

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie, Theorie (ITP)

Projektleitung: PD Dr. Stefan Gieseke

Verbund: Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T03) - Run 3 von CMS am LHC

Thema: Phänomenologie am LHC

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Verbundprojektes wurden am Institut für Theoretische Physik Projekte durchgeführt, die die Arbeit der experimentellen Kollaborationen am Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Zentrum für Teilchenphysik (CERN) in Genf unterstützen. Die Zusammenarbeit mit Experimentalphysiker*innen der CMS-Kollaboration wurde in diesem Verbund besonders gefördert. Der Large Hadron Collider ist eines der größten internationalen Forschungsprojekte überhaupt. Um die Interpretation der vielfältigen Messungen zu unterstützen, sind genaue Vorhersagen aus der Theorie notwendig, die in diesen Projekten in einer Form zur Verfügung gestellt werden, die für die experimentellen Kollaborationen unmittelbar nutzbar wird.

Am LHC werden in der anstehenden Laufzeit Observablen mit sehr großer Genauigkeit zugänglich, die bislang aufgrund zu geringer Statistik nicht sichtbar waren. Dieser experimentellen Genauigkeit müssen entsprechend präzise Vorhersagen gegenüberstehen, um eine Interpretation der Daten zu ermöglichen. Eines der wichtigsten Ziele des LHC sind Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells, wofür wir möglicherweise Spuren in den Daten finden können. Dazu ist es notwendig, die Prozesse des Standardmodells mit bisher nicht erreichter Präzision zu kennen, um sehr geringe Abweichungen davon zu messen. In den Projekten dieses Vorhabens werden Vorhersagen für Prozesse in und jenseits des Standardmodells ermöglicht und in Form von Computerprogrammen zur Verfügung gestellt, die unmittelbar von den experimentellen Gruppen verwendet werden können.

Das Spektrum der Arbeiten reicht von Präzisionsvorhersagen für komplexe Prozesse mit zwei Teilchen im Endzustand unter Hinzunahme von Korrekturen in nächst-nächst-führender Ordnung (NNLO) in der starken Kopplung, über QCD-Korrekturen in verschiedenen Modellen der Physik jenseits des Standardmodells bis hin zu Vorhersagen für Prozesse, die viele Jets enthalten, einschließlich QCD-Korrekturen. In diesem Projekt werden Programme entwickelt, die die Interpretation dieser Daten erst ermöglichen und von theoretischer Seite die Präzision erreichen, die für diese Interpretation notwendig ist. Mit dem Monte Carlo Programm Herwig werden Simulationen auf dem Niveau der tatsächlich gemessenen Teilchen gemacht, die für die Interpretation der Daten außerordentlich wichtig sind. Die Anwendung dieser Programme in den experimentellen Kollaborationen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Experiment und Theorie, die durch dieses Projekt ermöglicht werden soll.

Die Programme und deren Vorhersagen sind sehr komplex und müssen oft genau auf die Bedürfnisse

in den Kollaborationen zugeschnitten werden. Zielsetzung der durchgeführten Projekte ist es, mithilfe von innovativen Rechnungen präzise Vorhersagen für Wirkungsquerschnitte von Signal- und Untergrundprozessen am LHC zu machen und für Modelle neuer Physik Benchmarkszenarien zu liefern, die am LHC getestet werden können. Damit wird der Weg zu einem grundlegenden Verständnis der LHC-Daten gebahnt. Dies geschieht im engen Austausch mit Experimentator*innen an allen LHC-Experimenten.

Die Hauptförderung dieser Aktivitäten erfolgte durch die Verbundförderung des BMBF.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Ziel der Forschung am LHC und damit ebenso innerhalb dieses Verbundprojektes ist in der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik verankert. Unser Verständnis der fundamentalen Prozesse in der Natur wird im Standardmodell der Elementarteilchen zusammengefasst. In dieser Quantenfeldtheorie können sehr präzise Vorhersagen für elementare Prozesse von Teilchenerzeugungen und -zerfällen gemacht werden, die durch die experimentellen Analysen mit großer Genauigkeit überprüft werden können. So konnte im Laufe der bisherigen Laufzeit des LHC das Standardmodell mit sehr großer Präzision verifiziert werden. Es gibt jedoch mögliche Widersprüche in der fundamentalen Beschreibung der Natur, die einerseits im Standardmodell selbst begründet sind, aber besonders auch durch Beobachtungen der Astrophysik und Kosmologie hervorgebracht wurden. Hier zeichnen sich klare Hinweise auf die Existenz der Dunklen Materie ab, die aus schweren Teilchen bestehen könnte, die nur sehr schwach mit den bisher bekannten Teilchen wechselwirken. In neuen Theorien, jenseits des Standardmodells, können die Wechselwirkungen solcher, bislang hypothetischer Teilchen genau formuliert werden. Solche Vorhersagen können auf die Konsistenz mit den Beobachtungen der Experimente am LHC und auch mit denen aus Astrophysik und Kosmologie verglichen werden, wenn sie hinreichend präzise sind. So besteht die begründete Hoffnung, dass am LHC erste Hinweise auf solche neuen Teilchen und Wechselwirkungen gefunden werden können.

Die Aufgaben und Fragen an die Theorie zeichnen sich hier klar ab. Es müssen quantitative Vorhersagen für experimentelle Ergebnisse gemacht werden, deren Präzision mit der experimentellen Genauigkeit kompatibel ist, um signifikante Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells finden zu können. Diese Vorhersagen werden von allen Teilprojekten entwickelt und in Form von komplexen Computerprogrammen zur Verfügung gestellt, die unmittelbar von den Kollaborationen genutzt werden. Neben den Rechnungen und der Erstellung der Programme ist eine weitere Zusammenarbeit mit den Kollaborationen unabdingbar. Hier besteht ein enger Austausch zwischen den Projekten mit den experimentellen Kollaborationen, so dass in den Arbeitsgruppen am CERN das volle Potential der Datenanalysen ausgeschöpft werden kann.

Das geförderte Projekt wurde in drei Arbeitsgruppen bearbeitet, deren Themen im hier kurz zusammengefasst werden:

Entwicklung von Herwig (S. Gieseke)

Für die Simulation von Endzuständen komplexer Prozesse, besonders mit vielen auslaufenden Partonen, werden Konfigurationen in Form von run-cards erarbeitet und in Zusammenarbeit mit den experimentellen Gruppen optimiert, um eine effiziente Simulation unter Hinzunahme aller wichtigen physikalischen Effekte zu gewährleisten. Der Monte Carlo-Ereignisgenerator Herwig wird im Bereich der Simulation nichtstörungstheoretischer Effekte weiterentwickelt.

Schnelle Simulationen mit NNLO Genauigkeit (G. Heinrich und K. Rabbertz)

Theorie-Vorhersagen höchster Präzision haben oft das Problem, dass die Rechenzeit sehr groß ist, um Vorhersagen für Observablen in differentieller Form zu liefern. Deshalb war die Aufgabenstellung, Ergebnisse in zweiter Ordnung Störungstheorie (NNLO) in einer Form bereitzustellen, welche die schnelle Variation von Eingangsparametern erlaubt, wie sie z.B. für Bestimmungen der starken Kopplungskonstanten α_s benötigt werden. Dies kann durch Interpolationsgitter erreicht werden, welche NNLO QCD Korrekturen codieren. Im Projekt wurde eine neue Schnittstelle zwischen dem NNLO-Generator `NNLOJet` und den Interpolations-Werkzeugen `APPLfast` (als Weiterentwicklung von `fastNLO`) erarbeitet, wobei zum ersten Mal die volle Farbinformation für 2-jet Produktion mit einbezogen wurde.

Die neue Bestimmung von α_s aus 2-jet Daten mit NNLO Genauigkeit hatte als Voraussetzung, dass die entsprechenden Daten von ATLAS und CMS schon publiziert sind. Von den 5 verwendeten Datensätzen wurde eines erst im Dezember 2023 publiziert, was zu Verzögerungen geführt hat.

Higgspaar Signaturen und Observablen jenseits des Standardmodells (M.M. Mühlleitner)

Im Rahmen des Unterprojekts „Higgspaar-Signaturen und Observablen jenseits des Standardmodells“ von M.M. Mühlleitner wurden folgende Themen behandelt:

1. Präzisionsrechnungen zu Beyond-Standard-Modell (BSM) Signaturen sowie Präzisionsrechnungen zu Dunkle Materie (DM) Observablen und deren jeweilige Implikationen für die LHC Phänomenologie
2. Implementierung von Higgspaar-Observablen in Computerprogramme; Wechselspiel Theorie-Experiment in Bezug auf Einzel- und Higgspaarproduktionsobservablen
3. Benchmarkszenarien für Higgspaarsignaturen; globale Analyse der Daten, Erarbeitung von Strategien zur Bestimmung der trilinearen Higgs-Selbstkopplung

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Programmpaket Herwig 7.2 war zu Beginn des Projektes veröffentlicht. Simulationen in führender und nächstführender Ordnung sind im Prinzip möglich, jedoch nicht für die ganze Bandbreite komplexer Prozesse gut getestet. Im Bereich der nichtstörungstheoretischen Modelle konnte mit Hilfe von Baryonic Colour-Reconnection die Rate von identifizierten Baryonen teilweise beschrieben werden, jedoch die Winkelkorrelationen nur unzureichend. Das Modell zur Cluster-Hadronisierung wurde seit der ersten Veröffentlichung von Herwig++ nur geringfügig modifiziert.

Eine Schnittstelle zu einer früheren Version von NNLOJet war schon vorhanden. Diese wurde zur Bestimmung von α_s aus HERA di-jet Daten mit NNLO Genauigkeit verwendet.

Die Programme `ScannerS` zum Scan von Parameterräumen in BSM Modellen und `HPAIR` zur Berechnung der QCD Korrekturen im Limes schwerer Topmassen wurden um weitere Modelle jenseits des Standardmodells erweitert. Für das Composite Higgsmodell wurde die Transversalimpulsverteilung in Higgspaarproduktion ausgearbeitet und in `HPAIR` implementiert. Es wurden erstmals Kriterien hergeleitet und angewandt, um sinnvoll die experimentellen Ergebnisse zu Kontinuums-Higgspaarproduktion und zu resonanter Higgspaarproduktion mit theoretischen Vorhersagen verbinden zu können. Es wurden erstmals höhere Ordnungskorrekturen in den trilinearen Higgskopplungen und deren Auswirkung auf die Interpretation der experimentellen Ergebnisse untersucht. Es wurde ein Zusammenhang zwischen der Erklärung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie und der Phänomenologie von BSM Higgssektoren, insbesondere auch der Paarproduktion von Higgsbosonen, am LHC hergestellt

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Die drei bewilligten Teilprojekte wurden im wesentlichen wie im Projektplan beschrieben bearbeitet. Im Laufe der Bearbeitungen wurden höchstens kleinere Details im Ablaufplan an die jeweilige Entwicklung angepasst, nicht jedoch die angepeilten Ziele.

Die im Antrag beschriebenen Projekte wurden mit Hilfe von Masterstudierenden, Promovierenden und Postdoktorand*innen sowie nationalen bzw. internationalen Kolleg*innen, mit denen bereits eine langjährige Zusammenarbeit bestand, bearbeitet. Die Gruppen profitierten von dem intensiven Austausch mit den experimentellen Gruppen am KIT, von der vielseitigen Wechselwirkung der Mitarbeiter*innen und der gegenseitigen Unterstützung bei technischen Aspekten.

4 **Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)**

Die Zuwendung wurde hauptsächlich für Personalmittel verwendet, um Promovierenden- oder Postdoktorandenstellen zu finanzieren. Alle Mittel sind entsprechend der Planung eingesetzt worden und die von den Mitteln eingestellten Mitarbeiter haben maßgeblich zu den geplanten Projekten beigetragen. Die entsprechenden Reisemittel wurden verwendet, um Ergebnisse auf Konferenzen und Workshops zu präsentieren und zu diskutieren.

5 **Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele**

Unterprojekt von S. Gieseke zu „Entwicklung von Herwig“

Im Projektplan wurden zwei Teilaspekte der Entwicklung von Herwig formuliert. Einerseits die Anwendung von Herwig-Simulationen für komplexe Prozesse mit mehreren Jets im Endzustand und andererseits die Weiterentwicklung von nichtstörungstheoretischen Modellen für die Teilchenproduktion. Die im Projektplan formulierten Ziele wurden erreicht und die Resultate mit dem Herwig Release 7.3 öffentlich zugänglich gemacht.

Im ersten Teilprojekt wurden in Zusammenarbeit mit dem Experiment verschiedene Konfigurationen von Ereignisgeneratoren untersucht, um nichtstörungstheoretische Effekte genauer zu verstehen.

In Zusammenarbeit mit der CMS-Gruppe von Klaus Rabbertz wurde die Simulation von komplexen Endzuständen in Z+jet und Dijet Ereignissen untersucht. Neben der im Projektplan anvisierten Erarbeitung von run-cards wurden die Endzustände für eine Analyse der nichtstörungstheoretischen Effekte in der Messung des dreifach differentiellen Wirkungsquerschnittes herangezogen. Diese Effekte werden in der Analyse der Ereignisse als Korrekturfaktoren dargestellt, die den Einfluss von Hadronisierung und Underlying Event auf den partonischen Endzustand zusammenfassen. Im ersten Schritt wurden die Korrekturfaktoren für den dreifach-differentiellen Wirkungsquerschnitt in der Dijet Produktion mit Herwig in führender (LO) und nächstführender Ordnung (NLO) berechnet und analysiert. Eine besondere Fragestellung war die Untersuchung der Ursache teils großer Korrekturen. Das Underlying Event wird durch ein Modell mehrfach partonischer Wechselwirkungen (MPI) beschrieben. Beide nichtstörungstheoretischen Modelle verändern den Teilchenfluss in Jets auf unterschiedliche Weise und können durch Verschmierungen positive oder negative Beiträge zu einzelnen Jets liefern, die sich entsprechend in den Korrekturfaktoren wiederfinden. Die Effekte von Hadronisierung und Underlying Event wurden in dieser Studie separat untersucht. Es hat sich gezeigt, dass beide Effekte in ähnlichen Phasenraumbereichen des Dijet-Systems eine größere Rolle spielen und zum Teil entgegengesetzten Einfluss auf die Korrekturfaktoren haben, sich also ggf. auch kompensieren können. Wenn die Jets in Vorwärtsrichtung gestreut werden oder das Dijet-System stark geboostet ist, wird der Einfluss der Korrekturen relativ groß. Die Universalität der Untersuchung wurde im Anschluss auch in einer Simulation von Z+Jet Ereignissen untersucht. Hier hat sich gezeigt, dass die Korrekturen zum Teil sehr groß werden können, wenn der Streuwinkel des Z+Jet Systems groß wird. Daraufhin wurde der Einfluss des Underlying Event für die Bins der harten Z+Jet Ereignisse genauer untersucht [G8]. Es hat sich gezeigt, dass die großen Korrekturen durch das Underlying event zu begründen sind. Allerdings reduzieren sich die großen Korrekturen merklich bei Hinzunahme weiterer harter Jets durch NLO Korrekturen oder Merging. Der große Unterschied zwischen den Korrekturen in der Dijet und der Z+Jet Simulation ist also vermutlich darauf zurückzuführen, dass besonders in den Z+Jet Simulationen die Mitnahme von nur einem zusätzlichen Jet in NLO noch keine stabilen Ergebnisse liefert. Hier sollte also in zukünftigen Analysen besonderes Augenmerk auf die Konfiguration der Ereignisgeneratoren gelegt werden. Die Ergebnisse beider Studien wurden in [G1] zusammengefasst und zur Veröffentlichung eingereicht. Insgesamt haben diese Studien wichtige Erkenntnisse für die Konfiguration der Ereignisgeneratoren geliefert, die so nur in Zusammenarbeit von Experiment und Theorie gewonnen werden können. Neben dem Z+Jet System wurde mit dem Dijet-System entsprechend dem Projektplan ein weiterer, komplexerer Endzustand untersucht.

Im zweiten Teilprojekt wurde die Weiterentwicklung nichtstörungstheoretischer Modelle in Herwig vorangetrieben. Hier wurde die Teilchenproduktion in der Diffraktion untersucht und es wurden Modelle für die Hadronisierung und Colour-Reconnection entwickelt, die eine verbesserte Beschreibung von Endzuständen am LHC erlauben.

Die präzise Simulation von hadronischen Endzuständen ist häufig durch die Genauigkeit der nichtstörungstheoretischen Modelle in Ereignisgeneratoren begrenzt. Durch die Wahl von geeigneten Jet-Algorithmen und hinreichend inklusiven Observablen kann die Unsicherheit aufgrund dieser Modelle häufig stark reduziert werden, jedoch ist ein genaues Verständnis dieser Effekte wünschenswert und kann die systematischen Unsicherheiten von Observablen weiter reduzieren. Ein wichtiges Beispiel ist die Produktion von Teilchen in der Hadronisierung. Die Raten von schweren identifizierten Teilchen können die Unsicherheiten im Teilchenfluss innerhalb von Jets stark beeinflussen. Wenn ein schweres Baryon anstelle einiger leichter Mesonen am Rande eines Jets erzeugt wird, kann dieses den Energiefluss im Jet beträchtlich beeinflussen, so dass auch die Unsicherheiten aufgrund der Simulation der Produktion von Baryonen entsprechend groß werden können. Hier haben neuere Studien zur Produktion identifizierter Teilchen Diskrepanzen in Ereignisgeneratoren aufgezeigt, die andernfalls durch Jet-Algorithmen herausgemittelt werden. Ein wichtiges Beispiel ist die Azimutalwinkelkorrelation von Baryonen, die aufgrund der Hadronisierungsmodelle von verschiedenen Ereignisgeneratoren sehr unterschiedlich vorhergesagt wird. In Herwig wurden diese Observablen genauer untersucht und mit einem Spielzeugmodell mögliche Verbesserungen des Hadronisierungsmodells aufgezeigt [G4]. Die Beobachtung von Teilchen in Minimum-Bias Ereignissen, die herangezogen werden, um die Teilchenproduktion in Ereignisgeneratoren zu Tunen, hat immer auch große Beiträge von diffraktiven Ereignissen. Der generelle Einfluss der diffraktiven Ereignisse auf Minimum-Bias Observablen wurde in [G5] untersucht. In [G6] wurde ein Modell zur Simulation von harten diffraktiven Ereignissen erstellt, um deren Einfluss auf die Minimum-Bias Ereignisse genauer zu beleuchten. In [G7] wurde der Einfluss eines alternativen Abstandsmaß farbgeladener Partonen im Colour-Reconnection Modell untersucht, um mögliche Verbesserungen dieses Modells auszuloten. Die verschiedenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die genaue Beschreibung der Endzustände am LHC immer ein Wechselspiel der störungstheoretischen Modelle ist, so dass die punktuelle Verbesserung eines Modells nur selten zu einer Verbesserung der beobachteten Diskrepanzen führt. Daher wurde in diesem Projekt die systematische Verbesserung des Hadronisierungsmodells in Herwig als erster Schritt zu einer Verbesserung der nichtstörungstheoretischen Modelle angestrebt. Im Cluster-Hadronisierungsmodell wurden die zentralen Modelle zur Cluster-fission und zum Cluster-decay analysiert und durch neue Modelle ersetzt, die es erlauben diese elementaren Prozesse mit Lorentz-invarianten Matrixelementen zu beschreiben, anstelle mit den bislang eher ad-hoc formulierten phänomenologischen Modellen. Des weiteren wurden neue Möglichkeiten der Colour-Reconnection implementiert, die ebenfalls großen Einfluss auf die Teilchenproduktion haben können, insbesondere auf die Produktion von Baryonen. Der mögliche Einfluss auf die Teilchenproduktion kann durch ganz unterschiedliche Observablen an verschiedenen Kollidern untersucht werden, so dass die Modelle nach wie vor eine universelle Beschreibung der Cluster-Hadronisierung erlauben. Die Ergebnisse wurden in [G9] zusammengefasst. Eine erste Publikation [G3] ist bereits akzeptiert, eine weitere ist in Fertigstellung. Die Ergebnisse der Studien sind zum großen Teil im Herwig Release 7.3 [G2] öffentlich verfügbar und werden in einem neuen Manual dokumentiert.

Unterprojekt von G. Heinrich und K. Rabbertz zu „Schnelle Simulationen mit NNLO Genauigkeit“

Das Projekt involvierte Experimentalphysikerinnen und Experimentalphysiker von ATLAS und CMS, sowie Theoretikerinnen und Theoretiker auf verschiedenen Karrierestufen: Masteranden, einen Doktoranden, einen Postdoc, staff scientists und Professorinnen/Professoren. Das Projekt war nur durch die Zusammenarbeit zwischen Theorie und Experiment möglich. Der CMS-Beitrag war hauptsächlich

durch Klaus Rabbertz (KIT) r presentiert, der ATLAS-Beitrag durch Daniel Britzger (MPP München). Die NNLOJet Kollaboration besteht u.a. aus Mitgliedern aus Zürich, CERN, Lissabon, UK.

Der erste Teil des Projektes bestand in der Konstruktion der Schnittstelle und deren Validierung. Nachdem die Ergebnisse mit voller Farbinformation verfügbar waren, wurden für diese ebenfalls Interpolationsgitter erstellt und mit denjenigen aus der „leading colour approximation“ verglichen. Im letzten Teil des Projekts wurde α_s aus 5 verschiedenen Datensätzen zu di-jet Produktion mit NNLO Genauigkeit bestimmt. Zudem wurden noch HERA-Daten hinzugenommen, um das Laufen von α_s zu bestimmen. Dies wurde in einem bisher weltweit gr o sten Energiebereich, von 7 GeV bis 7 TeV, durchgeführt.

Die Anzahl der Publikationen ist nicht groß, aber die Publikation [H1] ist ein Flagship auf dem Gebiet der Bestimmungen von α_s und hat zu Einladungen auf verschiedensten internationalen Konferenzen 2025 geführt (z.B. Moriond 2025, EPS 2025).

Die Interpolationsgitter werden demnächst auf ploughshare.web.cern.ch öffentlich zur Verfügung gestellt.

Die elektroschwachen (EW) Korrekturen wurden im Gegensatz zum ursprünglichen Plan nicht im Interpolationsgitter mit einbezogen, da die Daten schon einen entsprechenden Korrekturfaktor enthalten. Die Verfügbarkeit der vollen Colour-Information war ursprünglich nicht geplant, mit deren Einbindung wurde also mehr erreicht als ursprünglich geplant.

Unterprojekt von M.M. Mühlleitner zu „Higgspar-Signaturen und Observablen jenseits des Standardmodells“

Es wurden die im Projektplan formulierten Ziele erreicht und die erzielten Ergebnisse und Computerprogramme wie geplant veröffentlicht. Im Detail:

Zu 1.: Im Teilprojekt 1 wurden Präzisionsrechnungen zu BSM Signaturen an Beschleunigern sowie für DM Observablen durchgeführt und deren jeweilige Auswirkungen auf den noch erlaubten Parameterraum der BSM Modelle untersucht. Dies bildet eine wichtige Grundlage dafür, für das Experiment sinnvolle Vorhersagen für zu untersuchende Signaturen und Benchmarkszenarien machen zu können.

Im Rahmen der Erweiterung des Standardmodells (SM) um ein komplexes Singulettfeld (CxSM) mit einem Dunkle-Materie-Kandidaten wurden die elektroschwachen Einschleifenkorrekturen zum Zerfall des SM-artigen Higgsbosons in ein Dunkle-Materie-Teilchenpaar berechnet [M1]. Die Korrekturen sind von der Gr o enordnung einiger Prozent. Bis zum Ende der Laufzeit des LHC wird die dann erreichte Präzision im Experiment den Einschluss der hier berechneten Korrekturen erfordern, um die experimentelle Präzision zu matchen. Das Projekt wurde in [M2] um die Berechnung der n chstf hrenden (NLO) elektroschwachen (EW) Korrekturen in sämtliche Higgszerf lle erweitert. Das Modell wurde hinsichtlich seiner DM Eigenschaften und den Implikationen für LHC Phänomenologie untersucht, wobei auch Higgsparproduktionsprozesse berücksichtigt wurden. Bei zukünftig zu erwartenden noch präziseren LHC Ergebnissen werden die berechneten Korrekturen eine wichtige Rolle für die Interpretation der experimentellen Daten spielen. Die Korrekturen wurden in unseren öffentlich zugänglichen Code `EWsHDECAY` implementiert, der auch die relevanten QCD Korrekturen enthält.

In [M3] wurde die Verknüpfung von DM mit LHC-Phänomenologie untersucht. Im Rahmen des Nächst-Minimalen-2HDM (N2HDM) wurden die EW Korrekturen zur Streuung des DM Teilchens an Nukleonen in Direkter Detektion berechnet. Unter Berücksichtigung sämtlicher Einschränkungen des Modells insbesondere der LHC Higgsdaten und Ausschlussgrenzen wurde gezeigt, dass die EW Korrekturen berücksichtigt werden müssen, um die Validität des Modells bzw. bestimmter Parameterregionen des Modells in den DM Experimenten verlässlich zu testen, was wiederum Auswirkungen hat auf die Higgs-Phänomenologie am LHC.

In der Arbeit [M4] wurde der derzeit noch erlaubte Parameterraum des CP-verletzenden 2-Higgs-Dublett Modells (C2HDM), insbesondere die noch mögliche Größe der CP-Verletzung im Higgs-Sektor präzise abgeleitet, indem die neuesten Grenzen aus der Bestimmung des elektronischen elektrischen Dipolmoments (eEDM), die neuesten 125 GeV-Higgsdaten, die letzten Ergebnisse aus den Suchen nach schweren Higgsbosonen am LHC und der direkten LHC Suche nach CP-Verletzung im Higgszerfall in ein Tau-Lepton-Paar sowie die neuesten B-Physik Grenzen an die Masse des geladenen Higgsbosons berücksichtigt wurden. Bisher erlaubte Benchmarkszenarien wurden ausgeschlossen. Es zeigte sich, dass die Validität oder der Ausschluss eines CP-verletzenden Szenarios aufgrund des Zusammenspiels von EDM-Einschränkungen und LHC-Daten sowie theoretischen Grenzen sehr empfindlich von den verwendeten SM Inputparametern abhängt.

Zu 2.: Im Teilprojekt 2 wurden wichtige theoretische Berechnungen zu für die Interpretation der Higgs-paar-Observablen relevanten Prozessen in Computerprogramme implementiert. Unter Einbezug der experimentellen Higgspaarpunktions-Daten wurde das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment in Bezug auf Einzel-Higgs- und Higgspaarpunktions untersucht.

Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen Phasenübergängen des Higgsvakuums im frühen Universum, die im Rahmen der elektroschwachen Baryogenese eine wichtige Rolle für die Erklärung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie spielen, und der Größe der Higgs-Selbstwechselwirkung des SM-artigen Higgsbosons sowie den Higgsspektren in Modellen mit erweiterten Higgssektoren. In [M5] wurde die Erweiterung des 2-Higgs-Dublett Modells (2HDM) um skalare Dimension-6 Operatoren zur Begünstigung eines starken Phasenübergangs untersucht. In der Arbeit wurde gezeigt, dass dies zu veränderten Raten von resonanter und nicht-resonanter Higgspaarpunktions führt. Im Zusammenspiel mit schweren Higgszerfällen in Top-Quarks und der Untersuchung von Interferenzeffekten lassen sich somit LHC-Physik und Physik des frühen Universums, verbinden. Für die Analyse wurden die Computerprogramme HDECAY und BSMPT erweitert und öffentlich bereitgestellt.

In [M6] wurde die Arbeit [M5] erweitert auf die Modifikationen der top-Higgs-Kopplung und deren Auswirkungen auf mögliche elektroschwache Phasenübergänge und Higgsphänomenologie. Es wurde gezeigt, dass diese Modifikationen mit den gegenwärtigen Higgsdaten vereinbar sind und auf eine Überschätzung der Sensitivität auf exotische Higgssuchen in top-Paar und vier-Top-Endzustandssuchen am LHC hindeuten.

In Composite Higgs Modellen beruht elektroschwache Symmetriebrechung auf starker Dynamik, und das Higgsboson ist ein zusammengesetztes Teilchen, was zu interessanten Auswirkungen auf die resonante und nicht-resonante Higgspaarpunktions führt. Die Arbeit [M7] zeigte, dass nicht-resonante Higgspaarpunktions um mehrere 10 Prozent vom SM-Wert abweichen kann und dass sowohl in nicht-resonanter als auch resonanter Punktions die Verteilungen merklich geändert werden im Vergleich zum 2HDM mit einem elementaren SM-artigen Higgsboson. Das Modell wurde in das Programm HPAIR eingebaut, um die NLO QCD Korrekturen und die Verteilungen zu berechnen.

Zu 3.: In Teilprojekt 3 wurden Benchmarkszenarien für Higgspaarsignaturen bereitgestellt, die wichtige BSM Aspekte abdecken und alle relevanten Einschränkungen berücksichtigen. Es wurden wichtige Effekte diskutiert, die bei der experimentellen Interpretation zu beachten sind.

Die phänomenologische Analyse in [M8] stellt Benchmarkszenarien bereit für Higgspaarsignaturen in Modellen mit archetypischen erweiterten Higgssektoren, konkret im CP-erhaltenden (2HDM) und CP-verletzenden 2-Higgs-Dublett Modell (C2HDM), dem nächstminimalen 2HDM (N2HDM) und dem nächstminimalen supersymmetrischen Modell (NMSSM). Alle Szenarien sind kompatibel mit den relevanten theoretischen und experimentellen Einschränkungen. Es wurde der Zusammenhang zwischen Ergebnissen der Einzel-Higgssuchen und der Higgspaarpunktions untersucht. Für das Projekt wurde das Programm HPAIR um das N2HDM erweitert, so dass für alle Modelle die QCD Korrekturen auf nächstführender Ordnung berücksichtigt werden konnten, und es wurden die neuesten experimentel-

len Ergebnisse zur Higgsbosonensuche in `ScannerS` eingebaut. Das Projekt liefert damit auch einen wichtigen Beitrag zu den Teilprojekten 1 und 2. (Siehe auch [M13].)

In [M9] wurde für das 2HDM die Möglichkeit der Messung der trilinearen Kopplung zwischen drei SM-artigen Higgsbosonen sowie zwischen einem schweren und zwei SM-artigen Higgsbosonen am LHC untersucht. Es wurde gezeigt, dass es gewisse Parameterregionen gibt, in denen eine oder beide trilineare Kopplungen experimentell zugänglich sind. Zur approximativen Berücksichtigung der experimentellen Bedingungen wurden Binning und Smearing verwendet. Hierfür wurden die Verteilungen im Transversalimpuls ausgearbeitet und in das Programm `HPAIR` eingebaut. Damit liefert das Projekt auch einen Beitrag zu Teilprojekt 2. (Siehe auch [M12].)

Die Arbeit [M10] zeigte den wichtigen Einfluss von höheren Ordnungskorrekturen der trilinearen Higgsbosonenselbstkopplungen sowie von Interferenzeffekten auf die Higgsbosonensuche. Es wurden exemplarische Benchmark-Szenarien untersucht, die alle relevanten Einschränkungen erfüllen. Die Berücksichtigung der genannten Effekte stellte sich als extrem wichtig heraus für den korrekten Vergleich zwischen experimentellen Ergebnissen und theoretischen Vorhersagen, um somit verlässliche Ausschlussgrenzen aus den Higgsbosonensuchdaten ableiten zu können. (Siehe auch [M14].)

In [M11] wurde ein wichtiger Beitrag für die Arbeitsgruppe zur Higgsbosonensuche im Rahmen der LHC Higgs Working Group geleistet. Es wurden Benchmark-Linien und -ebenen für Higgsbosonensuchen im NMSSM bereitgestellt, welche die Higgsbosonensuchraten in für das Experiment relevanten Endzuständen maximieren und mit allen wichtigen Einschränkungen kompatibel sind.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen tragen allesamt direkt zur Interpretation von Daten am LHC und anderen Teilchenbeschleunigern bei. Die Rechnungen und Programmpakete sind oftmals so komplex, dass nur in der Zusammenarbeit von Experiment und Theorie eine konsistente Nutzung der Programme und damit der Interpretation der Daten möglich ist. Darüberhinaus erlauben die entwickelten Programme die Konzipierung der Experimente im Hinblick auf eine optimale Nutzung des vollen Potenzials des LHC.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die während der Projektlaufzeit gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse sind von zentraler Bedeutung für die weitere Entwicklung der LHC Experimente, die korrekte Interpretation der gewonnenen Daten und somit für die weitere Entwicklung der gesamten Elementarteilchenphysik. Die von unserer Gruppe gewonnenen Resultate werden unmittelbar in Form von Programmen von anderen Gruppen übernommen. Die Langfristigkeit des Projekts erlaubt es, über die Jahre Rechenmethoden und Computerprogramme zu entwickeln, die für die durchgeführten hochkomplexen Rechnungen unerlässlich sind. Die langfristige Zusammenarbeit zwischen Experiment und Theorie gewährleistet den optimalen Austausch zwischen beiden und somit, dass die von der Theorie bereitgestellten Ergebnisse bestmöglich von den Experimenten verwendet werden können. Damit ist eine erstklassige wissenschaftliche Anschlussfähigkeit gewährleistet. Unsere theoretischen Projekte werden nahtlos im Rahmen des bekannten nationalen Verbunds mit den experimentellen Gruppen auch in der neuen Förderperiode fortgesetzt.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die neuesten Ergebnisse der LHC Experimente fließen immer auch in die Entwicklung unserer Programmpakete ein, um mit aktuellsten Daten Parameter der Theorie so festzulegen, dass die bestmögliche Beschreibung der Experimente möglich ist und um die Grenzen für theoretische Vorhersagen

richtig einzuordnen. Die Theoriegruppen am ITP arbeiteten aktiv in der LHC Higgs Working Group (HWG) mit und waren hier zum Teil in verschiedenen Untergruppen (z.B. der „NMSSM“ und der „HH“ Untergruppe) als Theorie Convener tätig. Prof. Heinrich war 10/21-12/23 Mitglied im Steering Committee der LHC HWG.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

[G1] Stefan Gieseke, Maximilian Horzela, Manjit Kaur, Dari Leonardi, Klaus Rabbertz, Aayushi Singla, Cedric Verstege, „Nonperturbative effects in triple-differential dijet and Z+jet production at the LHC“, eprint 2412.19694, im Review bei Eur.Phys.J.

[G2] G. Bewick et.al., „Herwig 7.3 release note“, Eur.Phys.J.C 84 (2024) 10.

[G3] Stefan Gieseke, Stefan Kiebacher, Simon Plätzer, Jan Priedigkeit, „Phenomenological constraints of the building blocks of the cluster hadronization model“, angenommen zur Veröffentlichung in Eur.Phys.J. C.

[H1] F.Ahmadova, D.Britzger, X.Chen, J.Gässler, A.Gehrmann-De Ridder, T.Gehrmann, N.Glover, C.Gwenlan, G.Heinrich, A.Huss, et al., „Precise Determination of the Strong Coupling Constant from Dijet Cross Sections up to the Multi-TeV Range“, [arXiv:2412.21165 [hep-ph]], accepted for publication in Phys. Rev. Lett.: <https://journals.aps.org/prl/accepted/10.1103/knrv-2r3t>

[H2] D.Britzger, A.Gehrmann-De Ridder, T.Gehrmann, N.Glover, C.Gwenlan, A.Huss, J.Pires, K.Rabbertz, D.Savoiu, M.R.Sutton, et al. „NNLO interpolation grids for jet production at the LHC“, Eur. Phys. J. C 82 (2022) no.10, 930 [arXiv:2207.13735 [hep-ph]].

[H3] J.Andersen, B.Assi, K.Asteriadis, P.Azzurri, G.Barone, A.Behring, A.Benecke, S.Bhattacharya, E.Bothmann, S.Caletti, et al. „Les Houches 2023: Physics at TeV Colliders: Standard Model Working Group Report“, [arXiv:2406.00708 [hep-ph]].

[M1] F. Egle, M. Mühlleitner, R. Santos, J. Viana, „One-loop Corrections to the Higgs Boson Invisible Decay in a Complex Singlet Extension of the SM“, Phys.Rev. D 106 (2022) 9, 095030.

[M2] F. Egle, M. Mühlleitner, R. Santos, J. Viana, „Electroweak corrections to Higgs boson decays in a Complex Singlet extension of the SM and their phenomenological impact“, JHEP 11 (2023) 116.

[M3] Seraina Glaus, Margarete Mühlleitner, Jonas Müller, Shruti Patel, Rui Santos, „Electroweak corrections to dark matter direct detection in the dark singlet phase of the N2HDM“, Phys. Lett. B 833 (2022) 137342.

[M4] Thomas Biekötter, Duarte Fontes, Margarete Mühlleitner, Jorge C. Romão, Rui Santos, João P. Silva, „Impact of new experimental data on the C2HDM: the strong interdependence between LHC Higgs data and the electron EDM“, JHEP 05 (2024) 127.

[M5] Anisha, Lisa Biermann, Christoph Englert, Margarete Mühlleitner, „Two Higgs doublets, effective interactions and a strong first-order electroweak phase transition“, JHEP 08 (2022) 091.

[M6] Anisha, D. Azevedo, L. Biermann, C. Englert, M. Mühlleitner, „Effective 2HDM Yukawa interactions and a strong first-order electroweak phase transition“, JHEP 02 (2024) 045.

[M7] S. De Curtis, L. Delle Rose, F. Egle, M. Mühlleitner, S. Moretti, „Composite 2-Higgs Doublet Model: Strong Effects on Higgs Pair Production“, JHEP 06 (2024) 063.

[M8] H. Abouabid, A. Arhrib, D. Azevedo, J. El Falaki, P.M. Ferreira, M. Mühlleitner, R. Santos, "Benchmarking Di-Higgs Production in Various Extended Higgs Sector Models", JHEP 09 (2022) 011.
[M9] F. Arco, S. Heinemeyer, M. Mühlleitner, K. Radchenko, "Sensitivity to Triple Higgs Couplings via Di-Higgs Production in the 2HDM at the (HL-)LHC", Eur.Phys.J.C 83 (2023) 11, 1019.

[M10] S. Heinemeyer, M. Mühlleitner, K. Radchenko, G. Weiglein, "Higgs Pair Production in the 2HDM: Impact of Loop Corrections to the Trilinear Higgs Couplings and Interference Effects on Experimental Limits", Eur.Phys.J.C 85 (2025) 4, 437.

9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

Beitrag zur LHC Higgs Working Group:

[M11] U. Ellwanger, M. Muehleitner, N. Rompotis, N. R. Shah, D. Winterbottom, "Benchmark Lines and Planes for Higgs-to-Higgs Decays in the NMSSM", e-Print: 2403.15046 [hep-ph]

Proceedings-Beiträge:

[H4] HP2 2022: <https://conference.ippp.dur.ac.uk/event/1100/contributions/5790/>

[H5] [SM@LHC](https://conference.ippp.dur.ac.uk/event/1429/contributions/8198/): <https://conference.ippp.dur.ac.uk/event/1429/contributions/8198/>

[H6] DIS 2025: <https://indico.cern.ch/event/1436959/contributions/6331203/>

[H7] proceedings: Moriond 2025, EPS 2025 (to appear)

[M12] Sven Heinemeyer, Margarete Mühlleitner, Kateryna Radchenko, Georg Weiglein, "Higgs Pair Production and Triple Higgs Couplings at the LHC in the 2HDM framework", PoS EPS-HEP2023 (2024) 411, Contribution to: EPS-HEP2023, 411.

[M13] Hamza Abouabid et al., "HHH White Paper", Eur.Phys.J.C 84 (2024) 1183, Contribution to: HHH Workshop, e-Print: 2407.03015 [hep-ph].

[M14] Sven Heinemeyer, Margarete Mühlleitner, Kateryna Radchenko, Georg Weiglein, "Higgs Pair Production in the 2HDM: Impact of Loop Corrections to the Trilinear Higgs couplings", PoS LL2024 (2024) 027, Contribution to: LL2024, 027.

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

[G4] Ronja Zimmermann, "Aspects of Hadron Production in Herwig", Masterarbeit am Institut für Theoretische Physik, KIT, August 2021.

[G5] Maximilian Rimpf, "Simulation of diffractive final states in Herwig", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, KIT, Juni 2022.

[G6] Jens Braun, "Hard Diffraction in Herwig", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, KIT, September 2022.

[G7] Deniz Yüksel, "Analysing the ΔR Distance Reduction within the Colour Reconnection Framework in Herwig", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, KIT, September 2023.

[G8] Dari Leonardi, "Simulation of the UE in triple differential Z+jet production", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, KIT, März 2024.

[G9] S. Kiebacher, "On The Phenomenology Of Hadronization And Colour Reconnection", Doktorarbeit am Institut für Theoretische Physik, KIT, Februar 2025.

[H8] Lucas Kunz, „Precision Calculations and their Application to LHC Data“, Dissertation KIT, Institut für Theoretische Physik, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000174525>

[H9] Johannes Gässler, „Workflow and performance optimization for fast NNLO pQCD Calculations“, Masterarbeit, Institut für experimentelle Teilchenphysik, Dezember 2023.

[M15] Kateryna Rachenko Serdula, "Triple Higgs Couplings in the 2HDM at the LHC", Masterarbeit, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, Juni 2022.

[M16] Philipp Rendler, "Tests von CP-Verletzungen in erweiterten Higgssektoren", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, Oktober 2022.

[M17] Karlina Kröhnert, "Verteilungen der Wirkungsquerschnitte von SM-artiger Higgs-Paar-Produktion im N2HDM", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, Dezember 2022.

[M18] David Schreiber, "Higgs Boson Pair Production Beyond the Standard Model", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, Oktober 2023.

[M19] Anasztazia Szalontai, "DM Reliktdichte im CxSM", Bachelorarbeit am Institut für Theoretische Physik, Dezember 2023.

[M20] Felix Egle, "Insights in New Physics through Di-Higgs Production and Precision Phenomenology", Doktorarbeit am Institut für Theoretische Physik, Oktober 2024.