

**Übersichtsteil zum Schlussbericht**  
**für das „Verbundprojekt 05H2021 – Run 3 von CMS am LHC:**  
**Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment“ im ErUM-FSP CMS**

Berichtszeitraum: 1.7.2021 bis 30.6.2024

Verbundsprecher: Prof. Dr. J. Haller

Kennzeichen	<u>Projektleiter/-innen</u> Gruppenleiter/-innen	Institut
<b>RWTH Aachen</b>		
05H21PACC1	<u>Prof. Dr. L. Feld</u>	I. Physikalisches Institut B
	Prof. Dr. A. Stahl	III. Physikalisches Institut B
05H21PACC2	<u>Prof. Dr. T. Hebbeker</u>	III. Physikalisches Institut A
	Prof. Dr. M. Erdmann	
	Prof. Dr. A. Schmidt	
05H23PACCA	<u>Prof. Dr. J. Erdmann</u>	III. Physikalisches Institut A
05H21PACCA	<u>Prof. Dr. R. Harlander</u>	Institut für Theoretische Teilchenphysik und Kosmologie
	Prof. Dr. M. Czakon	
	Prof. Dr. M. Worek	
<b>Universität Hamburg</b>		
05H21GUCC1	<u>Prof. Dr. J. Haller</u>	Institut für Experimentalphysik
	Prof. Dr. E. Garutti	
	Prof. Dr. P. Schleper	
	Jun.-Prof. Dr. G. Kasieczka	
05H21GUCCA	<u>Prof. Dr. B. Kniehl</u>	II. Institut für Theoretische Physik
	Prof. Dr. S.-O. Moch	
<b>Karlsruher Institut für Technologie</b>		
05H21VKCCB	<u>Prof. Dr. Th. Müller</u>	Institut für Experimentelle Teilchenphysik
	Prof. Dr. U. Husemann	
	Prof. Dr. M. Klute	
	Prof. Dr. G. Quast	
05H21VKCCA	<u>Prof. Dr. S. Gieseke</u>	Institut für Theoretische Physik
	Prof. Dr. G. Heinrich	
	Prof. Dr. M. M. Mühlleitner	
<b>Assoziierter Partner: Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY</b>		
	Prof. Dr. F. Blekman <sup>1</sup> , Prof. Dr. K. Borras <sup>2</sup> , Prof. Dr. E. Gallo <sup>1</sup> , Dr. I. Melzer-Pellmann, Dr. A. Mussgiller, Dr. A. Meyer, Prof. Dr. C. Schwanenberger <sup>1</sup> <sup>1</sup> auch Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg <sup>2</sup> auch III. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen	
<b>Assoziierter Partner: Center for Advanced System Understanding CASUS, Görlitz</b>		
	Dr. M. Bussmann	

## 1. Zusammensetzung des FSP und Arbeitsteilung

Die experimentellen Gruppen der RWTH Aachen, der Universität Hamburg, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie des DESY und von CASUS (als assoziierte Institute) arbeiten themenübergreifend gemeinsam am CMS-Experiment am Large Hadron Collider (LHC). Die Theoriegruppen der RWTH Aachen, der Universität Hamburg und des Karlsruher Instituts für Technologie führen Berechnungen und Analysen zur LHC-Physik durch, die von den experimentellen Gruppen dringend benötigt werden. Gemeinsam bildeten die in der Tabelle auf der Titelseite angegebenen experimentellen und theoretischen Gruppen den ErUM-Forschungsschwerpunkt ErUM-FSP CMS „Verbundprojekt 05H2021 – Run 3 von CMS am LHC“. FSP-Sprecher war Prof. Dr. J. Haller, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, stellvertretender FSP-Sprecher war Prof. Dr. A. Schmidt, III. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen.

## 2. Aktivitäten und Tätigkeitsfelder

### 2.1 Übersicht

Der Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Forschungszentrum CERN ist der größte und leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt. Seit seiner Inbetriebnahme im Jahr 2009 wurden Protonstrahlen bei Schwerpunktsenergien von 7 TeV, 8 TeV, 13 TeV und 2022 erstmalig 13,6 TeV zur Kollision gebracht. Der LHC-Beschleuniger hat Stand Oktober 2024 ca.  $390 \text{ fb}^{-1}$  an Kollisionsdaten geliefert, wovon eine Datenmenge von ca.  $337 \text{ fb}^{-1}$  von CMS aufgenommen werden konnte.

Diese großen Datenmengen und hohen Schwerpunktsenergien bieten die einmalige Gelegenheit, sehr seltene und besonders hochenergetische Prozesse in der Welt der Elementarteilchen zu untersuchen. Insbesondere können die folgenden Fragen adressiert werden:

- Wie erhalten Elementarteilchen ihre Masse?
- Woraus besteht die Dunkle Materie, die wir im Weltraum beobachten?
- Gibt es weitere, bisher nicht entdeckte Elementarteilchen in unserem Universum?
- Lassen sich die fundamentalen Kräfte weiter vereinheitlichen?
- Welche Ursache hat die Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum?

Der CMS-Detektor (CMS = Compact Muon Solenoid) ist einer der vier großen Detektoren am LHC. Als Vielzweckdetektor erlaubt er es, einer besonders großen Breite physikalischer Fragestellungen nachzugehen. Die Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012 stellt hierbei zweifellos einen bisherigen Höhepunkt dar. Das Higgs-Teilchen ist ein völlig neuartiges Teilchen, welches unmittelbar mit der Entstehung der Masse der Elementarteilchen und der Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute zusammenhängt. In den vergangenen Jahren konnten wichtige Eigenschaften des Higgs-Teilchens untersucht werden, wodurch wissenschaftliches Neuland betreten wurde. Dennoch bleiben viele grundlegende Fragen unbeantwortet und bedürfen weiterer Forschung.

Die CMS-Kollaboration besteht aus rund 6.000 Mitgliedern, darunter rund 1.100 Promovierende. Die deutschen Universitätsgruppen aus Aachen, Hamburg und Karlsruhe sowie die Gruppen vom DESY und CASUS sind zum Teil von Anfang an Mitglied in der CMS-Kollaboration und haben in dieser Zeit wesentlich zum Bau und Betrieb des Detektors sowie zur Vorbereitung und Durchführung der Analyse der aufgezeichneten Kollisionsdaten beigetragen.

Der Überfall der Russischen Föderation auf die Ukraine am 24. Februar 2022 stellte auch für die CMS-Kollaboration und das CERN insgesamt eine beispiellose Zäsur mit erheblichen Auswirkungen auf die internationale Zusammenarbeit dar. Als Konsequenz hat der CERN Council beschlossen, die Kooperationsverträge (ICA) mit Russland und Belarus nach ihrem Auslaufen im November bzw. Juni 2024 nicht zu verlängern und somit die Zusammenarbeit zu beenden. Das ICA mit JINR wird unter Einschränkungen verlängert, so wird z.B. der gegenseitige „Observer“-Status beendet und es können keine neuen gemeinsamen Projekte begonnen werden. Bisher konnten die Auswirkungen auf die CMS-Kollaboration unter anderem durch einen deutlich erhöhten Einsatz der Kollaborationsmitglieder weitgehend

aufgefangen werden. Der Ausfall der russischen Beiträge wird aber vermutlich in der Zukunft zu einigen Herausforderungen, vor allem im zukünftigen Detektorbetrieb und auch im Bereich des Ausbaus des Detektors (Upgrade, Phase 2, insbesondere HGCALE), führen. Es sind deshalb besondere Anstrengungen notwendig, um den erwarteten Ausfall zu kompensieren, u.a. verstärkte Beiträge zum Betriebspersonal. In Deutschland gibt es zudem aus diesem Grunde verstärkte Beiträge zum HGCALE-Projekt.

Im Berichtszeitraum hat die CMS-Kollaboration hauptsächlich folgende Aufgaben bearbeitet:

- Vorbereitung der Detektorsysteme und Datenverarbeitung auf den Run 3-Betrieb
- Reguläre Datennahme im Run 3 bei einer Rekordschwerpunktenergie von 13,6 TeV,
- Kalibrierung und erste Analyse des wachsenden Run 3-Datensatzes,
- Finale Kalibrierung des großen Run 2-Datensatzes,
- Physikanalyse mit Daten des Run 2-Datensatzes,
- Vorbereitung des Phase 2-Upgrades (nicht Gegenstand dieses Berichts).

Wesentlich für die Datenverarbeitung und -analyse sind neben einer gut ausgebauten und reibungslos betriebenen Computing-Infrastruktur (nicht Gegenstand dieses Berichts) die Anwendung moderner Methoden der statistischen Datenanalyse und insbesondere des maschinellen Lernens („künstliche Intelligenz“).

Die herausragende Bedeutung der Forschungsarbeit spiegelt sich auch in der großen Zahl an Veröffentlichungen wider. Die CMS-Kollaboration hat im Berichtszeitraum mehr als 300 Artikel bei referierten Fachzeitschriften eingereicht; zusätzlich wurden mehr als 300 „Physics Analysis Summaries“ (PAS) veröffentlicht. An vielen dieser Ergebnisse waren die deutschen Gruppen führend beteiligt. Hinzu kommen vielfältige theoretische Aktivitäten, die im Rahmen dieses FSPs durchgeführt werden. Das Spektrum deckt Arbeiten auf den Gebieten der Higgs-Physik, Top-Quark-Physik, QCD und der Suche nach neuer Physik ab. Details dazu finden sich in den Einzelberichten der Verbundpartner.

Als Reaktion auf den Überfall der Russischen Föderation auf die Ukraine hat die CMS-Kollaboration in Abstimmung mit den anderen drei LHC-Experimenten ihr Verfahren zur Auflistung der Autoren bei Veröffentlichungen geändert. Die russischen und belarussischen Institute sowie JINR wurden von der Autorenliste entfernt, und die zugehörigen geldgebenden staatlichen Institutionen werden nicht mehr dankend erwähnt. In Wahrung der guten wissenschaftlichen Praxis werden die Angehörigen der betroffenen Institute weiterhin namentlich erwähnt, allerdings unter der Rubrik „*Affiliated with an Institute that was formerly covered by a cooperation agreement with CERN*“ (belarussische und russische Institute) bzw. „*Affiliated with an international laboratory covered by a cooperation agreement with CERN*“ (JINR).

## 2.2 Der LHC-Zeitplan

Der Betrieb des LHC gliedert sich in mehrjährige Datennahmephase (Runs), die von Wartungsphasen unterbrochen werden (Long Shutdowns oder LS). Im Berichtszeitraum endete der LS2 und seit Mitte 2022 läuft der Run 3, in dem die Datennahme bei der höchsten bisher erreichten Schwerpunktenergie von 13,6 TeV durchgeführt wird.

Der Zeitplan für den Betrieb des LHC zum Ende des Berichtszeitraums (Juni 2024) ist in Abb. 1 gezeigt. Der Run 3 wird demnach bis Ende 2025 dauern, gefolgt vom LS3, der von 2026 bis Ende 2028 geplant ist. Danach soll der High-Luminosity LHC (HL-LHC) seinen Betrieb aufnehmen. Für die Veränderungen gegenüber der Planung zur Zeit der Antragsstellung gibt es LHC-weit verschiedene Ursachen. In CMS stehen die Verzögerungen aufgrund der COVID-19-Pandemie und deren sekundäre Effekte auf verschiedenste Bereiche der Versorgungsketten im Vordergrund, die die Upgrade-Arbeiten an vielen Stellen beeinflusst haben. Darüber hinaus haben sich aufgrund des Ukrainekriegs und der vom CERN ergriffenen Energiesparmaßnahmen Änderungen ergeben. Insbesondere endete der Datennahmebetrieb 2022 bereits zwei Wochen früher und erfolgte 2023 kürzer als ursprünglich geplant. Die allgemeine Teuerungsrate aufgrund des Ukrainekriegs sowie auch der Wegfall der russischen Beiträge haben darüber hinaus bedeutende Auswirkungen auf die Upgrade-Projekte; Details dazu finden sich in den Einzelberichten der FIS-Projekte.

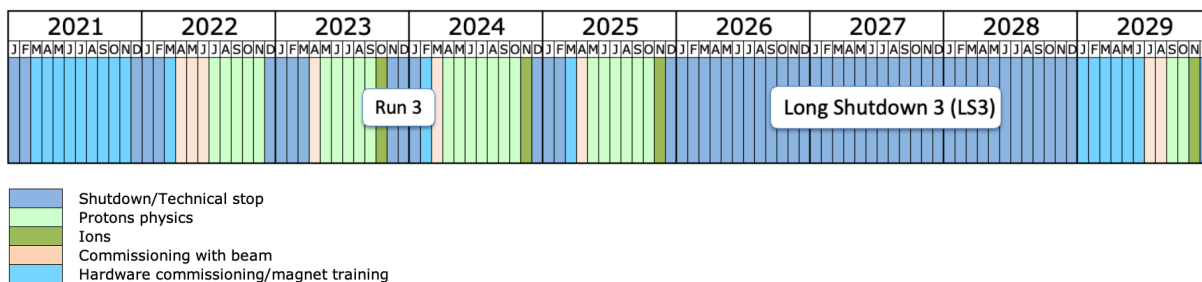


Abbildung 1: Langfristige Planung für den Betrieb des LHC und HL-LHC (Stand Juni 2024)

Im Oktober 2024, nach dem Ende des Berichtszeitraums, wurde der LHC-Zeitplan ein weiteres Mal angepasst. Der LS3 soll nun im Juli 2026 beginnen und der Beginn der Datennahme am HL-LHC (Run 4) soll im Juni 2030 erfolgen. Details zum letzten Stand (Stand: 4.10.24) finden sich unter <https://home.cern/news/opinion/accelerators/updated-schedule-cerns-accelerators>.

## 2.3 Das CMS-Experiment am LHC

### 2.3.1 Das CMS-Experiment: Detektor und Daten

Der CMS-Detektor hat in den Runs 1 und 2 sehr gut funktioniert und insgesamt etwa  $178 \text{ fb}^{-1}$  an Daten aufgenommen, davon ca.  $150 \text{ fb}^{-1}$  bei einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV (Run 2). Der Berichtszeitraum deckt die Wiederinbetriebnahme des LHC nach dem LS2 sowie die ersten Jahre des Run 3 ab, in dem die Datennahme bei der bisher höchsten erreichten Schwerpunktsenergie von 13,6 TeV erfolgt.

Im Berichtszeitraum wurden Arbeiten zur Wiederinbetriebnahme des CMS-Detektor und an den Datenauslesesystemen in Vorbereitung der Run 3-Datennahme erfolgreich abgeschlossen, trotz der Beeinträchtigungen durch die COVID-19-Pandemie. Sowohl die Wiederinbetriebnahme des CMS-Detektors nach dem LS2 im Mai 2022 als auch der laufende Detektorbetrieb während des Run 3 verliefen dabei sehr erfolgreich, mit einer sehr hohen Datennahmeeffizienz von über 90%. Die vom LHC gelieferte und von CMS aufgezeichnete Datenmenge im Run 3 ist in Abb. 2 gezeigt.

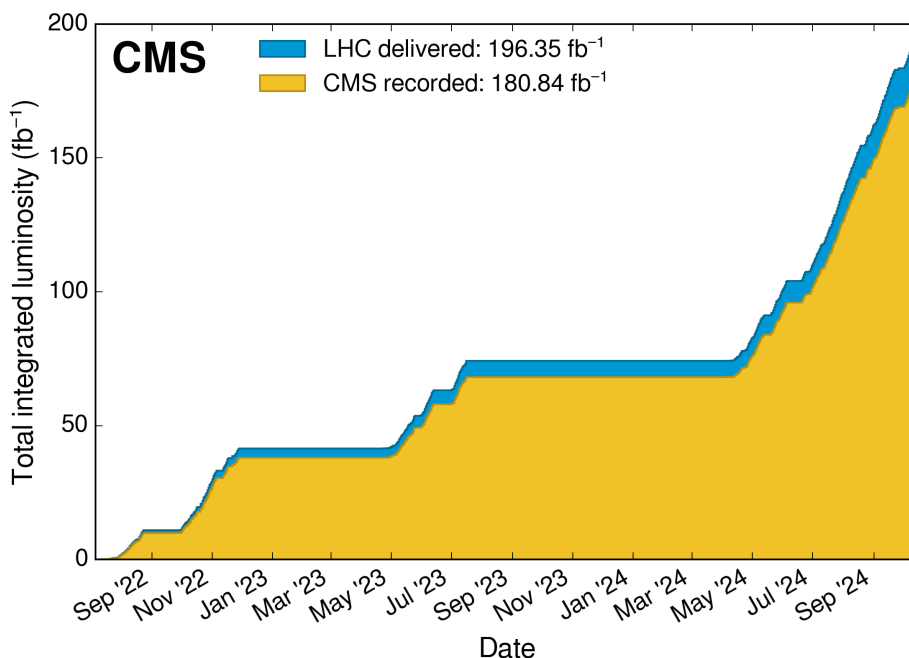


Abbildung 2: Vom LHC während des Run 3 produzierte (blau) und von CMS aufgezeichnete (gelb) kumulierte Datenmenge (Stand Oktober 2024)

Im Jahr 2022 wurde eine Datenmenge von  $38 \text{ fb}^{-1}$  aufgezeichnet. Der Detektorbetrieb verlief weitestgehend störungsfrei. Auswirkungen eines Wasserlecks in der Kühlung des elektromagnetischen Kalorimeters konnten unter Kontrolle gehalten, und anfängliche Engpässe in der Abdeckung der für

den Betrieb nötigen Kontrollraumschichten konnten durch verschiedene organisatorische Maßnahmen gelöst werden. Nach einem gelungenen Start der Datennahme im Jahr 2023 war die aufgezeichnete Datenmenge mit  $30 \text{ fb}^{-1}$  jedoch geringer als geplant, da der LHC-Betrieb mit Proton-Proton-Kollisionen vorzeitig beendet werden musste, um Reparaturarbeiten durchzuführen. Diese waren notwendig, da Spannungsschwankungen im Stromnetz, ausgelöst durch einen umgestürzten Baum, ein Leck im Vakuumsystem des LHC verursacht hatten. Der LHC-Betrieb und die Datennahme im Jahr 2024 verliefen dagegen hervorragend, und es konnten mit der Rekorddatenmenge von  $113 \text{ fb}^{-1}$  mehr Daten als geplant aufgezeichnet werden.

Insgesamt beläuft sich der von CMS aufgezeichnete Run 3-Datensatz damit auf etwa  $180 \text{ fb}^{-1}$  (Stand Oktober 2024). Mit den aufgezeichneten Daten wurden zahlreiche Kalibrierungsarbeiten durchgeführt sowie bereits mehrere Physikergebnisse bei der neuen Schwerpunktsenergie erzielt. So wurde das erste wissenschaftliche Ergebnis des Run 3 (Messung des Produktionswirkungsquerschnittes von Top-Quark-Antiquark-Paaren) von der CMS-Kollaboration und federführend von Wissenschaftler\*innen deutscher Institute veröffentlicht. Insgesamt sind der Start und die laufenden Datennahme des Run 3 für den FSP als großer Erfolg anzusehen.

### **2.3.2 Computing-Infrastruktur: das Grid**

Die Analyse der LHC-Daten ist nur mit einer Computing-Infrastruktur möglich (Worldwide LHC Computing Grid, WLCG), über die die gesammelten Daten an die weltweit verteilten Rechenzentren geliefert, dort prozessiert und gespeichert werden. Hinzu kommen die Generierung, Verteilung und Bereitstellung großer Mengen an simulierten Daten, die ebenfalls einen wesentlichen Bestandteil einer Physikanalyse darstellen. Das seit langem erfolgreiche Konzept des Grid-Computings wurde in den letzten Jahren in Richtung einer Cloud-Infrastruktur weiterentwickelt, um auch zusätzliche, ursprünglich nicht für Anwendungen in der Teilchenphysik gedachte Ressourcen effizient nutzen zu können.

## **2.4 Deutsche Beteiligung am CMS-Experiment**

Im Folgenden wird ein Überblick über die Beteiligung der deutschen Gruppen bzgl. Personal, Betrieb des Detektors, Weiterentwicklung der Detektorsysteme, Computing, Datenanalyse und Service-Arbeit gegeben. Die Einzelheiten finden sich in den Berichten der jeweiligen Gruppen.

### **2.4.1 Personal**

Insgesamt arbeiten 364 Personen (inkl. DESY und CASUS) im ErUM-FSP CMS am CMS-Experiment, wobei die Aufteilung in promovierte Physiker\*innen, Doktorand\*innen, Ingenieur\*innen und andere (Bachelor- und Masterstudent\*innen) der Tabelle 1 entnommen werden kann. Die Tabelle zeigt auch die jeweiligen Anteile des deutschen Personals an ganz CMS. Die Zahlen belegen einen besonders hohen Anteil von Doktorand\*innen in den deutschen Gruppen.

Die für Detektorbetrieb und -wartung nötigen Arbeiten erfordern normalerweise eine Präsenz am CERN. Aber auch für die erfolgreiche Arbeit in anderen Bereichen (Detector Performance, Object Performance, Physikanalyse) und für die Sichtbarkeit in den entsprechenden Arbeitsgruppen ist eine regelmäßige Anwesenheit am CERN von Vorteil.

Etwa ein Dutzend Personen (ohne DESY) sind üblicherweise zum CERN abgeordnet. Dabei profitieren wir sehr davon, dass unsere Institute langfristig am CERN arbeitende Mitarbeiter\*innen haben; deren Aufenthalte werden in der Regel erst durch die entsprechende BMBF-Förderung ermöglicht.

Im Berichtszeitraum war die Reisetätigkeit aufgrund der COVID-19-Pandemie zunächst stark eingeschränkt und die Anwesenheit am CERN musste reduziert werden. Fast alle Arbeitstreffen fanden in diesem Zeitraum online statt, und Arbeiten am Detektor wurden überwiegend von lokal ansässigen CMS-Mitgliedern (auch aus Deutschland) durchgeführt. Auf diese Weise konnten die Arbeiten zur Datenanalyse und Wiederinbetriebnahme des Detektors weitgehend wie geplant durchgeführt werden, wenn auch mit verringerter Effizienz.

	Promovierte Physiker*innen	Doktorand*innen	Andere (größt. Student*innen)	Ingenieur*innen	Summe
<b>CMS gesamt</b>	<b>2068</b>	<b>1167</b>	<b>1542</b>	<b>1234</b>	<b>6011</b>
Universitäten (D)	81	82	61	28	252
DESY	64	25	7	14	110
CASUS	1	1	0	0	2
<b>Deutsche Gruppen</b>	<b>146</b>	<b>108</b>	<b>68</b>	<b>42</b>	<b>364</b>
<b>Anteil (D)</b>	<b>7,1%</b>	<b>9,3%</b>	<b>4,4%</b>	<b>3,4%</b>	<b>6,1%</b>

Tabelle 1: Deutscher Anteil am CMS-Personal (Stand August 2024).

## 2.4.2 Management

Mitglieder der deutschen CMS-Gruppen arbeiten an vielen Stellen und sehr sichtbar im Management der CMS-Kollaboration. Im Berichtszeitraum waren dies unter anderem folgende Positionen:

- **CMS-Management**
  - Deutsche Vertretung CMS Management Board: J. Haller (Stellvertreter: A. Schmidt)
  - Mitglied CMS Management Board: A. Meyer, A.B. Meyer, F. Hartmann, K. Klein
  - Deutsche Vertretung CMS Finance Board: E. Butz, J. Haller, F. Hartmann, I. Melzer-Pellmann
  - Mitglied Spokesperson Advisory Group: K. Klein, I. Melzer-Pellmann
  - Communications Officer: F. Blekman, N. Jafari
  - Diversity Office: I. Melzer-Pellmann
  - Engagement Officer: M. Kasemann
  - Deutsche Vertretung CMS Search Committee: J. Haller
  - Vorsitz Conference Committee: A. Meyer
- **Collaboration Board und zugeordnete Ausschüsse**
  - Vorsitz Collaboration Board: E. Gallo
  - Regional Representative: J. Haller
  - Mitglied Collaboration Board Chair Advisory Committee: M. Kasemann
  - Vorsitz Authorship Committee: K. Hoepfner
  - Vorsitz Career Committee: K. Borras
  - Mitglied Implementation Team on Diversity and Inclusion: F. Blekman, M. Aldaya
  - Mitglied International Committee: M. Kasemann
  - Stellv. Vorsitz Publication Committee: A.B. Meyer
  - Publication Committee Editorial Board SMP: K. Wichmann
  - Publication Committee Editorial Board SUSY: I. Melzer-Pellmann
  - Publication Committee Editorial Board TOP: T. Chwalek
  - Mitglied Schools Committee: A. Grohsjean
  - Mitglied Statistics Committee: O. Behnke, A. Nivamova
  - Mitglied Thesis Advisory Committee: T. Hebbeker, T. Müller
  - Subgroup on Phase-II-Effort Planning for CMS Offline and Computing Co-Chair: M. Klute
- **Subsystem Institution Boards und Ausschüsse**
  - Vorsitz BRIL Institution Board: W. Lohmann
  - Vorsitz Muon DT Institution Board: K. Hoepfner
  - Mitglied Muon Management Board: A. Sharma
  - Vorsitz Tracker Management Board: E. Butz
  - Mitglied Tracker Management Board: L. Feld, U. Husemann
  - Vorsitz Tracker Upgrade Steering Group: E. Butz
  - Mitglied Tracker Upgrade Steering Group: L. Feld, E. Garutti, A. Mussgiller
  - Vorsitz Tracker Editorial Boards: K. Klein, E. Butz

- Mitglied Tracker Finance Board: G. Steinrück, L. Feld, G. Eckerlin
- **Computing**
  - Deutsche Vertretung im CMS Computing Resource Board: G. Quast
  - Mitglied CMS Computing Resource Board: M. Giffels
  - CMS-Vertretung im GridKA Technical Advisory Board: M. Giffels
  - Koordination der deutschen CMS-Computing-Aktivitäten: M. Giffels, J. Lange
- **LHC Cross Section Working Group**
  - Mitglied LHC Higgs Working Group Steering Committee: R. Wolf
  - CMS-Vertretung LHC Top Working Group: M. Aldaya
  - CMS-Vertretung Bereich “Higgs” in der LHC Cross Section Working Group: M. Bonanomi, V. Botta, A. Gottmann
- **Level 1**
  - CMS Upgrade Coordinator: F. Hartmann
  - Tracker Project Manager: E. Butz
  - Tracker Project Manager Deputy: K. Klein
- **Level 2**
  - B tagging and vertexing (BTV) POG convener: S. Mitra, S. Mondal
  - Beyond Two Generations (B2G) PAG convener: A. Hinzmann
  - Deputy electronics coordinator: D. Eliseev
  - DT Run Coordinator: A. Sharma
  - Dynamic Resource Provisioning: C. Wissing
  - Electron/Gamma (EGM) POG convener: S. Mukherjee
  - Generator (GEN) group convener: A. Grohsjean
  - HGCal System Validation group convener: K. Krueger
  - HGCal Scintillators and SiPM Tileboards group convener: F. Sefkow
  - HLT Scouting group convener: K. El Morabit
  - Machine Learning group convener: G. Kasieczka
  - Simulation group convener: S. Bein
  - Strategy for Trigger Evaluation and Monitoring (STEAM) group convener: L. Benato
  - TEDD Coordinator im Tracker Upgrade: A. Mussgiller
  - Tau POG convener: R. Wolf
  - Top quark (TOP) PAG convener: A. Grohsjean, J. Kieseler
  - Tracker DPG convener: P. Connor
  - Tracker Operations Coordinator: E. Butz
  - Tracker Operations & Technical Field Manager: I. Shvetsov
- **Level 3**
  - AlCaDB Convener: S. Consuegra Rodriguez
  - BTV POG B-Tag@HLT subgroup convener: N. Eich, M. Link
  - BTV POG HLT subgroup convener: S. Wuchterl
  - BTV POG Performance/Validation/Commissioning subgroup conveners: J. van der Linden, S. Diekmann, S. Mondal
  - BTV POG Software & Algorithms subgroup convener: M.Y. Lee
  - Development Manager in der PdmV group: S. Kaveh
  - DT Calibration responsible: S. Mukherjee, F. Silva
  - DT VDC/PADC responsible: A. Sharma
  - EXO PAG LLP subgroup convener: L. Benato
  - GEM PPD subgroup convener: S. Zaleski
  - GEM PFA subgroup convener: S. Zaleski
  - HGCal Baseplates subgroup convener: M. Klute
  - Higgs (HIG) PAG H to  $\tau\tau$  subgroup convener: A. Raspigera
  - HIG PAG Higgs to bb subgroup convener: L. Mastrolorenzo
  - HIG PAG Higgs Extended subgroup convener: R. Mankel
  - HIG PAG H to ZZ subgroup convener: M. Bonanomi
  - HIG PAG HWW subgroup convener: N. Trevisani

- HIG PAG MC and Interpretation subgroup convener: R. Wolf
- JetMET (JME) POG Jet Energy Resolution and Correction subgroup convener: A. Malara, D. Savoie
- JME POG MET subgroup convener: B. Maier
- L1 Trigger Phase 2 menu group convener: A. Lobanov
- Monte Carlo (MC) request manager: A. Pozdnyakov, N. Johmari Zulaiha
- MC Physics Comparisons and Generator Tunes group convener: A. Bermudez Martinez
- MC validation convener: A. Grohsjean
- Muon POG Calibration and Commissioning group convener: J. von den Driesch
- $\mu$ TCA Module Management Control: D. Eliseev
- Outer Tracker Hybrids working group convener: K. Klein
- Outer Tracker Sensors working group convener: A. Dierlamm
- Outer Tracker System Tests working group convener: A. Dierlamm
- Inner Tracker Sensor working group convener: G. Steinbrück
- Outer Tracker Module and Mechanics working group convener: A. Mussgiller
- PDF Forum convener: K. Rabbertz
- PPD McM group convener: L. Moureaux
- PPD PdmV/MC group convener: M. Sommerhalder
- SMP PAG Hadronic subgroup convener: P. Connor, K. Rabbertz
- SMP PAG VV subgroup convener: A. Mehta
- Strip Local Reconstruction group convener: R. Walsh
- SUS third-generation convener: D. Perez Adan
- Tau POG ID subgroup convener: A. Cardini
- TOP PAG mass and properties subgroup convener: H. Stadie
- TOP PAG ttX subgroup convener: O. Behnke
- TOP PAG t+X subgroup convener: N. Faltermann
- Tracker Alignment group convener: V. Botta, S. Consuegra Rodriguez
- Tracker Monitoring group convener: M. Lipinski
- Tracker Strip DAQ and Commissioning group convener: E. Butz
- Datenbank für Tracker-Upgrade coordinator: S. Maier
- TRK POG Tracking@HLT subgroup convener: K. Pena
- Upgrade Physics study group (UPSG) SMP subgroup convener: A. B. Meyer
- Workflow Orchestration and Analysis Preservation: M. Rieger

### 2.4.3 Betrieb und Wartung des Detektors

Im Berichtszeitraum waren der Betrieb und die Wartung des CMS-Detektors in der Datennahme des Run 3 eine wesentliche Aufgabe für die Mitglieder des ErUM-FSP CMS. Der Fokus lag hierbei auf zwei wichtigen Komponenten von CMS, für die die deutschen Gruppen langfristige Verantwortung übernommen haben, um deren Funktion und Datenqualität sicherzustellen: dem Spurdetektor, bestehend aus Pixeldetektor und Streifen-Tracker, sowie dem Myonsystem. Wie in den Einzelberichten erläutert, haben sich die deutschen Gruppen im Berichtszeitraum an den Wartungs- und Betriebsarbeiten dieser Detektorsysteme sowie ihrer Wiederinbetriebnahme nach dem LS2 beteiligt. Weiterhin haben wir Schichten als Schichtleiter\*innen, Technical Shifter und On-call-Expert\*innen sowie DAQ-Shifter, Trigger-Shifter und Data Quality Monitoring-Shifter geleistet. Darüber hinaus wurden im Bereich des L1-Triggers Betriebs- und Entwicklungsaufgaben übernommen. Ferner haben wir zunehmende Verantwortung für den Bau des HGCal-Detektors übernommen, auch vor dem Hintergrund der ausfallenden Beiträge russischer und belarussischer Institute. Details können den Einzelberichten entnommen werden.

### 2.4.4 Beteiligung am CMS-Computing

Die in Deutschland bereitgestellte Infrastruktur – das Tier-1-Zentrum GridKa in Karlsruhe und die Tier-2-Ressourcen in Aachen und am DESY – konnten zum gesamten CMS-Computing mit hoher Zuverlässigkeit und internationaler Sichtbarkeit beitragen. Mit der National Analysis Facility (NAF) am DESY,

den national verfügbaren Ressourcen am GridKa sowie den lokalen Rechenclustern an allen beteiligten Universitäten wurden Ressourcen für Endnutzer-Analysen in den deutschen CMS-Gruppen zur Verfügung gestellt.

Seit Oktober 2021 sind die Computing-Projekte der deutschen CMS-Gruppen Teil von eigenen BMBF-Verbänden im Rahmen des Aktionsplans „ErUM-Data“. Es gibt zwei Verbände, „Verbundprojekt 05H2021 – R&D COMPUTING (LHC RUN 3)“ (Sprecher: M. Schumacher (Freiburg)) und „Verbundprojekt 05H2021 – R&D COMPUTING (Föderierte Infrastrukturen, FIDIUM)“ (Sprecher: A Schmidt (RWTH Aachen)). Der Fortschritt in den entsprechenden Computing-Projekten wird im Rahmen dieser Verbände berichtet und ist daher nicht Gegenstand des jetzt vorgelegten Berichts.

## 2.4.5 Datenanalyse und Publikationen

Um die gesammelten Daten erfolgreich analysieren zu können, sind neben dem Computing diverse Arbeitsschritte nötig, die wiederum die Entwicklung und Anwendung spezieller Techniken, Software-Werkzeuge und Algorithmen erfordern. Die Aufgaben lassen sich in drei Gruppen einteilen: Kalibrierung und Alignment der verschiedenen Detektorsysteme, Rekonstruktion und Identifikation physikalischer Objekte, und die Entwicklung übergeordneter Analyse-Werkzeuge. Dieser Klassifizierung folgend wurden innerhalb der CMS-Kollaboration drei verschiedene Arbeitsgruppenebenen eingeführt:

- *Detector Performance Groups (DPG)*: Analyse der Daten einzelner Subdetektoren, um diese bestmöglich zu verstehen und auszuwerten, einschließlich Kalibrierung und Alignment.
- *Physics Object Groups (POG)*: Rekonstruktion und Identifikation einzelner Objekte wie Myonen, Elektronen, Jets oder fehlende Transversalenergie; Nachweis von b- und c-Quark-Jets.
- *Physics Analysis Groups (PAG)*: Analyse der Daten unter teilchenphysikalischen Fragestellungen, z.B. Vermessung der Eigenschaften des Higgs-Bosons.

Die Beteiligungen des ErUM-FSP CMS an den einzelnen Analysegruppen können der Tabelle 2 entnommen werden (gezeigt ist der aktuelle Stand nach einer CMS-weiten teilweisen Umstrukturierung der PAGs). Sie spiegeln die Vielfalt der physikalischen Aktivitäten in den deutschen Gruppen wider. Das Spektrum der Analyseprojekte der FSP-Gruppen reicht von Standardmodell-Präzisionsmessungen wie

<b>DPG</b>	<b>POG</b>	<b>PAG</b>
<b>Tracker</b> AC-IB, DESY, KIT	<b>Tracking</b> DESY, HH	<b>B2G</b> DESY, HH
<b>ECAL</b> AC-III A	<b>b-tag &amp; vertexing</b> AC-III A, DESY, KIT	<b>SMP</b> DESY, HH, KIT
<b>HCAL/HO</b> DESY, KIT	<b>Electron &amp; gamma</b> AC-III A, DESY	<b>TOP</b> AC-IB, AC-III A, DESY, HH, KIT
<b>Muon</b> AC-III A	<b>JetMET</b> AC-III A, DESY, HH, KIT	<b>b-physics</b> DESY
<b>L1 Trigger</b> HH, KIT	<b>Muon</b> AC-III A, DESY, HH, KIT	<b>HIG</b> AC-III A, AC-IB, DESY, KIT, HH
<b>HLT</b> AC-III A, DESY, HH	<b>Tau</b> AC-III A, DESY, KIT	<b>SUS</b> AC-III A, AC-IB, DESY, HH, KIT
<b>BRIL</b> DESY	<b>LUMI</b> DESY	<b>EXO</b> AC-III A, DESY, HH, KIT
	<b>GEN</b> DESY	
<b>Machine Learning</b> AC-III A, DESY, HH		

Tabelle 2: Überblick über die Beteiligung der deutschen Gruppen an den CMS-Arbeitsgruppen in den Bereichen Detector Performance (DPG), Physics Objects (POG), und Physik-Analyse (PAG).

Top-Quark-Massen-Bestimmung und Wirkungsquerschnittsmessung der (Einzel-)Top-Quark-Produktion über die Suche nach seltenen Prozessen mit zwei Higgs-Bosonen und Studien zur Kopplung von Higgs-Boson und Top-Quark sowie der Higgs-Boson-Selbstkopplung bis hin zu Suchen nach Hinweisen auf neue Physik jenseits des Standardmodells. Für letztere sind vor allem die Suchen nach supersymmetrischen Teilchen, nach schweren Higgs-Bosonen, nach exotischen Bosonen, sowie nach Kandidaten für Dunkle Materie zu nennen. Die verschiedenen Analyseprojekte der individuellen FSP-Gruppen sind im Detail in den Einzelberichten beschrieben.

In allen genannten Gebieten wurden wichtige neue Ergebnisse erzielt und veröffentlicht. Eine Liste aller CMS-Publikationen findet sich unter [http://cds.cern.ch/search?cc=CMS&action\\_search=Search&c+CMS+Papers](http://cds.cern.ch/search?cc=CMS&action_search=Search&c+CMS+Papers).

#### **2.4.6 Service-Arbeit**

Das Memorandum of Agreement (CMS-MoA-2008-001) verpflichtet jede\*n CMS-Autor\*in, sich an Service-Arbeiten zu beteiligen. Jede\*r Autor\*in muss im Mittel vier Monate Service-Arbeit im Rahmen des CMS-EPR-Systems (Experimental Physics Responsibilities) leisten. Um CMS-Autor\*in zu werden, müssen neue Kollaborationsmitglieder, insbesondere Doktorand\*innen, zunächst einmalig sechs Monate Service-Arbeit durchführen (nach Erhalt der Autorenschaft muss die zugehörige Arbeitsgruppe dann zusätzlich bis zu vier Monate Service-Arbeit leisten, wobei die exakte Anzahl davon abhängt, wann im laufenden Jahr die Autorenschaft erteilt wurde). Außerdem sind Schichten zu leisten, was im Berichtszeitraum mit der Run 3-Datennahme eine herausragende Bedeutung für den Betrieb von CMS hatte. Für die meisten Schichten ist eine Anwesenheit am CERN unerlässlich. Eine besondere Bedeutung hat darüber hinaus das in Hamburg neu eingerichtete „CMS Remote Operating Center“, welches es ermöglicht, Schichten zur Prüfung der CMS-Datenqualität durchzuführen, ohne vor Ort am CERN zu sein. Während der Reiseeinschränkungen durch die COVID-19-Pandemie zu Beginn des Berichtszeitraums konnten einige Schichten ebenfalls von den jeweiligen Heimatinstituten aus online durchgeführt werden, um den CMS-Betrieb zu gewährleisten. Die deutschen CMS-Gruppen leisten ihre Service-Arbeit in diversen Bereichen, wie im Folgenden kurz beschrieben. Details zu den konkreten Service-Arbeiten der einzelnen Gruppen können den Einzelberichten entnommen werden.

Manche Rollen in der Koordination werden als Service-Arbeit anerkannt. Dies gilt für Run Coordination, für DPGs und POGs, für Editorial Boards, sowie für diverse Ausschüsse: Conference Committee, Authorship Committee, Statistics Committee, School Committee.

Im Bereich Detektorbetrieb und DPG lagen die Schwerpunkte beim Pixeldetektor (Rekonstruktion und Monitoring, Alignment), dem Streifen-Tracker (Detektor-Kontrollsystem, Betriebskoordination, Data Quality Monitoring, Alignment, Tracking), dem Drift-Tube-Muon-System (Kalibrierung, Arbeit in der GIF++, Technical Coordination) sowie dem Triggersystem (Entwicklung, Monitoring, Koordination). Die Institute beteiligten sich ferner an zentralen Schichten, an Detector-on-call (DOC)-Schichten sowie als „on call“-Experten.

Wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, sind die deutschen Gruppen in sämtlichen POGs beteiligt. Die Aktivitäten beinhalten u.a. Beiträge zur Tau-Identifikation und -Kalibrierung, Kalibrierung von b-tag-Algorithmen, Messung der Jetenergieauflösung sowie Entwicklung von Methoden zur Pileup-Unterdrückung.

Zusätzlich zu den EPR-Arbeiten beteiligten sich die deutschen CMS-Gruppen an der Qualitätskontrolle der CMS-Publikationen im Rahmen von Institutional Reviews und Analysis Review Committees.

#### **2.4.7 Auszeichnungen von Mitgliedern des ErUM-FSP CMS**

Die herausragende Qualität der im ErUM-FSP CMS geleisteten Arbeit spiegelt sich auch in der Auszeichnung einer großen Zahl unserer Wissenschaftler\*innen durch die CMS-Kollaboration wider. Im Berichtszeitraum wurden H. Aarup Petersen, F. Blekman, S. Consuegra Rodríguez, A. Lintuluoto, S. Mukherjee, Y. Otari, K. J. Pena Rodriguez, W. Redjeb, F. Rehm, M. Reinecke, H. Reithler, J. Rübenach, A. Sharma, J. L. Spah und L. Stockmeier mit dem „CMS Award“ sowie B. Maier mit dem „Young Researcher Prize“ ausgezeichnet. Ferner wurden die Doktorarbeiten von M. Bonanomi, D. Walter und S. Mondal mit dem CMS Thesis Award ausgezeichnet.

## 2.5 Theorie im ErUM-FSP CMS

Die Theoriegruppen im ErUM-FSP CMS führen Berechnungen und Analysen durch, die für die Auswertung und Interpretation der LHC-Daten erforderlich sind. Bei einer Reihe von Analysen findet eine unmittelbare Zusammenarbeit zwischen den experimentellen und theoretischen Gruppen im FSP statt. Eine Übersicht über das umfangreiche Physikprogramm der Theorie-Gruppen im ErUM-FSP CMS ist in Tabelle 3 aufgeführt; ausführlichere Beschreibungen der Projekte finden sich in den Einzelberichten.

Standort	Gruppenleiter*innen	Themen
Aachen	Czakon, Michael; Worek, Malgorzata	Realistische Beschreibung von Top-Quark-Zerfällen bei phänomenologischen Anwendungen am LHC
	Harlander, Robert	Konsistente Vorhersage von Higgs-Wirkungsquerschnitten in BSM-Modellen und effektiven Theorien
Hamburg	Moch, Sven	Präzisionsbestimmung von Partondichtefunktionen und Top-Quark-Masse
Karlsruhe	Gieseke, Stefan	Entwicklung von Herwig
	Heinrich, Gudrun	Schnelle Simulationen mit NNLO-Genauigkeit
	Mühlleitner, Margarete	Higgspaar-Signaturen und Observablen jenseits des Standardmodells

*Tabelle 3: Übersicht über die im Berichtszeitraum durchgeführten Theorieprojekte an den einzelnen Standorten. Die genannten Themen repräsentieren wichtige Forschungsschwerpunkte. Die Tabelle bildet die Arbeit der Theoriegruppen nicht notwendigerweise vollständig ab.*

## 2.6 Vernetzung und Koordination im ErUM-FSP CMS

Die Mitglieder des ErUM-FSP CMS treffen sich einmal im Jahr zu einem Jahrestreffen, auf dem die Ergebnisse ausgetauscht und die weiteren Arbeiten koordiniert werden. Im Berichtszeitraum fanden drei solche Treffen statt:

- 22.—24.09.2021 online, mit 164 Teilnehmer\*innen und 105 Vorträgen
- 28.—30.09.2022 in Aachen, mit 198 Teilnehmer\*innen und 118 Vorträgen
- 04.—06.10.2023 am DESY, mit 176 Teilnehmer\*innen und 95 Vorträgen

Die Jahrestreffen bieten den Student\*innen und Doktorand\*innen die Gelegenheit, ihre Arbeit in den Bereichen Top-Quark-Physik, Higgs-Physik, Standardmodell und QCD, Physik jenseits des Standardmodells, Computing und moderne Analysemethoden, sowie Detektorentwicklung und -kalibrierung in zahlreichen Parallelsitzungen vorzustellen. In Plenarvorträgen wird über übergreifend wichtige Themen berichtet. Ergänzt wird das Programm um einige Vorträge jenseits der Fachwissenschaft, zum Beispiel aus anderen Wissenschaftsgebieten oder zur Karriereplanung von Nachwuchswissenschaftler\*innen. Alle drei Jahrestreffen verliefen sehr erfolgreich und trugen viel zur Vernetzung und Koordination bei.



*Abbildung 3: Gruppenfoto der FSP-Mitglieder während des Jahrestreffens am DESY, Hamburg, 4.—6.10.2023.*

Als neue Maßnahme zur weiteren Verbesserung der Vernetzung der Gruppen untereinander, insbesondere des Nachwuchses, und zur wissenschaftlichen Aus- und Weiterbildung startete in dieser Förderperiode ein monatliches ErUM-FSP-Kolloquium. Im Kolloquium werden in einem Online-Vortrag neueste wissenschaftliche und methodische Ergebnisse aus den beteiligten Gruppen von Nachwuchswissenschaftler\*innen präsentiert und dann diskutiert. Mit regelmäßig zwischen 40 und 60 teilnehmenden Wissenschaftler\*innen aus dem FSP erwies sich das Programm als sehr erfolgreich. Im Berichtszeitraum fanden FSP-Kolloquien zu den folgenden Themen statt:

- **Higgs-Physik:** 10 Jahre Entdeckung des Higgs-Bosons, Suche nach Zwei-Higgs-Produktion, Zerfall des Higgs-Bosons in Tau-Leptonen, Zerfall des Higgs-Bosons in Charm-Quarks, Top-Quark-assoziierte Higgs-Boson-Produktion, Suche nach leichten Higgs-Bosonen
- **Top-Physik:** Messung des Top-Quark-Antiquark-Wirkungsquerschnitts mit Run 3-Daten (erstes LHC-Physikresultat mit Run 3-Daten), Top-Quark-Massenmessung, Messung des tt+b-Jets Produktionswirkungsquerschnitts
- **Schwerionenphysik:** Photon-Photon-Streuung, Suche nach ALPS
- **Detektorbetrieb und -upgrade sowie Objektkalibrierung:** Luminositätsmessung, Alignment des Spurdetektors, Elektronrekonstruktion, Myonrekonstruktion, Upgrade des Spurdetektors, HGAL-Entwicklung und -Bau
- **Datenanalysemethoden:** Regewichtung von MC-Ereignissen mit Techniken des maschinellen Lernens
- **Computing:** Computing in CMS Deutschland, Pläne für die Zukunft

Etwa einmal im Monat (und nach Bedarf) fand ein virtuelles Treffen der Gruppenleiter\*innen statt, um Fragen von generellem Interesse zu diskutieren und die Kooperation zu verbessern. Diese Treffen sind im Indico-System von CMS dokumentiert. E-Mail-Listen dienen der Vernetzung unter den FSP-Mitgliedern. Weitere Details zu Maßnahmen zur Vernetzung und zur Koordination des ErUM-FSP CMS werden im separaten Bericht zum FSP-Projekt der Universität Hamburg ausgeführt.

Der FSP-Sprecher vertrat als „Regional Representative“ die deutschen Interessen im CMS Management Board, im CMS Finance Board und im CMS Selection Committee. Darüber hinaus fungierte der FSP-Sprecher als Ansprechpartner für das BMBF, den Projektträger, sowie für die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) und das Komitee für Elementarteilchenphysik (KET).

Die deutschen CMS-Gruppen arbeiten inhaltlich in vielfältiger Weise zusammen, um die Expertise zu bündeln und die Sichtbarkeit zu erhöhen. Beispielhaft erwähnt seien hier aus dem Bereich „Datenanalyse“ die Zusammenarbeit von Gruppen der RWTH Aachen, des KIT und der Universität Hamburg an der Suche nach Zwei-Higgs-Produktion sowie die Zusammenarbeit von Gruppen der RWTH Aachen, des KIT, der Universität Hamburg und des DESY an einer Messung von ttH-Produktion mit  $H \rightarrow b\bar{b}$ . Im Bereich „Service und Kalibrierung“ gab es beispielsweise Zusammenarbeit zwischen der RWTH Aachen und DESY im Bereich Tracker-Alignment. Für die Beschreibung weiterer Kollaborationsprojekte wird auf die Einzelberichte verwiesen.

## 2.7 Öffentlichkeitsarbeit im ErUM-FSP CMS

Wichtige Teile der Öffentlichkeitsarbeit des ErUM-FSP CMS werden vom gemeinsamen LHC-ErUM-FSP-Büro übernommen. Diese sind weiter unten dargestellt. Darüber hinaus engagieren sich die deutschen CMS-Gruppen in vielfältiger Weise in der Öffentlichkeitsarbeit. Im Berichtszeitraum wurden u.a. folgende Aktivitäten durchgeführt:

- Diverse Veranstaltungen zum Thema „10 Jahre Higgs“ (alle Standorte)
- Durchführung von lokalen CMS-Masterclasses (zu Zeiten von Kontaktbeschränkungen zunächst auch online, Aachen IIB, KIT, Universität Hamburg);
- Unterstützung der mobilen Ausstellung „Urknall unterwegs“ vom Netzwerk Teilchenwelt (Aachen, Universität Hamburg)
- Teilnahme an der Veranstaltung „I’m a Scientist“ von „Wissenschaft im Dialog“, bei der Schüler\*innen mit Wissenschaftler\*innen live chatten können (Universität Hamburg)

- Führungen und Vorträge als Rahmenprogramm zur Ausstellung „Wie alles begann“ im Museum der Arbeit in Hamburg (Universität Hamburg)
- Projektangebote für die „Physik-Projektstage“ für Schüler\*innen (Universität Hamburg)
- Ausstellung „Code des Universums“ und umfangreiches Rahmenprogramm mit Afternoon Science, Podiumsdiskussionen, Vorträgen und Masterclasses (KIT)
- Öffentliche Vorträge beim Wissenschaftsfestival EFFEKTE im TRIANGEL Open Space sowie in der Reihe „Unser Universum“ im Naturkundemuseum Karlsruhe (KIT)
- Science&Art@School in Karlsruhe: Interdisziplinäre Verbindung von Kunst und Wissenschaft für Schüler\*innen (KIT)

Außerdem wurde der Webauftritt des FSP gepflegt, der es der interessierten Öffentlichkeit ermöglicht, sich über die Aktivitäten des FSP zu informieren. Regelmäßig wurden neue Meldungen aus dem FSP eingestellt. Im Berichtszeitraum wurde dabei die urspr. FSP-Webseite in die neue, durch das LHC-ErUM-FSP-Büro entwickelte Webseite aller ErUM-FSP ([lhc-deutschland.de](http://lhc-deutschland.de)) integriert.

Im Rahmen der Jahrestreffen 2021 und 2022 wurden Fotowettbewerbe durchgeführt, bei denen Fotos eingereicht werden konnten, die die Arbeiten in der CMS-Kollaboration darstellen. Es wurden jeweils diverse Fotos eingereicht, und die ersten drei Plätze mittels einer Wahl durch die Mitglieder des ErUM-FSP CMS entschieden. Die Gewinner\*innen wurden mit einem hochwertigen Druck ihrer Fotos prämiert. Alle Fotos sind auf der FSP-Webseite ausgestellt und können für PR-Zwecke verwendet werden.

## 2.8 Bericht des LHC ErUM-FSP Büros

Eine wichtige Aufgabe der ErUM-FSPs ist es, mit Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit, des Wissens- bzw. Technologietransfers und der Nachwuchsarbeit nachhaltig in Gesellschaft und Wirtschaft hineinzuwirken. Bei vielen der notwendigen Maßnahmen können auf Grund der thematischen Nähe der vier ErUM-FSPs am LHC (ALICE, ATLAS, CMS und LHCb) Synergien genutzt und die Aufgaben gemeinsam effizienter und effektiver umgesetzt werden. Aus diesem Grund wurde im Jahre 2020 das gemeinsame LHC-ErUM-FSP Büro eingerichtet. Das Büro hat seinen Standort am DESY in Hamburg und ist dort an die DESY-Infrastruktur angebunden. Einmal im Monat treffen sich die Mitarbeitenden des LHC-ErUM-FSP-Büros mit den Sprechern und Sprecherinnen der vier ErUM-FSPs, diskutieren den Fortschritt in den oben genannten Arbeitsbereichen und entscheiden über die nächsten Schritte. Im Folgenden werden die im Berichtszeitraum umgesetzten Maßnahmen in den einzelnen Aufgabengebieten zusammenfassend vorgestellt.

### Aufgabengebiet A: Öffentlichkeitsarbeit

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit wurden im Berichtszeitraum große Fortschritte erzielt. Besonders hervorzuheben sind folgende Aspekte:

- Im Berichtszeitraum hat sich das LHC-Büro mit wichtigen anderen Akteuren im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit für die Teilchenphysik (CERN PR, DESY PR, Netzwerk Teilchenwelt, PR-Aktivitäten anderer Projekte) vernetzt und hat sich national und international als wichtiger Player auf diesem Arbeitsgebiet etabliert.
- Eine 36-seitige Imagebroschüre zur Außendarstellung und zur Etablierung der Marke ‚LHC-ErUM-FSP‘ wurde veröffentlicht, gedruckt und an zahlreiche Vertreter\*innen aus Politik und Wissenschaft sowie auch an die allgemeine Öffentlichkeit verteilt.
- Der im gleichen Corporate Design entwickelte gemeinsame Webauftritt der ErUM-FSPs wurde fertiggestellt und ging online. Auf der gemeinsamen Webseite ([lhc-deutschland.de](http://lhc-deutschland.de)) und entsprechenden Unterseiten werden die FSPs vorgestellt und aktuelle Inhalte und interessanten Neuigkeiten aus den vier FSPs und aus der deutschen Teilchenphysik eingepflegt. Auch die Karrieremöglichkeiten am CERN werden umfassend präsentiert.
- Aus Anlass des im Jahre 2022 von der internationalen Teilchenphysik-Gemeinschaft gefeierten 10-jährigen Jubiläums der Higgs-Entdeckung hat das LHC-Büro die öffentlichen Events an 15

Standorten in Deutschland koordiniert und unterstützt, z.B. mit Werbemitteln und einer zentralen Landingpage ([higgs10.de](https://higgs10.de)). Auch das zentrale Event zur Feier des 70-jährigen Bestehens des CERN (CERN70) in Berlin wurde vom LHC-Büro mit vorbereitet.

- In Zusammenarbeit mit einer professionellen Agentur wurde im Rahmen des Wissenschaftsjahres 2023 die Augmented Reality App ‚Das Teilchenuniversum‘ für Smartphones und Tablets entwickelt. Die App wurde im Rahmen der CERN70-Veranstaltung im Oktober 2024 im Futurium in Berlin der Öffentlichkeit vorgestellt. Die weitere Entwicklung und Pflege der App, inkl. der entsprechenden Werbemaßnahmen z.B. an Schulen und Museen, wird in Zukunft im LHC-Büro verortet sein.

Außerdem hat das LHC-Büro eine Vielzahl von Werbematerialien erstellt (Sticker, Kugelschreiber, Juicebeutel, etc), Roll-Ups für Veranstaltungen an den FSP-Standorten entwickelt und bereitgestellt und war auf verschiedenen Tagungen mit einem eigenen Infostand präsent.

### **Aufgabengebiet B: Wissens- und Technologie-Transfer**

In diesem Aufgabengebiet war das LHC-Büro vor allem in zwei Bereichen aktiv:

- Industriemessen: Mit dem Abklingen der Pandemie war es im Berichtszeitraum erstmals möglich, die geplanten Auftritte auf Industriemessen umzusetzen und den in der letzten Förderperiode entwickelten professionellen Messestand zu nutzen. Das LHC-Büro war auf der Hannover-Messe 2023 und 2024 (gemeinsam mit dem ErUM-Data-Hub und dem ErUM-FSP Belle II) und der ISC High Performance Messe in Hamburg 2023 (gemeinsam mit FIDIUM und PUNCH4NFDI) präsent. Der Stand erzeugte jeweils große Sichtbarkeit bei einem technisch interessierten Publikum und sorgte für viele Gespräche mit Industrie-Vertretern. Mitglieder der FSPs stellten die Forschungs- und Entwicklungsarbeit an den Instituten vor. Gleichzeitig ermöglichte dies den Nachwuchswissenschaftler\*innen, die Stände der Industrie zu besuchen und einen Einblick in die Arbeit dort zu bekommen.
- Alumni-Veranstaltungen: Das LHC-Büro hat im Berichtszeitraum verschiedene Veranstaltungen organisiert, in denen ehemalige Mitglieder der LHC-ErUM-FSPs, die inzwischen in der Wirtschaft oder anderen Bereichen außerhalb der Wissenschaft arbeiten, über ihren beruflichen Werdegang berichten und für weitere Diskussionen zur Verfügung stehen. Diese Veranstaltungen finden regelmäßig als Teil von FSP-Jahrestreffen statt und erfreuen sich vor allem beim wissenschaftlichen Nachwuchs einer großen Beliebtheit.

### **Aufgabengebiet C: Nachwuchsgewinnung und Qualifizierung**

Ein wichtiges Aktionsfeld des LHC-Büros in diesem Bereich ist die Durchführung von Coaching-Workshops für den wissenschaftlichen Nachwuchs der vier LHC-ErUM-FSPs. Im Berichtszeitraum hat das Büro zwei 1,5-tägige Workshops mit professionellen Trainern zu den Themen ‚Leadership‘ und ‚Wissenschaftskommunikation‘ durchgeführt. Diese Workshops erfreuten sich so großer Beliebtheit (29 Teilnehmende), dass für den Herbst 2024 ein offener ‚Soft-Skill-Herbst‘ vorbereitet wurde, auf dem die Themen Wissenschaftskommunikation, Leadership, Rhetorik, Scientific Project Management und Digitales Präsentieren auf dem Programm stehen werden.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Universität Hamburg  
Projektleitung: Prof. Dr. Johannes Haller  
Verbund: 05H2021—Run 3 von CMS am LHC  
Thema: Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment

## Zusammenfassung

Das Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg beteiligt sich seit etwa 20 Jahren am CMS-Experiment. Die beteiligten Arbeitsgruppen (AG) haben sich dabei in vielen Bereichen des Experiments führend engagiert. Die Beiträge im Berichtszeitraum werden im Folgenden beschrieben.

### Arbeitsgruppen

Die CMS-AG der Universität Hamburg bestehen derzeit aus ca. 80 Mitgliedern, darunter:

- Prof. E. Garutti, Prof. J. Haller, Prof. G. Kasieczka, Prof. K. Nikolopoulos, Prof. P. Schleper,
- 19 weitere promovierte Wissenschaftler\*innen, darunter 5 finanziert vom BMBF,
- 29 Promovierende, darunter 12 finanziert vom BMBF, und
- 15 Master- und 5–10 Bachelor-Studierende je Semester

sowie Ingenieur\*innen und Techniker\*innen. Prof. Nikolopoulos trat im Berichtszeitraum eine W3-Professur an der Universität Hamburg an und wird mit seiner Expertise in der Higgs-Physik die Aktivitäten der CMS-AG weiter ausbauen.

### Verantwortung und Koordination im CMS-Experiment

Das Engagement der AG der Universität Hamburg im CMS-Experiment zeigt sich auch in den Koordinationsaufgaben unserer Wissenschaftler\*innen in der Kollaboration. In praktisch allen Bereichen, in denen wir aktiv sind, ist es uns gelungen, auch nach außen sichtbar leitende Rollen zu übernehmen. Wissenschaftler\*innen der AG hatten im Berichtszeitraum folgende Koordinatorenposten inne:

#### Koordination in den Bereichen „Detektorbetrieb und Datennahme“:

- L. Benato: Koordinatorin der *Trigger Evaluation and Monitoring*-Gruppe (Level 2), 2020–2022
- P. Connor: Koordinator der *Tracker Detector Performance*-Gruppe (Level 2), 2021–2023
- P. Connor: Koordinator der *Tracker Alignment*-Gruppe (Level 3), 2018–2021
- K. El Morabit: Koordinator der *HLT Scouting*-Gruppe (Level 2), seit 2022
- A. Lobanov: Koordinator der *L1 Trigger Phase 2 Menu*-Gruppe (Level 3), seit 2022
- J. Lange: DQM Remote Operation Center Manager, seit 2023
- J. Lange: Koordinator der deutschen CMS-Computing-Aktivitäten, seit 2022
- G. Steinbrück: Koordinator der *Pixel Sensor*-Gruppe (Level 3), seit 2016

#### Koordination in den Bereichen „Computing“ und „Maschinelles Lernen“:

- S. Bein: Koordinator der *Simulation*-Gruppe (Level 2), seit 2019

- G. Kasieczka: Koordinator der *Machine Learning*-Gruppe (Level 2), 2020–2022
- M. Rieger: Koordinator der *Machine Learning Production*-Gruppe (Level 3), 2020–2022
- M. Rieger: Koordinator der Common Analysis Tools (CAT) subgroup *Workflow Orchestration and Analysis Preservation*-Gruppe (Level 3), seit 2023

#### **Koordinatino von “CMS Physics Object-Groups” (POG):**

- A. Malara: Koordinator der *Jet Energy Resolution and Correction*-Gruppe (Level 3), 2021–2023
- L. Moureaux: Koordinator der *PdmV/Development Gruppe*-Gruppe (Level 3), 2022–2024
- K. Pena: Koordinatorin der *Tracking@HLT*-Gruppe (Level 3), 2021–2023
- D. Savoju: Koordinator der *Jet Energy Resolution and Correction*-Gruppe (Level 3), seit 2023
- M. Sommerhalder: Koordinator der *PPD PdmV/MC*-Gruppe (Level 3), 2022–2024

#### **Koordination von “CMS Physics Analysis-Groups” (PAG):**

- L. Benato: Koordinatorin der *EXO-LLP*-Gruppe (Level 3), seit 2023
- M. Bonanomi: Koordinator der *HIG-HZZ*-Gruppe (Level 3), 2023–2024
- P. Connor: Koordinator der *SMP-Had*-Gruppe (Level 3), seit 2023
- A. Grohsjean: Koordinator der *TOP*-Gruppe (Level 2), seit 2023
- A. Hinzmann: Koordinator der *B2G*-Gruppe (Level 2), 2021–2022
- A. Mehta: Koordinator der *SMP-VV*-Gruppe (Level 3), seit 2022
- A. Grohsjean: Koordinator des *EFT Forum*, seit 2022
- H. Stadie: Koordinator der *TOP mass and properties*-Gruppe (Level 3), seit 2023

#### **Arbeitsschwerpunkte**

Unsere AG haben sich im Berichtszeitraum insbesondere in folgenden Arbeitsbereichen zum Betrieb des Detektors sowie der Entwicklung und Verbesserung von Technologien und Methoden zur Datenanalyse führend engagiert:

- Gewährleistung des allgemeinen Betriebs des CMS-Experiments durch Detektorschichten,
- Betrieb des Trigger-Systems, u.a. durch Entwicklung und Validierung der verwendeten Algorithmen sowie Verbesserung von Systemen zur Überwachung der Datenqualität,
- Verbesserung des automatischen Überwachungssystems des Pixeldetektors,
- Entwicklung neuer, auf Methoden des maschinellen Lernens basierender Trigger-Algorithmen,
- Entwicklung und Nutzung von Verfahren des maschinellen Lernens zur Datenanalyse sowie
- Rekonstruktion und Kalibration von Jets.

Darüber hinaus haben wir durch die Analyse der Run 2-Daten wichtige Ergebnisse in den Bereichen

- Physik des Top-Quarks,
- Physik des Higgs-Bosons sowie
- Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

erzielt, und waren jeweils führend an zahlreichen Publikationen beteiligt. Unsere Tätigkeiten sind dabei eng verzahnt und weisen an vielen Stellen erhebliche Synergieeffekte auf, bspw. zwischen der Jetrekonstruktion und -kalibration und den Präzisionsmessungen der Top-Quark-Masse. In allen Arbeitsfeldern haben wir ferner stets eine enge Kollaboration mit den anderen deutschen CMS-Gruppen, insbesondere auch mit DESY, innerhalb des ErUM-FSP CMS sowie mit internationalen Institutionen gepflegt.

# Bericht

## 1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die wissenschaftlichen Ziele des CMS-Experiments und der deutschen Gruppen sind ausführlich im gemeinsamen Vorspann dieses Berichts dargestellt.

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt knüpft wissenschaftlich an Ergebnisse von anderen Beschleunigerexperimenten wie die am Fermilab oder am DESY an, sowie an Ergebnisse der ATLAS- und CMS-Experimente am CERN, die in der vorangegangenen Förderperiode erreicht wurden.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Planung und Ablauf des Projekts sind eingebunden in den im gemeinsamen Vorspann dargestellten Gesamtplan des CMS-Projekts und die Datennahmeperioden des LHC. Da das Projekt eine Weiterführung der bereits in der vorherigen Förderperiode begonnenen Arbeiten darstellt, sind die Planung und der Ablauf der einzelnen Arbeiten ein kontinuierlicher Prozess.

Im Rahmen der internationalen CMS-Kollaboration arbeitet das Institut für Experimentalphysik mit ca. 200 Instituten aus 57 Ländern zusammen. Das Institut ist Teil des ErUM-FSPs CMS und arbeitet dort mit den beteiligten deutschen Instituten intensiv zusammen. Die Arbeitsteilung und Zusammenarbeit mit den deutschen Gruppen innerhalb des ErUM-FSPs sind im gemeinsamen Vorspann dieses Berichts dargestellt. Insbesondere war Prof. J. Haller im Berichtszeitraum zudem Sprecher des ErUM-FSPs. Das Institut für Experimentalphysik profitiert darüber hinaus in erheblichem Maße vom exzellenten wissenschaftlichen Umfeld für Teilchenphysik auf dem Campus in Hamburg-Bahrenfeld, auf dem sich neben DESY eine Vielzahl von Instituten der Universität Hamburg befindet. Dabei sind insbesondere das Exzellenzcluster „Quantum Universe“ an der Universität Hamburg und die strategische Partnerschaft „PIER Partnership for Innovation, Education and Research“ mit DESY hervorzuheben, an denen die CMS-AG vielfach federführend beteiligt sind.

## 4 Verwendung der Zuwendung

Die Mittel wurden entsprechend der Zuwendung ordnungsgemäß ausgegeben.

## 5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Die in den verschiedenen Arbeitsbereichen erzielten Ergebnisse werden im folgenden kurz dargestellt. Die vereinbarten Ziele konnten in jedem der Arbeitsbereich erreicht werden.

### 5.1 Detektorbetrieb

Wir haben im Berichtszeitraum zentrale Arbeiten zum Betrieb des CMS-Detektors geleistet, die dazu beigetragen haben, dass der Start des Run 3 und die nachfolgende Datennahme erfolgreich und mit hoher Effizienz verliefen. Wissenschaftler\*innen unserer AG hatten dabei, wie oben dargestellt, wichtige Koordinatorenposten in den Bereichen Trigger und Spurrekonstruktion inne.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag im Bereich des Trigger-Systems. Hier haben wir Verbesserungen im zentralen System zur Überwachung der Triggerraten und der Datenqualität implementiert und zur Validierung der bei der Datennahme verwendeten Trigger-Algorithmen beigetragen [PhDa, PhDb] sowie neue Methoden zur Messung von Trigger-Effizienzen entwickelt [PhDj]. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten lag im Bereich des Pixeldetektors, wo wir durch die Wartung und ständige Weiterentwicklung

eines automatisierten Überwachungssystems des Pixeldetektors zentrale Beiträge zum Betrieb geleistet haben [Kut23, Nis23, PhDh]. Außerdem haben wir an der Charakterisierung und Modellierung von Strahlungsschäden in den Silizium-Halbleiterdetektoren gearbeitet [Zoi21].

Darüber hinaus haben wir zur Gewährleistung der Run 3-Datennahme Trigger- und Datennahmeschichten geleistet. Eine besondere Bedeutung hat hierbei das 2023 von uns zusammen mit DESY eingerichtete „CMS Remote Operating Center“ (ROC) in Hamburg, von dem aus Schichten durchgeführt werden können, ohne vor Ort am CERN zu sein, was zu erheblichen Ressourceneinsparungen bei Dienstreisen führt.

## 5.2 Entwicklung auf neuronalen Netzen basierender Trigger

Wir haben die geplanten Entwicklungsarbeiten für auf neuronalen Netzen (NN) basierende Trigger-Algorithmen für die erste Trigger-Stufe (L1 Trigger) von CMS für Run 3 und den HL-LHC erfolgreich durchgeführt. Die Trigger zielen sowohl auf hochinteressante Prozesse der Higgs-Physik ab als auch auf ungewöhnliche Signaturen von möglichen Prozessen unbekannter neuer Physik. Die Studien waren dabei eng verzahnt mit den oben beschriebenen Aktivitäten zum Trigger im laufenden Betrieb des CMS-Detektors.

Im Berichtszeitraum haben wir Vorstudien erfolgreich abgeschlossen, in denen erste NN entwickelt wurden, die mit Hilfe der reduzierten L1-Objektinformation arbeiten und Effizienzsteigerungen gegenüber konventionellen Triggermethoden bei der Identifikation von Zwei-Higgs-Ereignissen erzielen [Kom22, Rin22, Kle22]. Gleichzeitig lassen sich diese NN auf der für den L1-Trigger vorgesehenen speziellen Hardware (FPGA) ausführen und genügen dessen stark beschränkten Ressourcen bzgl. Rechenleistung und Ausführungszeit. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurde begonnen, die Nutzung der Trigger in einer Suche nach Zwei-Higgs-Produktion zu erproben [PhDj] sowie die Entwicklung NN-basierter Triggeralgorithmen auf weitere Higgs-Prozesse [Sep23, Fre23] und auf modellunabhängige Anomaliesuchen [PhDa, Emm23] auszuweiten. Die entwickelten Algorithmen wurden ferner erstmalig während der Datennahme im laufenden Detektorbetrieb auf FPGA getestet und haben dabei hervorragend funktioniert [PhDj].

Im Kontext dieser Studien haben wir ferner Entwicklungsarbeiten an Programmbibliotheken für das Design zukünftiger Triggeralgorithmen geleistet und vorgesehene Algorithmen getestet [PhDd].

## 5.3 Rekonstruktion und Kalibration von Jets

Unsere AG ist innerhalb von CMS seit langem für zentrale Aufgaben im Bereich der Rekonstruktion und Kalibration von Jets verantwortlich, insbesondere für die Messung der Jetenergieauflösung (JER) sowie für die Optimierung von Verfahren zur Identifikation von geboosteten Top-Quarks (Top Tagging). Wir haben diese Arbeiten im Berichtszeitraum planmäßig fortgeführt. Wissenschaftler unserer AG waren außerdem über den gesamten Zeitraum als Koordinatoren für die Organisation der CMS-weiten Aktivitäten im Bereich Jetenergiekalibration verantwortlich.

Wir haben verschiedene Studien zum verbesserten Verständnis der JER-Unsicherheiten durchgeführt und darauf aufbauend u.a. hochpräzise JER-Messungen für den Run 2-Datensatz erzielt [CMS21a, Mal21, Paa24]. Die Ergebnisse wurden für die finale Rekonstruktion aller Run 2-Daten verwendet und sind essentielle Grundlage für nahezu sämtliche Publikationen der CMS-Kollaboration mit diesem Datensatz. Für die neu aufgezeichneten Run 3-Daten wurden erste JER-Messungen bereits kurz nach Beginn der Datennahmepériode erfolgreich durchgeführt und dann laufend für den wachsenden Run 3-Datensatz verbessert [CMS24a, Paa24]. Ferner haben wir verschiedene Top-Tagging-Algorithmen kalibriert und ihre Leistungsfähigkeit auf dem Run 2-Datensatz gemessen [PhDf].

Wir haben darüber hinaus Entwicklungsarbeiten an einer neuen, komplementären Methode zur Messung der JER aus Zweijetereignissen unter Berücksichtigung des fehlenden Transversalimpulses begonnen, die bereits vielversprechende erste Ergebnisse liefert die eine weitere Reduzierung der Unsicherheiten verspricht [PhDq]. Außerdem wurden Arbeiten begonnen, um die JER-Messungen und die Top-Tagging-Kalibration unter Zuhilfenahme moderner Datenanalysetechniken zu automatisieren und für die Anwendung auf die zukünftigen, noch größeren Datensätze zu ertüchtigen [PhDq].

## 5.4 Physik des Top-Quarks

Unsere AG ist innerhalb von CMS führend in der Messung der Top-Quark-Masse  $m_{\text{top}}$ , einerseits auf direktem Wege, andererseits über eine Messung der Jetmasse von hadronischen Top-Quark-Zerfällen mit hohem Lorentz-Boost.

Im Berichtszeitraum haben wir die direkte Messung von  $m_{\text{top}}$  mit den Daten aus 2016 im Lepton+Jets-Kanal mit einer Profile-Likelihood-Methode abgeschlossen [Gar22]. Das Ergebnis stellt die weltweit genaueste Messung von  $m_{\text{top}}$  dar und wurde veröffentlicht [33]. Wir haben erste Studien zur Erweiterung der Messmethode auf die Zerfallsbreite des Topquarks [Dav22] und einen Test der C-Symmetrie von  $m_{\text{top}}$  (Quark-Antiquark) [Gri23] durchgeführt.

Das nächste große Ziel ist die Anwendung einer nochmals verbesserten Messmethode im Nur-Jets-Kanal der Top-Quark-Paarzeugung. Hierzu wurden Verbesserungen der Ereignisselektion und die Anwendung des Profile-Likelihood-Fits aus Ref. [33] im Nur-Jets-Kanal studiert [Jan22b, Bro24, Gru23]. Zudem wurden ein kinematischer Fit zur Top-Quark-Rekonstruktion an die aktuellen Daten angepasst und verschiedene Auswahlkriterien der Eingangsjets evaluiert [Pee23, Sch23a]. Zusätzlich haben wir zur weiteren Verbesserung der Messmethode Entwicklungen für mehrdimensionale Loglikelihood-Fits mit neuronalen Netzen begonnen [Pro22, Mar24b, PhDg].

Ebenso haben wir eine Messung der Jetmassenverteilung in hadronischen Zerfällen des Top-Quarks mit dem gesamten Run 2-Datensatz erfolgreich abgeschlossen und veröffentlicht [28, Paa24].

## 5.5 Physik des Higgs-Bosons

Die Suche nach Zwei-Higgs-Produktion (HH-Produktion) ist eines der aktuell wichtigsten Themen in der Higgs-Physik. Wir konnten unsere Projekte in diesem Bereich erfolgreich durchführen und wie geplant ausweiten.

Wir haben zwei Suchen nach HH-Produktion mit dem vollen Run 2-Datensatz erfolgreich abgeschlossen und veröffentlicht: eine Suche in Endzuständen mit mehreren Leptonen [7], bei der wir die kompletten Analysen von zwei Hauptkanälen durchgeführt haben [Lan22, PhDn], und eine Suche im  $b\bar{b}\tau\tau$ -Endzustand [8], bei der wir sowohl an der finalen statistischen Auswertung der Daten als auch der CMS-weiten Koordination der Analyse führend beteiligt waren. Außerdem haben wir zentrale Beiträge zur Veröffentlichung einer Kombination aller HH-Suchen von CMS geleistet, die anlässlich des zehnjährigen Jubiläums der Higgs-Boson-Entdeckung in Nature veröffentlicht wurde [9]. Im  $b\bar{b}\tau\tau$ -Kanal haben wir darauf aufbauend wichtige Vorarbeiten für die Analyse der Run 3-Daten sowie für eine Suche nach resonanter HH-Produktion mit dem Run 2-Datensatz durchgeführt [PhDm, PhDi, Vos23, Her23, Le23, Luk23, Sch23b, Bec22, Had22, Wit22]. Diese beinhalten die Entwicklung verschiedener verbesserter Rekonstruktions- und Klassifikationsmethoden, u.a. basierend auf neuronalen Netzen.

Ferner konnten wir den  $b\bar{b}WW$ -Kanal neu für die Gruppe erschließen. Wir haben dabei vollständige Analysen für die Suche nach HH-Produktion mit den Run 3-Daten in Endzuständen mit einem und zwei Leptonen entwickelt [PhDI, Fra22, Mar24a], und dabei u.a. Studien des VBF-Produktionskanals [Tho23]

sowie des Regimes mit hohem Lorentz-Boost durchgeführt [Mö124]. Erstmals haben wir dazu ferner die Güte der neuen Run 3-Daten in diesem Endzustand untersucht. Die Entwicklung der Analysestrategien erfolgte dabei eng verzahnt mit den oben beschriebenen Trigger-Entwicklungen. Darüber hinaus haben wir Studien zur Suche nach resonanter HH-Produktion begonnen, wofür u.a. parametrische neuronale Netze untersucht wurden [Kos24].

Unsere Arbeiten profitieren stark von der von uns neu entwickelten Programmumgebung `columnflow`, welche die Analysen durch Zuhilfenahme moderner Datenverarbeitungstechniken („vektorierte Analyse“) vielfach beschleunigt und automatisiert [Rie24]. Inzwischen ist `columnflow` ein offizielles, CMS-weites Analysewerkzeug und wird bereits von vielen CMS-Gruppen verwendet.

## 5.6 Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Wir haben verschiedene Arbeiten im Bereich der Suche nach neuer Physik jenseits des Standardmodells durchgeführt. Die Suchen zielen vor allem auf die speziellen Signaturen von langlebigen schweren Teilchen ab, welche u.a. in Modellen Dunkler Materie erwartet werden, auf die Zerfälle neuer schwerer Teilchen, z.B. schwerer Higgs-Bosonen, in Endzustände mit Top-Quarks sowie auf modellunabhängige Anomaliesuchen.

Wir konnten eine Reihe von Suchen abschließen und veröffentlichen, die auf spezielle Signaturen abzielen und für die wir deshalb neuartige Rekonstruktionsmethoden entwickelt haben: Suchen nach langlebigen Teilchen mit Zerfällen außerhalb des Spurdetektors [2, 30, 39, Sch23] sowie Suchen nach supersymmetrischen Teilchen mit Signaturen wie versetzte Vertices, verschwindende Spuren oder Spuren mit besonders niedrigem Impuls [41, Kut23, Nis23, Tew24, PhDo]. Diese wurden ergänzt durch eine Studie der Sensitivität zukünftiger Experimente auf mögliche Signaturen supersymmetrischer Modelle fertiggestellt [Mro23]. Ebenfalls haben wir mehrere Suchen nach neuen schweren Resonanzen in Endzuständen mit einem Top-Quark und einem W-Boson [10, Frö22, Kos21, Sch21b], mit Bottom-Quarks [32, PhDb] und einem Top-Quark und einem Gluon [40, PhDj, Ban21], für die u.a. spezielle Techniken zur Rekonstruktion von Teilchen mit hohem Lorentz-Boost zur Anwendung kommen.

Darüber hinaus haben wir Algorithmen des maschinellen Lernens weiterentwickelt, welche direkt auf Daten trainiert („unsupervised learning“) und zur modellunabhängigen Suche nach Anomalien in den Daten verwendet werden können [11, 15, 17, 43–45, HMP<sup>+</sup>23, Qua24, War22, Kin22, Dre23, Käm23]. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Untersuchung der Eignung von bereits trainierten Modellen, wodurch Ressourcen eingespart und somit die Nachhaltigkeit verbessert werden könnte.

Desweiteren haben wir die CMS-weit erste Suche nach neuen schweren Higgs-Bosonen im Kanal  $A \rightarrow ZH(\bar{t}t)$  mit  $Z \rightarrow \ell\ell$  entwickelt und abgeschlossen [46, PhDd, PhDq, Fis21, Let22] sowie die Ausweitung der Suche auf  $Z \rightarrow \nu\nu$ -Endzustände untersucht [Ebe24]. Die Suche beschränkt Modelle mit erweiterten Higgs-Sektoren, die insbesondere für die Beschreibung der Baryogenese im frühen Universum relevant sind, und stellt somit einen interessanten Zusammenhang zur Kosmologie dar.

## 6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Trigger- und Datennahmeschichten sind unbedingte Voraussetzung für den Betrieb des CMS-Detektors und somit für die Gewährleistung der Datennahme und müssen von allen CMS-Mitgliedern geleistet werden. Die durchgeführten Entwicklungs- und Verbesserungsarbeiten im Trigger-System und im Pixeldetektor sind notwendig, um den Betrieb des CMS-Experiments unter den Bedingungen des Run 3 zu ermöglichen und eine hohe Datenqualität zu gewährleisten. Ebenso sind die Arbeiten im Bereich der Jetrekonstruktion und -kalibration sowie der Weiterentwicklung der Methoden des maschinellen Lernens unerlässlich, um die LHC-Daten analysieren zu können. Gleichzeitig ist die

Entwicklung neuer Trigger-Algorithmen Voraussetzung, um auch die zukünftigen Daten des HL-LHC aufzeichnen und verarbeiten zu können. Unser starkes Engagement in diesen für den Betrieb des Detektors und die Rekonstruktion der Daten notwendigen Bereichen ist dabei wichtig, um die starke Rolle der AG innerhalb der internationalen CMS-Kollaboration und auf dem Feld der Teilchenphysik allgemein jetzt und in Zukunft zu behaupten.

Durch die überaus erfolgreiche Run 2-Datennahme und die damit zur Verfügung stehende, sehr große Menge von aufgezeichneten Proton-Proton-Kollisionsdaten höchster Qualität sind unsere AG gleichzeitig verpflichtet, die oben erläuterten Datenanalyseprojekte durchzuführen, um die wissenschaftlichen Früchte der bereits in den vergangenen Jahren mit BMBF-Unterstützung geleisteten erheblichen Aufbauleistungen zu ernten.

Die Vielzahl an Aufgaben in diesen ganz entscheidenden Aktivitätsfeldern konnten die AG nur mithilfe der Zuwendungen durch das BMBF bewältigen.

## **7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Mit seiner im Vergleich zu vorherigen Beschleunigern deutlich erhöhten Schwerpunktsenergie und Ereignisrate stößt der LHC in neue Bereiche der Elementarteilchenphysik vor. Die Resultate des CMS-Experiments bringen die Elementarteilchenphysik als physikalische Grundlagenforschung entscheidend voran, wie z.B. durch die Entdeckung des Higgs-Teilchens. Andererseits werden am LHC und seinen Experimenten neue Technologien entwickelt und angewendet, die zukünftige teilchenphysikalische Forschung und damit Erkenntnisgewinn erst ermöglichen und darüber hinaus aber auch in anderen Bereichen der Wissenschaft und in der Industrie Anwendung finden. Beispielhaft seien hier das „Grid-Computing“, die Forschung- und Entwicklung an Siliziumdetektoren sowie die Entwicklung von Verfahren des maschinellen Lernens zur Analyse großer Datenmengen („Big Data“) genannt.

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

Das ATLAS-Experiment am LHC befasst sich mit den gleichen Themenbereichen wie das CMS-Experiment. Ergebnisse von ATLAS dienen als Gegenprobe; z.B. wurde die Entdeckung des Higgs-Teilchens simultan von ATLAS und CMS der Öffentlichkeit vorgestellt.

## **9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Im Folgenden findet sich eine Liste von Veröffentlichungen, zu denen wir entweder alle oder die zentralen Ergebnisse beigesteuert haben. Außerdem sind Abschlussarbeiten (Doktor-, Master- und Bachelorarbeiten) aufgeführt, die während des Berichtszeitraums in unseren Gruppen angefertigt wurden und bereits fertiggestellt sind oder deren Abschluss in Vorbereitung ist.

### **9.1 Referierte Publikationen**

- [1] CMS Collaboration, *Study of quark and gluon jet substructure in Z+jet and dijet events from pp collisions*, *JHEP* **01** (2022) 188, [2109.03340]. Resultat mit der EN-Gruppe Hinzmann.
- [2] CMS Collaboration, *Search for Long-Lived Particles Decaying in the CMS End Cap Muon Detectors in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, *Phys. Rev. Lett.* **127** (2021) 261804, [2107.04838]. Resultat mit der EN-Gruppe Kasieczka.
- [3] J. Barron et al., *Unsupervised hadronic SUEP at the LHC*, *JHEP* **12** (2021) 129, [2107.12379].

- [4] G. Kasieczka et al., *The LHC Olympics 2020 a community challenge for anomaly detection in high energy physics*, *Rept. Prog. Phys.* **84** (2021) 124201, [2101.08320].
- [5] G. Kasieczka, et al., *Automating the ABCD method with machine learning*, *Phys. Rev. D* **103** (2021) 035021, [2007.14400].
- [6] CMS Collaboration, *Evidence for Higgs boson decay to a pair of muons*, *JHEP* **01** (2021) 148, [2009.04363].
- [7] CMS Collaboration, *Search for Higgs boson pairs decaying to  $WWWW$ ,  $WW\tau\tau$ , and  $\tau\tau\tau\tau$  in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, *JHEP* **07** (2023) 095, [2206.10268].
- [8] CMS Collaboration, *Search for nonresonant Higgs boson pair production in final state with two bottom quarks and two tau leptons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, *Phys. Lett. B* **842** (2023) 137531, [2206.09401].
- [9] CMS Collaboration, *A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery*, *Nature* **607** (2022) 60–68, [2207.00043].
- [10] CMS Collaboration, *Search for a heavy resonance decaying into a top quark and a W boson in the lepton+jets final state at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, *JHEP* **04** (2022) 048, [2111.10216].
- [11] G. Kasieczka, et al., *Anomaly detection under coordinate transformations*, *Phys. Rev. D* **107** (2023) 015009, [2209.06225].
- [12] CMS Collaboration, *Strategies and performance of the CMS silicon tracker alignment during LHC Run 2*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **1037** (2022) 166795, [2111.08757].
- [13] S. Bein et al., *Rebalance and Smear for multi-jet background estimation*, *JINST* **17** (2022) P09022, [2206.09583].
- [14] L. Benato et al., *Shared Data and Algorithms for Deep Learning in Fundamental Physics*, *Comput. Softw. Big Sci.* **6** (2022) 9, [2107.00656].
- [15] A. Hallin, et al., *Classifying anomalies through outer density estimation*, *Phys. Rev. D* **106** (2022) 055006, [2109.00546].
- [16] A. Butter, et al., *Ephemeral Learning - Augmenting Triggers with Online-Trained Normalizing Flows*, *SciPost Phys.* **13** (2022) 087, [2202.09375].
- [17] A. Hallin, et al., *Resonant anomaly detection without background sculpting*, *Phys. Rev. D* **107** (2023) 114012, [2210.14924].
- [18] B. M. Dillon, et al., *Symmetries, safety, and self-supervision*, *SciPost Phys.* **12** (2022) 188, [2108.04253].
- [19] G. Karagiorgi, et al., *Machine Learning in the Search for New Fundamental Physics*, *Nature Reviews Physics* **4** (2022) 399–412, [2112.03769].
- [20] E. Buhmann, et al., *Hadrons, better, faster, stronger*, *Mach. Learn. Sci. Tech.* **3** (2022) 025014, [2112.09709].
- [21] S. Bieringer, et al., *Calomplification — the power of generative calorimeter models*, *JINST* **17**

- (2022) P09028, [2202.07352].
- [22] J. Kummer, et al., *Radio galaxy classification with wgan-supported augmentation*, *INFORMATIK 2022 Workshops, Lecture Notes in Informatics (LNI) P-326* (2022) 469–478, [2206.15131].
- [23] ATLAS Collaboration, *Searches for exclusive Higgs and Z boson decays into a vector quarkonium state and a photon using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of ATLAS  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  proton–proton collision data*, 2208.03122. Result of K. Nikolopoulos (at the time member of the ATLAS Collaboration).
- [24] A. Chisholm, et al., *Non-parametric data-driven background modelling using conditional probabilities*, *JHEP* **10** (2022) 001, [2112.00650].
- [25] S. Badger et al., *Machine learning and LHC event generation*, *SciPost Phys.* **14** (2023) 079, [2203.07460].
- [26] L. Rustige, et al., *Morphological classification of radio galaxies with Wasserstein generative adversarial network-supported augmentation*, *RAS Techniques and Instruments* **2** (2023) 264–277, [2212.08504].
- [27] ATLAS Collaboration, *Search for exclusive Higgs and Z boson decays to  $\omega\gamma$  and Higgs boson decays to  $K^*\gamma$  with the ATLAS detector*, *Phys. Lett. B* **847** (2023) 138292, [2301.09938]. Resultat von K. Nikolopoulos (damals ATLAS Collaboration).
- [28] CMS Collaboration, *Measurement of the differential  $t\bar{t}$  production cross section as a function of the jet mass and extraction of the top quark mass in hadronic decays of boosted top quarks*, *Eur. Phys. J. C* **83** (2023) 560, [2211.01456].
- [29] CMS Collaboration, *Measurement of differential cross sections for the production of a Z boson in association with jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , *Phys. Rev. D* **108** (2023) 052004, [2205.02872].
- [30] CMS Collaboration, *Search for long-lived particles using out-of-time trackless jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , *JHEP* **07** (2023) 210, [2212.06695].
- [31] CMS Collaboration, *Measurement of the mass dependence of the transverse momentum of lepton pairs in Drell–Yan production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , *Eur. Phys. J. C* **83** (2023) 628, [2205.04897].
- [32] CMS Collaboration, *Search for narrow resonances in the b-tagged dijet mass spectrum in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , *Phys. Rev. D* **108** (2023) 012009, [2205.01835].
- [33] CMS Collaboration, *Measurement of the top quark mass using a profile likelihood approach with the lepton+jets final states in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , *Eur. Phys. J. C* **83** (2023) 963, [2302.01967].
- [34] J. K. Behr et al., *Dark Matter Searches with Top Quarks*, *Universe* **9** (2023) 16, [2302.05697].
- [35] CMS Collaboration, *Measurement of multidifferential cross sections for dijet production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , 2312.16669. Akzeptiert von Eur. Phys. J. C.
- [36] CMS HGCal Collaborations, *Timing Performance of the CMS High Granularity Calorimeter Prototype*, *JINST* **19** (2024) P04015, [2312.14622].

- [37] P. Odagiu et al., *Ultrafast jet classification at the HL-LHC*, *Mach. Learn. Sci. Tech.* **5** (2024) 035017, [2402.01876].
- [38] CMS Collaboration, *Measurement of the  $t\bar{t}H$  and  $tH$  production rates in the  $H \rightarrow b\bar{b}$  decay channel using proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, 2407.10896. Akzeptiert von JHEP.
- [39] CMS Collaboration, *Search for long-lived particles decaying in the CMS muon detectors in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, *Phys. Rev. D* **110** (2024) 032007, [2402.01898].
- [40] CMS Collaboration, *Search for pair production of heavy particles decaying to a top quark and a gluon in the lepton+jets final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, 2410.20601. Eingereicht bei Eur. Phys. J. C.
- [41] CMS Collaboration, *Search for supersymmetry in final states with disappearing tracks in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, *Phys. Rev. D* **109** (2024) 072007, [2309.16823].
- [42] I. Bubanja et al., *The small- $k_T$  region in Drell–Yan production at next-to-leading order with the parton branching method*, *Eur. Phys. J. C* **84** (2024) 154, [2312.08655].
- [43] E. Buhmann, et al., *Full phase space resonant anomaly detection*, *Phys. Rev. D* **109** (2024) 055015, [2310.06897].
- [44] T. Finke, et al., *Tree-based algorithms for weakly supervised anomaly detection*, *Phys. Rev. D* **109** (2024) 034033, [2309.13111].
- [45] T. Golling, et al., *The interplay of machine learning-based resonant anomaly detection methods*, *Eur. Phys. J. C* **84** (2024) 241, [2307.11157].
- [46] CMS Collaboration, *Search for heavy neutral Higgs bosons  $A$  and  $H$  in the  $t\bar{t}Z$  channel in proton-proton collisions at 13 TeV*, 2412.00570. Eingereicht bei PLB.

## 9.2 Andere Veröffentlichungen (CMS Physics Analysis Summaries (PAS), Detector Performance (DP) Notes und Konferenzberichte)

- [A<sup>+</sup>22] A. Adelmann et al., *New directions for surrogate models and differentiable programming for High Energy Physics detector simulation*. In *Snowmass 2021*. [arXiv:2203.08806](https://arxiv.org/abs/2203.08806) [hep-ph], 2022.
- [B<sup>+</sup>21] E. Buhmann et al., *Decoding Photons: Physics in the Latent Space of a BIB-AE Generative Network*. In *25th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2021)*. [arXiv:2102.12491](https://arxiv.org/abs/2102.12491) [physics.ins-det], 2021.
- [B<sup>+</sup>22] G. Benelli et al., *Data Science and Machine Learning in Education*. In *Snowmass 2021*. [arXiv:2207.09060](https://arxiv.org/abs/2207.09060) [physics.ed-ph], 2022.
- [BDE<sup>+</sup>21] E. Buhmann, et al., *Generative models for particle shower simulation in fundamental physics*. In *simDL Workshop at ICLR 2021*. 2021.
- [BDE<sup>+</sup>23] E. Buhmann, et al., *CaloClouds: Fast Geometry-Independent Highly-Granular Calorimeter Simulation*, [arXiv:2305.04847](https://arxiv.org/abs/2305.04847) [physics.ins-det], 2023.
- [BDK<sup>+</sup>21] A. Butter, et al., *Amplifying statistics with ensembles of generative models*. In *simDL Workshop at ICLR 2021*. 2021.

- [BKT23] E. Buhmann, et al., *EPiC-GAN: Equivariant Point Cloud Generation for Particle Jets*, [arXiv:2301.08128](#) [hep-ph], 2023.
- [Bon22] M. Bonanomi, *Higgs couplings combination at CMS*. In *Proceedings of 41st International Conference on High Energy physics — PoS(ICHEP2022)*. [CMS-CR-2022-208](#), 2022.
- [CMS21a] CMS Collaboration, *Jet energy scale and resolution measurement with Run 2 legacy data collected by CMS at 13 TeV*, CMS Detector Performance Note, [CMS-DP-2021-033](#), 2021.
- [CMS21b] CMS Collaboration, *Pileup-per-particle identification: optimisation for Run 2 Legacy and beyond*, CMS Detector Performance Note, [CMS-DP-2021-001](#), 2021. Result with EN group Hinzmann.
- [CMS22a] CMS Collaboration, *A profile likelihood approach to measure the top quark mass in the lepton+jets channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-TOP-20-008](#), 2022.
- [CMS22b] CMS Collaboration, *Differential cross section measurements in the Higgs boson to four-lepton decay channel in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-HIG-21-009](#), 2022.
- [CMS22c] CMS Collaboration, *Jet Energy Scale and Resolution Measurements Using Prompt Run3 Data Collected by CMS in the First Months of 2022 at 13.6 TeV*, CMS Detector Performance Note, [CMS-DP-2022-054](#), 2022.
- [CMS22d] CMS Collaboration, *Measurement of the jet mass distribution and top quark mass in hadronic decays of boosted top quarks in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-TOP-21-012](#), 2022.
- [CMS22e] CMS Collaboration, *Search for Higgs boson pairs decaying to  $WWWW$ ,  $WW\tau\tau$ , and  $\tau\tau\tau\tau$  in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-HIG-21-002](#), 2022.
- [CMS22f] CMS Collaboration, *Search for nonresonant Higgs boson pair production in final states with two bottom quarks and two tau leptons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-HIG-20-010](#), 2022.
- [CMS23a] CMS Collaboration, *Performance of Soft Drop Mass Jet High Level Trigger at  $\sqrt{s} = 13.6$  TeV in Run 3*, CMS Detector Performance Note, [CMS-DP-2023-013](#), 2023.
- [CMS23b] CMS Collaboration, *Search for supersymmetry in final states with disappearing tracks in proton-proton collisions at 13 TeV*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-SUS-21-006](#), 2023.
- [CMS24a] CMS Collaboration, *Jet Energy Scale and Resolution Measurements Using Run 3 Data Collected by CMS in 2022 and 2023 at 13.6 TeV*, CMS Detector Performance Note, [CMS-DP-2024-039](#), 2024.
- [CMS24b] CMS Collaboration, *Measurements of Higgs boson production cross sections in the four-lepton final state at 13.6 TeV*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-HIG-24-013](#), 2024.

- [CMS24c] CMS Collaboration, *Search for a heavy resonance decaying into  $ZH$  in events with an energetic jet and two electrons, two muons, or missing transverse momentum*, CMS Physics Analysis Summary, [CMS-PAS-B2G-23-008](#), 2024.
- [DBH<sup>+</sup>22] J. Dickinson, et al., *A Grand Scan of the  $p$ MSSM Parameter Space for Snowmass 2021*, [arXiv:2207.05103](#) [hep-ph], 2022.
- [DEG<sup>+</sup>23a] S. Diefenbacher, et al., *New Angles on Fast Calorimeter Shower Simulation*, [arXiv:2303.18150](#) [physics.ins-det], 2023.
- [DEG<sup>+</sup>23b] S. Diefenbacher, et al., *L2LFlows: Generating High-Fidelity 3D Calorimeter Images*, [arXiv:2302.11594](#) [physics.ins-det], 2023.
- [DKS22] R. Das, et al., *Feature Selection with Distance Correlation*, [arXiv:2212.00046](#) [hep-ph], 2022.
- [dL22] K. de Leo, *Search for new resonances coupling to third generation quarks at CMS*. In *Proceedings of 41st International Conference on High Energy physics — PoS(ICHEP2022)*. [CMS-CR-2022-174](#), 2022.
- [F<sup>+</sup>23] L. Ferencz et al., *Study of  $t\bar{t}b\bar{b}$  and  $t\bar{t}W$  background modelling for  $t\bar{t}H$  analyses*, [arXiv:2301.11670](#) [hep-ex], 2023.
- [HHK<sup>+</sup>22] J. Haller, et al., *Status of the global electroweak fit with Gfitter in the light of new precision measurements*. In *Proceedings of 41st International Conference on High Energy physics — PoS(ICHEP2022)*. [arXiv:2211.07665](#) [hep-ph], 2022.
- [HMP<sup>+</sup>23] P. Harris, et al. *Machine learning techniques for model-independent searches in dijet final states*, 2023.
- [K<sup>+</sup>21] G. Kasieczka et al., *New methods and datasets for Group Anomaly Detection from fundamental physics*, [arXiv:2107.02821](#) [stat.ML], 2021.
- [Kei23] P. Keicher, *Machine Learning in Top Physics in the ATLAS and CMS Collaborations*. In *15th International Workshop on Top Quark Physics*. [arXiv:2301.09534](#) [hep-ex], 2023.
- [RGK<sup>+</sup>23] J. Rolph, et al., *PeakOTron: A Python Module for Fitting Charge Spectra of Silicon Photo-multipliers*, [arXiv:2301.11833](#) [physics.ins-det], 2023.
- [Rie24] M. Rieger, *End-to-End Analysis Automation over Distributed Resources with Luigi Analysis Workflows*. In *26th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2023)*. [arXiv:2402.17949](#) [physics.data-an], 2024.
- [Sch21] D. Schwarz, *New jet tagging techniques at CMS*. In *Proceedings of 40th International Conference on High Energy physics — PoS(ICHEP2020)*. 2021.

### 9.3 Abschlussarbeiten

#### Promotionen

- [Bie24] S. Bieringer, *Uncertainties in Generative Deep Learning and Data Amplification for High Energy Physics*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2024.
- [Die22] S. D. Diefenbacher, *Topics in Generative Modeling of Particle Physics Data*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2022.
- [Eic22] M. Eich, *Search for new long-lived particles with the CMS experiment at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, September 2022.
- [Frö22] A. Fröhlich, *Search for heavy resonances decaying to a top quark and a W boson with the CMS experiment*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Februar 2022.
- [Gar22] C. Garbers, *A Precision Top Quark Mass Measurement with a Profile Likelihood Nuisance Fit*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Juli 2022.
- [Kut23] V. G. Kutzner, *Search for exotic long-lived particles using disappearing tracks with the CMS experiment in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Juni 2023.
- [Lan22] T. Lange, *Search for rare Higgs boson decays at a center of mass energy of  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the CMS Experiment at the LHC*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, April 2022.
- [Mal21] A. Malara, *Calibration of the jet transverse momentum resolution and search for heavy resonances decaying into a Z and a Higgs boson with the CMS experiment*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, November 2021.
- [Mro23] M. Mrowietz, *Status of R-parity Conserving Supersymmetry after the LHC Run 2 and Other Experiments*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2023.
- [Nis23] Y. Nissan, *Search for compressed mass Higgsino production with low-momentum lepton tracks with the CMS experiment*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Juli 2023.
- [Paa24] A. Paasch, *Determination of the Jet Energy Resolution and Measurements of Jet Substructure and the Top Quark Mass in Decays of Boosted Top Quarks at CMS*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2024.
- [Qua24] T. Quadfasel, *A Model-Agnostic Search for Beyond the Standard Model Physics in the Dijet Topology using Machine Learning*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, 2024.
- [Rie21] J. O. Rieger, *Evidence for Higgs boson decay to muons with the CMS experiment*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Juni 2021.
- [Sch21] D. Schwarz, *Measurements of jet mass, top quark mass and top tagging efficiencies in decays of boosted top quarks at CMS*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Februar 2021.
- [Sch23] J. Schindler, *Search for long lived particles in the CMS muon system*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2023.
- [Tew24] A. Tews, *Search for Electroweakinos Using Two Soft Opposite-Sign Displaced Muons at the CMS Experiment*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, März 2024.

[Zoi21] I. Zoi, *Search for diboson resonances in the all jets final state with CMS at  $\sqrt{s} = 13$  TeV and pixel sensors development for HL-LHC*, Doktorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2021.

### Promotionen in Vorbereitung

- [PhDa] *Anomaly Detection in the CMS L1 Trigger*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDb] *Discovering new physics with anomaly detection*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDc] *Fast simulation of the CMS HGCal*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDd] *First CMS search for heavy Higgs bosons in  $t\bar{t}Z$  final states*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDe] *High precision generative models for high resolution calorimeters*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDf] *Measurement of boosted single top quark production in association with a W boson*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDg] *Normalizing flows and their applications in precision physics and applied mathematics*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2026.
- [PhDh] *Search for ALPs in  $t\bar{t}$  final states*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDi] *Search for Di-Higgs self-coupling in  $b\bar{b}\tau\tau$  final states*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDj] *Search for excited top quarks and machine-learning on FPGA for the CMS L1 trigger*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDk] *Search for heavy resonances decaying to  $t\bar{t}$* , Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDI] *Search for HH production in the  $b\bar{b}WW$  final state*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDm] *Search for Higgs self-coupling in the  $b\bar{b}\tau\tau$  channel with Run 3 data recorded by the CMS experiment*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDn] *Search for Higgs Selfcoupling in 4-Lepton Final States*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDo] *Search for natural supersymetry in events with a low-momentum displaced pion*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.
- [PhDp] *Searches for exotic Higgs decays to long-lived particles in B-parked data*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.

[PhDq] *Searches for heavy Higgs bosons*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.

[PhDr] *Understanding neural network decisions for generative models*, Doktorarbeit in Vorbereitung, Universität Hamburg. Erwartet 2025.

### Master- und Bachelorarbeiten

[Alb21] A. Albrecht, *Improving the Heavy Object Tagger with Variable  $R$  with soft-drop grooming*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Januar 2021.

[Ban21] Y. J. Banthien, *Search for Excited Top Quarks*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2021.

[Bec22] J. Becks, *Methoden zur Verbesserung der Rekonstruktion des Higgs-Bosons mit  $b$ -Jets am CMS-Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, November 2022.

[Bol21] S. Bollweg, *Physics application of invertible network architectures*, Masterarbeit, Universität Hamburg, August 2021.

[Bor23] F. Bornemann, *Symbolic Regression with active learning*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2023.

[Bro24] S. Brozzo, *Mass-Decorrelated Classification of Unlabeled Data for  $t\bar{t}$  Identification*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Juli 2024.

[Dav22] T. Davids, *A Maximum Likelihood Measurement Method for the Top Quark Decay Width*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, November 2022.

[Die22] Q. Diepholz, *Search for Higgsino Dark Matter in stop decays with the CMS Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2022.

[Dre23] J. Drews, *Leveraging pre-trained models for anomaly detection in particle physics*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2023.

[Ebe24] L. Ebeling, *Search for Heavy Higgs Bosons with the CMS Detector in the  $t\bar{t}$  and Missing Transverse Momentum Final State*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Februar 2024.

[Ele21] V. Elejnik, *Methods of top reconstruction by using neural networks*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2021.

[Emm23] L. Emmrich, *New anomaly detection algorithms for the CMS Level-1 trigger*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Mai 2023.

[Erd24] P. Erdle, *Study of introspection methods in a search for Higgs boson pair production at CMS*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2024.

[Ewe21] C. Ewen, *Attention Networks in Particle Physics*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2021.

[Fis21] Y. Fischer, *Search for heavy Higgs bosons in the  $Z + t\bar{t}$  final state with the CMS detector*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2021.

- [Fra22] M. Frahm, *Search for non-resonant Higgs boson pair production in the lepton+jets final state of the  $b\bar{b}WW$  decay mode at CMS*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Februar 2022.
- [Fre23] S. Fresenbet, *ML-based High Level Trigger strategies for VBF Higgs production at the CMS experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2023.
- [Ger23] N. M. Gerber, *Modeling the energetic response of the CMS Detector to jets with Machine Learning*, Masterarbeit, Universität Hamburg, März 2023.
- [Gri23] L. Griesing, *A maximum likelihood approach to measure the mass difference between the top quark and top antiquark in the lepton+jets channel*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, April 2023.
- [Gru23] Y. R. Gruel, *Messung der Masse des Top-Quarks mit einer Likelihood-Anpassung mit Störparametern im vollhadronischen Kanal*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Mai 2023.
- [Hac24] M. Hackmann, *Identifying long-lived particle events using deep neural networks*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, April 2024.
- [Had22] A. Haddad, *Search for Di-Higgs Production in Boosted  $b\bar{b}\tau\tau$  Final States with the CMS Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2022.
- [Har21] S. Harder, *Machine learned simulation for CMS*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2021.
- [Her23] K. Herges, *Reconstruction methods of the  $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$  system in the boosted regime at the CMS experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Juli 2023.
- [Hun21] D. Hundhausen, *Statistics of Generative Models in Physics*, Masterarbeit, Universität Hamburg, September 2021.
- [Jac21] M. Jacobsen, *The Blessing of Dimensionality: Event Manifold Dimensionality Estimation for Event Clustering*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2021.
- [Jan22a] S. Janardhan, *Refinement of Jet simulations using Generative Adversarial Networks*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Juli 2022.
- [Jan22b] M. Janik, *Optimizing the CMS trigger for  $t\bar{t}$  all-jet events using python-native columnar analysis tools*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2022.
- [Käm23] L. Kämmler, *Latent and Data Space Trajectories as a new Tool for Anomaly Detection in Particle Physics*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, März 2023.
- [Kin22] V. Kinsvater, *Enhancing model-agnostic anomaly detection methods with autoencoders*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2022.
- [Kin24] A. Kinsvater, *Concepts of tau polarization analysis in Di-Higgs physics*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, April 2024.
- [Kle22] K. Kleinböling, *Development of a neural network for the CMS Level-1 trigger*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, April 2022.
- [Kom22] I. Komarov, *Development of neural-network based topological Level-1 triggers for the CMS*

- experiment at the HL-LHC*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Mai 2022.
- [Kos21] H. L. Koser, *Search for singly produced vector-like bottom quarks with the CMS detector*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, August 2021.
- [Kos24] V. Kosterin, *Search for heavy resonances decaying into two Higgs bosons in the  $b\bar{b}WW$  final state with the CMS detector*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Juli 2024.
- [Le23] B. A. V. Le, *Identification of production modes in a search for the  $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$  process with neural networks at the CMS experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2023.
- [Let22] B. Letzer, *Study of DNN-based event reconstruction for a search of heavy Higgs bosons in  $t\bar{t}Z$ -events with the CMS experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Juli 2022.
- [Löw24] T. Löwe, *Inferring the properties of long lived decays in the CMS muon system with deep learning*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, April 2024.
- [Luk23] T. Lukas, *Kinematic Fits in a Search for  $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$  Production at the CMS Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, August 2023.
- [Mar24a] L. Markus, *Search for non-resonant Higgs boson pair production in the dilepton final state of the  $b\bar{b}WW$  decay mode at CMS*, Masterarbeit, Universität Hamburg, August 2024.
- [Mar24b] P. A. Marti, *Optimized Observables for a Precise Top Quark Mass Measurement*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, März 2024.
- [Mat23] J. Matthiesen, *Search for top-antitop quark resonances in the lepton+jets final state with the CMS detector*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2023.
- [Mel23] H. Melosch, *Generating pion Showers in hadronic calorimeters using point cloud diffusion models*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2023.
- [Möl21] J. Möls, *Differentielle Messung der Topquarkmasse mit dem CMS-Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2021.
- [Möl24] J. Möls, *Studying the boosted regime in a search for non-resonant Higgs boson pair production in the lepton+jets final state of the  $b\bar{b}WW$  decay mode at CMS*, Masterarbeit, Universität Hamburg, März 2024.
- [Pee23] C. T. Peeters, *Impact of Resolution on  $t\bar{t}$  Kinematic Fit*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Juni 2023.
- [Pra23] P. Prangchaikul, *Mitigating Uninformative Features in Weak Supervision*, Masterarbeit, Universität Hamburg, April 2023.
- [Pro22] N. Prouvost, *Neural network based estimators to measure the top quark mass*, Masterarbeit, Universität Hamburg, April 2022.
- [Pur21] A.-L. Purchert, *Characterization of Prototype Pixel Sensors for the CMS Inner Tracker at the High-Luminosity LHC*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Februar 2021.
- [Qui21] F. Quinton, *Analysis of the substructure of variable- $R$  jets using machine learning*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Juli 2021.

- [Rin22] P. Rincke, *Fast Machine Learning for the Level-1 Trigger of CMS*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2022.
- [Sch21a] S. F. Schaefer, *Optimization of Multi-class Classification Methods for the Search for Di-Higgs Production in the  $\tau^+\tau^-$  Final State with the CMS Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, November 2021.
- [Sch21b] D. Schieber, *Analysis of Boosted Higgs and Top Decays with the CMS detector*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2021.
- [Sch23a] L. Schaller, *Beyond six jets in kinematic fits of fully hadronic  $t\bar{t}$  decays*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, November 2023.
- [Sch23b] M. Schlingmeyer, *Studien zur Optimierung der Sensitivität der Higgs-Selbstkopplung für die  $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$  Analyse am CMS Experiment mit neuronalen Netzwerken*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, März 2023.
- [Sch23c] J. L. Schreiber, *Evaluation of Evaluation Metrics of Generative Models in High Energy Physics*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, März 2023.
- [Sch24a] S. F. Schaefer, *Application of Deep Sets Neural Networks for the Search for Di-Higgs Production in the  $b\bar{b}\tau\tau$  Final State with the CMS Experiment*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Juni 2024.
- [Sch24b] R. Schröder, *Optimisation of the  $t\bar{t}$  reconstruction in the lepton + jets channel for a  $t\bar{t}$  resonance search at CMS*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Februar 2024.
- [Sep23] S. Sepanlou, *Development of neural network based trigger algorithms for the Level 1 Trigger of the CMS experiment*, Masterarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2023.
- [She22] I. Shekhzadeh, *Simulation of High-Granularity Calorimeter Showers Using Normalizing Flows*, Masterarbeit, Universität Hamburg, September 2022.
- [Sok21] T. Sokolinski, *Search for heavy resonances in the  $pT(\text{miss}) + \text{jet}$  final state with the CMS experiment*, Masterarbeit, Universität Hamburg, August 2021.
- [Tan23] A. Tanikulov, *Search for top squarks decaying into dark matter in final states with a soft displaced pion with the CMS experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2023.
- [Tet22] N. Tettenborn, *High-Dimensional Generative Models on Regular Grids*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, November 2022.
- [Tho23] H. H. Thoms, *Studie des VBF-Kanals für HH-Produktion*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Juli 2023.
- [Tut21] A. Tutus, *Search for Higgs boson Pair production with the CMS experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Dezember 2021.
- [Vos23] J. Voss, *Optimization of Classifier Binning for Differential Statistical Inference in Particle Physics*, Masterarbeit, Universität Hamburg, September 2023.
- [vS21] T. von Schwartz, *Semi-supervised learning as a new tool for particle physics analysis*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2021.

- [War22] K. Warnholz, *Understanding the Sensitivity of Anomaly Detectors*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, August 2022.
- [Wer22] N.-M. Werther, *Frechet Distance Evaluation of Generative Models for Calorimeter Shower Generation*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2022.
- [Wir21] R. I. Wirth, *Muon track reconstruction in Liquid Scintillation Detectors with GCNs* Myonspur-rekonstruktion im Flüssigszintillations-Detektor mit Hilfe von GCNs, Masterarbeit, Universität Hamburg, Februar 2021.
- [Wit22] M. L. Witt, *Reconstruction of  $H \rightarrow \tau\tau$  Decays in Events with Resonant Di-Higgs Production using Machine Learning with the CMS Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Oktober 2022.
- [Woh21] M. Wohlstein, *Anomaly detection for long-lived decays in the muon system*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, September 2021.
- [Yam22] M. Yamrali, *Search for Higgs Boson Production in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks using Deep Learning Techniques with the CMS Experiment*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, März 2022.
- [Yam24] M. Yamrali, *Deciphering Spin Information in Tau Products: Distinguishing Higgs, Drell–Yan, and Top Quark Contributions*, Masterarbeit, Universität Hamburg, November 2024.
- [Zan24] M. Zander, *Hadron Shower Simulation with Normalizing Flows*, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, März 2024.