GEFÖRDERT VOM

Schlussbericht

Verbund: 05H2021 - Run 3 von CMS am LHC

Zuwendungsempfänger:	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Projektleitung:	Prof. Dr. Robert Harlander
E-Mail:	harlander@physik.rwth-aachen.de
Förderkennzeichen:	05H21PACCA
Förderzeitraum:	01.07.2021 - 30.06.2024
Zuwendung:	365.141,50 €
Projektträger:	Projektträger DESY
Zusätzlicher Kontakt:	worek@physik.rwth-aachen.de
Zusätzlicher Name:	Malgorzata Worek

Genutzte Großgeräte:	**Labor**	**Gerät**	**Experiment**

Diplomarbeiten:	0
Dissertationen:	1
Habilitationen:	0
Referierte Publikationen:	7
Andere Veröffentlichungen:	0
Patente:	0
Bachelorarbeiten:	0
Masterarbeiten:	3
Staatsexamen:	0

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 30.12.2024 21:38 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	RWTH Aachen University
Projektleitung:	Prof. Dr. Robert Harlander, Prof. Dr. Michal Czakon, Prof. Dr. Malgorzata Worek
Verbund:	05H2021 (ErUM-FSP T03)
Thema:	Run 3 von CMS am LHC: Theoretische Studien zur Physik an Teilchenbeschleunigern

Zusammenfassung

Dieses Projekt dient der Verbesserung von Vorhersagen über die Eigenschaften des Higgs-Bosons im Standard-Modell und darüber hinaus gehenden Theorien, im speziellen supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells. Dazu wurden höhere Ordnungen in der Störungsreihe berechnet. Außerdem wurden systematische Ungenauigkeiten in den Berechnungen der Masse und den partiellen Zerfallsbreiten des Higgsbosons identifiziert und eliminiert. Darüberhinaus wird die Vorhersage von Produktionsquerschnitten für das Higgs-Boson verbessert, indem auch kinematische Verteilungen bei der Higgsproduktion bestimmt werden. Die Ergebnisse wurden und werden in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht und als öffentlicher Computercode zur Verfügung gestellt. Die in diesem Projekt entwickelten und verwendeten Methoden können auch auf Modelle jenseits des Standardmodells angewendet werden.

Das Projekt zielt weiterhin darauf ab, hochmoderne theoretische NLO-QCD-Vorhersagen für die Produktion eines Top-Quark-Paares mit einem zusätzlichen Objekt am LHC bereitzustellen. Das Hauptaugen-merk des Projekts liegt auf der Untersuchung der Modellierung von Top-Quark-Zerfällen sowie auf der Anwendung dieser Ergebnisse auf experimentelle Daten aus dem LHC. Diese Berechnungen für ttH, ttW, ttbb und für tt + Dunkle Materie basieren auf den vollständigen Matrixelementen für den vorliegenden Prozess und beinhalten alle resonanten und nicht-resonanten Feynman-Diagramme, Interferenzen und Off-Shell-Effekte des Top-Quarks sowie die W- und Z-Eichbosonen. Die nicht faktorisierbaren NLO-QCD-Korrekturen sowie QCD-Effekte höherer Ordnung in Top-Quark-Zerfällen beeinflussten signifikant die ttV-Wirkungsquerschnitte in verschiedenen Phasenraumregionen. Aus diesen Gründen sollten sie beide in die zukünftigen Vergleiche zwischen theoretischen Vorhersagen und experimentellen Daten einbezogen werden. Wenn wir die vollständige Theorie ohne enthaltene Näherungen zur Hand haben, sind wir in der Lage, die tatsächliche Größe der theoretischen Unsicherheiten aufgrund der Skalenabhängigkeit zu untersuchen. Mit anderen Worten, um zu überprüfen, ob sie bei Vorhandensein verschiedener Annäherungen unter- oder überschätzt werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Nach seiner Entdeckung 2012 am Large-Hadron-Collider durch die ATLAS- und CMS-Kollaborationen bleibt das Higgs-Boson weiterhin eine wichtige Sonde für präzise Tests des Standardmodells und die (indirekte) Suche nach neuer Physik. Daher sind, zusätzlich zu der hochpräzisen Vermessung seiner Eigenschaften, ebenso präzise Vorhersagen eben jener Eigenschaften und deren Beziehungen untereinander notwendig. Präzisere Vorhersagen werden insbesondere durch die Berechnung höherer Ordnungen in der Störungsreihe erreicht, aber auch die Identifikation und Eliminierung systematischer Unsicherheiten in diesen Berechnungen sind wichtige Schritte zu genaueren Vorhersagen. Diese Vorhersagen sind auch in den Modellen, die über das Standardmodell hinausgehen, durchzuführen, um sie zu validieren oder ihre Parameterräume einzuschränken.

Hochpräzisionsmessungen am LHC, insbesondere im Top-Quark-Sektor, sind einer der wenigen Bereiche, in denen wir am LHC neue Physik finden könnten. Zu diesem Zweck sind nicht nur hochpräzise, sondern auch sehr genaue theoretische Vorhersagen der Prozesse erforderlich, an denen Top-Quarks beteiligt sind, wie z. B. $pp \rightarrow tt$ und $pp \rightarrow tt + X$, wobei $X = Z, H, W, bb$ ist. Sobald diese hochgenauen Vorhersagen vorliegen, sollten sie mit den LHC-Daten verglichen werden. Einerseits wollen wir die verschiedenen Näherungen testen, die in den allgemeinen Monte-Carlo-Programmen verwendet werden, die derzeit am LHC eingesetzt werden, und andererseits hoffen wir, dass eine vollständige Beschreibung der Top-Quark-Prozesse etwas Licht auf die neue Physik werfen wird.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Standardmodell sind höhere Korrekturen für die wichtigsten Wirkungsquerschnitte für Higgs-Produktion zu hoher Präzision bekannt. In weiterführenden Modellen sind solche Ergebnisse nur in den populärsten Fällen gegeben, wie etwa dem Minimalen Supersymmetrischen Standardmodell (MSSM). Allerdings ist die bloße Berechnung solcher Korrekturen in supersymmetrischen Modellen nicht immer ausreichend. Es muss auch berücksichtigt werden, dass supersymmetrische Modelle neue Symmetrien einführen, die verschiedene Parameter verknüpfen und voneinander abhängig machen. Der wichtigste Parameter ist hier die Masse des Higgs-Bosons. In supersymmetrischen Modellen ist diese im Allgemeinen kein unabhängiger Parameter. Der Zusammenhang mit anderen Parametern kann allerdings störungstheoretisch bestimmt werden. Ebenso ist die Zerfallsbreite des Higgs-Bosons in verschiedene andere Zustände relevant. Hierbei ist zu beachten, dass supersymmetrische Modelle zusätzliche Higgs-Bosonen enthalten. Dabei kommt es in der Regel zu einer Mischung im Higgs-Sektor, was die Berechnungen insbesondere in höheren Ordnungen der Störungstheorie erschwert.

Im Falle des Nächst-Minimalen Supersymmetrischen Standardmodells (NMSSM) können sowohl die leichten Higgs-Bosonen als auch das Standardmodell-artige Higgs-Boson große Strahlungskorrekturen auf ihre Massen erhalten, wenn zusätzliche leichte, Singlet-dominierte Higgs-Bosonen auftreten. Durch die Mischung der Higgs-Bosonen ändert sich auch die Kinematik der Strahlungskorrekturen in den Zerfällen des Higgs-Bosons. Dieses Problem kann durch eine explizite Brechung der Supersymmetrie erfolgen.

In Zwei-Higgs-Dublett-ähnlichen Erweiterungen des Standardmodells können bosonische Zerfälle der Higgs-Bosonen zu klaren Signaturen führen, auch wenn sie gegenüber anderen Kanälen subdominant auftreten. Falls das Standardmodell, anstelle von Dubletts, durch Singlets erweitert wird, können die bosonischen Zerfälle sogar dominieren.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Die Erzeugung von Higgs-Bosonen am LHC erfolgt größtenteils durch Interaktion von stark wechselwirkenden Teilchen, also den Gluonen und Quarks. Zusätzlich zu der Fusion dieser Teilchen und der folgenden Produktion eines einzelnen Higgs-Bosons spielt auch die Produktion eines Higgs-Bosons zusammen mit einem zusätzlichen Vektorboson eine zentrale Rolle. Letzterer Prozess wird Higgsstrahlung gennant. Hierbei ist zu beachten, dass die Higgsstrahlungsprozesse mit einem W- und einem Z-Boson sehr ähnlich zueinander sind. Durch einen Vergleich dieser beiden Prozesse lassen sich einige systematische Ungenauigkeiten vermeiden.

Bevor unsere wissenschaftlichen Ergebnisse zu den oben genannten Topquark-Prozessen vorlagen, berücksichtigten die am LHC verwendeten Monte-Carlo-Programme nicht alle notwendigen Beiträge. Normalerweise werden nur NLO-Korrekturen für die Produktion berücksichtigt, und die Zerfälle schwerer Resonanzen werden mit Parton Shower-Programmen wie PYTHIA durchgeführt. Aus diesem Grund waren die theoretischen Vorhersagen nicht sehr genau und konnten die Qualität der Vergleiche mit experimentellen Daten beeinträchtigen. Außerdem enthielten sie viele Näherungen, die mit Hilfe der vollständigen Theorie überprüft werden sollten.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Planung und Ablauf des Vorhabens entsprechen im Wesentlichen der Darstellung im Projektantrag. Die Umsetzung einiger Teilaspekte erfolgte in Kooperation mit folgenden Partnern:

1. Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies (LPTHE), France
2. ELKH-DE Particle Physics Research Group, University of Debrecen, Hungary
3. Cavendish Laboratory, University of Cambridge, J.J. Thomson Avenue, Cambridge CB3 0HE, United Kingdom
4. Physics Department, Florida State University, Tallahassee, U.S.A.
5. Institute of Nuclear and Particle Physics, NCSR ”Demokritos”, Agia Paraskevi, Greece

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

Die Finanzmittel wurden zum überwiegenden Teil für Personalausgaben verwendet. Ein geringerer Teil diente der Finanzierung von Konferenzreisen zur Vorstellung der Resultate und zum wissenschaftlichen Austausch.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Die theoretische Vorhersage von Higgsmassen und partiellen Zerfallsbreiten im NMSSM, auch unter Berücksichtigung zusätzlicher leichter, Singlet-dominierter Higgs-Bosonen, wurden untersucht [1], wobei die konsistente Handhabung tachyonischer Massenterme in Ref. [1] untersucht wurde. Die bosonischen Zerfälle von schweren, Dublett-dominierten Higgs-Bosonen im MSSM und NMSSM wurde unter Berücksichtigung höherer Ordnungen in der Störungsreihe in Ref. [2] berechnet. Dabei wurde der Fokus auf den Einfluss der SU(2)-Symmetrie und die Effekte nicht-resonanter Beiträge zu den Zerfällen mit drei Bosonen im Endzustand gelegt.

Die beiden Programme SusHi und vh@nnlo wurden vereinigt und damit eine neue Version von SusHi erstellt. Dadurch wurde die Konsistenz der beiden Programme sichergestellt. Außerdem wird dadurch vermieden, zwei ähnliche Programme parallel entwickeln zu müssen. Darüberhinaus wurde die Higgsstrahlungskomponente dieses neuen Programmes um eine weitere Ordnung in der Störungstheorie ergänzt, um auf dem aktuellen Stand der Forschung zu bleiben [3].

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Im Rahmen einer Doktorarbeit führte das Projekt zur Entwicklung eines Programmes, das die Berechnung von Wirkungsquerschnitten für die Produktion eines Higgs-Bosons auf differenzielle Verteilungen und kinematische Schnitte erweitern soll. In diesem Programm ist es möglich, allgemeine Informationen über beispielsweise die Rapidität und den Transversalimpuls der ausgehenden Teilchen zu erhalten, auch auf nächst-nächst-führender Ordnung. Dies erweitert die Analysemöglichkeiten zu diesem Prozess. Am Ende soll ein Programm entstehen, das die wesentlichen Charakteristika von SusHi beinhaltet, allerdings auf voll differenziellem Niveau, einschließlich der Zerfälle des Higgsbosons. Insbesondere können auch hier verschiedene Modelle jenseits des Standardmodells betrachtet werden. Die Eingabeparameter können auf eine einfache und verständliche Weise verändert werden. Außerdem ist dieses Programm sehr einfach durch neue Modelle oder Prozesse zu erweitern, auch durch den Endnutzer.

In Ref. [5] haben wir Vorhersagen für die Produktion eines leptonisch zerfallenden Top-Quark-Paares und eines stabilen Higgs-Bosons mit möglicher Mischung zwischen CP-geraden und CP-ungerade Zuständen auf NLO in QCD für das LHC Run II Schwerpunktsenergie von 13 TeV. Berücksichtigt wurden endliche Top-Quark- und Eichbosonbreiteneffekte sowie alle Doppel-, Einfach- und Nicht-Resonanz-Feynman-Diagramme einschließlich ihrer Interferenzeffekte. Wir haben das Verhalten der Szenarien CP-gerade, -ungerade und -gemischt für die integrierten Wirkungsquerschnitte sowie mehrere Schlüsseldifferentialverteilungen verglichen. Darüber hinaus haben wir gezeigt, dass sowohl NLO-Korrekturen als auch Off-Shell-Effekte auch auf der Ebene integrierter Wirkungsquerschnitte eine wichtige Rolle spielen und diese in differentiellen Verteilungen noch verstärkt werden. Obwohl wir uns in diesem Artikel auf das SM-Higgs-Boson konzentrieren, könnten die Berechnungen direkt auf Modelle angewendet werden, die einen erweiterten Higgs-Boson-Sektor habenund die Existenz von CP-ungerade Higgs-ähnlichen Teilchen, wie dem Zwei-Higgs-Dublett, vorhersagen Modell.

In Ref. [6] haben wir vollständige Off-Shell-Effekte bei der pp → ttbb-Produktion im Dileptonkanal am LHC mit der Schwerpunktsenergie von 13 TeV untersucht. Insbesondere haben wir NLO-QCD-Korrekturen berechnet und ein Verfahren für die Identifizierung von B-Jets bereitgestellt, um prompte B-Jets von B-Jets zu unterscheiden, die aus dem Zerfall der Top-Quarks stammen. Als wichtiger irreduzibler Hintergrund für pp → ttH(H → bb) ist die tt-Produktion in Verbindung mit zwei prompten b-Jets eine Hauptquelle der Unsicherheit bei der Messung von ttH(H → bb). Bei der Quantifizierung von Full-Off-Shell-Effekten haben wir Vergleiche zwischen der hochmodernen Full-Off-Shell-Berechnung und derBerechnung in der Narrow-Width-Approximation durchgeführt. Ersteres umfasst alle Doppel-, Einzel- und nichtresonanten Feynman-Diagramme, Interferenzen sowie Effekte der endlichen Zerfallsbreite der Top-Quarks und W-Eichbosonen. Letzteres beschränkt die instabilen Top-Quarks und W-Eichbosonen auf Zustände auf der Massen-Schale und beinhaltet erstmals NLO-QCD-Korrekturen sowohl für Produktion als auch für Zerfälle. Wir haben beobachtet, dass vollständige Off-Shell-Effekte im Vergleich zu den Skalenunsicherheiten für den integrierten Referenz-Wirkungsquerschnitt und für die Mehrheit der differentiellen Observablen in den von uns untersuchten Phasenraumregionen untergeordnet sind. Für eine Reihe von Observablen die relevant sind im Zusammenhang mit Suchen nach Physik außerhalb des Standardmodells sind jedoch vollständige Off-Shell-Effekte von Bedeutung. Darüber hinaus können mit unserem B-Jet-Kenn- zeichnungsverfahren die prompten B-Jets und die B-Jets aus Top-Quark-Zerfällen erfolgreich entwirrt werden.

In Ref. [7] haben wir das vollständige Off-Shell-NLO-QCD-Ergebnis für pp → ttWj präsentiert. Wir haben uns auf den Multi-Lepton-Zerfallskanal am LHC mit sqrt(s) = 13 TeV konzentriert. In unserer Berechnung wurden Off-Shell-Top-Quarks und Eichbosonen durch Breit-Wigner-Propagatoren beschrieben, außerdem wurden Doppel-, Einzel- sowie nichtresonante Top-Quark-Beiträge sowie alle Inter-erenzeffekte konsequent auf der Matrixelement-Ebene berücksichtigt. Wir haben Ergebnisse sowohl für integrierte als auch für differenzielle Wirkungsquerschnitte für verschiedene Renormierungs- und Faktorisierungsskaleneinstellungen und verschiedene PDF-Sätze präsentiert. Mit einer umfassenden Auswahl an Schnitten und unabhängig von der Wahl des Maßstabs und der PDF wurden für viele von uns untersuchte Observablen nicht-konstant differenzielle K-Faktoren erhalten. Da

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

aus experimenteller Sicht beide Prozesse pp → ttWj und pp → ttW ähnliche Endzustände aufweisen, haben wir die Auswirkung zusätzlicher Jet-Aktivität auf die integrierten und differentiellen Wirkungsquerschnitte weiter untersucht. Zu diesem Zweck wurden die normalisierten Differential-verteilungen für pp → ttWj und pp → ttW verglichen. Die theoretischen Ergebnisse für den letztgenannten Prozess wurden ebenfalls neu berechnet.

Schließlich widmete sich die Doktorarbeit [13] der Analyse von Modellierungseffekten in assoziierten-Top-Quark-Paar-Produktionsprozessen am LHC im Kontext der Beyond the Standard Model (BSM)-Physik. Wir haben modernste Vorhersagen für mehrere Hintergrundprozesse des BSM-Signals und des Standardmodells (SM) bereitgestellt und diskutiert, wie diese durch vollständige Off-Shell-Effekte und Korrekturen höherer Ordnung beeinflusst werden. Um diese Studien zu erleichtern, haben wir zwei Erweiterungen des HELAC-NLO-Frameworks vorgestellt, die die Einbeziehung einer CP-gemischten Top-Higgs-Yukawa-Wechselwirkung und Beiträge von SMEFT-Operatoren (Standard Model Effective Field Theory) der Dimension sechs im pp → ttH Prozess im Di-Lepton-Top-Quark-Zerfallskanal ermöglichen.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten dienen der Analyse experimenteller Daten zur Suche nach und Interpretation von neuer Physik. Angesichts der wissenschaftlichen Situation sind diese Arbeiten essentiell für ein vertieftes Verständnis der fundamentalen Gesetze der Natur.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse zur Vorhersage von totalen Produktionsquerschnitten für die Higgs-Produktion in verschiedenen Modellen wurden in den Programmen SusHi und vh@nnlo veröffentlicht. Die Ergebnisse zu den differenziellen Produktionsquerschnitten werden zuerst in einem neuen Programm veröffentlicht werden. Alle Programme werden für phänomenologische Studien und Datenanalyse verwendet werden.

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse sind essenziell für die Interpretation von Messungen am LHC und an zukünftigen Beschleunigern. Ein wichtiger Aspekt ist die fachüber-greifende Datenanalyse, die es erlaubt, bestehende und zukünftige Erkenntnisse etwa aus Astroteilchenphysik, Kosmologie, so- wie Niederenergieexperimenten mit einzubeziehen. Die theoretischen Ergebnisse aus werden zum einen in Form von modifizierten Les Houches Event Files und ROOT Ntuples gespeichert. Zum anderen werden sie in der Form von öffentlich zugänglichen Computer-Programmen für die Datenanalyse zur Verfügung gestellt.

Die von uns erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden vor kurzem zum Beispiel bei den folgenden Vergleichen mit den ATLAS-Daten verwendet:

1. *Measurement of the total and differential cross-sections of ttW production in pp collisions at sqrt(s) = 13 TeV with the ATLAS detector*
   The ATLAS Collaboration
   JHEP 05 (2024) 131
   https://doi.org/10.1007/JHEP05(2024)131

2. *Measurement of tt production in association with additional b-jets in the eμ final state in proton-proton collisions at sqrt(s) = 13 TeV with the ATLAS detector*
   ATLAS Collaboration
   submitted to JHEP
   https://inspirehep.net/literature/2809112

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

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

Das Vorhaben betrifft ein aktives Forschungsgebiet, das sich kontinuierlich weiterentwickelt. Auf dem speziellen Bereich, der im Vorhaben selbst bearbeitet wurde, sind uns keine direkt mit den Zielsetzungen konkurrierende Fortschritte von anderer Seite bekannt.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

[1] Florian Domingo, Sebastian Paßehr, *Curing tachyonic tree-level syndrome in NMSSM light-singlet scenarios*, Eur.Phys.J.C 82 (2022) 2, 98 [arXiv: 2109.00585 [hep-ph]].

[2] F. Domingo, S. Paßehr, *About the bosonic decays of heavy Higgs states in the (N)MSSM,* Eur. Phys. J. C 82 (2022) 962.

[3] S.Y. Klein, *SusHi 2.0 - Higgs production cross sections in BSM models*, PoS EPS-HEP2023, (2024), 416.

[4] R. Harlander, S.Y. Klein, and M. Schaaf, *FeynGame-2.1 - Feynman diagrams made easy*, Pos EPS-HEP2023 (2024) 657.

[5] J. Hermann, D. Stremmer, M. Worek, C*P structure of the top-quark Yukawa interaction: NLO QCD corrections and off-shell effects,* JHEP 09 (2022) 138.

[6] G. Bevilacqua, H. Y. Bi, H. B. Hartanto, M. Kraus, M. Lupattelli, M. Worek, *ttbb at the LHC: On the size of off-shell effects and prompt b-jet identification,* Phys. Rev. D 107 (2023) 014028.

[7] Huan-Yu Bi, Manfred Kraus, Minos Reinartz, Malgorzata Worek, *NLO QCD predictions for off-shell ttW production in association with a light jet at the LHC,* JHEP 09 (2023) 026.

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

[8] Jonathan Hermann, *On the exclusion limits in tt+DM searches at the LHC,* Presented at the 14th International Workshop on Top Quark Physics (videoconference), 13-17 September 2021.

[9] Jonathan Hermann, *ttH production in the Higgs characterisation model at NLO in QCD with full off-shell effects,* Presented at the 41st International Conference on High Energy physics, ICHEP2022, 6-13 July, 2022, Bologna, Italy.

[10] Jonathan Hermann, *NLO QCD corrections and off-shell effects for ttH production in the Higgs characterisation model,* Presented at the 15th International Workshop on Top Quark Physics, Durham, UK, 4-9 September 2022

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

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

[11] Ruijia Yang, *Higgs Production beyond the Standard Model*, Masterarbeit, RWTH Aachen University, 2022.

[12] Maximilian Rzehak, *Representation of operators in effective field theories*, Masterarbeit, RWTH Aachen University, 2023.

[13] Jonathan Hermann, *Signal and background modeling in BSM studies in the top-quark sector at the LHC,* Dissertation, RWTH Aachen University, 2023.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	RWTH Aachen University
Projektleitung:	Prof. Dr. Robert Harlander, Prof. Dr. Michal Czakon, Prof. Dr. Malgorzata Worek
Verbund:	05H2021 (ErUM-FSP T03)
Thema:	Run 3 von CMS am LHC: Theoretische Studien zur Physik an Teilchenbeschleunigern

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Auf der Suche nach neuer Physik ist neben den immer präziseren Messungen verschiedener Eigenschaften der Elementarteilchen, insbesondere von Produktionsquerschnitten, auch deren präzise Vorhersage notwendig. Dabei ist nicht nur die Berechnung dieser Eigenschaften im Standardmodell, sondern auch in darüber hinaus gehenden Modellen notwendig, um konkrete Eigenschaften zu entdecken, bei denen signifikante Unterschiede zwischen dem Standardmodell und den jeweiligen anderen Theorien vorhergesagt werden, die dann explizit bei Messungen priorisiert werden können. Präzisere Vorhersagen werden durch die Berechnung höherer Ordnungen in der Störungsreihe erzielt. Außerdem müssen systematische Ungenauigkeiten identifiziert und eliminiert werden.

Ein weiteres Ziel des Projekts ist es, modernste theoretische Vorhersagen in NLO-QCD für die Produktion eines Top-Quark-Paares mit einem zusätzlichen Objekt am LHC bereitzustellen. Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Untersuchung der Modellierung von Top-Quark-Zerfällen und der Anwendung dieser Ergebnisse auf experimentelle Daten des LHC. Diese Berechnungen für pp -> tt + X basieren auf den vollständigen Matrixelementen für den vorliegenden Prozess und beinhalten alle resonanten und nicht-resonanten Feynman-Diagramme, Interferenzen und Off-Shell-Effekte des Top-Quarks sowie die der W- und Z-Eichbosonen. Die nicht faktorisierbaren NLO-QCD-Korrekturen sowie QCD-Effekte höherer Ordnung in Top-Quark-Zerfällen hatten einen erheblichen Einfluss auf die Wirkungsquerschnitte für pp $\rightarrow$ tt +X (X = W,Z,H,bb, ...) in verschiedenen Phasenraumregionen. Aus diesen Gründen sollten beide in zukünftige Vergleiche zwischen theoretischen Vorhersagen und experimentellen Daten einbezogen werden. Da wir über die vollständige Theorie verfügen, ohne Näherungen, können wir die tatsächliche Größe der theoretischen Unsicherheiten aufgrund der Skalenabhängigkeit untersuchen. Mit anderen Worten, um zu überprüfen, ob sie bei Vorliegen verschiedener Näherungen unter- oder überschätzt werden. Wann immer möglich liefern wir auch theoretische Ergebnisse für die gleichen Prozesse in der sogenannten Narrow-Width-Approximation. Auf diese Weise können wir die Größe von Off-Shell-Effekten für viele unterschiedliche Verteilungen in verschiedenen Phasenraumbereichen untersuchen.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Supersymmetrische Modelle sind eine wichtige Gruppe von Erweiterungen des Standardmodells, da sie die vorhandenen Symmetrien dieser Theorie auf eine natürliche Weise durch neue Symmetrien ergänzen. Doch diese neuen Symmetrien schränken den Parameterraums des Standardmodells im Allgemeinen ein. Insbesondere ist die Higgs-Masse durch andere Parameter des Modells bestimmt. Die Berechnung dieser nun nicht mehr freien Parameter ist daher ein wichtiger Teil in der Vorhersage der Eigenschaften der Elementarteilchen in diesen Modellen.

Die einfachsten Realisierungen dieser neuen „Supersymmetrien“ findet sich im Minimalen Supersymmetrischen Standardmodell (MSSM) und dem Nächst-Minimalen Supersymmetrischen Standardmodell (NMSSM), die neben dem Higgs-Boson des Standardmodells noch weitere Higgs-Bosonen beinhalten. Im Berichtszeitraum wurde die theoretische Vorhersage der Higgs-Massen und -Zerfälle in letzterem untersucht [1]. Hierbei wurde auch der Fall zusätzlicher leichter Higgs-Bosonen berücksichtigt, die zu großen Strahlungskorrekturen auf die Massen führen. Die konsistente Beschreibung dieser Korrekturen wurde in Ref. [1] beschrieben.

Die Zerfälle des Higgs-Bosons im MSSM und im NMSSM wurden weitergehend untersucht, indem die Zerfallsbreiten der schweren Higgs-Zustände in andere Bosonen in voller Ein-Schleifen-Ordnung berechnet wurden [2]. Diese bosonischen Zerfälle können zu klaren Signaturen führen.

Diese Studien sollen in Anschlussprojekten in die beiden numerischen Programme SusHi und vh@nnlo integriert werden. Beide Programme werden von der Community als Standard für Vorhersagen von Produktionsquerschnitten von Higgs-Bosonen verwendet. SusHi ist auf die Produktion eines Higgs-Bosons in Gluonfusion und Bottomquark-Annihilation spezialisiert, vh@nnlo beschreibt die Produktion eines Higgs-Bosons zusammen mit einem Vektorboson. Beide Programme führen die Berechnungen auf nächst-nächst-führender Ordnung durch und beinhalten verschiedene supersymmetrische Modelle. Im Verlauf dieses Projektes wurde im Rahmen einer Masterarbeit vh@nnlo in SusHi eingebunden. Das Zusammenführen dieser beiden Programme ist notwendig, um Konsistenz zwischen ihnen, vor allem in Modellen, die über das Standardmodell hinausgehen, zu erlangen. Demnach kann die neue Version von SusHi auch weiterhin mit verschiedenen externen Programmen wie FeynHiggs und 2HDMC verknüpft werden. Am Ende entsteht ein benutzerfreundliches Werkzeug, das zu phänomenologischen Studien und zur Datenanalyse benutzt werden kann [3].

Im Berichtzeitraum wurde die Entwicklung eines Programmes zur differenziellen Berechnung von Produktionsquerschnitten weitergeführt, das mittelfristig zu einer Verallgemeinerung von SusHi mit all seinen Möglichkeiten auf die Anwendung der Higgsproduktion in Modellen jenseits des Standardmodells führen soll. Hier können zusätzlich zum totalen inklusiven Produktionsquerschnitt auch die Verteilung der Endprodukte bezüglich Rapidität und Transversalimpuls berechnet sowie experimentelle Schnitte angewandt werden. Bei einem Vergleich mit experimentellen Daten hat dies den Vorteil, dass einige systematische Ungenauigkeiten, sowohl bei der experimentellen Datenerfassung als auch bei den theoretischen Vorhersagen, eliminiert werden. Als Erweiterung von SusHi soll dieses Programm auch einfach bedienbar und für phänomenologische Studien und Datenanalyse benutzbar sein. Weiterhin soll es einfach erweiterbar sein, sodass auch der Endnutzer eigene neue Prozesse und Modelle hinzufügen kann. Nach Fertigstellung eines alleinstehenden Programms soll auch dieses in SusHi integriert werden.

In [X1] haben wir Vorhersagen für die Produktion eines leptonisch zerfallenden Top-Quark-Paares und eines stabilen Higgs-Bosons mit möglicher Mischung zwischen CP-geraden und CP-ungerade Zuständen auf NLO in QCD für das LHC Run II Schwerpunktsenergie von 13 TeV. Berücksichtigt wurden endliche Top-Quark- und Eichbosonbreiteneffekte sowie alle Doppel-, Einfach- und Nicht-Resonanz-Feynman-Diagramme einschließlich ihrer Interferenzeffekte. Wir haben das Verhalten der Szenarien CP-gerade, -ungerade und -gemischt für die integrierten Wirkungsquerschnitte sowie mehrere Schlüsseldifferentialverteilungen verglichen. Darüber hinaus haben wir gezeigt, dass sowohl NLO-Korrekturen als auch Off-Shell-Effekte auch auf der Ebene integrierter Wirkungsquerschnitte eine wichtige Rolle spielen und diese in differentiellen Verteilungen noch verstärkt werden. Obwohl wir uns in diesem Artikel auf das SM-Higgs-Boson konzentrieren, könnten die Berechnungen direkt auf Modelle angewendet werden, die einen erweiterten Higgs-Boson-Sektor habenund die Existenz von CP-ungerade Higgs-ähnlichen Teilchen, wie dem Zwei-Higgs-Dublett, vorhersagen Modell.

In [X2] haben wir vollständige Off-Shell-Effekte bei der pp → ttbb-Produktion im Dileptonkanal am LHC mit der Schwerpunktsenergie von 13 TeV untersucht. Insbesondere haben wir NLO-QCD-Korrekturen berechnet und ein Verfahren für die Identifizierung von B-Jets bereitgestellt, um prompte B-Jets von B-Jets zu unterscheiden, die aus dem Zerfall der Top-Quarks stammen. Als wichtiger irreduzibler Hintergrund für pp → ttH(H → bb) ist die tt-Produktion in Verbindung mit zwei prompten b-Jets eine Hauptquelle der Unsicherheit bei der Messung von ttH(H → bb). Bei der Quantifizierung von Full-Off-Shell-Effekten haben wir Vergleiche zwischen der hochmodernen Full-Off-Shell-Berechnung und der Berechnung in der Narrow-Width-Approximation durchgeführt. Ersteres umfasst alle Doppel-, Einzel- und nichtresonanten Feynman-Diagramme, Interferenzen sowie Effekte der endlichen Zerfallsbreite der Top-Quarks und W-Eichbosonen. Letzteres beschränkt die instabilen Top-Quarks und W-Eichbosonen auf Zustände auf der Massen-Schale und beinhaltet erstmals NLO-QCD-Korrekturen sowohl für Produktion als auch für Zerfälle. Wir haben beobachtet, dass vollständige Off-Shell-Effekte im Vergleich zu den Skalenunsicherheiten für den integrierten Referenz-Wirkungsquerschnitt und für die Mehrheit der differentiellen Observablen in den von uns untersuchten Phasenraumregionen untergeordnet sind. Für eine Reihe von Observablen die relevant sind im Zusammenhang mit Suchen nach Physik außerhalb des Standardmodells sind jedoch vollständige Off-Shell-Effekte von Bedeutung. Darüber hinaus können mit unserem B-Jet-Kenn- zeichnungsverfahren die prompten B-Jets und die B-Jets aus Top-Quark-Zerfällen erfolgreich entwirrt werden.

In [X3] haben wir das vollständige Off-Shell-NLO-QCD-Ergebnis für pp → ttWj präsentiert. Wir haben uns auf den Multi-Lepton-Zerfallskanal am LHC mit sqrt(s) = 13 TeV konzentriert. In unserer Berechnung wurden Off-Shell-Top-Quarks und Eichbosonen durch Breit-Wigner-Propagatoren beschrieben, außerdem wurden Doppel-, Einzel- sowie nichtresonante Top-Quark-Beiträge sowie alle Inter-erenzeffekte konsequent auf der Matrixelement-Ebene berücksichtigt. Wir haben Ergebnisse sowohl für integrierte als auch für differenzielle Wirkungsquerschnitte für verschiedene Renormierungs- und Faktorisierungsskaleneinstellungen und verschiedene PDF-Sätze präsentiert. Mit einer umfassenden Auswahl an Schnitten und unabhängig von der Wahl des Maßstabs und der PDF wurden für viele von uns untersuchte Observablen nicht-konstant differenzielle K-Faktoren erhalten. Da aus experimenteller Sicht beide Prozesse pp → ttWj und pp → ttW ähnliche Endzustände aufweisen, haben wir die Auswirkung zusätzlicher Jet-Aktivität auf die integrierten und differentiellen Wirkungsquerschnitte weiter untersucht. Zu diesem Zweck wurden die normalisierten Differential-verteilungen für pp → ttWj und pp → ttW verglichen. Die theoretischen Ergebnisse für den letztgenannten Prozess wurden ebenfalls neu berechnet.

Schließlich widmete sich die Doktorarbeit [X4] der Analyse von Modellierungseffekten in assoziierten Top-Quark-Paar-Produktionsprozessen am LHC im Kontext der Beyond the

Standard Model (BSM)-Physik. Wir haben modernste Vorhersagen für mehrere Hintergrundprozesse des BSM-Signals und des Standardmodells (SM) bereitgestellt und diskutiert, wie diese durch vollständige Off-Shell-Effekte und Korrekturen höherer Ordnung beeinflusst werden. Um diese Studien zu erleichtern, haben wir zwei Erweiterungen des HELAC-NLO-Frameworks vorgestellt, die die Einbeziehung einer CP-gemischten Top-Higgs-Yukawa-Wechselwirkung und Beiträge von SMEFT-Operatoren (Standard Model Effective Field Theory) der Dimension sechs im pp → ttH Prozess im Di-Lepton-Top-Quark-Zerfallskanal ermöglichen.

[1] Florian Domingo, Sebastian Paßehr, *Curing tachyonic tree-level syndrome in NMSSM light-singlet scenarios*, Eur.Phys.J.C 82 (2022) 2, 98 [arXiv: 2109.00585 [hep-ph]].
[2] F. Domingo, S. Paßehr, *About the bosonic decays of heavy Higgs states in the (N)MSSM,* Eur. Phys. J. C 82 (2022) 962.

[3] S.Y. Klein, *SusHi 2.0 - Higgs production cross sections in BSM models*, PoS EPS-HEP2023, (2024), 416.

[4] R. Harlander, S.Y. Klein, and M. Schaaf, *FeynGame-2.1 - Feynman diagrams made easy*, Pos EPS-HEP2023 (2024) 657.

[5] J. Hermann, D. Stremmer, M. Worek, C*P structure of the top-quark Yukawa interaction: NLO QCD corrections and off-shell effects,* JHEP 09 (2022) 138.

[6] G. Bevilacqua, H. Y. Bi, H. B. Hartanto, M. Kraus, M. Lupattelli, M. Worek, *ttbb at the LHC: On the size of off-shell effects and prompt b-jet identification,* Phys. Rev. D 107 (2023) 014028.

[7] Huan-Yu Bi, Manfred Kraus, Minos Reinartz, Malgorzata Worek, *NLO QCD predictions for off-shell ttW production in association with a light jet at the LHC,* JHEP 09 (2023) 026.

[8] Jonathan Hermann, *Signal and background modeling in BSM studies in the top-quark sector at the LHC,* Dissertation, RWTH Aachen University, 2023.

3. Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Mit Hilfe der öffentlichen Programmen SusHi und vh@nnlo können verschiedene Vorhersagen für Produktionsquerschnitte der Higgs-Produktion berechnet werden. Diese beinhalten nicht nur Berechnungen im Standardmodell, sondern auch in anderen Modellen, insbesondere supersymmetrischen. Mit dem Programm vh@nnlo wurden Vorhersagen produziert, die von der LHC Higgs Working Group als offizielle Empfehlungen für die Datenanalyse bereitgestellt werden.

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse sind essentiell für die Interpretation von Messungen am LHC und an zukünftigen Beschleunigern. Ein wichtiger Aspekt ist die fachüber-greifende Datenanalyse, die es erlaubt, bestehende und zukünftige Erkenntnisse etwa aus Astroteilchenphysik, Kosmologie, so- wie Niederenergieexperimenten mit einzubeziehen. Die theoretischen Ergebnisse aus werden zum einen in Form von modifizierten Les Houches Event Files und ROOT Ntuples gespeichert. Zum anderen werden sie in der Form von öffentlich zugänglichen Computer-Programmen für die Datenanalyse zur Verfügung gestellt.

Die von uns erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden vor kurzem zum Beispiel bei den folgenden Vergleichen mit den ATLAS-Daten verwendet:

1. Measurement of the total and differential cross-sections of ttW production in pp collisions at sqrt(s) = 13 TeV with the ATLAS detector
   The ATLAS Collaboration
   JHEP 05 (2024) 131
   https://doi.org/10.1007/JHEP05(2024)131

2. Measurement of tt production in association with additional b-jets in the eμ final state in proton-proton collisions at sqrt(s) = 13 TeV with the ATLAS detector
   ATLAS Collaboration
   submitted to JHEP
   https://inspirehep.net/literature/2809112