünglich erwartet. Ein Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die benutzten theoretischen Berechnungen der SUSY-Higgs-Eigenschaften für die hohen erlaubten SUSY-Massenskalen erweitert werden mussten (externes Programm `FeynHiggs`) und viele Iterationen nötig sind, bis wieder ein konsistentes Bild entsteht. Zwischenergebnisse wurden in 2013 und 2014 auf verschiedenen großen Konferenzen und Workshops vorgestellt. Die Arbeiten konzentrierten sich auf den Versuch, endgültige Aussagen über die Validität des Constrained MSSM (CMSSM) zu machen. Mehrere Gruppen (auch unsere) haben beobachtet, dass nach Einbeziehung der expliziten Ausschlussgrenzen der LHC-Experimente für SUSY-Produktion sowie der Interpretation des entdeckten Higgs-Bosons als leichtestes skalares SUSY-Higgs-Boson eine deutliche Verschiebung des bevorzugten Parameterbereichs hin zu schweren SUSY-Teilchen stattgefunden hat. Allerdings war eine statistisch fundierte Aussage über die Konsistenz des besten Parameterbereichs mit der Gesamtheit der Daten bislang nicht möglich. Die naive Angabe eines p -Werts war aufgrund stark nicht-Gaußscher Fehler und großer Parameterkorrelationen nicht möglich. Uns ist es 2014 erstmals gelungen, mit Hilfe von numerisch sehr aufwändigen *toy fits* einen zuverlässigen p -Wert zu bestimmen. Hierbei haben sich statistisch interessante Probleme bei der Kombination mehrerer Experimente, die die gleichen Messungen durchführen (hier ATLAS und CMS Higgs-Messungen) ergeben. Ein Doktorand konnte zeigen, dass sich das beobachtete χ^2 in zwei Anteile zerlegen lässt:

einen Anteil, der die Übereinstimmung der (kombinierten) Messungen mit dem Modell beschreibt und einen Anteil, der die Konsistenz der Experimente untereinander quantifiziert. Daher hängt (entgegen der naiven Erwartung) der beobachtete p -Wert davon ab, ob man zunächst eine Kombination äquivalenter Messungen durchführt oder alle Einzelmessungen in die p -Wert-Bestimmung einfließen lässt. Für vernünftige Annahmen ergibt sich aus unseren Studien ein p -Wert für das CMSSM in der Gegend von 5%, so dass man erstmals von einem Ausschluss des CMSSM im Ganzen sprechen kann. Diese neuen Ergebnisse wurden auf mehreren Konferenzen und Workshops vorgestellt und fanden viel Beachtung. Die entsprechende Veröffentlichung wurde kurz nach Ende der Förderperiode im August 2015 zur Veröffentlichung bei Eur. Phys. J. C eingereicht.

Weitere Arbeiten an der Grenze zwischen Experiment und Theorie befassen sich mit der Interpretation der Messungen des Higgs-Bosons. Ein Wissenschaftler der Arbeitsgruppe hat zu zwei Veröffentlichungen der Programme HiggsBounds und HiggsSignals beigetragen. Im Rahmen der Fittino-Kollaboration wurde mit einer Interpretation der Higgs-Eigenschaften im Rahmen von Modellen mit effektiven Dimension-6-Operatoren begonnen. Auf der experimentellen Seite wird hier unter anderem untersucht, in wie weit die Parameter effektiver Lagagrangedichten für den Higgs-Sektor die Detektorakzeptanz für verschiedene Higgs-Kanäle beeinflussen. In diesem Zusammenhang wurde im August 2013 eine Bachelorarbeit abgeschlossen.

Die statistischen Methoden von Fittino werden nun auch eingesetzt, um nicht-SUSY-Erweiterungen des Standardmodells zu untersuchen. In einer Masterarbeit wurde damit begonnen, eine auf effektiver Feldtheorie beruhende Erweiterung des Higgs-Sektors um Dimension-6-Operatoren zu untersuchen. Hier wird insbesondere (mit Hilfe von schneller Detektorsimulation) untersucht, inwieweit solche Erweiterungen neben einer Veränderung der beobachtbaren Higgs-Signalstärken auch zu einer Modifikation kinematischer Verteilungen führen. In diesem Fall wären die veröffentlichten Higgs-Resultate nicht ohne weiteres anwendbar und dedizierte Analysen der Experimente wären nötig.

2.7 Weitere Analysen

Die Suche nach mehrfach-geladenen neuen Teilchen durch ihren anomalen spezifischen Energieverlust im TRT und dem Myonsystem (Eine Doktorandin der Arbeitsgruppe als Editorin) wurde im Mai 2013 von ATLAS veröffentlicht und die Doktorarbeit von Simone Zimmermann wurde im Juni 2013 abgeschlossen. Die erzielten Ausschlussgrenzen auf mehrfach-geladene, paarproduzierte neue Teilchen mit 2–6 Elementarladungen liegen oberhalb von 400 GeV und waren zum Veröffentlichungszeitpunkt die weltbesten Grenzen für diese Teilchen.

Die Studien zur Messung des Verzweigungsverhältnisses von $W \rightarrow \tau \nu_\tau$ mit Hilfe von myonisch zerfallenden Tau-Leptonen wurden fortgesetzt. Die entsprechende Doktorarbeit ist abgeschlossen worden. Die Methode ist zwar weiterhin vielversprechend, jedoch erlauben die beobachteten systematischen Unsicherheiten auf dem 5%-Niveau derzeit keine Veröffentlichung.

2.8 Mitarbeit bei Veröffentlichungen

Von März 2013 bis Februar 2015 war I. Brock Mitglied im *Publications Committee*. Dies bedeutete deutlich mehr Aktivitäten in *Editorial Boards*. Er hat in 2014 die Verantwortung für die Vorlagen bei ATLAS Publikationen übernommen und in der 2. Hälfte des Jahres die Vorlagen neu aufgesetzt und dokumentiert. Die Vorlagen werden ab der ersten Hälfte von 2015 für alle offiziellen ATLAS Dokumente verwendet.

Mitglieder der Gruppe sind auch in verschiedenen *Editorial Boards* aktiv. Das Institut beteiligt sich auch regelmäßig an *Institute Reviews*.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Hauptziele der Arbeitsgruppe im Berichtszeitraum lagen im Beitrag zum Betrieb des ATLAS-Detektors, der Entwicklung von Analysewerkzeugen sowie in der Analyse der genommenen Daten im Rahmen des Forschungsschwerpunkts FSP-101.

Hieraus ergeben sich die drei wichtigsten Positionen der Mittelverwendung:

- Personalmittel (Pos. 812): 57 % der Zuwendung wurden für Personalkosten (Doktoranden und wissenschaftliche Mitarbeiter) eingesetzt.
- Reisemittel (Pos. 834 und 846): 15 % der Zuwendung wurden für längerfristige Aufenthalte am CERN, Reisen zum CERN und für Konferenzreisen zur Präsentation der erzielten Ergebnisse eingesetzt.
- Investitionsmittel (Pos. 850): 11 % der Zuwendung wurden als Investitionsmittel eingesetzt. Dies beinhaltet vorwiegend die Mitgliedsbeiträge zum ATLAS-Experiment (M&O-Kosten).
- Programmpauschale (Pos. 865): 20 % der Zuwendung.

Die tatsächliche Mittelverwendung entsprach innerhalb von $\pm 8\%$ bei jeder Einzelposition der Bewilligung.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Vorhabens wurden wesentliche Beiträge zu 11 Publikationen in internationalen referierten Fachzeitschriften sowie zu 22 veröffentlichten Konferenzbeiträgen des ATLAS-Experiments geleistet. Die Ergebnisse der LHC-Experimente stehen seit Beginn der Datennahme im Zentrum des öffentlichen Interesses und bilden einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Mikrokosmos und der Entstehung unseres Universums.

Die geleisteten Arbeiten stehen im unmittelbaren Zusammenhang mit den Zielen der BMBF-Projektförderung im Bereich Elementarteilchenphysik und wären ohne die Förderung nicht möglich gewesen.

5 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dieses Vorhaben der physikalischen Grundlagenforschung ist erkenntnisorientiert. Die konkreten erzielten Ergebnisse sind relevant für das Verständnis des Top-Quarks und weitere Eigenschaften der Elementarteilchen des Standardmodells. Die durchgeführten Suchen nach neuen Phänomenen jenseits des Standardmodells haben bereits eine Vielzahl theoretischer Hypothesen ausschließen können. Die Arbeiten bilden die Grundlage für die weitere Nutzung des wissenschaftlichen Potenzials des LHC und des ATLAS-Experiments.

Das Vorhaben verfolgt keine unmittelbaren wirtschaftliche Ziele. Eine unmittelbar wirtschaftliche Verwertung der erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse ist in absehbarer Zeit nicht zu erwarten. Mittelbar haben die erzielten Ergebnisse jedoch Einfluss auf Gesellschaft und Wirtschaft, beispielsweise durch die Ausbildung höchstqualifizierter Nachwuchswissenschaftler und -wissenschaftlerinnen und durch die Entwicklung technischer Lösungen im Bereich von Detektoren und Analysemethoden, die auch Anwendungen in anderen Bereichen der Gesellschaft nach sich ziehen.

Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten sind weiterhin sehr gut und entsprechen dem Antrag zum Vorhaben.

6 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die im Vorhaben durchgeführten Arbeiten finden im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunktes FSP-101 (ATLAS-Experiment) in enger Zusammenarbeit mit 13 weiteren deutschen Universitäten, dem MPI für Physik München und dem Helmholtz-Zentrum DESY statt. Des Weiteren arbeitet die Arbeitsgruppe im Rahmen des ATLAS-Experiments auch auf internationaler Ebene mit zahlreichen Arbeitsgruppen zusammen. Der bisherige Erfolg des ATLAS-Experiments basiert auf der internationalen Zusammenarbeit von etwa 3000 Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen aus allen Kontinenten.

6.1 Liste der im Berichtszeitraum erschienenen Publikationen

- P. Bechtle, T. Plehn, C. Sander, „Supersymmetry“ in „The Large Hadron Collider – The Harvest of Run 1“, ISBN: 978-3-319-15000-0, DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-15001-7>.
- ATLAS Collaboration, „Identification and energy calibration of hadronically decaying tau leptons with the ATLAS experiment in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV“, Eur. Phys. J. C 75 (2015) 303.
- ATLAS Collaboration, „Search for Supersymmetry in events with large missing transverse momentum, jets, and at least one tau lepton in 20 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 8$ TeV proton–proton collision data with the ATLAS detector“, JHEP 1409 (2014) 103.

- P. Bechtle, S. Heinemeyer, O. Stål, T. Stefaniak, G. Weiglein, „Probing the Standard Model with Higgs signal rates from the Tevatron, the LHC and a future ILC“, JHEP 1411 (2014) 039.
- P. Bechtle, O. Brein, S. Heinemeyer, O. Stål, T. Stefaniak, G. Weiglein and K. E. Williams, „HiggsBounds-4: Improved Tests of Extended Higgs Sectors against Exclusion Bounds from LEP, the Tevatron and the LHC“, Eur. Phys. J. C 74 (2014) 2693.
- ATLAS Collaboration, „Search for single top-quark production via FCNC in strong interaction in $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data“, ATLAS-CONF-2013-063.
- ATLAS Collaboration, „Search for long-lived, multi-charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector“, Phys. Lett. B 722 (2013) 305.
- P. Bechtle, S. Heinemeyer, O. Stål, T. Stefaniak and G. Weiglein, „*HiggsSignals*: Confronting arbitrary Higgs sectors with measurements at the Tevatron and the LHC“, Eur. Phys. J. C 74 (2014) 2711.
- ATLAS Collaboration, „Search for non-pointing photons in the diphoton and missing transverse energy final state in 7 TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector“, Phys. Rev. D 88, 012001 (2013).
- ATLAS Collaboration, „Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least One Tau Lepton in 21 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 8$ TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector“, ATLAS-CONF-2013-026,
- ATLAS Collaboration, „Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least One Tau Lepton in 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector“, Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2215.

6.2 Veröffentlichte Vorträge

- O. Arslan, „FCNC in top production and decay“, CKM 2014, Vienna, Sep. 2014.
- P. Wagner (für die ATLAS-Kollaboration) „ATLAS Detector performance challenges in Run2“, Rencontres du Vietnam 2014: Physics at LHC and beyond, Quy Nhon, Vietnam, Aug. 2014.
- B. Sarrazin (for the Fittino Collaboration), „How alive is constrained SUSY really?“, SUSY 2014, Manchester, Jul. 2014.
- B. Sarrazin (for the Fittino Collaboration), „How alive is constrained SUSY really?“, ICHEP 2014, Valencia, Jul. 2014.
- S. Mergelmeyer (for the ATLAS Collaboration), „Measurement of the Wt Production Cross-Section in Dilepton Events with the ATLAS Detector (Poster)“, ICHEP 2014, Valencia, Jul. 2014.

- T. Velz, „Introduction and reminder: C++, OO and all that“ Advanced Programming Concepts 2014, Munich, Jun. 2014.
- S. Zimmermann (for the ATLAS Collaboration), LHCP 2013 Proceedings: „Search for stable multi-charged particles with the ATLAS experiment“, EPJ Web of Conferences 60, 20016 (2013), ATL-PHYS-PROC-2013-153, Nov. 2013.
- G.A. Stewart, W.B. Breaden-Madden, H.J. Maddocks, T. Harenberg, M. Sandhoff, B. Sarrazin (for the ATLAS Collaboration), „ATLAS Job Transforms: A Data Driven Workflow Engine“, CHEP 2013 Proceedings: ATL-SOFT-PROC-2013-023, Okt. 2013.
- B. Sarrazin, „Constrained SUSY after the Higgs discovery“, LHC Run 1 Aftermath, Bad Honnef, Okt. 2013.
- I. Brock (for the ATLAS and CMS Collaborations), „Top-Quark Mass at the LHC“, TOP 2013, Durbach, Germany, Sep. 2013.
- P. Bechtle, „ATLAS results for Higgs and SUSY searches at the LHC“, Theory Meeting, Experiment, Warsaw, Polen, Jun. 2013.
- S. Zimmermann (for the ATLAS Collaboration), „Search for heavy resonances with the ATLAS detector“, DIS 2013 Proceedings: PoS (DIS 2013) 116; ATL-PHYS-PROC-2013-190, Jun. 2013.
- P. Bechtle, „The Status of Constrained SUSY, and implications from the Higgs“, Planck 2013, Bonn, Mai 2013.
- O. Ricken, „Simplified model approaches in the search for supersymmetry with tau leptons in the final state at ATLAS“, SUSY Workshop 2013, Hamburg, Mai 2013.
- B. Sarrazin, „The status of constrained SUSY and implications for the Higgs boson“, SUSY Workshop 2013, Hamburg, Mai 2013.
- B. Sarrazin, „The status of constrained SUSY and implications for the Higgs boson“, ECFA LCWS 2013, Hamburg, Mai 2013.
- J. Stillings (for the ATLAS Collaboration), „Single top quark production in ATLAS at the LHC“, LHCP 2013, Barcelona, Spain, Mai 2013.
- J. Stillings (for the ATLAS Collaboration), „Evidence for the associated production of a W boson and a top quark in ATLAS“, Poster Session, LHCP 2013, Barcelona, Spain, Mai 2013.
- A. Vogel (for the ATLAS Collaboration), „ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT): Straw Tube Gaseous Detectors at High Rates“, VCI 2013 Proceedings: NIM A 732 (2013) 277; ATL-INDET-PROC-2013-005, Apr. 2013.
- S. Schaepe (for the ATLAS Collaboration), „Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least One Tau Lepton in 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector“, ATLAS-COM-CONF-2012-157, Proceedings of ICHEP 2012, Melbourne.

- S. Zimmermann (for the ATLAS Collaboration), „Search for Physics Beyond the Standard Model with the ATLAS detector“, PoS (Confinement X) (2012) 343.
- M. Krämer, P. Bechtle et al., „Constrained supersymmetric models in the light of LHC exclusions, precision measurements and astroparticle physics“, Frascati Phys.Ser. 54 (2012) 258.

6.3 Interne Berichte:

Bei den internen Berichten werden nur die Autoren aus der Gruppe erwähnt.

- I. Cioara et al., „Jet Calibration and Systematic Uncertainties for Jets Reconstructed in the ATLAS Detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV“, ATL-COM-PHYS-2015-444
- I. Brock, P. Seema et al., „Measurement of the t -channel single top-quark and top-antiquark differential cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector“, ATL-COM-PHYS-2015-181.
- I. Brock, P. Seema et al., „Measurement of the Inclusive and Fiducial Cross-Section in Single Top-Quark t -Channel Events in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV“, ATL-COM-PHYS-2015-177.
- I. Brock et al., „Report of the ATLAS figures task force“, ATL-GEN-INT-2014-001.
- I. Brock et al., „Rounding – ATLAS Recommendations“, ATL-COM-GEN-2014-006.
- A. Bandyopadhyay, I. Brock, S. Mergelmeyer, R. Zhang et al., „Search for excited b^* quarks and singly-produced vector-like B' quarks in the Wt final state with one or two leptons“, ATL-COM-PHYS-2014-1207.
- P. Bechtle, O. Ricken, S. Schape, M. Schultens et al., „Summary of the ATLAS experiment's sensitivity to supersymmetry after LHC Run 1 – interpreted in the phenomenological MSSM“, ATL-COM-PHYS-2014-952.
- P. Bechtle, O. Ricken, S. Schape, M. Schultens et al., „Interpretation within a simplified model of squark and gluino pair production of the search for supersymmetry in events with missing transverse momentum, jets and at least one tau lepton in 20 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS pp collision data“, ATL-COM-PHYS-2014-940.
- O. Arslan, I. Brock et al., „Search for single top quark production via strong FCNC in $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data“, ATL-COM-PHYS-2014-907.
- I. Brock, S. Mergelmeyer, P. Seema, J. Stillings, T. Velz et al., „Monte Carlo generator comparisons for the lepton+jets Wt -channel of single top-quark production at $\sqrt{s} = 7$ TeV and $\sqrt{s} = 8$ TeV“, ATL-COM-PHYS-2013-1614.
- I. Brock, „Measurement of the top quark mass and the amount of final state radiation with a JES-independent approach in $\sqrt{s} = 7$ TeV data with the ATLAS detector“, ATL-COM-PHYS-2013-1399.

- P. Bechtle, K. Desch, W. Ehrenfeld, T. Nattermann, O. Ricken, S. Schaepe, M. Schultens et al., „Search for Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and Leptons ($e/\mu/\tau$) in 8 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector“, ATL-COM-PHYS-2013-1086.
- O. Arslan et al., „Search for single top quark production via strong FCNC's in $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data“, ATL-COM-PHYS-2013-477.
- P. Bechtle, K. Desch, W. Ehrenfeld, O. Ricken, S. Schaepe, M. Schultens et al., „Search for squarks and gluinos in events with jets, missing transverse momentum and at least one tau lepton“, ATL-COM-PHYS-2013-162.
- P. Bechtle, K. Desch, W. Ehrenfeld, O. Ricken, S. Schaepe, M. Schultens et al., „Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least One Tau Lepton in 21 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 8$ TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector“, ATL-COM-PHYS-2012-1738
- P. Bechtle, K. Desch, T. Nattermann, S. Schaepe, M. Schultens et al., „Search for Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and Leptons ($e/\mu/\tau$) in 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector “, ATL-COM-PHYS-2012-567

7 Liste der im Berichtszeitraum abgeschlossenen Arbeiten

7.1 Habilitationen:

- P. Bechtle, „The Search for New Physics in Electroweak Symmetry Breaking“, Dez. 2014.

7.2 Doktorarbeiten:

- J. A. Stillings, „Search for the associated production of a W boson and a top quark with the ATLAS detector at 7 TeV“, Mai 2015.
- Ch. Limbach, „A new method for tau lepton reconstruction and its application in the ATLAS detector“, März 2015.
- M. Uhlenbrock, „Studies into the mis-identification probability of tau leptons and a measurement of the cross section $\sigma(pp \rightarrow W) \cdot BR(W \rightarrow \tau\nu)$ at a center-of-mass energy of $\sqrt{s} = 7$ GeV with the ATLAS detector“, Feb. 2015.
- R. Zimmermann, „Search for R-parity violating Supersymmetry in multi-lepton final states with the ATLAS detector“, März 2014.
- T. Nattermann, „Search for Supersymmetry with Tau Leptons, Muons, Missing Transverse Momentum and Jets with the ATLAS Experiment at the Large Hadron Collider“, Sep. 2013.

- S. Zimmermann, „A Search for Stable Massive Particles Carrying Electric Charges of $2e$ to $6e$ with the ATLAS Detector at the LHC“, Jun. 2013.
- P. Kövesárki, „Multivariate methods in the search for single top-quark production in association with a W boson in ATLAS“, Nov. 2012.
- M. Alhroob, „Search for Flavour Changing Neutral Currents in Single Top-Quark Production at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector“, Aug. 2012.

7.3 Masterarbeiten:

- A. Bandyopadhyay, „Statistical methods used in the search for singly produced vector-like quarks using the ATLAS detector“, Jun. 2015
- U. Thakur, „Studying an effective field theory for the Higgs boson with Fittino“, Jun. 2015
- R. Beckmann, „Data/Monte-Carlo Comparison for Tau Lepton Reconstruction with Decay Mode Identification in the ATLAS Detector“, Okt. 2014.
- O. Ricken, „Development and Analysis of Simplified Models in the Search for Supersymmetry with Tau Leptons in the Final State at the ATLAS Experiment“, Nov. 2013
- M. Hansen, „Application of the matrix element method to top-quark physics“, Nov. 2013
- I. Cioara, „Optimization of the single top-quark production analysis in the Wt channel at ATLAS using kinematic fitting and neural networks“, Okt. 2013
- P. Seema, „Search for single top-quark production in the Wt -channel with 1 lepton and 2 jets at ATLAS“, Apr. 2013
- S. Matberg, „Validation of a new approach for tau lepton identification in the ATLAS experiment“, Nov. 2012

7.4 Diplomarbeiten:

- J. Leininger, „Untersuchungen zur Suche nach R-paritätsverletzender SUSY mit vereinfachten Modellen im ATLAS Experiment“, Mai 2013
- E. Nickel, „Messung der Top-Quark-Masse mittels der Lepton-Transveralipuls-Methode mit einem Datensatz von 5 fb^{-1} am ATLAS-Detektor“, Dez. 2012

7.5 Bachelorarbeiten:

- M. Hübner, „Studie zur Messung der CP-Eigenschaften des Higgs-Bosons in $H \rightarrow \tau\tau$ -Zerfällen am ATLAS-Experiment“, Aug. 2014.
- P.T. König, „Studie zur Suche nach SUSY am ATLAS-Experiment am LHC für Run II“, Jul. 2014.
- Ch. Kurtscheid, „Rekonstruktionsstudien neutraler Pionen in hadronischen Tau-Lepton-Zerfällen im ATLAS Detektor“, Jul. 2014.
- F. Beisiegel, „Vergleiche zwischen Daten und Monte-Carlo-Simulationen bei der Suche nach Supersymmetrie mit Tau-Leptonen“, Jul. 2014.
- T. Guttenberger, „Implementierung und Validierung einer neuen Extrapolationsmethode innerhalb der Energyflow-Rekonstruktion des ATHENA-Frameworks von ATLAS“, Dez. 2014.
- S. Heer, „Analyse der effektiven Higgs-Kopplungen mit Fittino“, Aug. 2013
- O. Berghoff, „Studie zur Messung der Tau-Polarisation mit dem ATLAS-Experiment“, Jun. 2013
- J. Kazandjian, „Auswirkung von Higgs-Observablen auf Supersymmetrie-Fits“, Okt. 2012
- E. Zarkh, „Bestimmung der Top-Quark-Masse aus Transversalimpulsen der Zerfallsleptonen im Dilepton-Kanal“, Sep. 2012
- R. Beckmann, „Untersuchung eines achtdimensionalen phänomenologischen Supersymmetrie-Modells für globale Fits“, Jul. 2012