

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: 05H2021 - Run 3 von LHCb am LHC

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dortmund  
Projektleitung: Prof. Dr. Gudrun Hiller  
E-Mail: ghillier@physik.tu-dortmund.de  
Förderkennzeichen: 05H21PECL2  
Förderzeitraum: 01.07.2021 - 30.06.2024  
Zuwendung: 183.542,30 €  
Projektträger: Projektträger DESY  
  
Zusätzlicher Kontakt: gudrun.hiller@tu-dortmund.de  
Zusätzlicher Name: Gudrun Hiller

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	CERN	LHC	LHCb
	Elementarteilchenphysik		Theorie
	KEK	KEKB	Belle-II
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	4		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	9		
Andere Veröffentlichungen:	6		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	5		
Masterarbeiten:	5		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 16.02.2025 20:23 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: TU Dortmund

Projektleitung: Prof.Dr. Gudrun Hiller

Verbund: 05H2021 (ErUM-FSP T04)

Thema: Run 3 LHCb am LHC: Vorhersagen und Interpretation seltener Charm und b-Zerfaelle

## Zusammenfassung

Das Theorieprojekt ist sehr gut verlaufen. Alle gefoerderten Teilprojekte konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die Resultate sind in referierten, international fuehrenden Journalen veroeffentlicht worden.

Die hochspannende Frage ob sich die drei Generationen Leptonen – Elektron, Myon und das Taulepton – mehr unterscheiden als bisher angenommen, beziehungsweise als es im Standardmodell verankert ist, ist zentrales Thema der Foerderperiode. Durch die Hinweise auf eine moegliche Universalitaetsverletzung in vorherigen Messungen ist das Thema ist von grosser Aktualitaet, welches zudem durch neue Daten, welche waehrend dieser Foerderperiode erschienen sind, eine neue Wendung genommen hat: Waehrend die verbesserte Analyse des LHCb-Experiments gezeigt hat das Elektron-Myon Universalitaet in seltenen B-Zerfaellen gut erfuellt ist, konnten wir als Projektbefund zeigen, dass eine erste Messung des Belle II-Experiments von B-Zerfaellen in neutrale Leptonen „Neutrinos“ einen Ueberschuss sieht, der nahelegt, dass Tauonen, als Partnerteilchen der Tau-Neutrinos, nicht-universell koppeln. Weitere Untersuchungen von Prozessen mit Neutrinos und anderen „unsichtbare“ Teilchen sind daher von grossem Interesse, sowie Zerfaelle in Tauonen. Wir haben Vorhersagen und Messvorschlaege gemacht fuer Prozesse von  $b \rightarrow s$ , sowie die weniger erforschten  $b \rightarrow d$  Quarks. Die Arbeiten sind abgeschlossen und in mehreren Publikationen veroeffentlicht worden. Eine signifikante Verletzung der Universalitaet ist auch ein Signal von Physik jenseits des Standardmodells, und kann wichtige Impulse fuer Modellbildung und dem Verstaendnis von Flavorstruktur geben, sowie Richtungen fuer Suchen an Kollidern.

Der andere Schwerpunkt des Projektes ist die Erforschung von Charm. Der Charmsektor ist komplexer zur Kaon- und B-Physik. Charm erlaubt es Kopplungen testen die sonst nicht zugaenglich sind. Wir haben in diesen Themenkomplex im Projekt sehr breit beitragen koennen. Dies beinhaltet eine allgemeine Klassifikation von Baryonzerfaellen in Endzustaend, in zwei, drei und auch vier Teilchen, mit Leptonen und Photonen. Deren volle Zerfallsspektren geben die Moeglichkeit zu besonders sensitiven Messungen, sogenannte Nulltests. Wir konnten fuer seltene Charmbaryonzerfaelle diese systematisch aufzeigen, inklusive einer Analyse der Helizitaetsformfaktoren basierend auf Endpunktsymmetrie. Als Highlight dieser Foerderperiode ist erwaehenswert dass LHCb bereits auf diese Charmbaryon-Nulltests eingegangen ist, und erste Resultate zur Vorwaerts-Rueckwartsasymmetrie auf der Discrete'24 Konferenz in Ljubljana vorgestellt hat. Wir warten mit Spannung auf die Analyse

der vollen Daten aus Run 3. Sollte die Messung nicht konsistent mit Null sein, so waere dies ein Signal neuer Physik.

Darueberhinaus konnten wir eine ersten, globalen Fit an seltene Charmzerfaelle durchfuehren. Ebenfalls beruecksichtigt wurde die Messung der CP-Asymmetrie in  $D \rightarrow KK$  (LHCb,2022), da diese ein ueberraschender Hinweis auf moegliche CP-Verletzung in der U-Spinbrechung liefert. Wir konnten eine erste, und bis dato einzigartige Interpretation der unterdrueckten CP-Asymmetrie in  $D \rightarrow KK$  durch ein sehr konkretes Model, ein leichtes, leptophobes  $Z'$ -Modell mit flavorabhaengigen Kopplungen vorschlagen.

Das zunehmende Interesse und Anzahl an experimenteller Analysen in Charm zeigt stark die Aufbruchstimmung in Charmtests des Standardmodells. Diese koennen prinzipiell auch am Belle-II Experiment durchgefuehrt werden. Wegen der komplizierten hadronischen Struktur ist insbesondere im Charmsektor eine bereichsuebergreifende Sichtweise und Methodik wichtig, um aus Synergien zwischen Theorie, Phaenomenologie und den Daten zu schoepfen. Wir freuen uns auf die Zusammenarbeit und zukuenftige Analysen von Run 3 und darueber hinaus.

# Bericht

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

Zu den Projektaufgaben und Kooperation mit LHCb existieren in der Dortmunder Teilchentheorie entsprechende Vorarbeiten und langjaehrige Expertise. Das Projekt hat vom wissenschaftlichen Umfeld in Dortmund stark profitiert.

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

Zu Projektbeginn existieren zwei wissenschaftliche Fragestellungen, zu denen wir mit dem Theorieprojekt beabsichtigen beizutragen: Die Frage ob Leptonen universell koppeln ist nach wie vor offen, allerdings gab es zu Projektbeginn Hinweise von LHCb-auf Elektron-Myon Universalitaetsverletzung, welche jedoch in der Analyse von 2022 nicht bestaetigt wurden. Ueber die Eigenschaften der dritten Generation, das Taulepton, ist weniger bekannt; es existieren Hinweise auf Universalitaetsverletzung in geladenen B-Zerfaellen. Wir haben die Partnereigenschaft von Neutrinos und geladenen Leptonen genutzt um Tests der Universalitaet mit seltenen B-Zerfaellen in Neutrinos durchzufuehren. Dieser neuen Richtung gehen wir in dieser Foerderperiode nach.

Die andere Frage ist inwieweit man das Standardmodell mit seltenen Charmserfaellen testen kann, u.a. auch ob dort die approximativen Symmetrien des Standardmodells gelten. Charm- und B-Physik eignen sich beide um das Standardmodell in Flavorobservablen systematisch zu testen und sind gleichzeitig komplementaer zueinander. Waehrend die Suche nach Neuer Physik in der B-Physik zu einem Praezisionsprogramm gewachsen ist, ist dies in seltenen Charmzerfaellen ein im Vergleich junges Gebiet, welches sowohl theoretisch als auch experimentell spannende, offene Enden hat und Gelegenheiten bietet, die es zu erforschen gilt, oder „Charm is the new Beauty“.

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

Dieses Theorieprojekt ist dem LHCb-Verbund assoziiert. Die Theorievorhersagen geben konkrete Vorschlaege fuer weitere Messungen und Interpretationen der LHCb-Daten.

Die Gruppe der Projektleiterin steht fuer enge und kontinuierliche Kooperation zwischen Theorie und Experiment in der Flavorphysik und darueber hinaus. Wir betreiben seit Jahren gemeinsame Aktivitaeten mit Mitgliedern der LHCb-Kollaboration, einschliesslich gemeinsamer Publikationen, gemeinsam organisierter Veranstaltungen und vor allem einen direkten Austausch zu Physikanalysen. In dieser Foerderperiode ist auch eneger wissenschaftliche Austausch mit Belle-II-Experimentalisten hinzugekommen.

In 2023 haben wir mit der Dortmunder LHCb-Gruppe eine neue Workshop-Serie „Charm in Dor“ zur Charmphysik ins Leben gerufen, um Synergien zwischen Theorie und Experiment vor Ort zu staerken. An diesem Mini-Workshop, das Format ist auf zwei Tage begrenzt, nehmen auch eingeladene externe Experten mit Vortraegen und Diskussionsrunden statt. Die Workshops fanden Januar 23, April 24 statt, der naechste ist fuer April 25 in Planung.

Die Kooperation erfolgt auf verschiedenen Ebenen, u.a.:

- Teilnahme und Presentation der Projektbefunde bei den jaehrlichen FSP-Treffen der deutschen Belle-II und LHCb-Gruppen
- Gemeinsame Nachwuchsausbildung, jaehrliche „Neckarzimmern“-Schule
- Seit 2023 neue, jaehrliche Workshopserie in Dortmund gemeinsam mit der Dortmunder LHCb-Gruppe an der Theorie-Experiment Schnittstelle zur Charmphysik „Charm in Dor“

- Gemeinsame Seminare und Fachdiskussionen an der TU Dortmund

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

Die Zuwendung wurde bis auf wenige zentrale Dienstreisen, wie die der Projektleiterin zu einem eingeladenen Plenarvortrag ans KEK, Tsukuba, bei einem Workshop zur Physik des Belle-II-Experiments, zur Finanzierung des Postdoktoranden Dr. Hector Gisbert-Mullor verwendet. Die engen Personalmittel haben eine Anstellung bis Ende 2022 ermöglicht. Dr. Gisbert war maßgeblich an den Arbeitsschritten der Projekte P1-P2 beteiligt, und seine Beteiligung war notwendig für den Erfolg des Gesamtunterfangens. Im Anschluss konnten wir einen Doktoranden mit den verbleibenden Projektmitteln finanzieren, um das Projekt im Bereich seltener Charmzerfälle (P3) zu bearbeiten. Auch dieses Projekt konnte durch Input des Postdoktoranden in Bezug auf Einarbeitung und Crosschecks von Codes maßgeblich profitieren und dadurch zielführend und zeiteffizient abgeschlossen werden.

Theoretisch-phenomenologische Untersuchungen welche an der Front der Forschung stattfinden sind ohne die Beteiligung hochqualifizierter Postdoktoranden mit Expertise auf dem Fachgebiet (hier Flavorphysik) nicht durchführbar.

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

Die Ziele sind im wesentlichen erreicht worden.

#### **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Alle geforderten Teilprojekte konnten erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen werden. Die Fördermittel sind (bis auf wenige zentrale Dienstreisen) für das Gehalt des Postdocs, Dr. Hector Gisbert, und anschließend für eine Doktorandenstelle verwendet worden. Herr Gisbert war maßgeblich mit der erfolgreichen Bearbeitung des Projektes beschäftigt. Ebenfalls notwendig für die Gesamtbefunde war die Mitarbeit von Doktoranden der Gruppe mit Finanzierung aus Landesmitteln. Dieser Gesamtpersonalaufwand war absolut notwendig um das Projekt im vollen Umfang erfolgreich durchzuführen.

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

Die Projektbefunde sind von unmittelbarer Relevanz für die Experimente am CERN, insbesondere für das LHCb-Experiment sowie für das Belle II Experiment am KEK. Das Vorhaben unterstützt die Experimentiergruppen in der Vorbereitung und Durch- sowie Weiterführung ihrer Analysen und erhöht die Physikausbeute am LHC Run3 und darüber hinaus. Der wissenschaftliche Nachwuchs wird durch Beteiligung am Vorhaben in internationaler Grundlagenforschung ausgebildet.

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

Durch die während der Laufzeit geänderte Datenlage -- Nullifizierung der e-mu-Leptonuniversalitätsverletzung von LHCb 2022 sowie die erste Messung eines erhöhten Verzweungsverhältnisses von  $B \rightarrow K \mu \mu$  von Belle II (2023) wurde der Fokus in P2 stärker auf Endzustände mit

Neutrinos bzw allgemeiner mit unsichtbaren Teilchen verschoben. Ebenfalls beruecksichtigt (P3) wurde die Messung der CP-Asymmetrie in  $D \rightarrow KK$  (LHCb,2022), da diese ein ueberraschender Hinweis auf moegliche CP-Verletzung in der U-Spinbrechung liefert. Somit haben wir zeitnah und an vorderster Front mit Interpretationen und Vorschlaegen fuer weitere, klaerende Messungen die neuen Befunde interpretieren koennen.

## 9 Erfolgte und geplante Veroeffentlichungen der Ergebnisse

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

Endpoint Relations for Baryons, G.Hiller and R.Zwicky, 2107.12993 [hep-ph], 10.1007/JHEP11(2021)073.

Probing for New Physics with Rare Charm Baryon ( $\Lambda_c, \Xi_c, \Omega_c$ ) Decays  
M.Golz, G.Hiller and T.Magorsch, arXiv: 2107.13010, JHEP09(2021)208.

Interplay of dineutrino modes with semileptonic rare B-decays, R.Bause, H.Gisbert-Mullor, M.Golz, and G.Hiller, arXiv: 2109.01675, DOI 10.1007/JHEP12(2021)061.

Pinning down  $\Delta c = \Delta u = 1$  couplings with rare charm baryon decays, M.Golz, G.Hiller and T.Magorsch, arXiv: 2202.02331 [hep-ph], Eur.Phys.J.C 82 (2022) 4, 357.

Rare radiative decays of charm baryons, N.Adolph and G.Hiller, 2203.14982 [hep-ph], Phys.Rev.D 105 (2022) 11, 116001.

Implications of an enhanced  $B \rightarrow K \nu \nu$  branching ratio  
R.Bause, H.Gisbert-Mullor, and G.Hiller, arXiv:2309.00075, Phys.Rev.D 109 (2024) 1, 015006.

Model-independent analysis of  $b \rightarrow d$  processes, R.Bause, H.Gisbert-Mullor, M.Golz and G.Hiller, arXiv: 2209.04457 [hep-ph], Eur.Phys.J.C (2023) 83:419.

Two is better than one: The U-spin-CP anomaly in charm, R.Bause, H.Gisbert-Mullor, G.Hiller, T. Hoehne and D. Litim, arXiv: 2210.16330, Phys.Rev.D 108 (2023) 3, 035005.

Effective field theory analysis of  $\Delta c = \Delta u = 1$  charm decays, H.Gisbert-Mullor, G.Hiller and D. Suelmann, arXiv: 2410.00115, JHEP 12 (2024) 102.

Andere Veroeffentlichungen (z. B. Konferenzbeitraege wie Vortraege und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

Null test searches for BSM physics with rare charm decays, Marcel Golz, in the proceedings of the 10th international workshop on Charm physics, arXiv:2109.07155.

Dineutrino modes probing lepton flavor violation, R.Bause, H.Gisbert-Mullor, M.Golz, and G.Hiller, EPS-HEP-2021 proceedings, arXiv: 2110.08795.

Null test BSM searches with rare charm baryon decays, M. Golz, G.Hiller and T.Magorsch, arXiv: 2203.01965 [hep-ph], in the proceedings of CKM 2021 workshop.

The role of dineutrino modes in the search for new physics, H.Gisbert-Mullor 2205.07534 [hep-ph], in the proceedings of Moriond EWK conference 2022.

Old and new anomalies in charm, R.Bause, H.Gisbert-Mullor, G.Hiller, T.Hoehne, D.Litim and T. Steudtner, arXiv:2309.04513 [hep-ph], in the BEAUTY 2023-proceedings.

Global fits of  $b \rightarrow d l+l-$ , H.Gisbert-Mullor, *PoS FPCP2023 057*, in the FPCP 2023 proceedings.

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

Tom Magorsch, MSc-Thesis, TU Dortmund Oktober 2021, "Rare semileptonic charm baryon decays as a probe of new physics"

Patrick Adolf, BSc-Thesis, TU Dortmund Juli 2021, "Flavor-Links im MFV-SMEFT"

Max Uetrecht, BSc-Thesis, TU Dortmund Juli 2021, "Flavor-Fits und Vorhersagen in SMEFT"

Antonia Bock, BSc-Thesis, TU Dortmund Juli 2021, "Flavorsymmetrien und SMEFT"

Marcel Golz, PhD-Thesis, TU Dortmund April 2022, "Delta c=Delta u=1 transitions in and beyond the Standard Model"

Rigo Bause, PhD-Thesis, TU Dortmund Mai 2022, "Exploiting the phenomenology of flavorful Z' models"

Nico Adolph, PhD-Thesis, TU Dortmund Mai 2022, "Rare radiative charm decays in and beyond the standard model"

Daniel Wendler, MSc-Thesis, TU Dortmund September 2022, "Missing Energy in the SMEFT"

Dominik Suelmann, MSc-Thesis, TU Dortmund Oktober 2022, "Rare baryon decay distributions with Missing Energy"

Miriam Simm, MSc-Thesis, TU Dortmund Oktober 2022, "Dipole operators in the Up-quark sector"

Marc Andre Schroeder, BSc-Thesis, TU Dortmund Juli 2024, "SU(2) - Vorhersagen in Charmzerfallen"

Marco Montino, BSc-Thesis, TU Dortmund Juli 2024, "Endpunktsymmetrien in hadronischen D-Zerfällen"

Der Doktorand Dominik Suelmann war bei der Bearbeitung der Teilprojekte P2 und P3 beteiligt, und wird nach Plan in Ende 2025 in der Theoretischen Flavorphysik promovieren.

Dominik Suelmann, PhD-Thesis, geplant Herbst/Winter 2025, TU Dortmund „Interpretation and New Physics signatures of rare charm decays (vorläufiger Titel)“

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: TU Dortmund

Projektleitung: Prof. Dr. Gudrun Hiller

Verbund: 05H2021 (ErUM-FSP T04)

Thema: Run 3 LHCb am LHC: Vorhersagen und Interpretation seltener Charm und b-Zerfaelle

### 1. Ziel und Inhalt des Projektes und Ergebnisse

Die Generationsstruktur fundamentaler Materie weisst tiefe Fragen auf: Warum gibt es drei Generationen von Quarks und Leptonen? Woher kommen die Unterschiede in deren Massen? Gibt es weitere Unterschiede ueber die Massen hinaus, d.h., eine Verletzung der Universalitaet? In diesem Projekt sind wir der Frage nachgegangen, ob sich Tauonen, Leptonen der dritten Generation, anders verhalten als die der ersten beiden, Elektronen, oder Myonen. Durch die Hinweise auf eine moegliche Universalitaetsverletzung in vorherigen Messungen ist das Thema ist von grosser Aktualitaet, welches zudem durch neue Daten die waehrend dieser Foerderperiode publiziert wurden eine neue Wendung genommen hat: waehrend die verbesserte Analyse des LHCb-Experiments gezeigt hat das Elektron-Myon Universalitaet in seltenen B-Zerfaellen gut erfuellt ist, konnten wir als Projektbefund zeigen, dass eine erste Messung des Belle II-Experiments von B-Zerfaellen in neutrale Leptonen „Neutrinos“ einen Ueberschuss sieht, der nahelegt dass Tauonen, als Partnerteilchen der Tau-Neutrinos, nicht-universell koppeln. Weitere Untersuchungen von Prozessen mit Neutrinos und anderen „unsichtbare“ Teilchen sind daher von grossem Interesse, sowie Zerfaelle in Tauonen. Eine signifikante Verletzung der Universalitaet ist auch ein Signal von Physik jenseits des Standardmodells, und kann wichtige Impulse fuer Modellbildung und dem Verstaendnis von Flavorstruktur geben.

Ein weiteres Highlight des Projektes sind die Ergebnisse zu seltenen flavoraendernden Charmzerfaellen. Diese sind per se interessant da sie ein Baustein zum Flavorpuzzle darstellen, und im Vergleich zu Kaon und B-Physik bisher nur relativ grob erforscht sind. Tests des Standardmodells und seiner Symmetrien in Charm ist ein Forschungsfeld welches in Dortmund entwickelt und vorangetrieben wird. Wir konnten im Projekt die Zerfallsspektren von Charmbaryonen in Photonen, Neutrinos und Leptonen vollstaendig klassifizieren und haben hochgradig diagnostische Messgroessen „Nulltests“ aufgezeigt. Erste Messungen haben interessaenterweise nun bei LHCb stattgefunden. Unsere Befunde legen wegen der guten Sensitivitaet und Komplementaritaet zu Suchen in anderen Sektoren weitere Analysen, auch bei Belle II, nahe. Ebenfalls konnten wir in einem globalen Fit Schranken an Kopplungen, welche gleichzeitig ein Vielzahl von Zerfaellen in allgemeiner Weise beschreiben, systematisch extrahieren. Das Thema Charm ist richtungsweisend und wird auch ueber Run 3 hinaus relevant sein.

Die Ergebnisse sind in internationalen, peer-review Journalen veroeffentlicht, zudem sind weitere Arbeiten (Tagungsbeitraege) auf dem Arxiv-Server oeffentlich zugaenglich.

## **2. Konkreter Nutzen sowie Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse**

Die Befunde sind von direkter Relevanz fuer das LHCb-Experiment am CERN, Run 3 und darueber hinaus, und das Belle II-Experiment am KEK. Die Arbeiten geben Richtungen fuer neue, klaerende Messungen zur Gueltigkeit des Standardmodells bei kleinsten Abstaenden vor, und erlauben eine schaeferere Interpretation existierender und zukuenftiger Messdaten.