Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

Projektleitung: Prof. Dr. C. Blume

Verbund: 05P2021 (ErUM-FSP T06)

Thema: „Aufbau von CBM bei FAIR: Bau eines Transition Radiation Detectors für das CBM Experiment bei FAIR“

Zusammenfassung

Dieses Projekt ist Bestandteil des gemeinsamen Antrags der beteiligten deutschen Gruppen zur BMBF Verbundforschung zum Bau des Compressed Baryonic Matter (CBM) Experiments. Dieser ist Teil des BMBF Förderschwerpunktes C.B.M.@FAIR. Das Ziel dieses Projekts ist der Bau des Transition Radiation Detectors (TRD) für das CBM-Experiment bei FAIR. Das CBM-Experiments wird der Erforschung des QCD Phasendiagramms im Gebiet sehr hoher Netto-Baryonendichten (bzw. großer baryochemischer Potentiale) dienen. Von besonderem Interesse sind die Phasenstruktur und die Zustandsgleichung baryonischer Materie bei höchsten Dichten, wie sie z.B. auch im Zentrum von Neutronensternen auftreten. Die Schwerionenstrahlen der zukünftigen FAIR Beschleunigeranlage bieten exzellente Voraussetzungen zur Erzeugung und Erforschung dieser Art von Kernmaterie und das CBM-Experiment wird die Messung einer Vielzahl von Observablen ermöglichen, von denen viele zum ersten Mal im Bereich hoher Baryonendichten untersucht werden können. Dies beinhaltet unter anderem die Suche nach Signaturen für die Phasengrenze zwischen Hadrongas und Quark-Gluon Plasma und nach einem möglichen kritischen Punkt im QCD Phasendiagramm, als auch das Studium von Medium-Modifikationen von Hadronen in dichter Materie. Das CBM-Experiment wird für die kommenden Jahrzehnte hervorragende wissenschaftliche Möglichkeiten bieten und einen sehr wichtigen Beitrag zur Ausbildung von Physikern/-innen leisten. Die wissenschaftliche Zielsetzung der Experimente mit CBM an FAIR ist im Detail im gemeinsamen Antrag zur BMBF-Verbundforschung im Rahmen des BMBF Forschungsschwerpunkts C.B.M.@FAIR dargelegt.

Als eine wichtige Komponente des CBM-Experiments ist der TRD insbesondere auf den Nachweis von Elektronen bei höheren Impulsen, sowie von leichten Kernen ausgelegt. Er ist damit von entscheidender Bedeutung für zwei wichtige Punkte im Physik-Programm von CBM, nämlich die Messung von thermischen Dielektronen und von Hyperkernen. Der Detektor wird aus 216 Modulen bestehen, die sich jeweils aus einer Vieldrahtproportionalkammer und einem Radiator, sowie der zugehörigen Ausleseelektronik zusammensetzten. An der Goethe-Universität wurde dieses Projekt von zwei Forschergruppen im Rahmen von zwei Teilprojekten (TP) bearbeitet:
TP1: Bau von Komponenten für den CBM-TRD und Analyse von HADES Daten (Leitung: Prof. Christoph Blume, CBM-TRD Projektleiter). Im Rahmen dieses Teilprojekts konnten die Entwicklungsarbeiten für den CBM-TRD mit drei Arbeitspaketen (AP) voran getrieben werden. Im Rahmen von AP1 („Modul-Produktion und Detektor-QA“) wurden Vorserien-Module des TRD gebaut und ausführlich innerhalb des mCBM-Aufbaus am SIS18 der GSI getestet. In AP2 („FEB-Entwicklung und Infrastruktur“) wurden in enger Zusammenarbeit mit der AG Fischer, Universität Heidelberg, und der AG Kebschull, Universität Frankfurt, (s. TP2) Entwicklungsarbeiten zur Front-End-Elektronik und zur Datenauslese des

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.

TRDs durchgeführt. Weiterhin wurde ein System zur LV-Versorgung entwickelt und getestet. Innerhalb von AP3 („Software, Machine Learning und HADES Analyse“) wurden Software-Entwicklungen für den CBM-TRD durchgeführt (detailliertes Modell der TRD-Geometrie in der Simulationssoftware, Algorithmen zur Auslese und Verarbeitung von TRD-Rohdaten, Verbesserung und Validierung der Detektorsimulation), Algorithmen zur Rekonstruktion von Hyperkernen unter Anwendung von Machine Learning Methoden entwickelt und Daten des HADES Experiments hinsichtlich kollektiver Flussphänomene analysiert.

TP2: DAQ-Entwicklungen für den CBM-TRD (Leitung: Prof. Udo Kebschull). Innerhalb dieses Teilprojekts wurde FPGA-Firmware für die TRD-Auslese unter Verwendung von High-Level-Synthese (HLS) entwickelt. Insbesondere wurden Algorithmen zur Feature Extraction (Signalankunftszeit, Ladungsdeposition und Cluster Finding) innerhalb der TRD-CRI Firmware implementiert und mit realen Daten im mCBM-Aufbau erfolgreich getestet.

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.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgabenstellung:
TP1 (AG Blume): Eine wesentliche Aufgabenstellungen dieses Teilprojekts war es Vorserien-Module für den CBM-TRD zu bauen und innerhalb des mCBM-Aufbaus zu betreiben. Die Datennahme mit mCBM stellt einen wichtigen Qualitäts-Test der Detektor-Module dar (AP1) und ist entscheidend für die Ausentwicklung der TRD-Datenauslese (AP2 und TP2). Diese Arbeiten schaffen die Voraussetzung für den Abschluss des derzeit laufenden Production Readiness Reviews (PRR) und damit für die Serienproduktion der TRD-Module. Weiterhin sollten die Softwareentwicklungen für den TRD weiter voran getrieben werden (AP3), so dass eine möglichst realistische Simulation des Verhaltens von Detektor und Ausleseelektronik durchführbar ist. Darüber hinaus sollten einschlägige Erfahrungen in der Physik-Analyse durch das Studium von existierenden HADES Daten gewonnen werden.
TP2 (AG Kebschull): Die Aufgabenstellung des Teilprojektes ist die kontinuierliche Weiterentwicklung und Wartung der CBM-TRD Datenerfassung (DAQ). Basierend auf der grundlegenden HLS-Implementierung der FPGA-Firmware sollen komplexerer feature extraction Algorithmen entwickelt und getestet werden.

Voraussetzungen:
Die Arbeiten zur Fertigstellung von Komponenten des CBM-Experiments sind abhängig von der allgemeinen Planung von FAIR. CBM ist hier als First Science+ (FS+) Projekt kategorisiert und eine endgültige Freigabe dieser Ausbaustufe durch das FAIR Council steht noch aus. Jedoch wurde die Fortsetzung des CBM Gesamtprojekts durch positive Council Entscheidungen hinsichtlich der Dipolmagnet-Beschaffung und der technischen Ausstattung des CBM Caves ermöglicht, so dass am ursprünglichen Zeitplan für die CBM Installation (2027) und erste Datennahme (2028) festgehalten werden kann. Aufgrund der anfänglichen Unklarheiten in der Gesamtplanung waren die Investitionsmittel der BMBF-Verbundförderung für CBM zunächst gesperrt, was auch entsprechende Veränderungen im Projektplan des CBM-TRDs nach sich zog. Diese Sperre wurde Anfang 2024 aufgehoben, in Verbindung mit einer Laufzeitverlängerung der Förderung bis Ende 2024, so dass die Beschaffung von TRD-Komponenten ab dort aufgenommen werden konnte.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

TP1 (AG Blume): Dieses Teilprojekt setzt die Vorarbeiten nahtlos fort, die am Institut für Kernphysik Frankfurt (IKF) im Verlauf der vorangegangenen Förderperioden zum CBM-TRD Projekt geleistet wurden. Darüber hinaus konnte an die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten von Modulen für das ALICE-TRD Projekt angeknüpft werden, an denen das IKF bereits maßgeblich beteiligt war.
TP2 (AG Kebschull): Die Komplexität der Entwicklung von FPGA-Firmware für die physikalische Echtzeit-Verarbeitung von Messdaten nimmt stetig zu. Fortschritte in den Designer-Tools, sowie größere FPGAs erlauben es nun, FPGA-Firmware mithilfe von HLS entwickeln und damit die Komplexität zu minimieren. Das HLS-Design baut auf den Arbeiten aus vorhergehender Förderperioden auf.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

TP1 (AG Blume): Für dieses Teilprojekt wurden drei Arbeitspakete definiert: AP1: „Modul-Produktion und Detektor-QA“, AP2: „FEB-Entwicklung und Infrastruktur“ und AP3: „Software, Machine Learning und HADES Analyse“. Zu AP1 war geplant Detektor-Module vom Typ-5 zu bauen und ausführlichen Tests im Labor, sowie im Betrieb in mCBM zu unterziehen. Für AP2 war die Ausentwicklung und Test

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.

der Front-End-Boards (FEB) geplant, wobei hier eine verbesserte Version des Auslese-ASICs SPADIC verwendet werden sollte. Außerdem war damit zusammenhängend die Entwicklung und Test des LV-Systems vorgesehen. Im Rahmen von AP3 sollte eine detaillierte Überarbeitung der Beschreibung der Detektorgeometrie und -simulation in der CBM-Software durchgeführt und Methoden zur Kalibration entwickelt werden. Weiterhin war geplant Machine Learning Algorithmen auf die Rekonstruktion von TRD-Daten anzuwenden und die Analyse von kollektiven Phänomenen in den Au+Au und Ag+Ag Daten der HADES Kollaboration weiter zu verfolgen. Diese Aktivitäten sind essentiell als Vorbereitung auf eine möglichst schnelle Analyse von kommenden CBM Daten.
TP2 (AG Kebschull): Ziel des Teilprojektes ist es eine funktionsfähige Auslese zu entwickeln, die dem CBM Auslesekonzept entspricht. Dazu sollte das HLS Basisdesign der TRD-Firmware kontinuierlich durch Feature-Extraction-Algorithmen (Energie- und Zeitrekonstruktion, Cluster-Finding) erweitert und getestet werden. Diese Arbeiten werden in engem Kontakt mit der AG Blume und der DAQ Arbeitsgruppe an der GSI, Darmstadt, durchgeführt.

Über die beiden an der Universität Frankfurt angesiedelten Teilprojekte hinaus, wird das CBM-TRD Projekt in enger Zusammenarbeit auch von der AG Andronic an der Universität Münster (TRD Module, Infrastruktur), der AG Fischer an der Universität Heidelberg (SPADIC Auslesechip) und, als neu hinzugekommenen nationalen Kollaborationspartner, der AG Ritman an der FZ Jülich / Universität Bochum (Gassystem) durchgeführt. Als internationaler Kollaborationspartner ist eine Gruppe vom IFIN-HH, Bukarest, Rumänien (TRD Module in der inneren Detektorregion), und eine Gruppe vom ICSI, Râmnicu Vâlcea, Rumänien (Beiträge zum Gassystem), im CBM-TRD Projekt involviert.

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

TP1 (AG Blume): Die bewilligten Investitionsmittel wurden zum Einen zur Beschaffung von Materialien zum Bau von TRD-Modulen (Eintrittsfenster mit Kapton-Folien auf Fiberglas-Rahmen, Backpanel aus CFK und Honeycomb-Material, Anoden- und Kathodendrähte, Kabel zur Hochspannungsversorgung, sowie Klebstoffe und Hilfsmaterialien) verwendet. Ein Großteil dieser Materialien wurde zentral vom technischen Koordinator des TRD-Projekts (P. Kähler, IKP Münster) über die Universität Münster bestellt und dann anteilig der Uni Frankfurt in Rechnung gestellt. Zum Anderen wurden Mittel zur Beschaffung des LV-Distribution-Systems verwendet. Die Personalmittel wurden für zwei Doktorandenstellen für die beiden Arbeitspakete AP1 und AP2, sowie für zwei PostDoc-Stellen (eine nur anteilig) zu AP3 verwendet.
TP2 (AG Kebschull): Die Investitionsmittel erlaubten die Finanzierung eines Teils der CRI-Boards, die zur gesamten TRD-Datenauslese benötigt werden. Die Personalmittel wurden zur Finanzierung einer Doktorandenstelle verwendet.

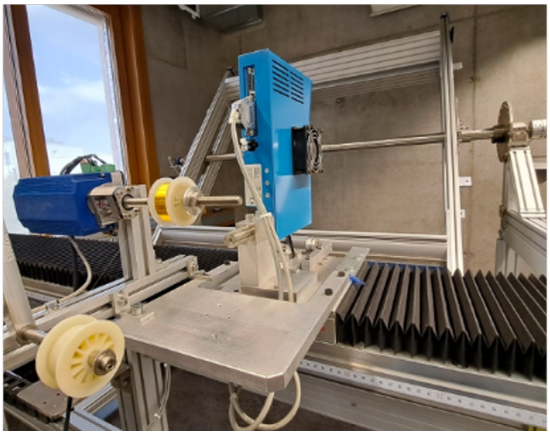
Ein Teil der oben angeführten Gegenstände (HV-Kabel, LV-System, CRI-Boards) werden in einer gemeinsamen Bestellung von den universitären Gruppen über FAIR in Darmstadt beschafft und wurden deshalb dort als Beitrag zum CBM Construction Team Account in Rechnung gestellt.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

TP1 (AG Blume): Im Verlauf dieses Teilprojekts konnten die geplanten Ziele im Wesentlichen erreicht werden. Innerhalb von AP1 („Modul-Produktion und Detektor-QA“) wurden zwei TRD Module vom Typ-5 fertig gestellt, d.h. große Module der Dimension 95 x 95 cm^2 mit feiner Auslese-Granularität (3456 Auslesepads pro Modul mit jeweils 2,67 cm^2 Fläche). Außerdem wurde die Serienproduktion von Komponenten der Typ-5-Module gestartet. Der Bau der Module und ihrer Komponenten erfolgte in den beiden Detektorlaboren der Frankfurter und Münsteraner Gruppen, wobei die Backpanel und Eintrittsfenster in Münster präpariert wurden und die Drahtebenen in Frankfurt aufgebracht und die Kammern

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.

geschlossen wurden (s. Abb. 1). Die beiden fertigen Module wurden anschließend in den mCBM-Aufbau integriert, in Betrieb genommen und in mehreren Strahlzeiten am SIS18 ausführlich getestet. Grundsätzlich erfüllten die beiden Module die in sie gestellten Erwartungen und konnten sehr erfolgreich im mCBM-Aufbau betrieben werden. Als einziges Problem wurden lokale Instabilitäten in der Hochspannung beobachtet, die bei einer genaueren Untersuchung auf einen lockeren Anodendraht zurückzuführen waren. Diese Erfahrungen wurden genutzt um die Qualitätssicherung während der Modulproduktion weiter zu verbessern, so dass derartige Probleme in der Zukunft vermieden werden können. Weitere Vorserien-Module sind derzeit im Bau, welche, nach Durchführung aller notwendigen Tests zusammen mit den Erfahrungen aus dem mCBM-Betrieb, die Grundlage für den Abschluss des laufenden Production Readiness Reviews (PRR) darstellen sollen. Anschließend werden dann die restlichen Typ-5 Module fertiggestellt, worauf im Anschluss dann mit der Serienproduktion der Typ-3 Module fortgefahren werden kann. Die entsprechenden Materialien dafür sind bereits beschafft worden, bzw. sind derzeit in der Bestellung.



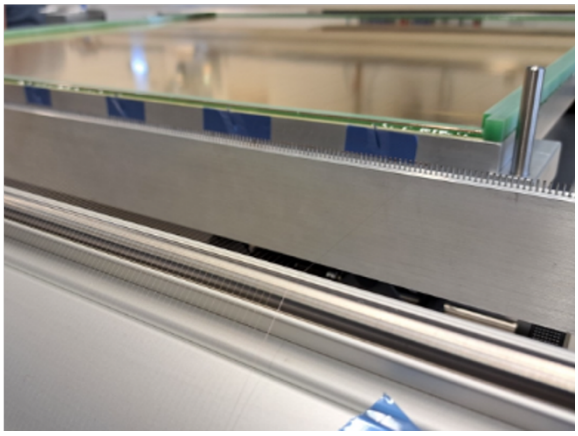


Abbildung 1: Wicklung der Anoden- und Kathoden-Drahtebenen im IKF-Detektorlabor (links). Aufbringen der Drahtebenen auf die Backpanel der Typ-5 TRD-Module (rechts).

Im Rahmen von AP2 ("FEB-Production and QM, Infrastructure (LV, HV)") wurde die Weiterentwicklung der Front-End-Elektronik (FEE) vorangetrieben. Die beiden Typ-5 Vorserien-Module im mCBM-Aufbau konnten vollständig mit der Vorserien-Version der FEBs ausgestattet werden, so dass die gesamte Detektoroberfläche zur Datennahme in einer, dem realen Experiment-Aufbau entsprechenden Version, zur Verfügung stand (s. Abb. 2). Diese FEBs benutzen derzeit noch den Auslesechip SPADIC in der Version 2.2. Auch wenn sich diese Version in der mCBM-Datennahme als sehr stabil erwiesen hat und auch grundsätzlich allen Anforderungen entspricht, hat es sich jedoch als unvermeidlich herausgestellt Verbesserungen hinsichtlich des Rauschverhaltens und der Produktions-Ausbeute durchzuführen. Dazu wurde von der Gruppe in Heidelberg (AG Fischer) die Version 3.0 entwickelt, die eine neue, besonders robuste ADC-Implementierung beinhaltet. Durch technische Komplikationen bei der Produktion hat sich deren Entwicklung leider verzögert. Mittlerweile konnten jedoch die ersten ASICs einer Test-Submission dieser Version in Heidelberg bereits erfolgreich getestet werden und die Submission eines weiter optimierten Designs (Version 3.1) des ASICs wurde beauftragt. Der Start der FEB-Massenproduktion kann entsprechend erst nach deren Fertigstellung erfolgen, so dass dieses AP noch nicht endgültig abgeschlossen ist. Um eine verzögerungsfreie Qualitätskontrolle der fertigen FEBs durchführen zu können, wurde in Frankfurt ein entsprechendes QA-Framework für die FEBs entwickelt und zur Einsatzreife fertiggestellt. Die bisherigen Erfahrungen aus dem Betrieb der Front-End-Elektronik in mCBM konnten dazu genutzt werden, um das LV-Verteilungssystem, unter Verwendung der bereits beschafften Wiener PL506 LV-Netzteile, zu konzipieren und zu testen. Insbesondere wurden hier Optimierungen hinsichtlich des Erdungsschemas erreicht. Damit sind alle Hardware-Komponenten für die TRD-Datenauslese

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.

ausentwickelt, bzw. stehen bereits in einer Vorserien-Version zur Verfügung, so dass nach der Lieferung aller SPADIC 3.1 Chips die gesamten FEBs inklusive LV-Versorgung schnell produziert werden können.

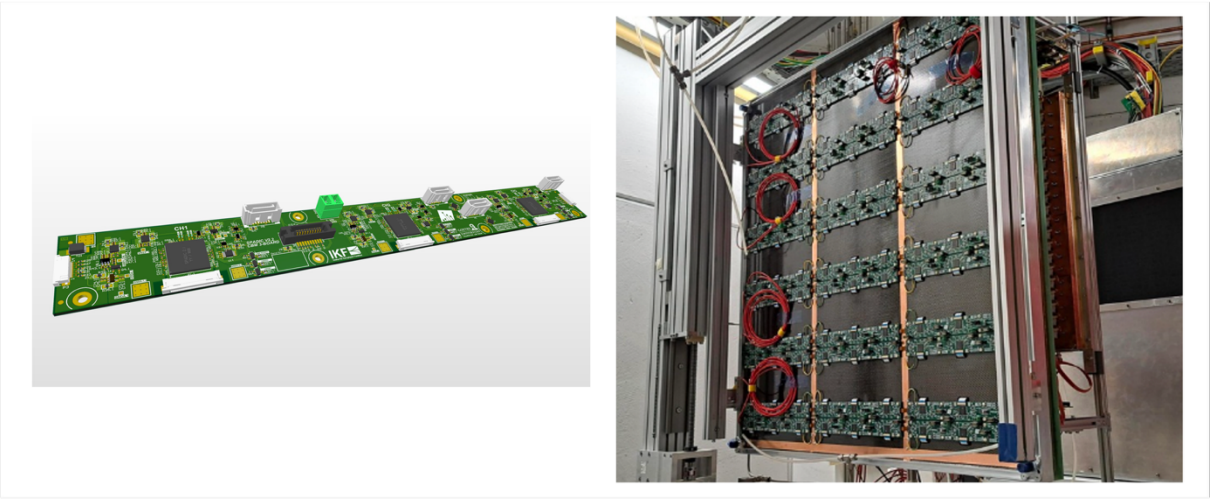


Abbildung 2: Front-End-Board (FEB) für die TRD Auslese, bestückt mit SPADIC 2.2 Auslese-ASICs (links). Eine der beiden TRD-Vorserien-Module (Rückseite mit FEBs) im mCBM-Aufbau (rechts).

Innerhalb von AP3 ("Software, Machine Learning und HADES-Analysen") wurde ein sehr detailliertes Modell der TRD-Geometrie in der Simulationssoftware implementiert, das auf einer automatischen Konvertierung von STEP-Dateien in ROOT-Geometrie-Objekten basiert (s. Abb. 3, links). Insbesondere beinhaltet diese Geometrie-Beschreibung eine sehr genaue Wiedergabe der geplanten Support-Struktur, was realistische Studien zum Einfluss des Materials dieser Struktur auf den im CBM-Experimentaufbau nachfolgenden TOF-Detektor ermöglicht. Diese Untersuchungen erlaubten nun eine finale Optimierung der TRD-Geometrie mit Blick auf die gesamte Physik-Performance des CBM Aufbaus. Die Software zur Auslese und Verarbeitung der TRD-Rohdaten, wie sie von der SPADIC-basierten Auslese bereit gestellt wird, wurde erweitert. Diese Software („Unpacker“) extrahiert die kodierten Rohdaten aus den Timeslices und übersetzt sie in ein high-level Format. Dabei wird die online durch Feature Extraction Algorithmen auf dem FPGA bestimmte Zeitinformation des Detektorsignals weiter verarbeitet, so dass sie direkt in der Spurrekonstruktion verwendet werden kann. Ein entsprechender Algorithmus zur Bestimmung der Signalankunftszeit für die Offline-Datenanalyse wurde ebenfalls entwickelt und getestet, so dass die Performance von Online- und Offline-Algorithmen direkt miteinander verglichen werden kann. Für die Analyse der TRD-Daten aus den mCBM-Strahlzeiten wurde ein QA-Framework implementiert, das eine unmittelbare Bestimmung der wichtigsten Parameter bis hin zur Ortsauflösung ermöglicht. Arbeiten zur Kalibration der TRD-Daten mussten zunächst mangels freier Kapazitäten aufgeschoben werden, sind aber im Laufe des letzten Jahres wieder aufgenommen worden. Die Software zur Detektorsimulation des TRDs wurde weiterhin im Detail überarbeitet, um eine realistischere Beschreibung des spezifischen Energieverlustes im Xenon-Gas zu erzielen. Diese Simulationen wurden mit Hilfe der am DESY-Elektronenstrahl gewonnenen Teststrahldaten ausführlich validiert.

Weiterhin wurden Performance-Studien hinsichtlich der Messung von Hyperkernen mit CBM durchgeführt. Hierzu wurden insbesondere die Möglichkeiten zur Identifikation von leichten Kernen, wie sie der TRD bietet, berücksichtigt und ausgelotet (s. Abb. 3, rechts). In diesem Zusammenhang wurden auch Machine Learning Methoden verwendet um die topologische Rekonstruktion von Hyperkernen zu optimieren.

Im Bereich der HADES Datenanalyse wurden erstmals in diesem Energiebereich die Event-by-Event Korrelationen von Flow-Koeffizienten studiert. Weiterhin wurde die Analyse des kollektiven Flusses von

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.

Protonen und leichten Kernen in Ag+Ag Kollisionen bei 1.58 AGeV bis zur Publikationsreife voran getrieben. Die hohe Ereignisstatistik, die mit HADES gesammelt werden konnte, erlaubte dabei eine multi-differentielle Studie mit hoher Präzision, die weit über das hinausgeht was mit früheren Experimenten möglich war. Diese Analysen stellen, neben ihrer hohen physikalischen Relevanz, damit auch eine sehr wertvolle Erfahrungsquelle für zukünftige, ähnlich gelagerte Untersuchungen mit dem CBM-Experiment dar, in dem noch deutlich höhere Reaktionsraten gemessen werden sollen.

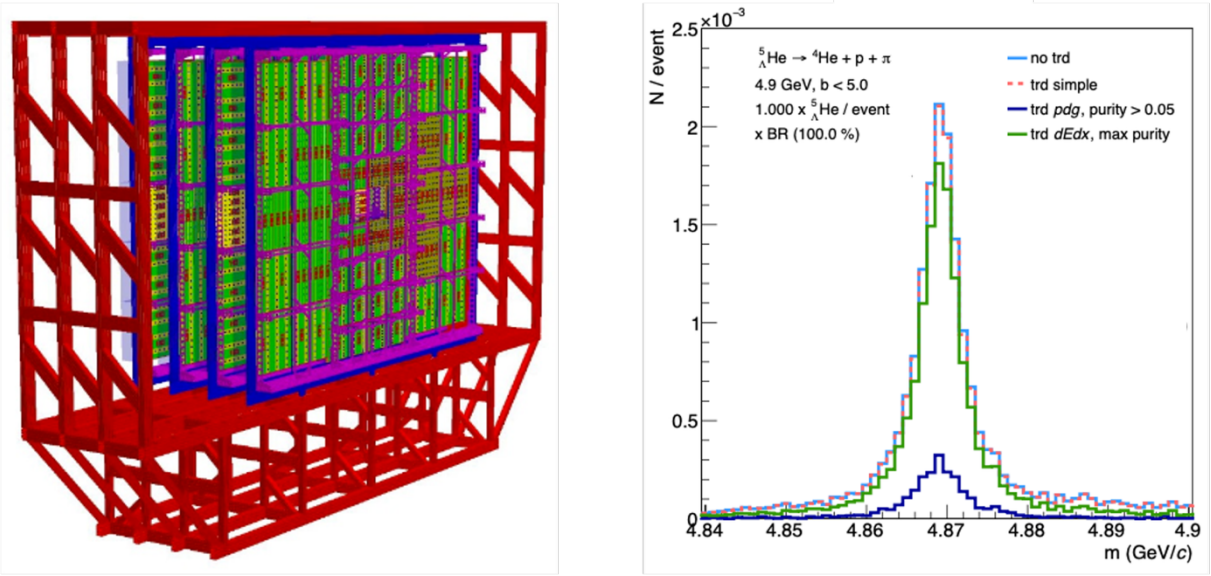


Abbildung 3: Detaillierte Geometrie-Beschreibung des TRDs in der Simulationssoftware (links). Performance-Studie zur Rekonstruktion von $^{5}_{\Lambda}$He Hyperkernen unter Verwendung des TRDs (rechts).

TP2 (AG Kebschull): Mit der Einführung der neuen Typ-5 Module sind die auszulesenden Kanäle von 672 auf 3456 pro Module gestiegen. Die dadurch produzierte Datenmenge kann nun nicht mehr ohne Komprimierung durch Feature-Extraction im mCBM-Aufbau gespeichert werden. Entsprechende Feature-Extraction-Algorithmen wurde deshalb implementiert und erfolgreich mit mCBM-Daten validiert. Sie erlauben die korrekte Verarbeitung von 'multi-hits', welche auftreten, wenn eine vorherige Nachricht durch eine neue abgebrochen wird. Außerdem wurden die Dekodierung und das Monitoring von Exception-Nachrichten des SPADICs implementiert. Weiterhin erlauben die entwickelten Algorithmen eine genaue Rekonstruktion der pro Auslesepad deponierten Energie und der Signalankunftszeit. Abbildung 4 demonstriert die signifikante Verbesserung der Zeitauflösung durch die Anwendung der Online Feature Extraktion. In einem nächsten Schritt wurde auch ein Cluster-Finding-Algorithmus entwickelt, der für das free-streaming Konzept von CBM optimiert ist. Er kommt ohne aufwändiges Sortieren der Daten nach der Position aus und kann die ankommenden Daten direkt verarbeiten, wodurch ein maximaler Durchsatz gegeben ist und Datenverluste durch Buffer-Overflows vermieden werden.

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.

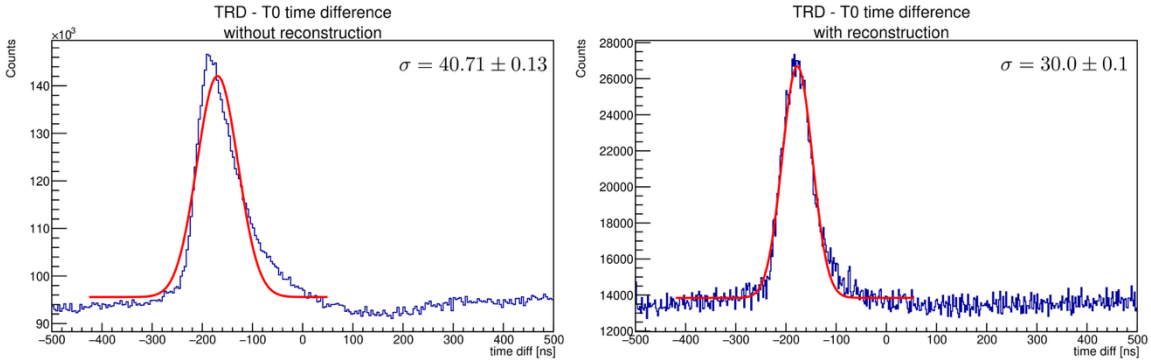


Abbildung 4: In mCBM gemessenen Differenz der im TRD bestimmten Signalankunftszeit und der Startzeit T_0. Gezeigt ist die Verteilung ohne (links) und mit (rechts) Online Feature Extraction.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die innerhalb der beiden Teilprojekte durchgeführten Arbeiten waren für die Fortführung des CBM-TRD Projekts von zentraler Notwendigkeit und konnten in angemessenen Rahmen in den Arbeitsgruppen durchgeführt werden. Dies wäre ohne die Mittel dieses BMBF-Projekts nicht erreichbar gewesen.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Verlauf der zurückliegenden Förderperiode konnten in beiden Teilprojekten entscheidende Fortschritte in der Produktion und Test von Detektormodulen, sowie seiner Datenauslese und -verarbeitung gemacht werden, so dass der CBM-TRD innerhalb des generellen CBM-Zeitplans fertiggestellt werden kann. CBM wird in den kommenden Jahrzehnten damit in der Lage sein, weltweit einzigartige Messungen zu den Eigenschaften hochdichter Kernmaterie zu machen und damit essentielle Beiträge zur Grundlagenforschung zu liefern. Diese werde in entsprechenden internationalen Fachjournalen und auf Konferenzen veröffentlicht werden. Weiterhin wird das CBM Experiment einen sehr wichtigen Beitrag zur wissenschaftlichen Ausbildung von Studierenden leisten.

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

Es wurden keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

1. J. Adamczewski-Musch et al., (HADES Collaboration), "*Production and Electromagnetic Decay of Hyperons: a Feasibility Study with HADES as a Phase-0 Experiment at FAIR*", J. Eur. Phys. J. **A57**, 138 (2021).
2. J. Adamczewski-Musch et al., (HADES Collaboration), "*Correlated Pion-Proton Pair Emission off Hot and Dense QCD Matter*", J. Phys. Lett. **B819**, 136421 (2021).
3. J. Adamczewski-Musch et al., (HADES Collaboration), "*Impact of the Coulomb Field on Charged-Pion Spectra in Few-GeV Heavy-Ion Collisions*", Eur. Phys. J. **A58**, 166 (2022).

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.

4. R. Abou Yassine et al. (HADES Collaboration), "*Measurement of Global Polarization of Λ Hyperons in Few-GeV Heavy-Ion Collisions*“, Phys. Lett. **B835**, 137506 (2022).
5. R. Abou Yassine et al., (HADES Collaboration), "*Production of Hydrogen Isotopes and Charged Pions in p (3.5 GeV) + Nb Reactions*”, Phys. Rev. **C108** (2023) 064902.
6. J. Adamczewski-Musch et al. (HADES Collaboration), "*Proton, Deuteron and Triton Flow Measurements in Au+Au Collisions at* $\sqrt{s_{NN}}$ *= 2.4 GeV* “, Eur. Phys. J. **A59** (2023) 80.
7. D. Schledt, U. Kebschull and C. Blume, "*Developing a Cluster-Finding Algorithm with Vitis HLS for the CBM-TRD*“, Nucl. Instrum. and Meths. in Phys. Res. **A1047** (2023) 167797.

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

1. M. Kunold, “*SPADIC Response to Single Photon Ionization based Signals*”, Vortrag auf der virtuellen DPG Herbsttagung SMuK 2021, HK 2.6.
2. D. Schledt, “*Designing FPGA Readout Firmware with the help of Vivado HLS*”, Vortrag auf der virtuellen DPG Herbsttagung SMuK 2021, HK 11.4.
3. C. Blume, “*Summary on the TRD Project*”, CBM Progress Report 2020, page 98, Darmstadt, Germany, 2021.
4. F. Roether et al., “*Ageing Test of new Materials used in the TRD*”, CBM Progress Report 2020, page 101, Darmstadt, Germany, 2021.
5. P. Kähler et al., “*Analysis of TRD Data from mCBM 2020*”, CBM Progress Report 2020, page 107, Darmstadt, Germany, 2021.
6. E. Bechtel, “*Dielectron Measurements with a TRD-Day-1 Setup*”, CBM Progress Report 2020, page 110, Darmstadt, Germany, 2021.
7. P. Raisig et al., “*Software Developments within the TRD Project*”, CBM Progress Report 2020, page 175, Darmstadt, Germany, 2021.
8. S. Gläßel et al., “*Reconstruction of Hypernuclei with PFSimple*”, CBM Progress Report 2020, page 183, Darmstadt, Germany, 2021.
9. E. Bechtel et al., “*Background Rejection via the Usage of the Micro-Vertex-Detector for the Dielectron Case*”, CBM Progress Report 2020, page 201, Darmstadt, Germany, 2021.
10. D. Schledt, “*Status update: SPADIC TRD firmware*”, CBM Progress Report 2020, page 103, Darmstadt, Germany, 2021.
11. D. Schledt, "*Developing a cluster-finding algorithm with Vitis HLS for the CBM-TRD*", Vortrag auf der internationalen Konferenz "15th Pisa Meeting on Advanced Detectors: Frontier Detectors for Frontier Physics (PM2021)", La Biodola, Isola d'Elba, Italien, Mai 2022.
12. D. Schledt, "*Developing Feature Extraction Algorithms with Vivado HLS for the CBM-TRD*“, Vortrag auf der virtuellen DPG Frühjahrstagung SMuK 2022, HK 15.4.
13. F. Roether, "*The TRD in CBM: status and steps towards series production*“, Vortrag auf der virtuellen DPG Frühjahrstagung SMuK 2022, HK 27.1.
14. C. Blume, "*Summary on the TRD Project*”, CBM Progress Report 2021, page 114, Darmstadt, Germany, 2022.
15. P. Kähler and F. Roether, "*Design of the LV supply system for the TRD*”, CBM Progress Report 2021, page 117, Darmstadt, Germany, 2022.
16. A. Bercuci et al., "*Global space-time correlation of the local TRD reconstruction within the mCBM environment*”, CBM Progress Report 2021, page 123, Darmstadt, Germany, 2022.
17. P.-A. Loizeau et al., "*A new unified architecture for unpacking, applied to mCBM data*”, CBM Progress Report 2021, page 172, Darmstadt, Germany, 2022.
18. B. Kardan, "*Collective flow measurements with HADES in Au+Au collisions at 1.23 AGeV*", Vortrag auf der DPG Frühjahrstagung Dresden SMuK 2023, HK 5.6.

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.

19. S. Gläßel, "*Hypernuclei studies in heavy-ion collisions at CBM*", Vortrag auf der DPG Frühjahrstagung Dresden SMuK 2023, HK 16.4.
20. D. Spicker, "*Status of the Front-End-Electronics for the CBM-TRD detector at FAIR*", Vortrag auf der DPG Frühjahrstagung Dresden SMuK 2023, HK 26.5.
21. L. Rossel, "*Detector response simulations for the CBM-TRD*", Poster auf der DPG Frühjahrstagung Dresden SMuK 2023, HK 74.32.
22. P. Kähler, M. Kunold und D. Schledt, "*CBM-TRD hit time extraction*", Poster auf der DPG Frühjahrstagung Dresden SMuK 2023, HK 74.52.
23. L. Lauf, "*Correlation of flow coefficients measured in Au+Au collisions at 1.23 AGeV with HADES*", Poster auf der DPG Frühjahrstagung Dresden SMuK 2023, HK 74.35.
24. B. Kardan, "*Decoding the EOS of neutron star-like matter via flow patterns of nuclear cluster emitted in HI collisions*", Vortrag auf der Tagung Helmholtz program days Matter and the Universe 2023 (MU Days), KIT Karlsruhe, Sept. 2023.
25. B. Kardan, "*Flow phenomena at high nuclear densities with HADES*", Vortrag auf dem XIth International Symposium on Nuclear Symmetry Energy 2023 (NuSym23), GSI Darmstadt, Sept. 2023, GSI.
26. C. Blume und B. Kardan, "*Correlation of flow coefficients measured in Au+Au collisions at 1.23 AGeV with HADES*", Poster auf der internationalen Konferenz Quark Matter 23, Houston, TX, USA, Sept. 2023.
27. S. Gläßel, "*Hypernuclei studies in heavy-ion collisions with the CBM experiment at FAIR*", Poster auf der internationalen Konferenz Quark Matter 23, Houston, TX, USA, Sept. 2023.
28. C. Blume, "*Summary on the TRD Project*", CBM Progress Report 2022, page 106, Darmstadt, Germany, 2023.
29. P. Kähler und F. Roether, "*Status of the TRD MWPC production*", CBM Progress Report 2022, page 109, Darmstadt, Germany, 2023.
30. M. Kunold und F. Roether, "*Offline time reconstruction for the TRD*", CBM Progress Report 2022, page 114, Darmstadt, Germany, 2023.
31. L. Rossel, "*Verification of TRD detector simulations*", CBM Progress Report 2022, page 115, Darmstadt, Germany, 2023.
32. F. Roether, P. Kähler und P. Fischer, "*Status of the SPADIC based readout*", CBM Progress Report 2022, page 117, Darmstadt, Germany, 2023.
33. D. Spicker, "*Introducing a graphical user interface for SPADIC chip testing*", CBM Progress Report 2022, page 118, Darmstadt, Germany, 2023.
34. S. Gläßel und C. Blume, "*Reconstruction of hypernuclei with PFSimple*", CBM Progress Report 2022, page 168, Darmstadt, Germany, 2023.
35. D. Schledt, "*SPADIC Level One feature extraction on the FPGA in mCBM*", CBM Progress Report 2022, page 146, Darmstadt, Germany, 2023.

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

1. L. Rossel, „*Simulationsstudien zur Geometrie des CBM-TRD*", Bachelor-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2021.
2. M. Kunold, „*Messungen zur Antwortfunktion der CBM-TRD Ausleseelektronik*", Bachelor-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2021.
3. E. Vardhami, „*The optimisation of the hypernuclei reconstruction with the CBM experiment at FAIR*", Bachelor-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2022.
4. B. Kardan, „*Collective Flow Measurements in Gold-Gold Collisions at 1.23 AGeV with HADES*", Doktor-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2022.

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.

5. L. Lauf, „*Korrelationen von Fluss-Koeffizienten in Au+Au Kollisionen bei 1.23 AGeV mit HADES*“, Bachelor-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2023.
6. D. Spicker, „*Entwicklung eines Testprogramms für den Auslese-ASIC des CBM-TRD Detektors*“, Master-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2023.
7. M. Kunold, „*Charakterisierung von Rohdaten des CBM-TRDs*“, Master-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2023.
8. L. Rossel, „*Weiterentwicklung und Tests der Detektorsimulation des CBM-TRD*“, Master-Arbeit, Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2023.

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.