

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05H2021 - Run 3 von CMS am LHC

Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Projektleitung: Prof. Dr. Johannes Erdmann
E-Mail: johannes.erdmann@physik.rwth-aachen.de
Förderkennzeichen: 05H23PACCA
Förderzeitraum: 01.01.2023 - 30.06.2024
Zuwendung: 179.926,45 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:
Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor CERN	Gerät LHC	Experiment CMS
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	0		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	1		
Andere Veröffentlichungen:	1		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	1		
Masterarbeiten:	1		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 18.11.2024 14:28 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: RWTH Aachen University

Projektleitung: Prof. Dr. Johannes Erdmann

Verbund: ErUM-FSP T03 / 05H2021

Thema: Run 3 von CMS am LHC: Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment

Berichtszeitraum: vom 01.01.2023 bis 30.06.2024

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
RWTH Aachen		
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	
Universität Hamburg		
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	
Karlsruher Institut für Technologie		
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	
Assoziierter Partner: Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY		
	Prof. Dr. F. Blekman ¹ , Prof. Dr. K. Borras ² , Prof. Dr. E. Gallo ¹ , Dr. I. Melzer-Pellmann, Dr. A. Mussgiller, Dr. A. Meyer, Prof. Dr. C. Schwanenberger ¹ ¹ auch Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg ² auch III. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen	
Assoziierter Partner: Center for Advanced System Understanding CASUS, Görlitz		
	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 fb^{-1} an Kollisionsdaten geliefert, wovon eine Datenmenge von ca. 337 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.

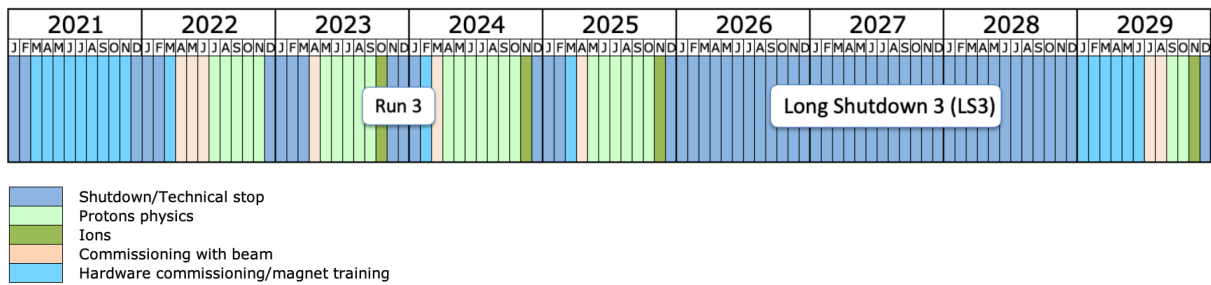


Abbildung 1: Langfristige Planung für den Betrieb des LHC und HL-LHC (Stand Juni 2024)

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 fb^{-1} an Daten aufgenommen, davon ca. 150 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.

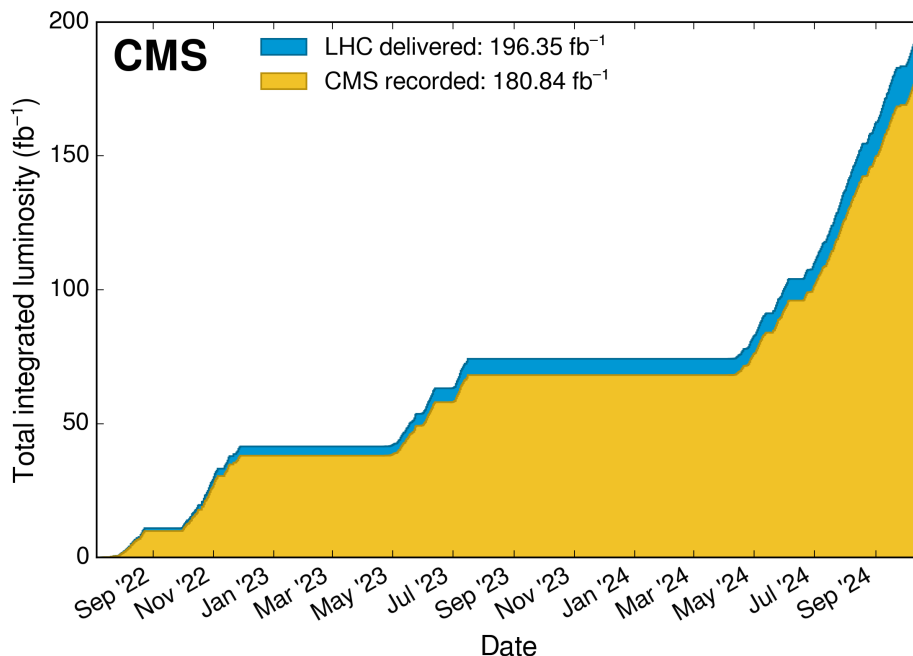


Abbildung 2: Vom LHC während des Run 3 produzierte (blau) und von CMS aufgezeichnete (gelb) kumulierte Datenmenge (Stand Oktober 2024)

Im Jahr 2022 wurde eine Datenmenge von 38 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 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 fb^{-1} mehr Daten als geplant aufgezeichnet werden.

Insgesamt beläuft sich der von CMS aufgezeichnete Run 3-Datensatz damit auf etwa 180 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
CMS gesamt	2068	1167	1542	1234	6011
Universitäten (D)	81	82	61	28	252
DESY	64	25	7	14	110
CASUS	1	1	0	0	2
Deutsche Gruppen	146	108	68	42	364
Anteil (D)	7,1%	9,3%	4,4%	3,4%	6,1%

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. Savoia
- 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
- μ 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

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

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) 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) 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). 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:	RWTH Aachen University
Projektleitung:	Prof. Dr. Johannes Erdmann
Verbund:	ErUM-FSP T03 / 05H2021
Thema:	Run 3 von CMS am LHC: Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment

Berichtszeitraum: vom 01.01.2023 bis 30.06.2024

Zusammenfassung

Das III. Physikalische Institut A der RWTH Aachen arbeitet auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik. Im Mai 2022 wurde Johannes Erdmann neu an die RWTH berufen. Der Bericht bezieht sich daher auf die in der Zeit vom 01.01.2023 bis zum 30.06.2024 unter seiner Leitung durchgeführten Arbeiten zur Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment mit Daten des LHC Run 3.

Die RWTH Aachen gehört zusammen mit den Universitäten Hamburg und Karlsruhe sowie mit DESY und CASUS als assoziierten Mitgliedern zum BMBF-Forschungsschwerpunkt ErUM-FSP T03.

Seit Mitte 2022 läuft der LHC Run 3 bei der neuen, bisher höchsten erreichten Schwerpunktsenergie von 13,6 TeV. Die bisher in den Jahren 2022-2024 (Stand Oktober 2024) aufgezeichnete Datenmenge beläuft sich dabei auf etwa 180 fb^{-1} .

Die Hauptaufgaben in den Jahren 2023 und 2024 waren Beiträge zum Betrieb des CMS-Detektors, unter anderem zum Myonsystem, sowie das Commissioning und die Weiterentwicklung der Photon-Algorithmen.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Aufgabenstellung sind Arbeiten, die präzise Messungen sowie die Suche nach neuer Physik in Proton-Proton-Kollisionseignissen am LHC am CERN ermöglichen. Die Voraussetzungen dazu waren gegeben: ein seit vielen Jahren gut funktionierender LHC-Beschleuniger, der Allzweckdetektor CMS und die vorhandene Computing-Infrastruktur.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die am ErUM-FSP T03 beteiligten Gruppen haben den CMS-Detektor bereits vor dem aktuellen Berichtszeitraum erfolgreich betrieben. Die neue Arbeitsgruppe von Johannes Erdmann leistet seit Sommer 2022 dazu Beiträge.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Alle am ErUM-FSP T03 beteiligten Gruppen arbeiten in enger Kooperation zusammen. Der Verbund ist eng in das internationale Forschungsprojekt LHC/CMS eingebunden.

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

Die bewilligten Personalmittel wurden verwendet, um Wissenschaftler/innen zu beschäftigen. Die Beteiligten sind in den nachfolgenden Berichtsteilen erwähnt. Außerdem wurden Finanzmittel für Reisen und M&O-Beiträge zum CMS-Experiment eingesetzt.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Fast alle Ziele wurden erreicht. Eventuelle Abweichungen von den Zielen werden im Bericht dargestellt.

Betrieb und Instandhaltung des CMS-Experiments

Um dieses Projektziel zu erreichen, wurden Beiträge zu Datennahme-Schichten und zum Monitoring des Myon-Driftkammersystems geleistet. Vom BMBF (teil-)geförderte Promovierende, die an diesem Projektziel gearbeitet haben: D, M und S

Im Bereich der Schichten wurden sowohl Offline-Schichten für das Driftkammersystem von Aachen aus geleistet, als auch Schichten im CMS-Kontrollraum am CERN. Das Engagement für die Schichten im CMS-Kontrollraum wurde notwendig, weil im Jahr 2023 nicht genug Personen zur Verfügung standen, die Kontrollraumschichten am CERN durchführen konnten. Im Jahr 2023 wurden Schichten als „Technical Shifter“ und im Jahr 2024 auch als „Shift Leader“ durchgeführt.

Im Bereich des Monitorings wurde ein Werkzeug für die automatisierte Analyse der Datenqualität (AutoDQM) für das Myon-Driftkammersystem nutzbar gemacht. Diese neue Funktionalität steht jetzt den Offline-Schichten/innen für das Driftkammersystem zur Verfügung und hilft ihnen, die Datenqualität zu beurteilen. Außerdem wurden Beiträge zum Online-Monitoring-System (OMS) für die Driftkammern geleistet. Dabei wurde eine graphische Darstellung der Driftkammern und deren Einbettung in das CMS-OMS implementiert. Verschiedene Messgrößen werden dabei farblich dargestellt, um Myon-Schichten/innen einen Überblick über den Status des Driftkammer-Systems zu geben.

Commissioning Photon-Identifikation Run 3 und Verbesserung der Photon-Identifikation

Um dieses Projektziel zu erreichen, wurden Beiträge zum Egamma-Commissioning der Run 3 Daten geleistet, eine Methode zur Messung von Photon-Identifikations-Effizienzen bei hohen Transversalimpulsen implementiert, Studien zur Verbesserung der Photon-Identifikations-Algorithmen durchgeführt und eine neue Methode zur Verbesserung der Photon-Modellierung in Simulationen entwickelt. Vom BMBF (teil-)geförderte Promovierende, die an diesem Projektziel gearbeitet haben: D und M

Seit Beginn des Run 3 hat die Arbeitsgruppe die Verantwortlichkeit für das Commissioning der neu aufgezeichneten Daten für die CMS-Egamma-Gruppe übernommen. Dabei wird mit Zerfällen des Z-Bosons in Elektron-Positron-Paare die Qualität der neuen Daten in Hinblick auf die Egamma-Rekonstruktion untersucht. Im Berichtszeitraum wurde das Commissioning der 2023er-Daten und der ersten 2024er-Daten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden der CMS-Egamma-Gruppe zur Verfügung gestellt.

Die Messung der Effizienz für die Photon-Identifikationsalgorithmen werden in der CMS-Egamma-Gruppe über einen großen Bereich des Transversalimpulses mit der Tag-and-Probe-Methode mit Z-Boson-Zerfällen durchgeführt. Für hohe Transversalimpulse ist diese Methode jedoch statistisch limitiert. Um auch in diesem Bereich eine präzise Effizienzmessung durchzuführen, wurde eine Methode implementiert, die auf Einzel-Photon-Ereignissen beruht, wobei die Reinheit der Ereignis-Sample vor und nach Anwendung der Identifikationskriterien über eine weitere Variable erfolgt. Die Methode wurde erfolgreich implementiert und erste Ergebnisse mit statistischen und mehreren systematischen Unsicherheiten der CMS-Egamma-Gruppe vorgestellt.

Zur Verbesserung der Photon-Identifikations-Algorithmen wurden in einer Masterarbeit (Choban 2023) Studien zum Training von Graph-Netzwerken und in einer laufenden Masterarbeit Studien zum Training von Vision-Transformern und Convolutional Neural Networks durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Vergleich zum aktuellen Identifikationsalgorithmus, der Boosted Decision Trees verwendet, vielversprechend. In einer Bachelorarbeit (Pesch Berrocal 2023) wurden Studien zur Verwendung von Super Resolution Generative Adversarial Networks durchgeführt, um das Training von Photon-Algorithmen durch im elektromagnetischen Kalorimeter künstlich höher aufgelöste Photon-Signaturen zu unterstützen.

Simulierte Photon-Schauer im CMS elektromagnetischen Kalorimeter weisen Unterschiede zu echten Photon-Schauern in Daten auf. Um diese Modellierung in der Simulation zu korrigieren, wurde ein effizienter Algorithmus entwickelt, der auf Normalizing Flows basiert. Dadurch können mehrere Photon-Identifikations-Variablen gleichzeitig korrigiert werden, wobei auch deren Korrelationen nach der Korrektur deutlich besser mit den Korrelationen in Daten übereinstimmen. Diese Methode wurde veröffentlicht (Comput. Soft. Big. Sci. **8** (2024) 15), als Poster auf dem 6th Inter-experiment Machine Learning Workshop (2024) vorgestellt und ist jetzt in CMS verfügbar.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ohne die oben beschriebenen Arbeiten, unter Einsatz der bewilligten BMBF-Mittel für Personal und Sachausgaben, hätten die wissenschaftlichen Ergebnisse nicht erzielt werden können.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse sind von höchster Relevanz für die Grundlagenforschung in der Elementarteilchenphysik und damit für die Physik insgesamt. Zudem bereiten sie den Weg für zukünftige Messungen mit dem CMS-Experiment am LHC. Die Resultate wurden wie unter Punkt 9 beschrieben veröffentlicht.

Die Projektziele sind rein wissenschaftlicher Natur und haben keinen unmittelbaren wirtschaftlichen Nutzen.

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

Nein.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

- C. Daumann, M. Donega, J. Erdmann, M. Galli, J. L. Späh, D. Valsecchi, *One Flow to Correct Them all: Improving Simulations in High-Energy Physics with a Single Normalising Flow and a Switch*, *Comput. Soft. Big. Sci.* **8** (2024) 15, arXiv:2403.18582.

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

- C. Daumann, *Conditional normalizing flows for correcting simulations*, 6th Inter-experiment Machine Learning Workshop, Poster, 29.01.-02.02.2024, CERN.

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

- Ali Malyali Choban, *Photon Identification using Graph Neural Networks at the CMS experiment*, Masterarbeit, RWTH Aachen University, Oktober 2023.
- Alexander Pesch Berrocal, *Super-resolution studies for photon calorimeter images*, Bachelorarbeit, RWTH Aachen University, Juni 2023.

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: RWTH Aachen University

Projektleitung: Prof. Dr. Johannes Erdmann

Verbund: ErUM-FSP T03 / 05H2021

Thema: Run 3 von CMS am LHC: Elementarteilchenphysik mit dem CMS-Experiment

Berichtszeitraum: vom 01.01.2023 bis 30.06.2024

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Das CMS-Experiment wird am Large Hadron Collider am CERN durchgeführt, um Kollisionereignisse bei den höchsten Energien, die jemals an einem Teilchenbeschleuniger erzielt werden konnten, aufzuzeichnen. Diese hohen Schwerpunktsenergien erlauben es, Prozesse zu untersuchen, wie sie in den ersten Milliardstel Sekunden des Universums stattfanden, und dabei insbesondere folgenden Fragen nachzugehen:

- 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?

Die CMS-Kollaboration hat bereits eine Vielzahl von wissenschaftlichen Ergebnissen erzielt, die in mehr als 1.300 frei zugänglichen Zeitschriftenpublikationen dokumentiert sind. 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 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.

Das CMS-Experiment wird von einer internationalen Kollaboration mit rund 6.000 Mitgliedern aus mehr als 50 Nationen betrieben, darunter rund 1.100 Promovierende. Deutschland stellt rund 7% der am CMS-Projekt beteiligten Forscher*innen. Die am CMS-Experiment beteiligten deutschen Institute von der RWTH Aachen, der Universität Hamburg und dem Karlsruher Institut für Technologie bilden den vom BMBF eingerichteten ErUM-Forschungsschwerpunkt ErUM-FSP CMS, zu dem als assoziierte Partner auch das DESY und CASUS gehören. Außerdem gehören zum ErUM-FSP CMS Theorie-Arbeitsgruppen der genannten Universitäten, die für die Auswertung der CMS-Daten erforderliche Rechnungen, Modelle und Ereignisgeneratoren beitragen. Das Spektrum dieser Aktivitäten deckt Arbeiten auf den Gebieten Higgs-Physik, Top-Quark-Physik, QCD und Suche nach neuer Physik ab.

Der ErUM-FSP stärkt den Beitrag der deutschen Gruppen zum CMS-Experiment durch eine verbesserte Vernetzung der beteiligten Forschungsgruppen, Koordination und Nachwuchsförderung, und er engagiert sich in Öffentlichkeitsarbeit und Wissenstransfer. Hierzu trägt insbesondere das LHC-ErUM-FSP-Büro bei, welches seit 2019 von den vier am LHC arbeitenden ErUM-FSPs gemeinsam betrieben wird.

Deutsche Gruppen waren von Anfang an am CMS-Experiment beteiligt und leisten wichtige und sehr sichtbare Beiträge zu Bau, Erneuerung, Betrieb und Wartung des Detektors, zur

Aufbereitung der Daten sowie zur Analyse und Veröffentlichung der wissenschaftlichen Ergebnisse. Wesentlich für den erfolgreichen Betrieb des CMS-Experiments und die Datenverarbeitung und -analyse sind eine gut ausgebaute Grid-Computing-Infrastruktur, zu der die deutschen Zentren in Karlsruhe (Tier 1), in Aachen (Tier 2) und am DESY (Tier 2) wichtige Beiträge leisten, sowie die Entwicklung und Anwendung moderner Methoden der statistischen Datenanalyse und insbesondere des maschinellen Lernens („künstliche Intelligenz“). Im Berichtszeitraum begann, nach einer mehrjährigen Wartungsphase, die aktuell laufende Datennahmeperiode („Run 3“) des LHC mit einer Rekordschwerpunktsenergie von 13,6 TeV. Der Fokus der Arbeiten lag daher auf der Vorbereitung der Detektorsysteme auf den Run 3-Betrieb und der regulären Datennahme und -kalibrierung im Run 3, aber auch der Physikanalyse mit dem großen Run 2-Datensatz. Außerdem wurden die Arbeiten zur Vorbereitung des HL-LHC-Upgrades des CMS-Detektors fortgesetzt, die aber nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts sind.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Bei der Aufzeichnung dieser Run 3-Daten haben wir uns sowohl im Bereich von Schichten im CMS-Kontrollraum stark engagiert, als auch Schichten für das Myon-Driftkammer-System geleistet. Zusätzlich haben wir an Werkzeugen für das Driftkammer-System gearbeitet, die eine effizientere Arbeit während der Schichten ermöglichen sollen: Zum einen wurde ein Werkzeug für die automatisierte Analyse der Datenqualität für das Driftkammer-System nutzbar gemacht, zum anderen wurde eine graphische Darstellung der Driftkammern und deren Einbettung in das CMS Online Monitoring System implementiert, um den Schichter/innen einen besseren Überblick über den Status des Systems zu geben.

Die neuen Daten müssen auch in Hinblick auf die verschiedenen rekonstruierten Teilchen überprüft werden. Für die CMS-Egamma-Gruppe, d.h. für die Rekonstruktion von Elektronen und Photonen, sind wir für die Run 3-Daten verantwortlich. Im Berichtszeitraum wurden die entsprechenden Überprüfungen für die 2023er und den ersten Teil der 2024er Daten durchgeführt.

Für die Messung der Effizienzen der Photon-Identifikations-Algorithmen haben wir eine neue Methode implementiert und außerdem Studien zur Verbesserung dieser Algorithmen mit Deep Learning durchgeführt. Für die Korrektur der Modellierung von Photon-Signaturen im CMS-Kalorimeter haben wir eine neue Methode entwickelt, die eine effiziente und präzise Korrektur von mehreren Photon-Variablen gleichzeitig ermöglicht. Diese Methode beruht auf Normalizing Flows und ist jetzt für CMS-Analysen, die Photonen verwenden, nutzbar.

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

Bei diesem Projekt geht es um Grundlagenforschung. Die Arbeitsgruppe von Johannes Erdmann am III. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen hat dabei Ergebnisse in einer wissenschaftlichen Publikation dokumentiert und auf dem 6th Inter-experiment Machine Learning Workshop vorgestellt. Die Arbeiten zur Verbesserung am CMS-Detektor sind von Nutzen für zukünftige Experimente innerhalb der Teilchenphysik und darüber hinaus. Gleiches gilt für die Entwicklung neuer Methoden für die Analyse großer Datenmengen, wie sie beim CMS-Experiment anfallen.