

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05H2021 - BELLE II

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (Universitätsaufgabe)
Projektleitung: Prof. Dr. Ulrich Nierste
E-Mail: ulrich.nierste@kit.edu
Förderkennzeichen: 05H21VKKBA
Förderzeitraum: 01.07.2021 - 30.06.2024
Zuwendung: 206.639,90 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: martina.schorn@kit.edu
Zusätzlicher Name: Martina Schorn

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	5		
Andere Veröffentlichungen:	0		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	6		
Masterarbeiten:	2		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 23.12.2024 16:49 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	2
2	Bericht	3
2.1	Aufgabenstellung und Voraussetzungen des Vorhabens	3
2.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	3
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten	3
2.4	Verwendung der Zuwendung	4
2.5	Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele	4
2.6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	5
2.7	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	5
2.8	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	6
2.9	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	6
2.9.1	Referierte Publikationen:	6
2.9.2	Andere Veröffentlichungen (unreferierte Publikationen):	6
2.9.3	Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Promotion)	7

Der gemeinsame Text zum Schlussbericht des Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T09) - BELLE II der deutschen Belle II Gruppen ist diesem Bericht als Anhang beigefügt.

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

1 Zusammenfassung

Die schweren Quarks der zweiten und dritten Generation, zu denen das c - und b -Quark gehören, können in leichtere Quarks der ersten beiden Generationen (und ggf. weitere Teilchen) zerfallen. Ziel der theoretischen Flavourphysik ist die präzise Berechnung solcher Übergänge, die im Standardmodell der Elementarteilchen aus der Yukawa-Wechselwirkung stammen und deren Kopplungsstärken in der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM-Matrix) kodiert sind. Der Fokus der Flavourphysik liegt dabei auf zwei Aspekten: Zum Einen sollen die CKM-Elemente genauer bestimmt werden (Metrologie). Dazu ist wichtig, dass die Genauigkeit der theoretischen Berechnungen von Zerfallsraten und Übergangsamplituden mit der wachsenden Präzision der experimentellen Daten mithält. Zum Anderen kann in Observablen der Flavourphysik sehr effizient nach Effekten Neuer Physik gesucht werden, weil die Standardmodell-Amplituden durch z.B. kleine CKM-Elemente stark unterdrückt sind. In den letzten Jahren haben sich in der Tat statistisch signifikante Abweichungen zwischen Daten und Standardmodell-Vorhersagen gezeigt, die als *Flavour-Anomalien* bezeichnet werden.

In diesem Projekt *Theoretische Studien für Belle II und LHCb* wurden Berechnungen in und jenseits des Standardmodells durchgeführt, die sich primär auf das Forschungsprogramm der deutschen Gruppen bei Belle II und LHCb beziehen. Es liegt in der Natur theoretischer Forschung, dass die Ergebnisse ebenso für die BMBF-geförderten Experimente CMS und ATLAS von Interesse sind, die ebenfalls flavour-ändernde B-Zerfälle studieren.

Ein zentrales Thema des Projekts waren die sog. Flavour-Anomalien in Zerfallsobservablen zu $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}$. Dazu wurden Polarisationsdaten aus Belle II genutzt, um Formfaktoren einzuschränken; im Ergebnis wurde gefunden, dass bestimmte Berechnungen der Formfaktoren, für die die $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}$ -Daten mit dem Standardmodell kompatibel waren, diese Polarisationsdaten nicht reproduzieren konnten. Die Interpretation der Flavour-Anomalie durch Neue Physik wurde also gestärkt. Als konkrete Modelle zur Erklärung wurden ein neues Zwei-Higgs-Dublett-Modell und Theorien mit Leptoquarks studiert. Berechnungen zu Zerfallsobservablen in $B \rightarrow D^*\ell N$ -Zerfällen, wobei $\ell = e$ oder μ ist und N ein hypothetisches steriles Neutrino bezeichnet, sind in eine arbeitsteiliges Projekt mit der Bonner Belle-II-Gruppe eingeflossen. Im Ergebnis haben wir in den Daten einen (statistisch insignifikanten) Hinweis auf ein steriles Neutrino mit Masse 354 MeV gefunden. Eine andere Forschungslinie hat sich CP-Asymmetrien in D -Zerfällen gewidmet, um LHCb-Daten zu $D \rightarrow \pi^+\pi^-$ und $D \rightarrow K^+K^-$ besser zu verstehen. Dabei wurden Vorhersagen für diverse noch nicht genau vermessene CP-Asymmetrien gemacht.

Im Förderzeitraum sind im Projekt 1 Dissertation, 2 Masterarbeiten und 6 Bachelorarbeiten entstanden. Zwei in 2023 begonnene Dissertationen werden fortgeführt, aber nun aus anderen Mitteln gefördert.

2 Bericht

2.1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen des Vorhabens

Die avisierten Aufgaben gliederten sich wie folgt in vier Teilprojekte A, B, C und D mit insgesamt 6 Arbeitspaketen:

- A1 $B \rightarrow hS$ mit Mediator S zur Dunklen Materie
- A3 B-Zerfälle in sterile Neutrinos
- B1 Flavour-Anomalien in geladenen Zerfällen
- C1 Penguin Pollution in $B \rightarrow DD$ -Zerfällen
- C2 Penguin Pollution in B-Zerfällen mit Charmonium
- D1 Hadronische Zweikörper-D-Zerfälle

In den Arbeitspaketen A1, A3 und B1 wurden Vorhersagen für Messgrößen in Szenarien neuer Physik berechnet. Die Motivation des Teilprojekts A ist das experimentelle Programm der Karlsruher bzw. Bonner Belle-II-Gruppe zur Suche nach hypothetischen leichten Bosonen bzw. sterilen Neutrinos in B -Zerfällen. Arbeitspaket B1 lagen die über 2 Jahrzehnte aufgebauten Diskrepanzen zwischen Standardmodell-Vorhersage und Messdaten der Experimente BaBar, Belle(-II) und LHCb zu diversen Observablen in $b \rightarrow c\tau\nu$ -Zerfällen zugrunde.

Die Arbeitspakete C1, C2 und D1 betreffen Berechnungen im Rahmen des Standardmodells mit dem Ziel, hadronische Zweikörper-Zerfälle schwerer Mesonen genauer vorhersagen zu können. Diese Aktivitäten waren motiviert durch die höhere Genauigkeit der experimentellen Daten zu CP-Asymmetrien, im Fall von D1 insbesondere durch die Entdeckung der CP-Verletzung in Charm-Zerfällen durch LHCb im Jahr 2019.

2.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Basis des Vorhabens waren die Ergebnisse, die die Arbeitsgruppe in den vorangegangenen BMBF-Förderperioden mit Hilfe der Verbundforschung in der Förderperiode 2018-2021 erzielt hatte.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Der Ablauf des Projekts ist im Wesentlichen der Meilensteinplanung des Antrags gefolgt, wobei in einigen Fällen die Reihenfolge der bearbeiteten Arbeitsschritte geändert wurde. Alle Ergebnisse wurden mit den deutschen Belle II- und LHCb-Gruppen diskutiert, zu Arbeitspaket A3 gibt es eine gemeinsame Publikation mit Experimentalphysikern der Bonner Belle II-Gruppe [5]. Einige Arbeitspakete wurden mit Theoretiker(inne)n an anderen wissenschaftlichen Institutionen bearbeitet. Solche Kooperationen gab es mit Kolleg(inn)en am *Paul-Scherrer-Institut*, Schweiz, und den Universitäten von Valencia, Nagoya und Rom [1, 4, 2].

2.4 Verwendung der Zuwendung

Personalmittel im Umfang von €131.571,06 wurden zur Beschäftigung eines Postdocs und von vier Doktoranden eingesetzt. Für Konferenzreisen und wissenschaftliche Gäste wurden €13.500,32 aufgewendet. Von der Bewilligungssumme wurden €27.128,54 nicht verwendet.

2.5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Im Arbeitspaket A1 wurde mit einem projektfinitzierten Doktoranden der Zerfall eines B-Mesons in ein K-Meson und ein hypothetisches Axion-artiges Teilchen (ALP) studiert. Das ALP wird im Detektor nicht nachgewiesen, sondern erzeugt ein Signal mit fehlendem Impuls und fehlender Energie. Dieses Thema hat an Aktualität gewonnen durch die Messung des Verzweigungsverhältnisses von $B^+ \rightarrow K^+ + E_{\text{miss}}$ um 2,7 Standardabweichungen oberhalb der Standardmodell-Vorhersage für $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ durch Belle II im Jahr 2023. Da diese Messung unter maßgeblicher Beteiligung der Belle-II-Gruppe am KIT durchgeführt wurde, bestand ein enger Bezug zwischen theoretischer und experimenteller Forschung am KIT mit regem fachlichen Austausch. Im Arbeitspaket wurde ein populäres ALP-Modell mit zwei Higgs-Dubletts betrachtet und eine Zweischleifenrechnung durchgeführt. Die gefundene Zweischleifenkorrektur kann genauso groß sein wie das zuvor bekannte Einschleifenresultat, weil eine parametrische Unterdrückung in dieser höheren Ordnung aufgehoben ist. Der Doktorand wird seit Juli 2024 aus anderen Mitteln bezahlt und führt diese Forschung fort, die Publikation zum Ergebnis wird zur Zeit erstellt. Die Masterarbeit [9] und die Bachelorarbeiten [8, 13] gehören thematisch ebenfalls zum Arbeitspaket A1.

Am Arbeitspaket A3 waren ein Postdoc (kurzzeitig) und ein Doktorand aus dem Projekt finanziert. Belle II untersucht die semileptonischen Zerfälle $B \rightarrow K^* \ell^+ \nu$ primär, um das Element V_{cb} der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix zu bestimmen. Der Datensatz eignet sich aber auch, um nach dem Zerfall $B \rightarrow K^* \ell^+ N$ zu suchen, wobei N ein hypothetisches schweres steriles Neutrino (auch schweres neutrales Lepton genannt) bezeichnet. In einem arbeitsteiligen Projekt mit zwei Mitgliedern der Belle II-Gruppe der Universität Bonn wurde eine Winkelanalyse der Daten durchgeführt, wobei die KIT-Theoretiker die Formeln für die Winkelverteilungen für alle möglichen Szenarien Neuer Physik beigesteuert haben. Zudem wurde ein "bump hunt" durchgeführt, der einen (statistisch noch nicht signifikanten) Hinweis auf ein steriles Neutrino mit Masse um 354 MeV hervorgebracht hat [5]. Der Doktorand wird seit Juli 2024 aus anderen Mitteln bezahlt und führt diese Forschungslinie fort.

Im Arbeitspaket B1 wurden die in der Kombination aus Daten der Experimente *Belle*, *BaBar* und *LHCb* beobachteten Abweichungen in Observablen von b -Zerfällen in Tau-Leptonen ("Flavour-Anomalien") untersucht. Zunächst wurde dazu das Verzweigungsverhältnis von $\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c \tau \nu$ berechnet, das bei LHCb mit großem Fehler gemessen wurde und künftig einen idealen Test der Flavour-Anomalie liefern kann [1]. Ein wichtiges Ergebnis des Projekts war eine Analyse von Polarisationsdaten des Belle-II-Experiments in semileptonischen B-Zerfällen in leichte Leptonen e, μ . Es konnte gezeigt werden, dass diese Daten zwischen inkorrekten Berechnungen von Formfaktoren und Neuer Physik als Erklärung der Flavour-Anomalien diskriminieren können. Formfaktoren aus jüngeren Gitter-Eichtheorie-Rechnungen mit gestaggerten Fermionen wurden dabei als inkorrekt identifiziert, sodass eine Deutung der $b \rightarrow c \tau \nu$ Daten durch Neue Physik

gestärkt wurde [4]. Eine Modelklasse, die die Flavour-Anomalie erklären kann, sind Zwei-Higgs-Dublett-Modelle. Eine Forschungslinie dazu wurde in der Förderperiode 2018-2021 begonnen, eine Doktorarbeit erstreckte sich bis in den Beginn der Periode 2021-2024 [15]. Die zugehörige Publikation [3] enthält Resultate aus dem Arbeitspaket B1 und aus Arbeitspaket A1 der Förderperiode 2018-2021. Eine andere Modellklasse, die die anomalen Messdaten erklären kann, sind Theorien mit Leptoquarks, also Teilchen, die eine Quark-Lepton-Kopplung haben. Auch diese Forschungslinie ist aus der vorherigen Förderperiode fortgeführt worden, mit dem neuen Resultat von Fixpunkten der Renormierungsgruppen-Evolution der Quark-Lepton-Kopplungen, die das in den neutralen semileptonischen B -Zerfällen experimentell beobachtete Verhalten der Leptonflavour-Universalität zeigen [2]. Aus diesem Projekt ist eine Masterarbeit entstanden [10].

Im Februar 2019 hat das Experiment $LHCb$ die CP-Verletzung in Charm-Zerfällen entdeckt. Die beobachtete Differenz der CP-Asymmetrien in $D \rightarrow \pi^+\pi^-$ und $D \rightarrow K^+K^-$ ist größer als im Standardmodell erwartet, was entweder durch neue Physik oder durch unverständlichen QCD-Effekte erklärt werden könnte. Aus diesem Anlass wurde das Arbeitspaket A2 der F-Periode 2018-2021 danach als Arbeitspaket D1 fortgeführt. Im Sommer 2022 hat $LHCb$ dann die erwähnten CP-Asymmetrien individuell bestimmt und eine Verletzung der approximativen $SU(3)$ -Flavoursymmetrie um ca. 2 Standard-Abweichungen gefunden. Im Rahmen von zwei Bachelorarbeiten [11, 12] wurden im Rahmen einer globalen $SU(3)$ -Analyse Standardmodell-Vorhersagen für andere, noch nicht genau vermessene CP-Asymmetrien gewonnen, mit deren Hilfe man eventuelle Neue Physik entdecken könnte, denn die Signaturen sind mit denen in $D \rightarrow \pi^+\pi^-$ und $D \rightarrow K^+K^-$ verknüpft. Die Publikation ist im Begutachtungsverfahren [6]. Eine weitere $SU(3)$ -Analyse hat Verzweungsverhältnisse von D -Zerfällen in Endzustände mit einem η' -Meson und einem Oktett-Pseudoskalar betrachtet [7] (im Begutachtungsprozess) und Vorhersagen für Zerfälle erzielt, die Belle II in der Zukunft vermessen kann. Die Bachelorarbeiten [14] und [16] haben ebenfalls CP-Asymmetrien in Charm-Zerfällen untersucht.

Die Arbeitspakete C1 und C2 waren für Masterarbeiten vorgesehen. Weil sich keine geeigneten Interessenten gefunden haben, wurden diese Pakete nicht abgeschlossen und die eingeplanten Projektmittel (für den betreuenden Postdoc) nicht genutzt.

2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Beiträge des Projekts erfüllen die Kernaufgabe der Theorieprojekte in der BMBF-Verbundforschung, nämlich die Interpretation der an den BMBF-geförderten Experimenten gewonnenen Daten zu fördern und neue interessante Observablen aufzuzeigen. Diese experimentnahe, in enger Wechselwirkung mit experimentellen Kolleginnen und Kollegen durchgeführte Forschung wird nicht durch die DFG gefördert, sodass die BMBF-Förderung notwendig war.

2.7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der wissenschaftliche Nutzen des Projekts ist die Verknüpfung der Daten moderner Experimente der Flavourphysik mit fundamentalen Größen der Teilchenphysik, insbesondere die Einschränkung von Parametern hypothetischer Theorien jenseits des Standardmodells. Die Ergebnisse

dieses theoretischen Projekts der Grundlagenforschung haben keine direkte wirtschaftliche Wertbarkeit. Jedoch haben die im Projekt ausgebildeten Nachwuchswissenschaftler Fähigkeiten (insbesondere zur Softwareentwicklung) erworben, die sie zu begehrten Mitarbeitern in der Privatwirtschaft machen.

2.8 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Zur Thematik einiger Arbeitspakete gab es Publikationen ausländischer Gruppen, die jedoch entweder komplementär zu diesem Projekt waren oder andere Methodiken verwendet haben. Es gab keine Doppelungen der theoretischen Arbeiten.

2.9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

2.9.1 Referierte Publikationen:

- [1] M. Fedele, M. Blanke, A. Crivellin, S. Iguro, T. Kitahara, U. Nierste, and R. Watanabe, "Impact of $\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c \tau \nu$ measurement on new physics in $b \rightarrow c \ell \nu$ transitions," *Phys. Rev. D* **107** (2023) no. 5, 055005, arXiv:2211.14172 [hep-ph].
- [2] M. Fedele, F. Wuest, and U. Nierste, "Renormalisation group analysis of scalar Leptoquark couplings addressing flavour anomalies: emergence of lepton-flavour universality," *JHEP* **11** (2023) 131, arXiv:2307.15117 [hep-ph].
- [3] M. S. Lang and U. Nierste, " $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ in a two-Higgs-doublet model with flavour-changing up-type Yukawa couplings," *JHEP* **04** (2024) 047, arXiv:2212.11086 [hep-ph].
- [4] M. Fedele, M. Blanke, A. Crivellin, S. Iguro, U. Nierste, S. Simula, and L. Vittorio, "Discriminating $B \rightarrow D^* \ell \nu$ form factors via polarization observables and asymmetries," *Phys. Rev. D* **108** (2023) no. 5, 055037, arXiv:2305.15457 [hep-ph].
- [5] F. U. Bernlochner, M. Fedele, T. Kretz, U. Nierste, and M. T. Prim, "Model independent bounds on heavy sterile neutrinos from the angular distribution of $B \rightarrow D^* \ell \nu$ decays," *accepted for publication in JHEP*, arXiv:2410.11945 [hep-ph].

2.9.2 Andere Veröffentlichungen (unreferierte Publikationen):

- [6] S. Iguro, U. Nierste, E. Overduin, and M. Schüßler, " $SU(3)_F$ sum rules for CP asymmetry of $D_{(s)}$ decays," arXiv:2408.03227 [hep-ph].
- [7] C. Bognani, U. Nierste, S. Schacht, and K. K. Vos, "Anatomy of Non-Leptonic Two-Body Decays of Charmed Mesons into Final States with η' ," arXiv:2410.08138 [hep-ph].

2.9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Promotion)

- [8] Philipp Goller, "*Light new particles in beta decay — Calculation of the beta decay with an additional scalar coupling to the majorana neutrino,*" November 2022, Bachelorarbeit.
- [9] J. Weiss, *A Visible QCD Axion Addressing $(g - 2)_\mu$.* Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, April 2022, Masterarbeit.
- [10] F. Wüst, *Fixed Point behaviour in Renormalisation-Group Runnings for Leptoquark Parameters.* Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Oktober 2024, Masterarbeit.
- [11] Emil Overduin, "*Charge-Parity Asymmetries of Charmed Meson Decays to Pseudoscalar Mesons,*" September 2022, Bachelorarbeit.
- [12] Maurice Schüssler, "*Charge-Parity Asymmetries of Charmed Meson Decays to Pseudoscalar-Vector Mesons,*" September 2022, Bachelorarbeit.
- [13] Ben Rott, "*Energy spectrum of a pion decay into electron, neutrino and a Majoron,*" August 2023, Bachelorarbeit.
- [14] Yizhuo Xi, "*CP Asymmetries of charmed Baryon Decays,*" March 2023, Bachelorarbeit.
- [15] Martin Lang, *Leptonic Decays of Neutral B Mesons in the Three-Spurion Two-Higgs-Doublet Model.* Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, November 2023.
- [16] Andro Groseta, "*Mixing-induced Charge-Parity Asymmetries in D meson mixing,*" April 2024, Bachelorarbeit.

Karlsruhe, den 23.12.2024

Ulrich Nierste

Prof. Dr. Ulrich Nierste
(Projektleiter)

Anhang:

Allgemeiner Text zum Schlussbericht des Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T09) - BELLE II

Allgemeiner Text für Schlussberichte

Vorbemerkungen zum Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T09)

Das in diesem Schlussbericht beschriebene Projekt ist Teil des Verbundprojekts *05H2021 (ErUM-FSP T09) - Belle II* der deutschen Universitäten Bonn, Gießen, Göttingen, Karlsruhe (KIT), Mainz, der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie der Technischen Universität München (Physik und Informatik) und der assoziierten Partner Deutsches Elektronen-Synchrotron und Halbleiterlabor sowie Institut für Physik der Max-Planck-Gesellschaft. In diesem einleitenden Abschnitt werden die allgemeinen Rahmenbedingungen und die Zusammenarbeit der Verbundpartner dargestellt.

Die Kernaktivitäten der deutschen Gruppen im Belle II Experiment waren der Bau und Betrieb des PXD2, basierend auf der DEPFET-Technologie, inklusive der gesamten Auslese- und Datennahmekette, sowie der Slow Control und des Data Quality Monitoring. Weiterhin arbeiteten die deutschen Gruppen am Trigger und an der Entwicklung zentraler Software-Komponenten und Algorithmen für die Rekonstruktion von Spuren und Clustern, sowie an Analyse-Werkzeugen. Schließlich trugen die deutschen Gruppen maßgeblich zum Belle II Computing-Grid bei und waren stark beteiligt an einem breiten Spektrum von Physikanalysen, was sich in zahlreichen Publikationen widerspiegelt. Die Vernetzung, auch mit Theoretikern, die Öffentlichkeitsarbeit und die Nachwuchsförderung wurden durch den Forschungsschwerpunkt deutlich gestärkt.

Allgemeiner Status von SuperKEKB und Belle II

Abbildung [1](#) zeigt den Verlauf der von Belle II aufgezeichneten Luminosität. Bis zum Ende der Förderperiode wurden insgesamt etwa 500 fb^{-1} an Daten genommen. An der wöchentlich aufgezeichneten Luminosität ist zu erkennen, dass es kontinuierliche Verbesserungen am SuperKEKB-Beschleuniger in Run 1 bis Mitte 2022 gab. Im Juni 2022 wurde eine Rekordluminosität von $4.71 \times 10^{34} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ erreicht. Es wurden jedoch auch Strahlinstabilitäten beobachtet, die zu plötzlichen Strahlverlusten (sudden beam losses, SBLs) geführt haben. In 2021 wurde eine internationale Task-Force mit Experten anderer Beschleunigerlaboren gegründet, um das SuperKEKB-Team bei den Herausforderungen, die es auf dem Weg zu höheren Luminositäten gibt, zu unterstützen.

Nach Run 1 folgte eine eineinhalbjährige Phase, in der SuperKEKB abgeschaltet war (long shutdown 1, LS1), um sowohl am Beschleuniger als auch am Belle II-Detektor Arbeiten für einen Betrieb bei höheren Luminositäten vorzunehmen. Es wurde ein neues Strahlrohr mit erweiterter Goldbeschichtung installiert. Zusätzliche Abschirmung wurde zwischen Beschleuniger und Experiment angebracht. Um dem Injektionsuntergrund entgegenzuwirken, wurden alle Kollimatoren erneuert und ein spezieller nicht-linearer Kollimator in den Positronenring eingebaut. Eine Vielzahl von neuen Detektoren, darunter das von deutschen Gruppen mitentwickelte CLAWS-System, wurde um den Ring herum angebracht, um Strahlinstabilitäten frühzeitig zu erkennen. Im Belle II-Detektor wurde der neue Pixel-Vertex-Detektor (PXD2) eingebaut (s.u.).

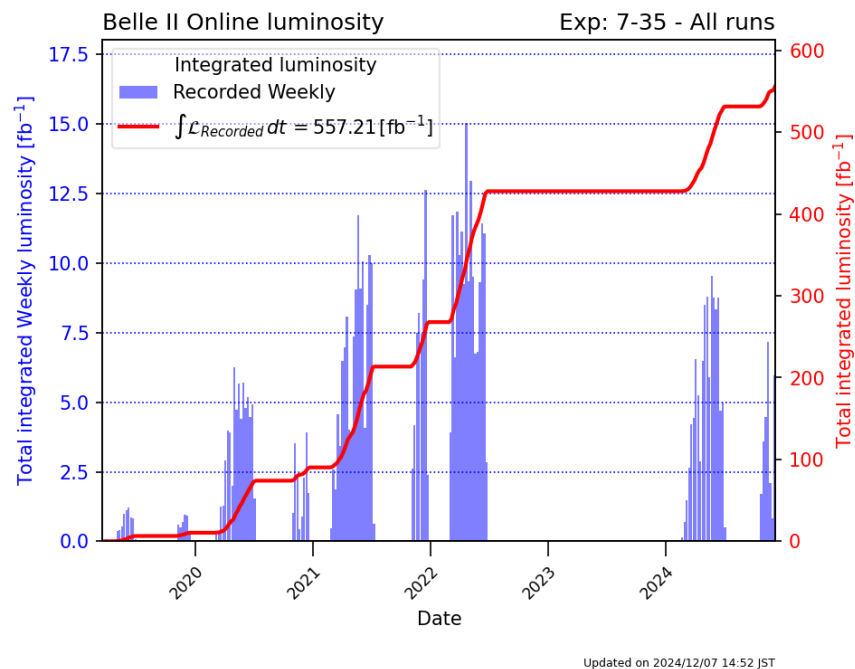


Abbildung 1: Die von Belle II in Run 1 und Run 2 bisher pro Woche und insgesamt aufgezeichnete Luminosität.

Weitere Arbeiten in LS1 waren unter anderem die Wartung und Verbesserung des Gassystems und der Überwachungsmechanismen der Driftkammer (CDC), der teilweise Austausch der Photomultiplier und Ausleseelektronik des TOP-Detektors, sowie Verbesserungen der lokalen und globalen Alarmsysteme zur Detektorüberwachung.

Anfang 2024 wurde der Betrieb von SuperKEKB und Belle II wieder aufgenommen. Das Hochfahren der Luminosität ist schneller als zu Beginn von Run 1, die Peak-Luminosität hat aber noch nicht ganz das Niveau von vor dem LS1 erreicht. Durch einige plötzliche Strahlverluste war es zu hohen Strahlendosen im Wechselwirkungsbereich gekommen, die zu Schäden am PXD2 geführt haben. Seit Mai 2024 ist der PXD2 während der Datennahme ausgeschaltet, um ihn vor weiteren Schäden zu schützen, bis die Ursache der Strahlverluste verstanden und behoben ist. Inzwischen gibt es Hinweise darauf, dass Strahlverluste durch Rückstände einer Vakuumversiegelung hervorgerufen werden. Weitere Ursachen können aber noch nicht ganz ausgeschlossen werden.

PXD2

In der Förderperiode wurden die Arbeiten am PXD2, neben dem Betrieb des PXD in Run 1, vorangetrieben, um für Run 2 einen kompletten Vertex-Detektor zu haben, so dass eine zuverlässige Spurfindung auch bei höheren Luminositäten und Untergründen gewährleistet ist. Die PXD2-Module wurden am HLL bzw. dem MPP gefertigt und dann in Bonn, am DESY, in Göttingen und am MPP eingehend charakterisiert. Probleme, die sich beim Verkleben von

Modulen zu Leitern am MPP gezeigt hatten, konnten behoben werden. Nach dem Zusammenbau zu Halbschalen am MPPP wurden diese an einem Teststand am DESY eingehend untersucht. Für ein Problem, das durch die thermische Ausdehnung von Modulen hervorgerufen wurde, konnte eine Lösung gefunden werden. Im März 2023 wurden die Halbschalen ans KEK geliefert. Nach dem Transport wurden die gesamten Services für 40 Module am Reinraum installiert und beide Halbschalen erfolgreich getestet. Daraufhin wurde der VXD ausgebaut, der PXD2 auf dem Strahlrohr montiert und im Juli schließlich der neue VXD in Belle II eingebaut. Die volle Funktionsfähigkeit des PXD2 konnte zunächst mit kosmischen Myonen und ab Februar 2024 im Strahlbetrieb gezeigt werden. Die Datenerfassung wurde dazu durch zusätzliche ONSEN-Hardware um einen Faktor 2 gegenüber Run 1 erweitert. Es mussten auch die Slow-Control- und Überwachungssysteme angepasst werden. Sowohl die Hit-Effizienz als auch die Hit-Reinheit wurde als etwa 20% höher als bei PXD1 bestimmt. Insgesamt wurden in der Förderperiode etwa 45 fb^{-1} an Physikdaten mit dem PXD2 aufgezeichnet. Da sich in Run 2 gegenüber Run 1 u.a. Kollimatoren und Abschirmungen in der Strahlführung geändert haben, wurde in Giessen die Online-Überwachung der Synchrotron-Strahlung für den PXD2 angepasst.

Durch die oben erwähnten plötzlichen Strahlverluste in Run 2 wurden einige Switcher beschädigt, so dass 2-3% des PXD2 nicht mehr ausgelesen werden können. Der Mechanismus, der zu den Schäden führt ist inzwischen, auch durch Teststrahlungsmessungen, besser verstanden. Da er nur im Betrieb wirksam ist, ist der PXD2 seit Mai 2024 während des Strahlbetriebs ausgeschaltet. Es ist damit zu rechnen, dass der PXD2 im Laufe des nächsten Jahres wieder an der Datennahme teilnehmen wird, wenn die Ursache der Strahlverluste identifiziert und behoben ist bzw. die Erkennung von Strahlinstabilitäten so frühzeitig erfolgt, dass hohe Strahlendosen im Wechselwirkungsbereich vermieden werden können.

Trigger

Die letzten eineinhalb Jahre der Förderperiode waren gekennzeichnet durch den „Long Shutdown 1 (LS1)“, der im Juli 2022 begann und Ende des Jahres 2023 endete. Die Zeit im LS1 wurde genutzt, um den z-Vertex-Trigger mit den in 2022 genommenen Daten, die durch stark erhöhten Untergrund gekennzeichnet waren, neu zu trainieren und somit seine Leistung weiter zu erhöhen. Die Netzwerk-Architektur wurde hierbei nicht verändert, weil der Betrieb des Neuronalen Triggers nach dem LS1 weiterhin auf die UT3 FPGA-Plattform beschränkt ist. Im Vergleich zu den noch im Jahr 2022 laufenden Netzwerken hat sich die Zurückweisungsrate für Spuren von außerhalb der Akzeptanzregion ($|z| < 15 \text{ cm}$) bei gleichbleibender Effizienz von 98% deutlich von 20% auf über 50% erhöht. Diese Netzwerke liefen erfolgreich im Frühjahr 2024 bis zum Ende der Förderperiode. Weiterhin wurden die vor dem Shutdown genommenen Daten genutzt, um eine erste, optimierte Version des 3D-Hough-Algorithmus abzuschließen. Auf der Hardware-Seite wurden hierfür von japanischer Seite neue „UT4“-Einheiten zur Verfügung gestellt, die deutlich höhere Ressourcen bereitstellen. Das Hauptaugenmerk bei der 3D-Hough-Spurfindung lag auf der Kontrolle der Triggerrate für den Single-Track-Trigger (STT) und auf der verbesserten Zurückweisung von „Fake Tracks“. Die Einführung der dritten Dimension bei der 3D-Hough-Methode durch den Polaremissionswinkel erlaubt es, die Kandidatensuche auf Spu-

ren aus dem Wechselwirkungspunkt zu beschränken. Die 3D-Spurfindung auf der UT4-Plattform bietet zudem die Möglichkeit, auch komplexere Netzwerkarchitekturen („Deep-Neural-Nets“ DNN), also mehrlagige neuronale Netze, einzusetzen. Eine weitere Leistungssteigerung konnte durch die Einführung eines zusätzlichen Klassifikationsknotens in der Output-Lage erreicht werden. Die Klassifikation ordnet hierbei allen Spuren mit $|z| < 1\text{cm}$ den Wert „1“ zu, sonst „0“. Bei einer Effizienz von 98% erhöht sich bei einem Schnitt von 0.5 die Zurückweisungsrate um weitere 5%.

Computing, Software und Performance

Als Land mit dem größten Mitgliederanteil spielt Deutschland eine wichtige Rolle in der Bereitstellung der Computing-Ressourcen, die für das Prozessieren und Speichern der Belle II-Daten erforderlich sind. Im Berichtszeitraum wurden die Ressourcen, die von der Computing Steering Group geplant, dem Belle Program Advisory Committee (BPAC) überprüft und den Financial Overview Board genehmigt wurden, zuverlässig von DESY, GridKa und MPP bereit gestellt. Dies beinhaltet die Speicherung von jeweils 10% der Rohdaten am DESY und GridKa. Außerdem hat das DESY vorübergehend als Kalibrationszentrum fungiert. Neben den zugesicherten Ressourcen wurden Rechenressourcen in sichtbarem Umfang in Bonn, München und Karlsruhe opportunistisch über die Einbindung in COBaID/TARDIS genutzt. Die NAF am DESY war unverzichtbar für viele Datenanalysen deutscher Gruppen. Zum erfolgreichen Betrieb der Computing-Infrastruktur hat die vom BMBF kofinanzierte Stelle am GridKa wesentlich beigetragen. In der Belle II-Kollaboration hatten Mitarbeiter an deutschen Instituten führende Rollen, darunter der Deputy Computing Coordinator, der Verantwortliche für Client Tools und User Support, der Calibration Manager und der Deputy Skim Manager.

Das DESY spielt eine zentrale Rolle bei den Collaborative Services. Dabei werden einige experimentspezifischen Services auf virtuellen Maschinen von Mitarbeitern an der LMU und dem KIT betreut. Das 2023 ins Leben gerufene Collaborative Tools Committee wird von einem Kollegen am DESY geleitet. Eine große Leistung in der Förderperiode war die erfolgreiche Migration von Atlassian Tools zu gitlab bzw. die Vorbereitung der Migration von Confluence zu XWiki. An Services hinzugekommen sind ein web-basiertes Event-Display, das von einer Google Summer of Code Studenten unter Betreuung von LMU und KIT entwickelt wurde, sowie ein an der LMU entwickeltes System für Abstimmungen.

In der Förderperiode haben deutsche Gruppen auch wieder führende Beiträge in der Softwareentwicklung geleistet, was sich in den Rollen widerspiegelt, die von Mitarbeitern an deutschen Instituten gehalten wurden. Neben dem Deputy Software Coordinator (KIT) waren dies die Leitungen folgender Gruppen: Framework and Infrastructure (LMU), Timing and Event T0 (DESY), Minor Release Management (KIT), Charged PID (MPP), Neutrals (DESY), Tracking and Vertexing (DESY, LMU), Analysis Tools (Bonn) und Generatoren (Bonn). Ein Schwerpunkt in der Softwareentwicklung war die Spurrekonstruktion mit Beiträgen von Bonn, DESY, Jülich, KIT, LMU und Mainz. Um die Rekonstruktion von Clustern im elektromagnetischen Kalorimeter hat sich das KIT gekümmert. Verbesserungen in der Teilchenidentifizierung gab es durch Arbeiten an TUM, DESY und MPP. Eine wesentliche Rolle spielten deutsche Gruppen auch bei den

Analysewerkzeugen wie der vollständigen Ereignisinterpretation (KIT, Bonn), der Kontinuums-Unterdrückung (KIT), der Rekonstruktion des Tag-B-Vertex (MPP), dem Flavor-Tagging (MPP, KIT) und dem Fittens von Zerfallsketten (DESY). Weitere wichtige Entwicklungen gab es beim Systematics Framework (LMU), dem Validation Interface for the Belle II Experiment (KIT), und dem Data Quality Monitoring (Mainz). Für die Arbeit der Softwaregruppe von entscheidender Bedeutung war die oben erwähnte Migration zu gitlab und die dadurch erforderliche Anpassung der Infrastruktur.

Die Performancegruppe spielt eine zentrale Rolle als Bindeglied zwischen den Detektor-, Software- und Physikgruppen. Bis Ende 2021 stand sie unter der Leitung von Prof. Ferber (KIT). Die Performancegruppen „Charged Particle Identification“, „Neutrals“ sowie „Tracking and Vertexing“ werden unter anderem von Mitarbeitenden des MPI und DESY geführt. Während dieser Förderperiode wurde zudem die Struktur der Performance- und Softwaregruppen neu organisiert, um flexibler auf die sich ändernden Bedingungen der Datennahme reagieren zu können. In der Förderperiode wurde die erste Kalibration der Kalorimeter-Energieauflösung abgeschlossen, und ein weiterer Fokus lag auf der Messung der Effizienz des neutralen Kaons (K_S^0), das für B -Physik und die Suche nach neuen Teilchen von Bedeutung ist. Ein wichtiger Beitrag war die Anwendung des automatisierten „Systematics Framework“ zur Bestimmung systematischer Unsicherheiten der Teilchenidentifikation. Deutsche Projektpartner spielten eine zentrale Rolle in der Messung der Myon-Identifikations-Effizienz. Deutsche Gruppen tragen maßgeblich dazu bei, die rekonstruierten Ereignisse in Belle II zu optimieren, indem sie Abweichungen zwischen simulierten und echten Daten korrigieren und systematische Fehler quantifizieren. Schwerpunkte waren hierbei die Hadronenidentifikation mittels neuronaler Netze (MPI), die Überwachung der Triggerraten bei steigenden Strahlhintergründen (KIT), Myon- und Hadron-Identifikation (DESY, Bonn), sowie die Messung der Rekonstruktionseffizienzen für π^0 , K_S^0 und K_L^0 (DESY, KIT, Bonn). Zudem wurden automatisierte Kalibrationsworkflows entwickelt (Bonn, LMU, KIT). Zahlreiche Analysewerkzeuge zur Bewertung systematischer Unsicherheiten und Korrektur der Monte-Carlo-Simulationen wurden ebenfalls von deutschen Gruppen entwickelt und betrieben. Mehrere deutsche Gruppen arbeiten an der Spurrekonstruktion, mit führenden Beiträgen zu Alignment, Strahlposition, Kalibration der Impulsskala (DESY), sowie schnellen Spurrekonstruktionsalgorithmen mit neuronalen Netzen (KIT). Das KIT ist zudem für die Clusterrekonstruktion im Kalorimeter verantwortlich. An der TUM wurden Verbesserungen bei der Teilchenidentifikation durch neuronale Netze erzielt, und die Kalibration des Flavor Taggers sowie die Triggereffizienz wurden in Bonn, am DESY und am KIT untersucht. In Giessen wurde ein auf maschinellem Lernen basierender Algorithmus implementiert und getestet, der mit einer Effizienz von 80% PXD-Cluster von Pionen mit geringem Transversalimpuls erkennt, die ansonsten nicht aufgezeichnet werden würden.

Physikanalysen

Zwischen 2021 und 2023 erzielte das Belle-II-Experiment bedeutende physikalische Fortschritte, zu denen deutsche Forschungsgruppen wesentlich beigetragen haben. Diese umfassten zentrale Ergebnisse in der Suche nach neuer Physik in seltenen Zerfällen, hochpräzisen Messungen

und der detaillierten Untersuchung von Abweichungen vom Standardmodell.

Im Jahr 2021 stand die Untersuchung des Zerfalls $B \rightarrow K\nu\nu$ im Mittelpunkt, um die sogenannten B -Anomalien zu analysieren. Dabei wurde der seltene Übergang $b \rightarrow s\nu\nu$ betrachtet, der komplementär zu Messungen von $b \rightarrow s\ell\ell$ ist, da er nicht durch $c\bar{c}$ -Schleifen beeinflusst wird, die Observablen wie P'_5 verfälschen könnten. Eine am DESY entwickelte innovative Methode zur vollständigen Rekonstruktion von Kollisionseignissen ermöglichte trotz eines relativ kleinen Datensatzes die Festlegung eines wettbewerbsfähigen Limits für das Verzweigungsverhältnis. Gleichzeitig demonstrierten präzise Lebensdauermessungen von D^0 - und D^+ -Mesonen die außergewöhnliche Vertexauflösung des PXD-Detektors. Der stabile Betrieb und die sorgfältige Kalibrierung des PXD durch deutsche Gruppen waren für diese Ergebnisse von zentraler Bedeutung.

Im Jahr 2022 weitete Belle II seinen Fokus auf seltene Zerfälle und die Suche nach neuer Physik aus. Zu den Höhepunkten zählten die bislang strengsten Ausschlussgrenzen für leptonzahlverletzende Prozesse wie $\tau \rightarrow e\alpha$ und $\tau \rightarrow \mu\alpha$. Zudem wurde der präziseste Test der Lepton-Universalität in B -Meson-Zerfällen durchgeführt, indem das Verhältnis $\mathcal{R}(X_{e/\mu})$ untersucht wurde, welches die Zerfälle $B \rightarrow X e \bar{\nu}_e$ und $B \rightarrow X \mu \bar{\nu}_\mu$ vergleicht. Weitere Analysen konzentrierten sich auf die Suche nach leichten Z' -Bosonen und anderen seltenen Zerfällen. Eine bedeutende Errungenschaft war die erste Bestimmung des CKM-Matrixelements V_{cb} durch die Analyse von q^2 -Momenten in $B \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}_\ell$ -Zerfällen. Zudem wurden präzise Lebensdauermessungen der Baryonen Λ_c und Ω_c^0 durchgeführt, die die herausragende Vertexauflösung des PXD-Detektors nutzten.

Im Jahr 2023 setzte Belle II seine Erfolge fort. Der erste Nachweis des Zerfalls $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ markierte einen Meilenstein, zu dem deutsche Gruppen mit Entwicklungen wie dem Full-Event-Tagging wesentlich beitrugen. Gleichzeitig erreichten Präzisionsmessungen neue Höhen, darunter die bislang genaueste Bestimmung der τ -Lepton-Masse mit einer Unsicherheit von nur 0,14 MeV, ermöglicht durch verbesserte Impulsauflösung und Selektionseffizienz. Erweiterte Tests der Lepton-Universalität, insbesondere durch das Verhältnis $\mathcal{R}(X_{\tau/\ell})$, lieferten neue Einblicke in B -Anomalien durch inklusive semitaunische Zerfälle. Ebenfalls in 2023 wurden die Ergebnisse zur erstmaligen Suche nach Tetraquarks mit charm- und strange Quarks im e^+e^- -Kontinuum vorgestellt, die komplementär zur Suche in B -Meson-Zerfällen ist und Präzisionstests auf chirale Symmetrie mit angeregten D_s -Mesonen ermöglicht hat.

Detaillierte Winkel- und kinematische Studien des Zerfalls $B \rightarrow D^* \ell \bar{\nu}_\ell$ ermöglichten eine präzise Bestimmung des CKM-Matrixelements V_{cb} und untersuchten mögliche Unterschiede in der Kopplung neuer Physik an Elektronen und Myonen. Deutsche Gruppen leisteten hier wichtige Beiträge. Darüber hinaus demonstrierten präzise Messungen der B^0 -Oszillationsparameter und Lebensdauern die außergewöhnlichen Fähigkeiten von Belle II und erreichten Präzisionsniveaus, die mit den Ergebnissen der Vorgängerkollaborationen BaBar und Belle vergleichbar sind.

Experimentbegleitende Theorie

Im Projekt „Belle II: Theoretische Studien für Belle II und LHCb“ wurden am KIT theoretische Arbeiten durchgeführt, die der Interpretation heutiger und künftiger Daten der Experimente

Belle II und LHCb dienen. Im Arbeitspaket zu B -Zerfällen in ein K -Meson und ein axion-artiges Teilchen wurde eine Zweischleifenrechnung durchgeführt, die die bekannte Theorievorhersage substantiell verbessert. Für eine gemeinsame Publikation wurde zusammen mit der Bonner Belle II-Gruppe nach Signaturen eines sterilen schweren Neutrinos N im Zerfall $B \rightarrow D^* \ell N$ gesucht, wobei die KIT-Theoriegruppe die Formeln für die möglichen Winkelverteilungen beige-steuert hat. Im Teilprojekt zu Flavour-Anomalien in $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}$ -Zerfalls-Observablen wurde gezeigt, dass Belle II-Daten zur D^* -Polarisation und Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie in $B \rightarrow D^* \tau \nu$ -Zerfällen zwischen verschiedenen Formfaktor-Berechnungen diskriminieren und falsch berechnete Formfaktoren als Ursache der Flavour-Anomalien ausgeschlossen werden können. Berechnungen zur Charm-Physik hatten das Ziel, Licht in die unverständlichen LHCb-Daten zu CP-Asymmetrien in $D \rightarrow \pi^+ \pi^-$ und $D \rightarrow K^+ K^-$ zu bringen. Dazu wurden Vorhersagen für andere CP-Asymmetrien bestimmt, die künftig bei Belle II oder LHCb untersucht werden können.

Forschungsschwerpunkt

Vernetzung, Transfer, und Nachwuchsförderung wurden im Verbund hauptsächlich durch das an der LMU angesiedelte FSP-Büro vorangetrieben. Bei der Öffentlichkeitsarbeit zählen dazu die Website und Berichte über die Aktivitäten der deutschen Gruppen in sozialen Medien, bei denen Kollegen am KIT eine führende Rolle gespielt haben. Die Faszination der Forschung bei Belle II wurde in Masterclasses an mehreren Standorten und virtuellen Besichtigungen des Belle II-Detektors vermittelt.

Zur Förderung und Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses wurden jährliche Akademien organisiert, die von den Teilnehmern überaus positiv bewertet wurden. Außerdem wurde eine Vertretung von Promovierenden und Postdoktoranden bei den Gruppenleitertreffen etabliert. Die Vernetzung mit der Wirtschaft wurde durch Online-Industrietreffen und durch Auftritte auf der Hannovermesse, die zusammen mit dem ErUM-Data-Hub und dem LHC-ErUM-FSP organisiert wurden, gestärkt.

Die Koordination innerhalb des Verbunds wurde durch jährliche Treffen der deutschen Gruppen, zahlreiche Treffen der Gruppenleiter und thematische Workshops verbessert. Erstere haben auch zu einer besseren Vernetzung mit Theoretikern und Kollegen von LHCb beigetragen.



Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Projektleitung: Prof. Dr. Ulrich Nierste
Verbund: 05H2021 (ErUM-FSP T09) - BELLE II
Thema: Theoretische Studien für Belle II und LHCb
Berichtszeitraum: 1.7.2021 bis 30.6.2024

Der *Der gemeinsame Teil zum Kurzbericht des Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T09) - BELLE II der deutschen Belle II Gruppen für die Förderperiode 2021-2024* ist diesem Bericht als Anhang beigefügt.

1 Ziel und Inhalt des Projektes

Die Elementarteilchenphysik zielt auf das Verständnis der kleinsten Bausteine der Materie und der zwischen ihnen wirkenden Kräfte ab. Die Flavourphysik zeichnet sich dabei dadurch aus, dass sie Effekte Neuer Physik, die über das etablierte Standardmodell hinausgeht, mit sehr hoher Effizienz erforschen kann: Sog. Flavour-ändernde neutrale Prozesse, worunter man Übergänge zwischen verschiedenen Quarks gleicher Ladung versteht, sind sensitiv auf virtuelle Effekte hypothetischer neuer Teilchen, deren Masse weit über der Energie existierender und künftiger Teilchenbeschleuniger liegt. In den Daten des LHCb-Experiments und der sog. B-Fabriken BaBar, BELLE und Belle II findet man Abweichungen von den Standardmodell-Vorhersagen für einige Messgrößen in den Zerfällen $b \rightarrow sl^+l^-$ und $b \rightarrow c\tau\nu$ („Flavour-Anomalien“). Zudem passen LHCb-Messungen zu CP-Asymmetrien in Charm-Zerfällen nicht zu den theoretischen Erwartungen. Theorievorhersagen in diesem Gebiet der Charm-Physik sind jedoch schwierig, Fortschritt in der Theorie erfordert bessere Daten und ein enges Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment.

Um in Präzisionsmessungen Fußabdrücke Neuer Physik zu entdecken —oder zumindest die Parameter der Theorien Neuer Physik einzuschränken— muss man theoretische Vorhersagen berechnen, deren Genauigkeit mit der der Präzisionsmessungen bei Belle II, LHCb, CMS und ATLAS mithält. Ziel des Projektes war, einerseits die Vorhersagen des Standardmodells für solche flavour-ändernde Prozesse, die durch die BMBF-geförderten deutschen Gruppen studiert wurden, zu verbessern. Andererseits wurden konkrete Theorien Neuer Physik studiert, die sich in diesen Prozessen zeigen könnten. Konkret wurden dazu Zerfälle von D - und B -Mesonen betrachtet.

2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Im Projekt wurde die Vorhersage der Zerfallsrate für $\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c\tau\bar{\nu}$ und die Interpretation der Daten zu $b \rightarrow c\tau\nu$ verbessert. Dazu wurden Fortschritte in der Bestimmung von Formfaktoren gemacht,

wobei neue Polarisationsdaten des Belle-II-Experiments eine wichtige Rolle gespielt haben. Die Deutung der Daten im Rahmen des Standardmodells durch steil abfallende Formfaktoren, wie in einer Rechnung der Gittereichtheorie gefunden, konnte verworfen werden und somit die alternative Deutung durch Physik jenseits des Standardmodells (z.B. durch Austausch eines geladenen Higgs-Bosons) gestärkt werden. Diese Forschungslinie wurde vertieft durch die Betrachtung eines neuen Zwei-Higgs-Dublett-Modells und —als alternativer Erklärung— von Modellen mit sog. Leptoquarks, worunter man hypothetische Teilchen versteht, die ein Quark an ein Lepton koppeln. Ein anderer Gegenstand der Forschung zu semileptonischen Zerfällen waren die Zerfälle $B \rightarrow D^* \mu N$ und $B \rightarrow D^* e N$, wobei N ein hypothetisches schweres Neutrino bezeichnet. Hierzu wurden Theorievorhersagen für Zerfalls-Verteilungen bereit gestellt und gemeinsam mit Bonner Belle-II-Mitgliedern mit Daten konfrontiert.

Eine zweite Forschungslinie hat sich mit Zerfällen von geladenen und neutralen D -Mesonen beschäftigt. Diese Mesonen enthalten ein Charm-Quark und ziehen zur Zeit ein besonderes Interesse auf sich, weil LHCb in den Jahren 2019 und 2022 erstmalig nicht-verschwindende CP-Asymmetrien in $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ und $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ gemessen hat. Diese Asymmetrien quantifizieren, inwieweit sich Zerfallsraten von Teilchen und Antiteilchen unterscheiden. Dazu wurden diverse Vorhersagen für noch nicht gemessene CP-Asymmetrien gemacht, die in der Zukunft durch Belle II oder LHCb gemessen werden können. Zudem wurde ein theoretischer Rahmen entwickelt, um Zerfälle in Endzustände mit η' zu behandeln.

3 Wesentliche Ergebnisse, konkreter Nutzen sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die wichtigsten Ergebnisse des Projekts sind, wie in Sec. 2 erwähnt, (i) die Klärung des in Sec. 2 Formfaktor-Problems in $b \rightarrow c \tau \nu$ und Stärkung der Interpretation durch Neue Physik, (ii) die Suche nach sterilen Neutrinos in semileptonischen b -Zerfällen mit einem (statistisch noch nicht signifikanten Hinweis) auf eine solches Teilchen mit Masse 354 MeV und (iii) Vorhersagen für CP-Asymmetrien in Zerfällen von D^0 -, D^+ - und D_s^+ -Zerfällen.

Wichtigste Partner bei den theoretischen Berechnungen in diesem Projekt waren das *Paul-Scherrer-Institut*, Schweiz, und die Universitäten in Valencia, Nagoya und Rom. Wichtigste experimentelle Partner bei der Durchführung des Projektes waren Kollegen der Universität Bonn, und bei der Diskussion aller experimentellen Aspekte der im Projekt studierten Prozesse waren dies die Gruppen des FSP T09 - Belle II, insbesondere die Belle II-Gruppe Ferber/Goldenzweig am KIT, sowie die LHCb-Gruppen Uwer und Hansmann-Menzemer in Heidelberg und Albrecht in Dortmund.

Karlsruhe, den 23.12.2024



Prof. Dr. Ulrich Nierste
(Projektleiter)

Allgemeiner Text für Kurzberichte

Vorbemerkungen zum Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T09)

Das Projekt ist Teil des Verbundprojekts *05H2021 (ErUM-FSP T09) - Belle II* der deutschen Universitäten Bonn, Gießen, Göttingen, Karlsruhe (KIT), Mainz, der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie der Technischen Universität München (Physik und Informatik) und der assoziierten Partner Deutsches Elektronen-Synchrotron und Halbleiterlabor sowie Institut für Physik der Max-Planck-Gesellschaft. Die Kernaktivitäten der deutschen Gruppen im Belle II Experiment waren der Bau und Betrieb des PXD2, basierend auf der DEPFET-Technologie, inklusive der gesamten Auslese- und Datennahmekette, sowie der Slow Control und des Data Quality Monitoring. Weiterhin arbeiteten die deutschen Gruppen am Trigger und an der Entwicklung zentraler Software-Komponenten und Algorithmen für die Rekonstruktion von Spuren und Clustern, sowie an Analyse-Werkzeugen. Schließlich trugen die deutschen Gruppen maßgeblich zum Belle II Computing-Grid bei und waren stark beteiligt an einem breiten Spektrum von Physikanalysen, was sich in zahlreichen Publikationen widerspiegelt. Die Vernetzung, auch mit Theoretikern, die Öffentlichkeitsarbeit und die Nachwuchsförderung wurden durch den Forschungsschwerpunkt deutlich gestärkt.