

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05H2021 - BELLE II

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (Universitätsaufgabe)
Projektleitung: Dr. Pablo Goldenzweig
E-Mail: pablo.goldenzweig@kit.edu
Förderkennzeichen: 05H21VKKB1
Förderzeitraum: 01.07.2021 - 30.06.2024
Zuwendung: 1.103.344,07 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:
Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor KEK	Gerät KEKB	Experiment Belle-II
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	4		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	27		
Andere Veröffentlichungen:	9		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	9		
Masterarbeiten:	16		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 23.12.2024 10:32 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Fachlicher Schlussbericht

BMBF-Projekt 05H21VKKB1:
Verbundprojekt 05H2021 - BELLE II: Pixeldetektor,
Software und erste Datenanalysen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Berichtszeitraum 1.7.2021 bis 30.6.2024

Projektpartner: Prof. Dr. Jürgen Becker, Dr. Pablo Goldenzweig (Leiter),
Prof. Dr. Ivan Perić

Inhaltsverzeichnis

1	Vorspann	2
2	Zusammenfassung	10
3	Softwareentwicklung für BELLE II (Teilprojekt Goldenzweig)	10
4	Detektorentwicklung für BELLE II (Teilprojekt Perić)	15
5	Hardware für den neuronalen z-Vertex Trigger (Teilprojekt Becker)	18
6	Publikationen im Berichtszeitraum	19
7	Liste der im Berichtszeitraum abgeschlossenen Bachelor- Master- und Doktorarbeiten	21

1. Vorspann

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 frühzeitiger zu erkennen. Im Belle II-Detektor wurde der neue Pixel-Vertex-Detektor (PXD2) eingebaut (s.u.).

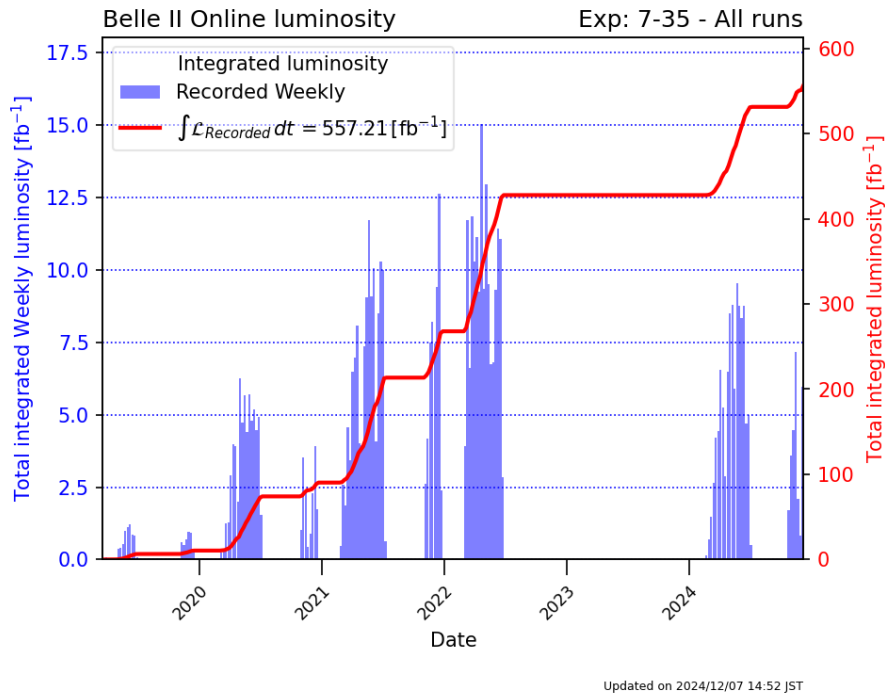


Abbildung 1: Die von Belle II in Run 1 und Run 2 bisher pro Woche und insgesamt aufgezeichnete Luminosität.

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 $|z| < 1$ 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 Kollisionsereignissen 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.

2. Zusammenfassung

Das Belle II-Experiment spielt eine Schlüsselrolle bei der Erforschung der fundamentalen Bausteine des Universums und bei der Suche nach Wechselwirkungen und Teilchen jenseits des Standardmodells (SM) der Teilchenphysik. Das am Karlsruher Institut für Technologie durchgeführte Verbundprojekt konzentriert sich auf die Entwicklung von Software und Hardware für das Belle II-Experiment. Der Fokus der Gruppe liegt auf den technischen Anforderungen, die für die Messung von B -Meson-Zerfällen mit unsichtbaren Teilchen, fehlender Energie und fehlendem Impuls, im Endzustand erforderlich sind. Wechselwirkungen und Teilchen, die über die des SM hinausgehen, können solche Signaturen durch zusätzliche Beiträge auf Baumgraphen- oder Schleifenniveau verändern. Dazu gehören Kandidaten, die vorgeschlagen werden, um die Anomalie in $B \rightarrow D^{(*)} \tau \bar{\nu}_\tau$ und den kürzlich von Belle II beobachteten Überschuss in $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ [15] zu erklären. Darüber hinaus kann auch das Vorhandensein neuer unsichtbarer Teilchen (bedingt durch dunkle Materie) die SM-Signaturen verändern. Eine vergleichbare Suche ist in Experimenten mit Hadronenbeschleunigern nicht immer oder zumindest nicht mit vergleichbarer Präzision möglich.

Dieses Projekt besteht aus 3 Teilen: *Softwareentwicklung für BELLE II* (Teilprojekt Goldenzweig); *Hardware für den neuronalen z-Vertex Trigger* (Teilprojekt Becker); und *Detektorentwicklung für BELLE II* (Teilprojekt Perić).

Im Projekt sind 4 Dissertationen, 16 Masterarbeiten und 9 Bachelorarbeiten entstanden.

3. Softwareentwicklung für BELLE II (Teilprojekt Goldenzweig)

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist die Entwicklung von Algorithmen und Analysewerkzeugen sowie die Mitarbeit an der Experimentsoftware des Belle II-Experiments. Darüber hinaus hat die KIT-Gruppe wesentliche Beiträge zum Level-1- und High-Level-Trigger geleistet, der ein wichtiger Bestandteil der Datenerfassung des Experiments ist. Darüber hinaus stellt das Teilchenphysik-Rechenzentrum GridKa bedeutende Ressourcen für die Simulation von Ereignissen sowie für die Rekonstruktion und Analyse von aufgezeichneten und simulierten Ereignissen zur Verfügung. Aufgrund der großen Datenmengen erfolgt dies hauptsächlich in einer global verteilten Infrastruktur, dem sogenannten Grid. Der GridKa-Kontakt ist am KIT angesiedelt und wird zum Teil durch dieses Projekt unterstützt.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Grundlage des Vorhabens waren die Ergebnisse der vorangehenden BMBF-Förderperiode 2021-2024. Die Projektziele wurden in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern abgestimmt.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Das Vorhaben erfolgte gemäß der Planung. Die geleisteten Arbeiten wurden mit den Verbundpartnern und Partnern in der Belle II-Kollaboration abgestimmt.

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

Die Personalmittel wurden für die Beschäftigung von Postdocs und Doktoranden verwendet. Reisekosten wurden für den Besuch des Experiments bei Kollaborationstreffen, für Schichten zur Überwachung des Detektors und für die Präsentation von Forschungsergebnissen auf Konferenzen verwendet.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

AP1: Weiterentwicklungen in der Spurenrekonstruktion

Während dieses Förderzeitraums haben Professor Torben Ferber, Postdoc Slavomira Stefkova und Doktorandin Lea Reuter einen ersten Prototyp eines vollständig trainierbaren Ende-zu-Ende-Mehrspuren-Rekonstruktionsalgorithmus für die zentrale Driftkammer (CDC) bei Belle II entwickelt. Ziel ist es, die Effizienz der Suche nach Teilchenspuren deutlich zu verbessern und die Identifizierung einer unbekanntenen Anzahl von Spuren bei hohem Strahlengrund zu ermöglichen, was angesichts des prognostizierten Anstiegs des Strahlengrunds von entscheidender Bedeutung sein wird [16].

Das Herzstück des GNN-basierten (Graph Neural Network-based) Algorithmus ist die Objektverdichtung (OC) für die Suche nach Teilchenspuren in der CDC. Der Algorithmus hat sich bei der Verallgemeinerung von Spuren als hervorragend erwiesen, was bei Ereignissen mit einer hohen Anzahl an Spuren und in der stark besetzten Strahlengrundumgebung von Belle II von entscheidender Bedeutung ist (siehe Abb. 1). Vorläufige Offline-Tracking-Ergebnisse wurden von L. Reuter auf der CHEP2023 gezeigt, wo ihr Poster mit dem ersten Preis ausgezeichnet wurde. Im Nov. 2024 wurden die endgültigen Ergebnisse bei Computing and Software for Big Science zur Veröffentlichung eingereicht [7].

Weitere Studien wurden von BSc-Student Jannis Klügl durchgeführt, der eine C++/Python-Schnittstelle entwickelte, welche die Laufzeit und den Speicherverbrauch des GNN-basierten Algorithmus zur Suche nach Teilchenspuren erfolgreich reduzierte [31].

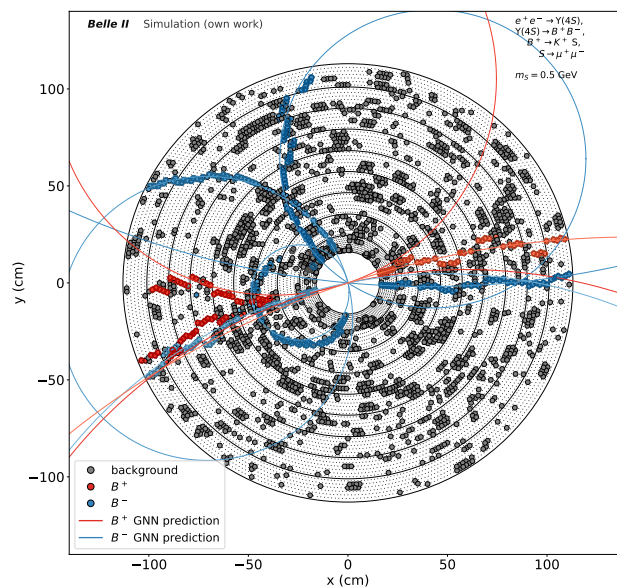


Abbildung 1: Darstellung eines simulierten Ereignisses ($\Upsilon(4S) \rightarrow B^+B^-$), das Treffer in der Driftkammer, sowie die vom GNN bestimmte Zuordnung zu Teilchenspuren und vorhergesagte Startwerte der Spurparameter (Linien), zeigt.

Der GNN-basierte Spurfindungsalgorithmus wurde zwar ursprünglich für die Offline-Rekonstruktion entwickelt, kann aber auch in die Level-1- und High-Level-Trigger-Systeme implementiert werden (siehe WP2). In Vorbereitung demonstrierte der MSc-Student Phillip Dorwarth [42] die Machbarkeit einer GNN-Pipeline für die Teilchenspursuchen in der CDC, wobei GNN-Modelle unter Verwendung verschiedener Muster für mögliche Verbindungen zu benachbarten Detektordrähte in der CDC analysiert wurden. Darüber hinaus wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Becker ein echtzeitfähiger Graphenbildender-Ansatz für die zentrale Driftkammer der Belle II CDC unter Verwendung von FPGAs entwickelt [17].

Weitere Arbeiten in diesem AP umfassen die Anpassung des zuvor entwickelten Bremsstrahlungsalgorithmus an die neuesten Simulationen, einschließlich einer detaillierten Auswertung.

Als Ergebnis dieser Arbeit des Doktoranden Patrick Ecker und des BSc-Studenten Niklas Buschmann steht der Bremsstrahlungsalgorithmus nun der Kollaboration zur Verfügung und kann die Impulsauflösung für geladene Teilchen verbessern, wovon viele Analysen in Belle II profitieren.

AP2: Optimierung der Level-1 und High-Level-Trigger Implementierungen

Die durch Teilcheninjektionen in SuperKEKB erzeugten Hintergründe erhöhen die Triggerraten, was ein kritisches Problem bei dem geschätzten zukünftigen Strahlenhintergrund darstellt. Die Arbeit der Doktorandin Isabel Haide im Bereich der Trigger-Entwicklung konzentrierte sich in erster Linie auf die Implementierung von Echtzeit-Clustering mit GNNs für den Trigger des elektromagnetischen Kalorimeters bei Belle II. Sie hat gezeigt, dass hohe Strahlenhintergründe mit einem GNN-Trigger-Algorithmus unter Verwendung von OC (siehe AP1) bewältigt werden können, wobei sich gezeigt hat, dass der Algorithmus überlappende Cluster mit höherer Effizienz trennt als der momentan verwendete Trigger-Algorithmus in Belle II. Es wurde eine deutliche Verbesserung der geschätzten Trigger-Effizienz aufgrund der verbesserten Trennung beobachtet. Dieser Algorithmus wird derzeit in Eigenleistung auf FPGAs in Belle II implementiert.

Darüber hinaus leitete der Doktorand Patrick Ecker die Entwicklung einer automatisierten Validierungsplattform namens VIBE, um u.a. die Überwachung der Triggerraten bei der Weiterentwicklung der Software zu verbessern. Seit Herbst 2022 fungiert P. Ecker als „Data Productivity Validation Convener“, bei dem neben anderen Rekonstruktionsvariablen auch die Trigger-Effizienz berücksichtigt wird.

AP3: Entwicklung von Algorithmen zur Rekonstruktion von versetzten Vertices und Weiterentwicklungen in der Spurenrekonstruktion

Der derzeit eingesetzte Belle-II-Spurfindungsalgorithmus ist nur für Spuren optimiert, die vom Wechselwirkungspunkt ausgehen und schränkt damit das Suchpotenzial für Zerfallsprodukte langlebiger Teilchen ein, die in bestimmten Szenarien der neuen Physik eine wichtige Signatur darstellen. Der oben erwähnte, neu entwickelte GNN-basierte Spurfindungs-Algorithmus (siehe WP1) wurde explizit auch für Spuren aus versetzten Vertices entwickelt, um diese Einschränkung zu finden. Vorläufige Ergebnisse der Belle-II-Offline-Spurfindung haben sehr vielversprechende Ergebnisse für verschobene Zerfallspunkte gezeigt: 96,8% Tracking-Effizienz, mit Fake- und Clone-Raten von 2,3% bzw. 0,7%. Dies ist eine erhebliche Verbesserung gegenüber der 65,6%igen Effizienz des derzeitigen Algorithmus zur Suche nach Teilchenspuren, mit einer Fake- und Clone von 8,6% bzw. 0,4% [7].

AP4: Tiefe neuronale Netzwerke für FEI-Alternative, Flavorerkennung, Kontinuumsunterdrückung und Teilchenidentifikation

Der Belle II Full Event Interpretation (FEI) Algorithmus (entwickelt am KIT in der letzten Förderperiode von Doktorand Thomas Keck [19]) rekonstruiert B -Meson-Zerfallsbäume unter Verwendung einer Reihe von individuell trainierten BDTs mit festen Zerfallsprozessen. Die Arbeit von MSc-Studentin Lea Reuter (MSc-Arbeit Feb. 2022 [37]) verwendete eine neuartige Zerfallsbaum-Darstellung über die LCAG-Matrix (lowest common ancestor generation), welche die Struktur eines Zerfallsbaums in einer kompakten Darstellung kodiert, als Trainingsziel für GNNs. Dies ermöglichte die erste durchgängig trainierbare Lösung, die direkt die hierarchische Struktur verschiedener Baumgrößen erlernt und dabei nur die Blätter des Baumes zur Darstellung der Teilchen des Endzustands verwendet. Vorläufige Ergebnisse des Algorithmus wurden auf der ACAT 2021 vorgestellt, und die endgültigen Ergebnisse wurden auf der ACAT 2022 präsentiert und in Machine Learning Science and Technology [14] veröffentlicht. Nach umfangreichen Trainings-, Evaluierungs- und Kalibrierungsstudien an vollständig simulierten Belle-II-MC und an Daten wurde das GraFEI (Graph Neural Network based FEI) im April 2024 im Belle-II-Analysesoftware-Framework (BASF2) für den Einsatz in Physikanalysen zur Verfügung gestellt.

Der MSc-Student Lars Sowa (MSc thesis [36]) setzte die Entwicklung einer auf tiefen neuronalen Netzen basierenden Kontinuum-Hintergrundunterdrückung fort (aus der vorherigen Förderperiode). Er untersuchte verschiedene neuartige Netzwerkarchitekturen und konzentrierte sich auf einen Ansatz, der auf neuronalen Aufmerksamkeitsnetzen basiert. Die Leistung wurde mit $B \rightarrow K_S^0 \pi^0$ -Abklingvorgängen untersucht, wobei Benchmark-Vergleiche mit bestehenden Kontinuum-Unterdrückungstechniken durchgeführt wurden. Das Verbesserungspotenzial wurde deutlich aufgezeigt, und mehrere Mitarbeiter/innen haben die Technik weiterentwickelt.

Die Entwicklung des Deep Neural Network Flavor Tagger und die erste Kalibrierung mit Belle-Daten wurde in der letzten Förderperiode abgeschlossen. Die Validierung und Leistungsbewertung des Algorithmus wurde mit 62.8 fb^{-1} Belle-II-Daten durchgeführt und die Ergebnisse wurden im EPJC [9] veröffentlicht.

Doktorand Alexander Heidelberg (MSc-Arbeit Feb. 2022 [38]) und BSc-Student Frederik Schmitt (BSc-Arbeit Dez. 2022 [28]) entwickelten eine verbesserte Methode zur Kandidatenauswahl bei der Suche nach der neuen Physiksignatur, die ein Axion-artiges Teilchen einschließt, das in zwei Photonen $B^\pm \rightarrow K^\pm a$, $a \rightarrow \gamma\gamma$ zerfällt, indem sie den Punzi-Loss [11] implementierten. Diese nicht-differenzierbare metrische Näherung für die Signifikanz-Optimierung bei der Suche nach neuen Teilchen wurde unter maßgeblicher Beteiligung des ETP während dieses Förderzeitraums entwickelt. Die Studien von A. Heidelberg und F. Schmitt haben gezeigt, dass das Punzi-Netz gut zu untrainierten, prompt zerfallenden Axion-artigen Teilchenmassen oberhalb der η' -Resonanz interpolieren kann. Dieses Punzi-Netz wird derzeit in der Dissertationsanalyse von $e^+e^- \rightarrow \gamma a$, $a \rightarrow \gamma\gamma$ von A. Heidelberg angewendet.

Während ihres Masterstudiums untersuchte Isabel Haide (MSc Thesis Juli 2021 [35]) das Potenzial von auf neuronalen Netzen basierenden Ansätzen als Alternative für die Simulation des Belle II time-of-propagation (TOP) Detektors. Ihre Arbeit konzentrierte sich auf die Entwicklung einer höherdimensionalen Kolmogorov-Smirnov-Metrik, die für die Validierung der neuronalen Netzwerkmodelle verwendet wird. Die Ergebnisse zeigten, dass diese Metrik die eindimensionale Metrik und die KL-Divergenz auf dem TOP MC-Simulationsdatensatz übertrifft. Dieses Ergebnis wurde auf dem ACAT 2021 Workshop am 11. November 2021 vorgestellt und wurde bei Statistical Analysis and Data Mining [1] eingereicht, aber noch nicht veröffentlicht.

AP6: Belle II-Computing

GridKa ist eines von 6 RAW-Rechenzentren welche eine Kopie der RAW-Datensätze von Belle II, zusätzlich zu der Kopie am KEKCC in Japan gespeichert hat und bereitstellt. An dieses RAW-Rechenzentren werden auch die Ereignisrekonstruktionen durchgeführt, welche dann für die späteren Analysen verwendet werden. Diese RAW-Datensätze werden am GridKa, sowie an fast allen anderen RAW-Rechenzentren, auf Bandlaufwerken gespeichert. 2021 wurden die mehr als 90 TB RAW-Datensätze am GridKa vom alten TSM Bandspeichersystem auf das neue HPSS Bandspeichersystem übertragen. Das neue HPSS Bandspeichersystem liefert eine deutlich bessere Lese- und Schreibperformance als das alte System. Dadurch ist GridKa für die anstehenden Datenraten des Belle II Experiments bestens gerüstet. GridKa hat, Stand 30.06.2024, 177 TB auf Band gespeichert und erfüllt damit die Zusage, 10% der Belle II RAW-Daten zu speichern.

GridKa liefert auch Online-Speicherplatz und Rechenleistung für die Belle II Kollaboration. Diese werden nicht nur der Rekonstruktion der RAW-Daten, sondern auch der Simulation von Kollisionseignissen und deren Rekonstruktion, sondern auch für End-Nutzer-Analysen benötigt. Beim Datentransport, als auch bei Rechenaufträgen, sogenannte Jobs, treten gelegentlich Probleme auf. Diese wurden durch den Experimentkontakt Dr. Matthias Schnepf zusammen mit dem GridKa Team schnell behoben. Dies erlaubte einen verlässlichen Betrieb, der die Erwartungen des Belle II Experiments mehr als erfüllte.

Da die Authentifizierung von Jobs mittels Grid-Zertifikten durch das Batch-System HTCondor nicht mehr unterstützt wird, mussten neue Authentifizierungsmethoden getestet und konfiguriert werden. Dr. Matthias Schnepf hat in enger Absprache mit dem Belle II Computing Team die Token- und SSL-basierte Authentifizierungsmethoden am GridKa getestet und konfiguriert. Dadurch konnte der sichere Betrieb und die Nutzung durch Belle II am GridKa gewährleistet werden. Während des Berichtszeitraums hat die Belle II Kollaboration bei GridKa über 627 Millionen HS06-Stunden bzw. 49 Millionen CPU-Stunden genutzt.

Um die Effizienz für einige Jobs zu erhöhen, gibt es in der Belle II Computinggruppe die Idee, so genannte Multi-Core Pilots zu verwenden. Dabei können Jobs, die mehrere CPU-Kerne benötigen, laufen. Das würde die Produktion von simulierten Kollisionsereignissen vereinfachen und den Ablauf optimieren. Hierzu wurden erste Tests am GridKa mit Hilfe von Dr. Matthias Schnepf erfolgreich durchgeführt. Des Weiteren hat Dr. Matthias Schnepf an Optimierungen gearbeitet, welche Nutzerjobs effizienter im Grid Umfeld laufen können. Dabei werden Jobs, die sonst kurz laufen, geschickt zusammen gefasst. Dadurch verringert sich der Overhead und erhöht die Effizienz des bisherigen Systems.

Zusätzlich zu den am GridKa bereitgestellten Rechenressourcen hat Dr. Matthias Schnepf auch die Verantwortung für die Anbindung opportunistischer Rechenressourcen. Diese Ressourcen stellt z.B. das KIT zur Verfügung, falls diese nicht KIT-intern benutzt werden. Dadurch werden diese Ressourcen effizient genutzt und können von der Belle II Kollaboration verwendet werden. Neben den opportunistischen Ressourcen am KIT wurden noch Ressourcen aus Bonn und München eingebunden. Bei der Einbindung in die GridKa Infrastruktur sowie den Betrieb, war Dr. Matthias Schnepf maßgeblich beteiligt.

Die ans GridKa angeschlossenen opportunistischen Rechenressourcen müssen allerdings die Daten von entfernten Speichersystemen lesen und darauf schreiben. Das langsame Lesen von Daten kann die Jobeffizienz negativ beeinflussen. Außerdem entsteht dadurch eine zusätzliche Last auf die Speichersysteme. Deswegen wurde am KIT ein Cache in das Belle II Grid integriert, welche für die opportunistischen Ressourcen die Daten effizient bereitstellt. Dr. Moritz Bauer hat das System zum Cachen entwickelt und konfiguriert. Das Konzept sowie erste Tests wurden von Moritz Bauer auf der *ACAT 2022* Konferenz vorgestellt. Das dazugehörige Papier mit dem Titel *XRootD caching for Belle II* wurde eingereicht und wird noch veröffentlicht. Seit 2022 ist das Caching System in Betrieb und versorgt die opportunistischen Rechenressourcen effizient mit Daten, ohne dabei Speichersysteme von anderen Rechenzentren merklich zu beeinträchtigen.

In der Hochenergiephysik gibt es immer mehr Anwendungen, welche von GPUs profitieren. Die Arbeiten von Isabel Heide und Lea Reuter, siehe oben, verwenden unter anderem GNNs, welche effizienter und schneller auf GPUs als auf CPUs trainieren. Das GridKa stellt einige GPUs bereit, welche von Dr. Matthias Schnepf betreut werden. Er hat Einweisungen und Support für die effiziente Nutzung der GPUs geliefert. Des Weiteren hat Dr. Matthias Schnepf sich mit der Nutzung von GPUs über das Belle II Grid beschäftigt und erste Grundlagentests durchgeführt.

Der Belle II Gruppe am ETP steht auch ein Grid-Speicher am GridKa zur Verfügung. Dieser ermöglicht es der Belle II Gruppe, Daten von verschiedenen Rechenressourcen zu lesen und zu schreiben. Da die Daten intern durch Dr. Matthias Schnepf gemanaged werden, kann hier auf individuelle Anforderungen leicht eingegangen werden. Dies war z.B. der Fall für die Doktorarbeit von Patrick Ecker. Dafür wurden bis zu 100 TB Speicher über mehrere Monate benötigt. Dies wäre woanders nicht oder nur schwer möglich gewesen.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Beiträge in den drei Teilprojekten waren eng mit unseren Verbundpartnern abgesprochen: die von uns geleisteten Entwicklungsarbeiten in der Spurfindung haben dazu geführt, dass die vom PXD aufgezeichneten Informationen in der laufenden Datennahme in der Spurfindung und -anpassung genutzt werden können. Der Beitrag der KIT-Gruppe war (und ist) für den Betrieb des Belle II-Detektors von entscheidender Bedeutung. Die Beiträge in der Koordination und Entwicklung im Online-Computing waren essentiell für den Erfolg der Datennahme im Zeitraum 2021-2024. Zusammen mit den Beiträgen zu Tracking-Software und Kalibrierung sowie modernsten Analysetechniken spielt das KIT eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung, dass die wissenschaftlichen Ziele des Experiments erreicht werden. Keine der Arbeiten hätte ohne die BMBF-Förderung ausgeführt werden können. Die Anzahl der im Rahmen dieser Finanzierung beschäftigten Personen war angemessen, um die vorgesehenen Aufgaben zu erfüllen.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der wissenschaftliche Nutzen des Projekts ergibt sich aus den Messungen, welche die mit dem Datensatz von Lauf 1 von 362fb^{-1} durchgeführt werden, die zusammen mit den von Belle II gesammelten zukünftigen Daten zur Beantwortung grundlegender Fragen im Bereich der „Physik der kleinsten Teilchen“ beitragen werden. Die Ergebnisse sind zwar nicht direkt kommerziell verwertbar, jedoch haben die im Rahmen des Projekts ausgebildeten Nachwuchswissenschaftler Fähigkeiten in der statistischen Datenanalyse und Softwareentwicklung erworben, die es ihnen ermöglichen, erfolgreich in der Privatwirtschaft tätig zu werden.

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

In der Spurrekonstruktion-Software und ersten Leistungsstudien, sowie High-Level-Trigger und Online Computing sind weitere Gruppen tätig. Diese sind aber komplementär zu den hier geleisteten Aufgaben.

4. Detektorentwicklung für BELLE II (Teilprojekt Perić)

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen des Vorhabens

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Aufbau des Belle II Pixeldetektors. Der Detektor basiert auf Sensoren in DEPFET-Technologie, die am Halbleiterlabor der Max-Planck Gesellschaft (MPG HLL) entwickelt wurde. Die DEPFET-Detektoren benötigen externe ASICs um die Transistor-Reihen ein- und auszuschalten, die gesammelte Ladung zu löschen und die Transistorströme zu verstärken und zu digitalisieren. Die ersten zwei Aufgaben übernehmen sog. SWITCHER Chips. Für die Signalverstärkung und Digitalisierung sind DCDs zuständig, die 256 Kanäle, jeweils mit einem Verstärker und einem ADC, enthalten. Beide Chips werden am KIT entwickelt. In der Förderperiode 21-24 haben wir eine verbesserte SWITCHER Version entworfen und getestet. Wir haben ebenfalls ein System für vollautomatische DCD- und SWITCHER-Tests auf einem Waferprober weiterentwickelt.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In den Förderperioden 2014-2021 wurden die Produktionsversionen des DCD und SWITCHER ASICs entworfen. Ein System für vollautomatische DCD- und SWITCHER- Tests auf einem Waferprober wurde entwickelt und die Serientests von ASICs durchgeführt. PXD-Module wurden aufgebaut, getestet und die Einstellungen der ASICs optimiert. 2018 wurde der erste Pixeldetektor (PXD1) in Belle II eingebaut (nur die Hälfte der Module waren zunächst installiert) und in 2019 wurde mit der Aufzeichnung der Kollisionen im Rahmen des Physikprogramms begonnen. Der Betrieb ist ohne große Probleme verlaufen. Es gab aber einige Stahlverlust-Ereignisse den einige SWITCHER Chips beschädigt wurden. Ein Ziel in der Förderperiode 2021-2024 war

es eine neue SWITCHER Version (HLSWITCHER) zu entwerfen, die unempfindlicher auf solche Stahlverlust-Ereignisse ist.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Der Ablauf des Vorhabens folgte im Wesentlichen der Projektplanung. Einige Arbeitspakete wurden zusammen mit den Kollegen von anderen Instituten bearbeitet: So wurden die Tests am neuen SWITCHER zusammen mit dem HLL durchgeführt. Bumping-Technik wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) in Berlin entwickelt.

4 Verwendung der Zuwendung

Zuwendung (BMBF-Mittel)

Personalmittel:

Es wurden keine Personalmittel beantragt, die Arbeit am Switcher ASIC-Design und Tests wurde aus eigenen Mitteln des Antragstellers finanziert.

Investitionsmittel:

Herstellung von HLSWITCHER: 22.600€

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Das erste Ziel: Eine verbesserte SWITCHER Version zu entwerfen und testen haben wir erreicht. Wir haben das neue Design des SWITCHER – ASICs entworfen. Der Chip wurde vom Hersteller TSI im Rahmen eines sog. "full mask engineering runs" hergestellt. Der Chip wurde hergestellt und erfolgreich getestet. Da für Hochluminositätsphase von Belle II ein CMOS Sensor geplant wird und ein neuer DCD Auslesechip nicht nötig ist haben wir den HLDCD in 28 nm nicht submittiert. Die Hauptkomponente des Chips – ein 8-bit ADC – wurde auf einem Testchip charakterisiert.

HLSWITCHER (SWITCHER-B2.3): Im PXD Betrieb gab es einige Stahlverlust-Ereignisse, wobei einige SWITCHER Chips beschädigt wurden. Wir haben die Mechanismen der Strahlenschäden untersucht. Die Untersuchung hat zuerst auf den Kontrollmessungen im Belle II Betrieb und auf Simulationen basiert. Eine empfindliche Schaltung (ein Regler für eine Versorgungsspannung im Clear-Treiber) wurde lokalisiert. Wir konnten unsere Simulationsergebnisse experimentell reproduzieren, indem wir SWITCHER Chips am Beschleuniger MAMI in Mainz mit einem fokussierten Elektronenstrahl bestrahlt haben. Die Strahlintensität wurde passend gewählt, so dass der Teststrahl eine ähnliche Dosisleistung in Silizium wie die Strahlung während des Stahlverlust-Ereignisses erzeugt hat. Der neue SWITCHER enthält zusätzliche Schutzschaltungen, die seinen Spannungsregler unempfindlicher für hohe Dosisleistungen bei Strahlverlusten machen. Wir haben zwei Arten von Schutzschaltungen implementiert. Die erste Schaltung basiert auf einer Sensordiode, die Teilchenfluss misst und wenn ein Wert überschritten wird den Spannungsregler abschaltet. Damit wird verhindert, dass die Ausgangsspannung des Reglers unkontrolliert steigt. Eine andere Schutzschaltungen wirkt wie ein großer Kondensator und verhindert einen schnellen Spannungsanstieg am Regler-Ausgang. Die erste Schaltung ist neuartig und verhindert einen langsamen Spannungsanstieg. Die zweite Schaltung ist einfacher und stellt einen redundanten Schutzmechanismus dar. Der neue SWITCHER wurde zusammen mit 5 anderen Chips zur Herstellung an TSI geschickt. Die Designs bilden eine Chip-Gruppe - ein Retikel. Auf einem Retikel befinden sich 5 Kopien des SWITCHER-Designs. Wir erhalten auf diese Weise 260 Chips pro Substrat (Wafer). Da es sich um ein full mask run handelt, haben wir vollständige (nicht zersägte) Substrate erhalten. Das ist ein großer Vorteil im Fall von Switcher, da die Erzeugung von Bumps einfacher ist, wenn sich Chips auf einem Wafer befinden. Es entfallen dadurch die Prozessschritte wo die Einzelchips auf ein Substrat aus Glas Aufgeklebt werden müssen. Die

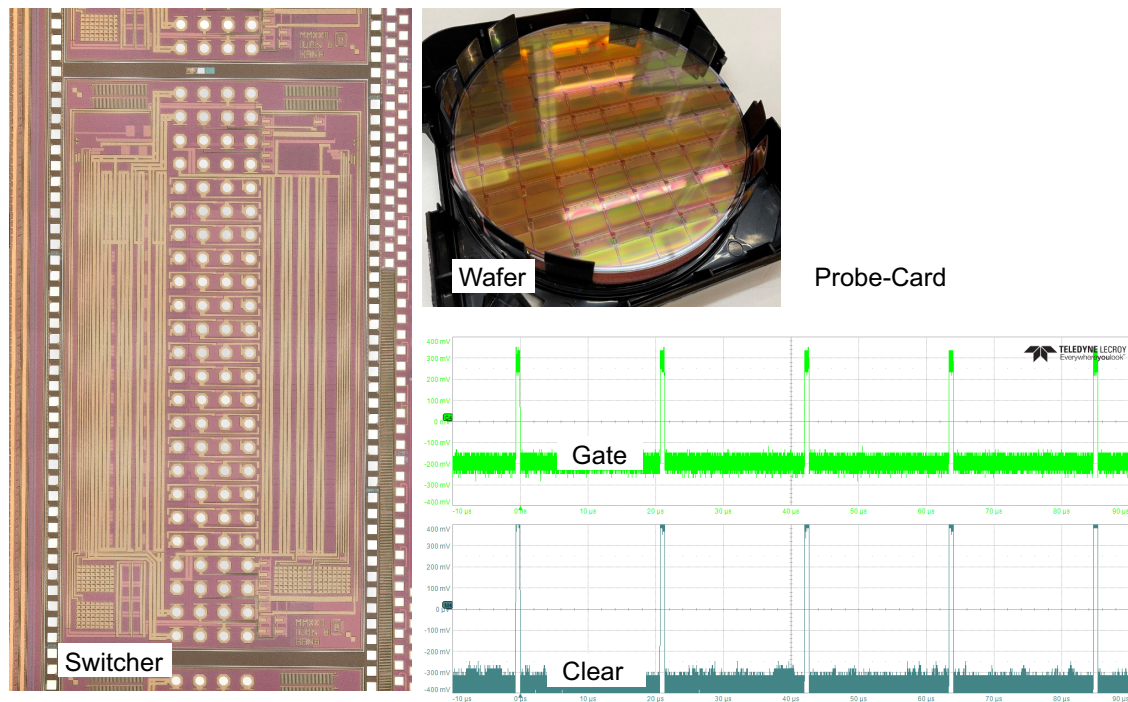


Abbildung 2: Links: Foto des Switcher Chips. Oben: Ein Wafer mit den Chips und die Probe-Card. Unten: Die gemessenen Gate- und Clear Signale. Die Signale wurden nach dem Spannungsteiler auf der Probe-Card gemessen.

Gesamtkosten des full mask runs (enthalten den Maskensatz, Designvorbereitungskosten und die Herstellung von 12 Wafers) waren 143.000 USD (zzgl. MwSt.). Die nicht zersägten Chips wurden zunächst mit der Probecard getestet. Alle Tests waren erfolgreich. Es war auch möglich die clear- und gate-Ausgangssignale bei voller Geschwindigkeit und voller Amplitude zu testen. Der Chip funktioniert wie erwartet. Abbildung 2 zeigt Foto des Switcher Chips, ein Wafer mit den Chips, die Probe-Card und die gemessenen Gate- und Clear Signale. Die Signale wurden nach dem Spannungsteiler auf der Probe-Card gemessen. Der Spannungsteiler erzeugt eine Dämpfung von Faktor 10. Zwei Switcher-Wafers wurden an Institut IZM zum Bumpen und Schneiden geschickt. Der neue SWITCHER wird für Aufbau von Ersatzmodulen verwendet werden.

Systeme für ASIC-Validierung:

Für die Fertigstellung des PXD haben wir zusätzliche SWITCHER Chips auf Probestation getestet und die neue Probecard in Betrieb genommen. Wir haben auch das Probecard System für SWITCHER Messungen am Halbleiterlabor des MPI aufgebaut. Dafür wurde eine Leiterplatte von uns entworfen und unser Probecard-Design von der Firma PTSL hergestellt. Die Software und Firmware wurden angepasst.

PXD2:

Nach vier Jahren erfolgreichen Betriebs wurde PXD1 durch das neue vollständige PXD2 ersetzt.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Auslese der verwendeten DEPFET Detektoren sind Spezialchips notwendig, die am KIT entwickelt und in ausreichender Stückzahl getestet wurden. Die hier beschriebenen Arbeiten sind daher von zentraler Bedeutung für das Gelingen des Belle II Experiments.

7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die DEPFET Pixeltechnologie ist für Experimente an verschiedenen zukünftigen Teilchenbeschleunigern interessant. Sehr gute Eigenschaften von DEPFETs wie das sehr niedrige Rauschen

bei langsamer Signal-Auslese machen die Technologie auch für andere Forschungsgebiete interessant. DEPFETs können zum Beispiel an Röntgensatellitenmissionen eingesetzt werden, wo sie Vorteile gegenüber voll depletierten CCDs bieten. Ein Beispiel ist das Mercury Imaging x-Ray Spectrometer (MIXS) auf der BepiColombo Raumsonde (Start war 2018). Weiterhin könnte das bildgebende Potential und die Möglichkeit den Dynamikbereich zu erweitern für Röntgen- oder Elektronen-Bildgebung interessant sein. Im Projekt EDET werden DEPFETs für die Transmissionselektronenmikroskopie verwendet. Die ASIC-Entwicklung am KIT (strahlenharte Multikanal-ADC Chips und Hochspannungschips) könnte auch für andere Anwendungen vom Interesse sein, z.B.: Medizin, Auslese verschiedener Detektoren, Einsatz im Weltraum, usw.

8 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bereich Detektion von geladenen Teilchen, machte in den letzten Jahren eine andere Technologie großen Fortschritt: monolithische, depletierte, oder Hochvolt-CMOS Sensoren (HVCMAPS, HVCMOS, oder DMAPS-Sensoren). Diese Sensorart stellt eine Alternative für DEPFETs in Teilchenphysik-Anwendungen dar.

5. Hardware für den neuronalen z-Vertex Trigger (Teilprojekt Becker)

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Aufgabenstellung ist die FPGA-seitige Weiterentwicklung und den Betrieb des z-Vertex Track Triggers. Der bestehende Trigger soll an das sich ändernde Hintergrundrauschen angepasst werden. Dabei soll ein Prototyp einer 3D Hough Vorverarbeitung und eines Triggers für versetzte Spuren entwickelt werden.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Für das Projekt konnte, bezüglich der Hardware-Umsetzung, auf die Arbeiten in der vorausgegangenen Förderperiode aufgebaut werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Durch die Kürzungen erfolgte die Arbeiten dem gekürzten Plan. Der Betrieb des z-Vertex Track Triggers wurde über die gesamte Laufzeit sichergestellt. Die Entwicklung der 3D Hough Vorverarbeitung wurde gestartet ist aber noch nicht abgeschlossen. Die gesamten Arbeiten erfolgten in enger Kooperation mit der Gruppe von Troben Ferber (KIT) und Christian Kiesling (MPI). Die Arbeiten in Japan wurden in Zusammenarbeit mit den Kollegen um Trigger Gruppenleiter Koga-san (KEK) ausgeführt.

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

Bewilligte E13 (1/2) Doktorandenstelle.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Geplant war den Betrieb des Triggers sicherzustellen. Diese wurde erreicht. Außerdem war ein neue 3D Hough Vorverarbeitung sowie ein Prototyp für versetzte Spuren geplant. Durch die Kürzungen entstand nur ein 3D Hough Prototyp dessen Entwicklung in der neuen Förderperiode fortgesetzt wird. Für den nicht geförderten vers

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das hier weiter entwickelte System ist der wichtigste Spurtrigger im Experiment. Ohne dieses System würde die Effizienz der Datennahme massiv leiden. Alle Arbeiten sind zur Funktionsfähigkeit des Experiments nötig.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das entwickelte System reduziert den Untergrund signifikant und arbeitet dabei äußerst effizient. Der hier entwickelte z-Vertex Track Trigger ist der wichtigste Spurtrigger im gesamten Experiment. Der Single Track Trigger ermöglicht das behalten bisher verworfener Spuren und erhöht damit die Effizienz des L1 Triggersystems.

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

Für das Thema maschinelles Lernen gab es im Projektzeitraum viele Weiterentwicklungen. So wurden neue Netzarchitekturen vorgestellt und bekannte weiterentwickelt. Auch im Bereich FPGAs gab es neue Plattformen. So sind die von Xilinx entwickelten Versal Plattformen mit AI Engines jetzt erhältlich. Seit 2024 gibt es auch einen auf maschinellen Lernen basierender Trigger im Cern CMS Experiment.

Für das Thema Graph Neural Networks finden sich erste Arbeiten in der Literatur, die sich mit der Umsetzung auf FPGA Hardware beschäftigen. Auch die Forschungsgruppe von Prof. Becker hat in Eigenleistung erste Untersuchungen in diese Richtung angestellt und veröffentlicht.

6. Publikationen im Berichtszeitraum

1 Teilprojekt Goldenzweig

- [1] A. Hagen, S. Jackson, J. Kahn, J. Strube, I. Haide, K. Pazdernik, and C. Hainje, "Accelerated Computation of a High Dimensional Kolmogorov-Smirnov Distance," (6, 2021), arXiv:2106.13706 [stat.CO]. Submitted to Wiley journal Statistical Applications and Data Mining.
- [2] **Belle-II** Collaboration, F. Abudinén *et al.*, "Exclusive $B \rightarrow X_u \ell \nu_\ell$ Decays with Hadronic Full-event-interpretation Tagging in 62.8 fb^{-1} of Belle II Data," arXiv:2111.00710 [hep-ex].
- [3] **Belle-II** Collaboration, F. Abudinén *et al.*, "Reconstruction of $B \rightarrow \rho \ell \nu_\ell$ decays identified using hadronic decays of the recoil B meson in 2019 – 2021 Belle II data," arXiv:2211.15270 [hep-ex].
- [4] **Belle-II** Collaboration, L. Aggarwal *et al.*, "Snowmass White Paper: Belle II physics reach and plans for the next decade and beyond," arXiv:2207.06307 [hep-ex].
- [5] T. Ferber, A. Filimonova, R. Schäfer, and S. Westhoff, "Displaced or invisible? ALPs from B decays at Belle II," arXiv:2201.06580 [hep-ph].
- [6] J. de Blas *et al.*, "Focus topics for the ECFA study on Higgs / Top / EW factories," arXiv:2401.07564 [hep-ph].
- [7] L. Reuter *et al.*, "End-to-End Multi-Track Reconstruction using Graph Neural Networks at Belle II," arXiv:2411.13596 [physics.ins-det].
- [8] E. Bernreuther, K. Böse, T. Ferber, C. Hearty, F. Kahlhoefer, A. Morandini, and K. Schmidt-Hoberg, "Forecasting dark showers at Belle II," *JHEP* **12** (2022) 005, arXiv:2203.08824 [hep-ph].
- [9] **Belle-II** Collaboration, F. Abudinén *et al.*, "B-flavor tagging at Belle II," *Eur. Phys. J. C* **82** (2022) no. 4, 283, arXiv:2110.00790 [hep-ex].
- [10] T. Ferber, C. Garcia-Cely, and K. Schmidt-Hoberg, "Belle II sensitivity to long-lived dark photons," *Phys. Lett. B* **833** (2022) 137373, arXiv:2202.03452 [hep-ph].

- [11] P. Feichtinger *et al.*, “Punzi-loss: a non-differentiable metric approximation for sensitivity optimisation in the search for new particles,” *Eur. Phys. J. C* **82** (2022) no. 2, 121, arXiv:2110.00810 [hep-ex].
- [12] S. Longo, M. Khan, S. Dharani, B. von Krosigk, and T. Ferber, “Energetic neutron identification with pulse shape discrimination in pure CsI crystals,” *JINST* **17** (2022) no. 07, P07007, arXiv:2202.12623 [physics.ins-det].
- [13] **Heavy Flavor Averaging Group, HFLAV** Collaboration, Y. S. Amhis *et al.*, “Averages of b-hadron, c-hadron, and τ -lepton properties as of 2021,” *Phys. Rev. D* **107** (2023) no. 5, 052008, arXiv:2206.07501 [hep-ex].
- [14] J. Kahn *et al.*, “Learning tree structures from leaves for particle decay reconstruction,” *Mach. Learn. Sci. Tech.* **3** (2022) no. 3, 035012, arXiv:2208.14924 [physics.comp-ph].
- [15] **Belle-II** Collaboration, I. Adachi *et al.*, “Evidence for $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ decays,” *Phys. Rev. D* **109** (2024) no. 11, 112006, arXiv:2311.14647 [hep-ex].
- [16] A. Natochii *et al.*, “Measured and projected beam backgrounds in the Belle II experiment at the SuperKEKB collider,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **1055** (2023) 168550, arXiv:2302.01566 [hep-ex].
- [17] M. Neu, J. Becker, P. Dorwarth, T. Ferber, L. Reuter, S. Stefkova, and K. Unger, “Real-Time Graph Building on FPGAs for Machine Learning Trigger Applications in Particle Physics,” *Comput. Softw. Big Sci.* **8** (2024) no. 1, 8, arXiv:2307.07289 [hep-ex].
- [18] **HFLAV** Collaboration, Y. S. Amhis *et al.*, “Averages of b-hadron, c-hadron, and τ -lepton properties as of 2021,” *Phys. Rev. D* **107** (2023) no. 5, 052008, arXiv:2206.07501 [hep-ex].
- [19] T. Keck, [...], F. Bernlochner, [...], P. Goldenzweig, *et al.*, “The Full Event Interpretation: An Exclusive Tagging Algorithm for the Belle II Experiment,” *Comput. Softw. Big Sci.* **3** (2019) no. 1, 6, arXiv:1807.08680 [hep-ex].

2 Teilprojekt Perić

- [20] **Belle-II DEPFET, PXD** Collaboration, H. Ye *et al.*, “Commissioning and performance of the Belle II pixel detector,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **987** (2021) 164875.
- [21] **Belle-II PXD** Collaboration, Q. Liu *et al.*, “Operational Experience and Performance of the Belle II Pixel Detector,” *JPS Conf. Proc.* **34** (2021) 010002.
- [22] **Belle-II DEPFET, PXD** Collaboration, B. Wang *et al.*, “Operational experience of the Belle II pixel detector,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **1032** (2022) 166631.
- [23] **Belle-II DEPFET, PXD** Collaboration, G. Giakoustidis *et al.*, “Status of the BELLE II Pixel Detector,” *PoS Pixel2022* (2023) 005.
- [24] **Belle-II DEPFET, PXD** Collaboration, A. Baur *et al.*, “The Belle II Pixel Vertex Detector,” *PoS VERTEX2023* (2024) 009.

3 Teilprojekt Becker

- [25] K. Unger, M. Neu, J. Becker, E. Schmidt, C. Kiesling, F. Meggendorfer, and S. Skambraks, "Data-driven design of the belle ii track segment finder," *Journal of Instrumentation* **18** (Feb., 2023) C02001.
<https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/C02001>.
- [26] M. Neu, J. Becker, P. Dorwarth, T. Ferber, L. Reuter, S. Stefkova, and K. Unger, "Real-time Graph Building on FPGAs for Machine Learning Trigger Applications in Particle Physics," *arXiv preprint arXiv:2307.07289* (2023) .
- [27] K. Unger, J. Becker, C. Kiesling, Y. Ma, F. Meggendorfer, M. Neu, E. Schmidt, and U. Zweigart, "A Convolution Neural Network Based Displaced Vertex Trigger for the Belle II Experiment," in *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications*, F. Palumbo, G. Keramidas, N. Voros, and P. C. Diniz, eds., vol. 14251, pp. 173–184. Springer Nature Switzerland, Cham, 2023.
https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-42921-7_12. Series Title: Lecture Notes in Computer Science.

7. Liste der im Berichtszeitraum abgeschlossenen Bachelor- Master- und Doktorarbeiten

1 Teilprojekt Goldenzweig

- [28] F. Schmitt, *Improving Event Selection with Machine Learning Methods for the $B^\pm \rightarrow K^\pm a$, $a \rightarrow \gamma\gamma$ Search at Belle II*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [29] A. Avocone, *Sensitivity Study for $B^+ \rightarrow K^+ \alpha$ at Belle II with XGBoost Classifier*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [30] N. Buschmann, *Validation of the Belle II Bremsstrahlung Correction*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [31] J. Klügl, *Development of a C++/Python Interface for a New Track Finding Algorithm in Belle II*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [32] R. Schmid, *Preparatory studies for a Time-Dependent CP Violation measurement of $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$* . Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [33] H. Li, *Search for a Dark Photon with Classifying Anomalies through Outer Density Estimation*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [34] L. Frank, *Search for the Rare Decay $B^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell \gamma$ with the Full Event Interpretation at the Belle II Experiment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
- [35] I. Haide, *Fast Simulation and Validation of the Time of Propagation Detector at the Belle II Experiment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
- [36] L. Sowa, *Deep Continuum Suppression with Predictive Uncertainties at the Belle II Experiment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
- [37] L. Reuter, *Full Event Interpretation using Graph Neural Networks*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [38] A. Heidelberg, *Sensitivity Study in the Search for $B^\pm \rightarrow K^\pm a$ (displaced $a \rightarrow \gamma\gamma$) Decays at Belle II*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [39] J. Eppelt, *Anomaly Detection in Searches for Inelastic Dark Matter with a Dark Higgs*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.

- [40] G. Heine, *A Fast AI-Based Track Reconstruction on FPGA for the PANDA Experiment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [41] F. Wemmer, *Photon Reconstruction in the Belle II Calorimeter Using Graph Neural Networks*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [42] P. Dorwarth, *Graph-Building and Input Feature Analysis for Edge Classification in the Central Drift Chamber at Belle II*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [43] F. Metzner, *Preparation of a Measurement of $\mathcal{R}(D^{(*)})$ with Leptonic τ and Hadronic FEI Tag at the Belle Experiment*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [44] J. Jabbar, *Fast Simulation of Electromagnetic Calorimeter Responses using Deep Learning*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [45] M. Bauer, *Measuring the Branching Fraction of $B \rightarrow \rho \ell \nu_\ell$ Decays with the Belle II Experiment*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2023. Summa cum laude.

2 Teilprojekt Perić

- [46] H. Mateos, *Development of CMOS Sensors for Scientific and Industrial Applications = Entwicklung von CMOS-Sensoren für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.

3 Teilprojekt Becker

- [47] F. Mätzler, *Entwicklung eines flexiblen Python-basierten Testframeworks für VHDL-Module: Am Beispiel der Neuentwicklung des Mergers und Track Segment Finders des Belle II Experiments*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [48] S. Shao, *Parallelization of Graph Neural Networks by using compiler-based high-level synthesis tools*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [49] Y. Ma, *Design and Evaluation of a CNN Based Displaced Vertex Trigger for the Belle II Experiment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [50] Q. He, *Low Latency Graph Construction for the Belle II Track Segment Finder*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [51] T. D. Tran, *Entwurf und Evaluation neuer Netzarchitekturen für den z-Vertex Track Triggers im Belle II Experiment*. Bachelorarbeit, 2023.
- [52] J. F. Grapengeter, *Design and Evaluation of a 3D Hough z-Vertex Track Trigger for the Belle II Experiment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [53] T. Mi, *Hough based displaced Vertex Trigger on FPGA for the Belle II Experiment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [54] J. Zhou, *Hough transformation for the displaced vertex trigger in the Belle II Experiment*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [55] M. Neu, *Data-Driven Design of the Belle II Track Segment Finder for Dark Matter Decays*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [56] U. Zweigart, *Entwurf eines Convolutional Neural Network für displaced vertex Spuren im Belle II Experiment*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.

Karlsruhe, den 23.12.2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Pablo Goldenzweig', written in a cursive style.

Dr. Pablo Goldenzweig
(Projektleiter)

Berichtszeitraum 1.7.2021 bis 30.6.2024

Projektpartner: Prof. Dr. Jürgen Becker, Dr. Pablo Goldenzweig (Leiter),
Prof. Dr. Ivan Perić

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.

1 Ziel und Inhalt des Projektes

Das Belle II-Experiment spielt eine Schlüsselrolle bei der Erforschung der fundamentalen Bausteine des Universums und bei der Suche nach Wechselwirkungen und Teilchen jenseits des Standardmodells (SM) der Teilchenphysik. Das am Karlsruher Institut für Technologie durchgeführte Verbundprojekt konzentriert sich auf die Entwicklung von Software und Hardware für das Belle II-Experiment. Der Fokus der Gruppe liegt auf den technischen Anforderungen, die für die Messung von B -Meson-Zerfällen mit unsichtbaren Teilchen, fehlender Energie und fehlendem Impuls, im Endzustand erforderlich sind. Wechselwirkungen und Teilchen, die über die des SM hinausgehen, können solche Signaturen durch zusätzliche Beiträge auf Baumgraphen- oder Schleifenniveau verändern. Dazu gehören Kandidaten, die vorgeschlagen werden, um die Anomalie in $B \rightarrow D^{(*)} \tau \bar{\nu}_\tau$ und den kürzlich von Belle II beobachteten Überschuss in $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ zu erklären. Darüber hinaus kann auch das Vorhandensein neuer unsichtbarer Teilchen (bedingt durch dunkle Materie) die SM-Signaturen verändern. Eine vergleichbare Suche ist in Experimenten mit Hadronenbeschleunigern nicht immer oder zumindest nicht mit vergleichbarer Präzision möglich.

2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Das Teilprojekt *Softwareentwicklung für BELLE II* besteht aus fünf Themenbereichen: Der erste Arbeitsbereich der Gruppe liegt im Bereich der Rekonstruktion von Teilchenspuren im Detektor. Hier hat die Gruppe einen ersten Prototyp eines vollständig trainierbaren End-to-End-Mehrspur-Rekonstruktionsalgorithmus unter Verwendung von Graph Neural Networks (GNN) für den Central Drift Chamber Tracking Detektor bei Belle II entwickelt. Ziel ist es, die Effizienz der Suche nach Spuren deutlich zu verbessern und die Identifizierung einer unbekannt Anzahl von Spuren bei hohem Strahlenuntergrund zu ermöglichen. Das zweite Arbeitspaket befasst sich mit den Level 1 und High Level Triggern. Die Forschung zu den Trigger-Effizienzen konzentrierte sich in erster Linie auf die Implementierung von Echtzeit-Clustering mit GNNs für den elektromagnetischen Kalorimeter-Trigger bei Belle II. Es wurde gezeigt, dass hohe Strahluntergründe mit einem GNN-Trigger-Algorithmus mit Objektverdichtung angegangen werden können, wobei der Algorithmus nachweislich überlappende Cluster mit höherer Effizienz trennt als der aktuelle Trigger-Algorithmus. Es wurde eine bemerkenswerte Verbesserung der geschätzten Trigger-Effizienz aufgrund der verbesserten Trennung beobachtet. Der derzeitige Belle-II-Spurrekonstruktionsalgorithmus ist nur für Teilchenspuren optimiert, die vom Wechselwirkungspunkt ausgehen, wodurch das Suchpotenzial für Zerfallsprodukte langlebiger Teilchen eingeschränkt wird. Dies motiviert die im dritten Arbeitspaket durchgeführten Arbeiten, nämlich die Rekonstruktion von verschobenen sekundären Zerfallsorten, die eine wichtige Signatur in bestimmten Szenarien der neuen Physik darstellen. Das vierte Arbeitspaket umfasst die Erforschung von Methoden des maschinellen Lernens für die Rekombination von Teilchen und die Datenanalyse. Es wurde ein Prototyp eines GNN-basierten Algorithmus zur Teilchenrekombination entwickelt. Darüber hinaus wurden tiefe neuronale Netze bei der Entwicklung eines Algorithmus zur Unterdrückung des leichten Quark-Jet-Hintergrunds und eines Algorithmus zur Kennzeichnung von B -Flavor eingesetzt. Der letzte Arbeitsbereich ist der Datenverarbeitung gewidmet. Der Ansprechpartner für das Belle II Experiment am GridKa ist am KIT angesiedelt und ist für den Betrieb der experimentenspezifischen Dienste und die reibungslose Zusammenarbeit mit anderen Komponenten verantwortlich, damit die benötigten Rechenressourcen zuverlässig bereitgestellt werden können. GridKa ist eines von 6 RAW-Datenzentren. Diese haben eine Kopie der RAW-Datensätze von Belle II, zusätzlich zu der Kopie, die am KEK-CC in Japan gespeichert ist. Des Weiteren stellt GridKa Online-Speicherplatz und Rechenleistung für die Belle-II-Kollaboration zur Verfügung. Diese werden nicht nur zur Rekonstruktion der RAW-Daten genutzt, sondern auch zur Simulation von Kollisionseignissen, deren Rekonstruktion und für Endnutzeranalysen. GridKa hat ebenfalls das Nutzen opportunistischer Rechenressourcen in Deutschland für die Belle II Kollaboration ermöglicht. Die in diesem Zeitraum durchgeführten Arbeiten waren entscheidend für die Integration der opportunistischen Ressourcen von unseren Partnern. Dazu gehörte auch die Integration eines Caches für das Belle II Grid am KIT, der das problemlose und performante Lesen von entfernten Speichersystemen erlaubt.

Im Teilprojekt *Hardware für den neuronalen z-Vertex Trigger* wurde die FPGA basierte Hardwarearchitektur für den z-Vertex Track Trigger weiterentwickelt. Dieser nutzt neuronale Netze, um den Ursprung einer Teilchenspur zu ermitteln. Damit lässt sich Tauschek-getriebene Untergrund Rauschen der normalerweise weit entfernt vom Wechselwirkungspunkt entsteht effektiv unterdrücken. Der z-Vertex Track Trigger ist durch seine hohe Effizienz der wichtigste Spurtrigger der ersten Triggerstufe. Zusätzlich sorgt ein in Hardware implementierter Ein-Spur-Trigger dafür, dass auch seltene Physik Ereignisse getriggert werden können.

Im Teilprojekt *Detektorentwicklung für BELLE II* haben wir eine verbesserte SWITCHER-Version entworfen und getestet. Wir haben ebenfalls ein System für vollautomatische DCD- und SWITCHER- Tests auf einem Waferprober weiterentwickelt.

3 Konkreter Nutzen sowie Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse

Die im Projekt geleisteten Arbeiten sind notwendig, um das Belle II-Experiment erfolgreich zu betreiben und seine Daten zu interpretieren. Der wissenschaftliche Nutzen liegt darin, dass neue Signaturen von Physik jenseits des Standardmodells studiert werden können, insbesondere in seltenen Zerfällen und Zerfällen mit unsichtbaren Teilchen im Endzustand. Der primäre wirtschaftliche Nutzen liegt in der Ausbildung junger Menschen, die die erworbenen Kenntnisse in Hardware- und Softwareentwicklung in Tätigkeiten in der Wirtschaft einsetzen.

Die DEPFET-Technologie hat Anwendungen in Teilchenphysik, Astronomie (z.B. Imaging x-Ray Spectrometer (MIXS) auf der BepiColombo Raumsonde), Transmissionselektronenmikroskopie (EDET), usw. Die ASIC-Entwicklung am KIT hat ein breites Anwendungspotential für Teilchenphysik, Medizintechnik, Datenauslese diverser Detektortypen und Weltraumforschung.

Karlsruhe, den 23.12.2024



Dr. Pablo Goldenzweig
(Projektleiter)