

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: nein

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main
Projektleitung: Prof. Dr. Harald Appelshäuser
E-Mail: appels@ikf.uni-frankfurt.de
Förderkennzeichen: 05P12RFFC5
Förderzeitraum: 01.07.2012 - 31.12.2015
Zuwendung: 253.800,00 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: blume@ikf.uni-frankfurt.de
Zusätzlicher Name: Christoph Blume

Genutzte Großgeräte:	Labor FAIR	Gerät FAIR	Experiment CBM
Diplomarbeiten:	1		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Publikationen:	1		
Konferenzbeiträge:	14		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	5		
Masterarbeiten:	1		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 30.06.2016 09:57 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

FAIR-CBM: TRD – Entwicklung und Bau eines Übergangsstrahlungszählers für das CBM-Experiment bei FAIR

Zuwendungsempfänger: Goethe-Universität Frankfurt am Main

Projektleitung: Prof. Dr. H. Appelshäuser

Zusammenfassung

Der Transition Radiation Detector (TRD) ist ein wichtiger Bestandteil des experimentellen Aufbaus von CBM für die Messung von Elektronen. Er ist insbesondere im hohen Impulsbereich, in dem der RICH Detektor keine ausreichende Elektron-Pion-Separation mehr erlaubt, von entscheidender Bedeutung und trägt darüber hinaus auch zur Identifikation von Hadronen bei.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten für den CBM-TRD wurden im Verlauf der zurückliegenden Förderperiode mehrere Prototypen entwickelt und in Teststrahlzeiten am CERN getestet. Diese Prototypen entsprechen in ihrem Aufbau und in ihren Dimensionen dabei den Detektoren, die für derzeit für den endgültigen Experimentaufbau geplant sind und erlaubten damit eine erste Validierung des vollständigen Detektorkonzepts für den CBM-TRD. Es wurden Untersuchungen zur erreichbaren Elektron-Pion-Separation angestellt und verschiedene Radiator-Optionen getestet. Ein besonderer Aspekt der Prototypstudien war dabei die Untersuchung der Stabilität der Kammern hinsichtlich Verstärkungsschwankungen, die durch mögliche Deformationen des Eintrittsfensters hervorgerufen werden können. Als ein neuartiger Ansatz um dieses Problem zu minimieren wurde eine veränderte Konfiguration der Drahtebenen untersucht, in der alternierende Anoden- und Kathodendrähte verwendet werden. Sowohl Simulationen als auch Labormessungen konnten zeigen, dass durch diese Anordnung die Verstärkungsschwankungen signifikant verringert werden können.

In den Teststrahlzeiten am CERN wurde neben dem Design der Ausleseammern auch erstmalig ein Test einer realistischen vollständigen Ausleseketten, bestehend aus dem SPADICv1.0 ASIC und der FLES basierenden Datenerfassung, erfolgreich durchgeführt. Dies stellt einen wichtigen Meilenstein in der Entwicklung des CBM-TRD Projekts dar, da damit zum ersten Male alle seine Komponenten, d.h. Detektoren, Front-End-Elektronik und Datenerfassung, gemeinsam betrieben worden sind.

Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt der mit diesem Projekt verbundenen Aktivitäten war die Durchführung umfangreicher Simulationsrechnungen um festzustellen, in wie weit sich mit Hilfe des TRDs verschiedene physikalische Fragestellungen am SIS100 untersuchen lassen. Eine dieser Observablen, die ohne den TRD im CBM-Aufbau nicht zugänglich wären, ist die Messung von Di-Elektronen im mittleren Massenbereich ($1.0 < m_{ee} < 3 \text{ GeV}/c^2$). Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit Kernfragmente mit Hilfe von Energieverlustmessungen im TRD zu identifizieren, was insbesondere für den Nachweis von Hyperkernen von entscheidender Bedeutung sein wird.

Der Technical Design Report für den TRD wurde basierend auf den oben beschriebenen Prototyp-Studien und Simulationen verfasst und wird Ende 2016 zur Begutachtung den entsprechenden Gremien übergeben.

Bericht

1. Projektumfeld

Das Projekt ist Teil der CBM-Verbundprojekts an FAIR und befasst sich mit der Entwicklung eines Transition Radiation Detectors (TRD) für das CBM-Experiment. Es wird gemeinsam mit den folgenden deutschen Verbundpartnern durchgeführt:

- Universität Münster (Prof. H. Wessels)
- Universität Heidelberg (Prof. P. Fischer)
- Universität Frankfurt (Prof. U. Keschull)

International ist an diesem Projekt die Arbeitsgruppe am IFIN-HH in Bukarest, Rumänien (Prof. Petrovici) beteiligt. Die Entwicklungen für den CBM-TRD werden darüber hinaus in enger Zusammenarbeit mit dem am CBM-RICH Projekt beteiligten Gruppen an der Universität Gießen (Prof. C. Höhne) und Universität Wuppertal (Prof. K.-H. Kampert), sowie Mitgliedern der Universität Darmstadt (JProf. T. Galatyuk, Leitung der CBM Physics Working Group Dileptons).

2. Projektdarstellung

Arbeitsschwerpunkte:

- Bau und Test von Prototypen für den CBM-TRD.
- Durchführung und Auswertung von Teststrahlzeiten mit TRD-Prototypen.
- Machbarkeitsstudien zur Messung von Di-Leptonen mit CBM.
- Anfertigung eines Technical Design Reports für den CBM-TRD.

Verantwortlichkeiten innerhalb CBM-Kollaboration:

- Projektleitung CBM-TRD (seit Anfang 2015 C. Blume)

Hauptausgabeposten:

- Eine Doktorandenstelle.
- Reisekosten der Arbeitsgruppe (Teststrahlzeiten am CERN, Collaboration meetings).
- Materialkosten zur Fertigstellung der TRD-Prototypen.
- Xenon-Gas zum Betrieb der TRD-Kammern.

Darstellung der Aktivitäten:

Der TRD spielt im Aufbau von CBM eine wichtige Rolle in der Messung von Elektronen im hohen Impulsbereich, in dem der RICH Detektor keine ausreichende Elektron-Pion-Separation mehr erlaubt. Der TRD wird es damit ermöglichen auch mit mittleren und hohen Massenbereich von Elektron-Paaren eine signifikante Messung von Elektron-Positron-Paaren durchzuführen. Dies ist essentiell für das Physikprogramm von CBM am SIS100, da damit zum einen die thermische Komponente im mittleren Massenbereich der Di-Elektron-Spektren zugänglich wird, zum anderen ermöglicht der TRD die Messung von J/ψ Mesonen in kleinen Systemen (z.B. p+A, Ni+Ni) am SIS100 über der Di-Elektron Zerfallskanal. Weiterhin wird der TRD in der Lage sein Fragmente über die Messung ihres spezifischen Energieverlusts eindeutig zu identifizieren. So wird die Unterscheidung von Deuteronen und ^4He , die z.B. für das Hyperkern-Programm entscheidend ist, nur mit Hilfe des TRDs möglich sein, da sie aufgrund des gleichen Z/A-Verhältnisses für den TOF Detektor alleine nicht unterscheidbar sind. Voraussetzung für die Durchführung dieser Messungen ist, dass der TRD den Anforderungen an Elektron-Identifikation, Ortsauflösung und Ratenfestigkeit genügt.

Im Verlauf der zurückliegenden Förderperiode wurden deshalb verschiedene Prototypen für den CBM-TRD konstruiert und sowohl in Labortests als auch in Teststrahlzeiten am CERN auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht. Dabei wurden zum ersten Male Detektoren angefertigt, die in ihren Dimensionen ($60 \times 60 \text{ cm}^2$) denen entsprechen wie sie für das endgültige Experiment im inneren Bereich des Aufbaus vorgesehen sind. Eine Besonderheit der Prototypen, die in Frankfurt untersucht wurden, ist dass hier auf eine Driftregion verzichtet wird und es sich damit um eine „klassische“ Vieldraht-proportionalkammer nur mit Verstärkungsbereich handelt. Der Vorteil dieser Anordnung ist die sehr kurze Signalsammelzeit, so dass ein solcher Detektor insbesondere für Bereiche sehr hoher Teilchenraten geeignet ist. Ein potentieller Nachteil ist dabei jedoch die geringe Dicke des Gasvolumens, was mit einer reduzierten Absorption von

Übergangsstrahlungsphotonen einhergeht und deshalb möglicherweise Einbußen in der Elektron-Pion-Separation verursacht.

Ein Test eines derartigen Prototyps wurde im Herbst 2012 am CERN-PS durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Radiator-Typen in Kombination mit der Auslesekommer getestet um die erreichbare Elektron-Pion-Separation zu studieren. Das Ergebnis ist in Abb. 1 zusammengefasst und zeigt, dass auch mit den relativ dünnen Kammern des Frankfurter Designs eine ausreichende Unterdrückung von Hadronen erreicht werden kann. Weiterhin wurden Untersuchungen zur Ortsauflösung durchgeführt, Methoden zur offline-Unterdrückung korrelierten Rauschens entwickelt und Studien zu einer alternativen Energieverlustmessung durch eine Time-Over-Threshold Messung angestellt.

Durch den Verzicht auf eine zusätzliche Driftregion, weisen die Frankfurter Prototypen jedoch eine besonders hohe Abhängigkeit der Gasverstärkung von differentiellen Druckschwankungen auf. Diese Abhängigkeiten wurden in Labortests und mit elektrostatischen und mechanischen Simulationen untersucht (s. Abb. 2). Es wurde eine Reihe von Ansätzen verfolgt, die diese Sensitivität minimieren sollen. Methoden zur mechanischen Stabilisierung erwiesen sich jedoch als wenig wirksam oder führten zu einer inakzeptablen Erhöhung der Strahlungslänge. Ein möglicher Ausweg bietet ein geändertes Design der Verstärkungsdrahtebene, in der alternierende Anoden- und Kathodendrähte verwendet werden (basierend auf: D. Varga et al, Nucl. Instrum. Meths. **A648**, 168 (2011)). In GARFIELD Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Verstärkungsvariation bei gegebener mechanischer Durchbiegung des Eintrittsfensters erheblich geringer ist als bei einer konventionellen Drahtanordnung (s. Abb. 2). Dies konnte auch in Labortests mit Hilfe eines speziell dafür angefertigten, kleinen Prototyps verifiziert werden.

Es wurde deswegen beschlossen auch einen Prototyp mit alternierender Drahtanordnung in realer Größe ($60 \times 60 \text{ cm}^2$) zu bauen und in einer Teststrahlzeit am CERN-PS zu testen. Diese wurde im Herbst 2014 zusammen mit den TRD-Gruppen aus Münster und Bukarest, sowie den am CBM-RICH beteiligten Gruppen durchgeführt (s. Abb. 3). Der neue Prototyp konnte erfolgreich im Strahl betrieben werden und zeigte ein sehr stabiles Verhalten. Abb. 4 zeigt die Pad Response Function die mit dem Prototyp in dieser Strahlzeit gemessen werden konnte. Der hauptsächliche Schwerpunkt dieser Strahlzeit lag jedoch auf dem erstmaligen Test einer realistischen vollständigen Auslesekommer, bestehend aus dem SPADICv1.0 ASIC und der FLES basierenden Datenerfassung, in einer Stahlzeitumgebung. Dieses komplexe System konnte trotz anfänglicher Schwierigkeiten erfolgreich betrieben und die Daten anschließend analysiert werden. Dies stellt damit einen wichtigen Meilenstein in der Entwicklung des CBM-TRD Projekts dar, da damit zum ersten Male alle seine Komponenten, d.h. Detektoren, Front-End-Elektronik und Datenerfassung, gemeinsam betrieben worden sind und die Erfahrungen aus dieser Strahlzeit sehr zur Verbesserung der Ausleseelektronik beigetragen haben. Weitere Tests der Auslesekommer wurden an Detektoren im Labor in Frankfurt durchgeführt.

Ein wichtiger Aspekt ist das Verhalten der Detektoren in einer Umgebung sehr hoher Teilchenmultiplizitäten, wie sie in den für CBM geplanten Schwerionenkollisionen bei extremer Interaktionsrate auftreten werden. Deshalb wurde im Herbst 2015, zusammen mit den Gruppen des CBM-TOF Projekts, eine weitere Strahlzeit am CERN-SPS mit Bleionen als Strahlteilchen durchgeführt. Der für diese Strahlzeit speziell präparierte Prototyp ist in Abb. 4 gezeigt. Die erste Auswertung dieser Daten zeigt, dass die Kammern auch unter diesen extremen Bedingungen ein stabiles Verhalten aufweisen und keine Verschlechterung der Datenqualität zu beobachten ist.

Neben diesen Entwicklungen zur TRD-Hardware wurden auch Arbeiten an den Algorithmen zur Rekonstruktion geladener Teilchen mit dem TRD weiter fortgeführt. Insbesondere wurden eine Reihe von Methoden zur Elektron-Identifikation (z.B.

Likelihood-Methode, Neuronale Netze, Boosted Decision Tree, usw.) implementiert und vergleichende Tests an Teststrahldaten durchgeführt.

Basierend auf diesen Software-Entwicklungen wurden umfangreiche Physik Performance-Studien angefertigt, die für den Technical Design Report benötigt werden. Der Schwerpunkt dieser Studien liegt dabei auf der Di-Elektron-Messung im mittleren Massenbereich ($1.0 < m_{ee} < 3 \text{ GeV}/c^2$), welche den hauptsächlichen Physics Case für den TRD am SIS100 darstellt. Das Ziel einer solchen Analyse ist die Extraktion einer effektiven Temperatur aus den Massenspektren. Abb. 5 zeigt ein simuliertes Massenspektrum von Di-Elektronen für Au+Au Kollisionen bei 11 AGeV. Diese Simulation basiert auf einer detaillierten Modellierung der Detektorantworten des TRD und des RICH und enthält eine möglichst realistische Beschreibung der physikalischen Quellen von Dileptonen, inklusive der thermischen Komponente. Für diese Untersuchungen wurde ein Software-Framework zur Analyse von Di-Leptonen entwickelt, das mittlerweile, generalisiert auf alle Zweiteilchenzerfälle, innerhalb der CBM Kollaboration vielfach angewendet wird. Derzeit wird im Rahmen dieser Studien geklärt, ob man mit einer vierlagigen Detektoranordnung, wie sie für das SIS100 vorgesehen ist, in der Lage ist im relevanten Di-Elektron-Massenbereich ein ausreichendes Signal-zu-Untergrund-Verhältnis zu erzielen. Falls sich dies als unwahrscheinlich herausstellt, muss der Aufbau noch um eine fünfte Lage ergänzt werden um die notwendige Elektron-Pion-Separation zu gewährleisten. Weiterhin werden Studien zur Messung von J/ψ -Mesonen in Proton-Nukleus und Ni+Ni Kollisionen durchgeführt. Um dies mit einer ausreichenden Statistik in möglichst kurzer Zeit realisieren zu können, wurde ein spezielles „fast simulation framework“ entwickelt, das die Detektorantwort in Form von Parametrisierungen enthält. Außerdem wurden die Fähigkeiten des TRDs zur Identifikation von Kernfragmenten untersucht. Abb. 5 zeigt die Separation verschiedener Fragmente wie sie durch die Kombination der Informationen des TRD und des TOF Detektors erzielt werden kann.

Basierend auf den R&D Studien der letzten Jahre konnte mittlerweile ein erster Entwurf des Technical Design Report (TDR) verfasst werden. Dieser enthält eine vollständige und detaillierte Beschreibung des geplanten TRD Aufbaus, einschließlich der Auslese, sowie der Physics Performance Studien. Derzeit muss noch abschließend geklärt werden, ob die geplanten Di-Elektron-Messungen am SIS100 mit der nötigen Signifikanz mit dem bislang geplanten vierlagigen Aufbau durchgeführt werden können, oder ob eventuell noch ein Modifikation des Aufbaus notwendig ist. Nach Abschluss dieser Studien kann der TDR zur Begutachtung dann den entsprechenden Gremien übergeben werden.

Abbildungen

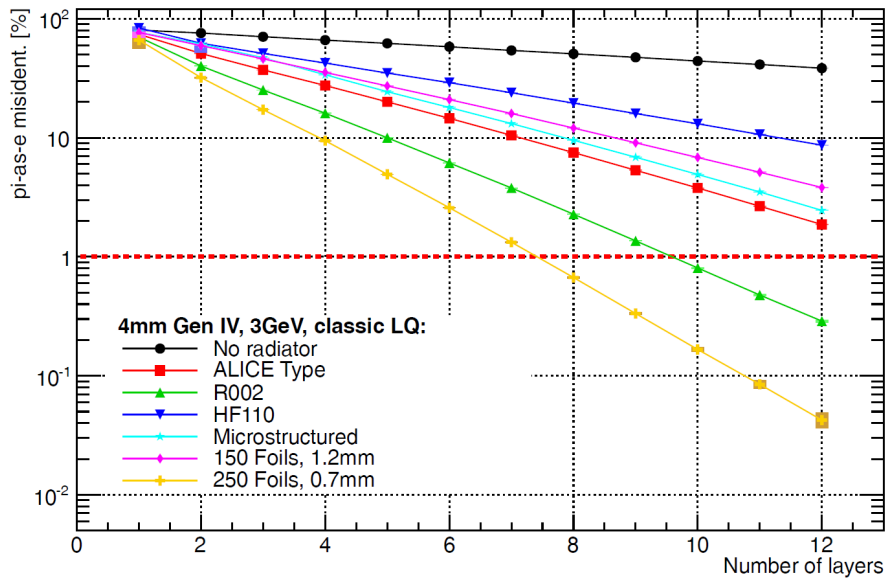


Abb. 1: Elektron-Pion-Separation für verschiedene Radiortypen in Kombination mit dem Frankfurter Prototyp, extrapoliert auf verschiedene Anzahlen von Detektorlagen.

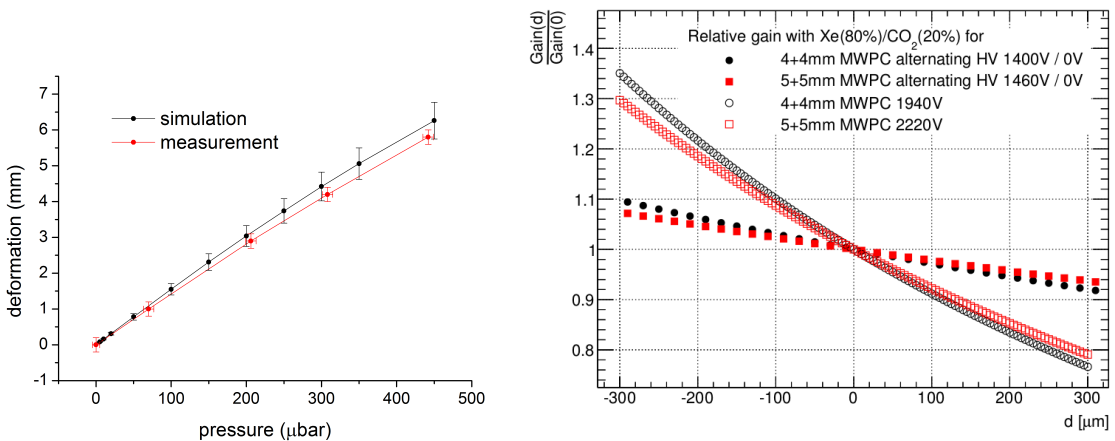


Abb. 2: Links: Mechanische Deformation des Eintrittsfensters als Funktion des differentiellen Überdrucks in der Messung und in der Simulation. Rechts: GARFIELD Rechnung zur differentiellen Änderung der Gasverstärkung als Funktion der Deformation des Eintrittsfensters für konventionelle Anodenebenen (offene Symbole) und alternierende HV-Drähte (ausgefüllte Symbole).

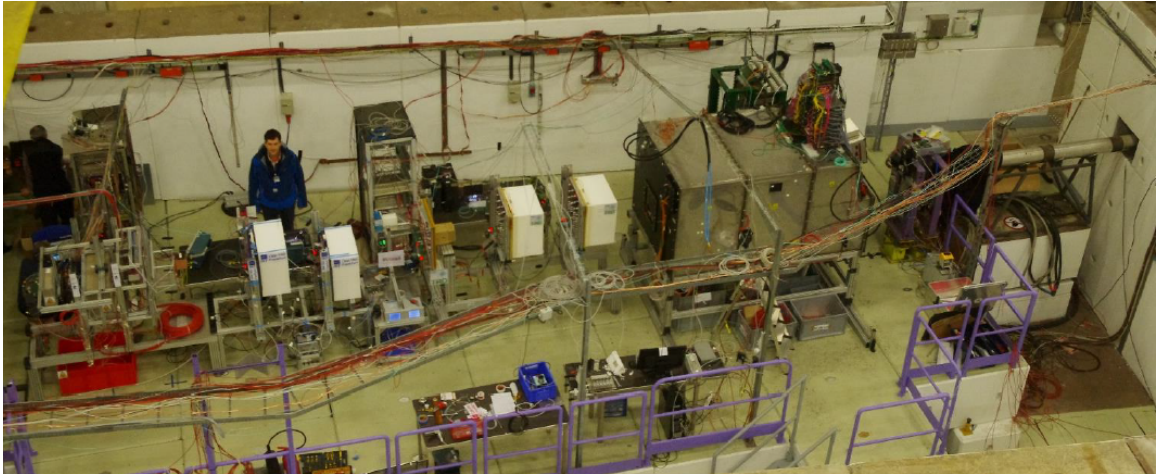


Abb. 3: Aufbau während der Teststrahlzeit am CERN-PS im November 2014. Die Frankfurter Prototypen sind als die ersten beiden weißen Kisten (enthalten die Faser-Radiatoren) von links zu erkennen. Weiterhin enthält der Aufbau noch die TRD Prototypen aus Münster und Bukarest, sowie den RICH Test-Aufbau (ganz rechts).

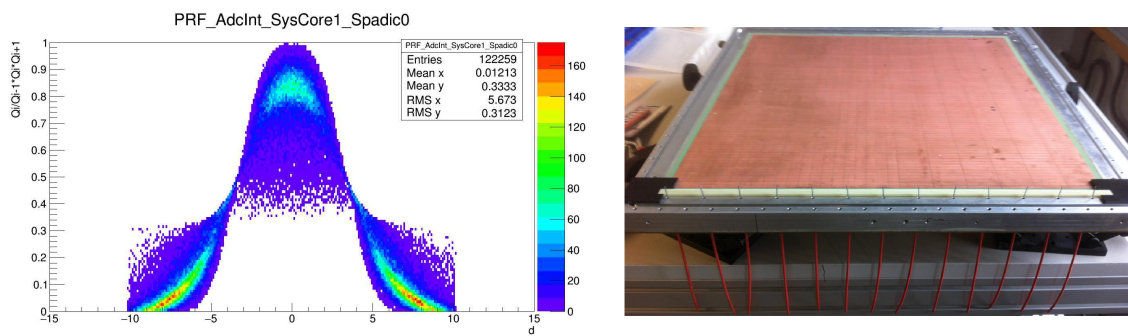


Abb. 4: Links: Die Pad Response Function für den Frankfurter Prototypen mit alternierenden HV-Drähten, gemessen in der Teststrahlzeit am CERN-PS in 2014. Rechts: Prototyp mit alternierenden HV-Drähten für die Teststrahlzeit mit Schwerionenstrahlen am CERN-SPS in 2015.

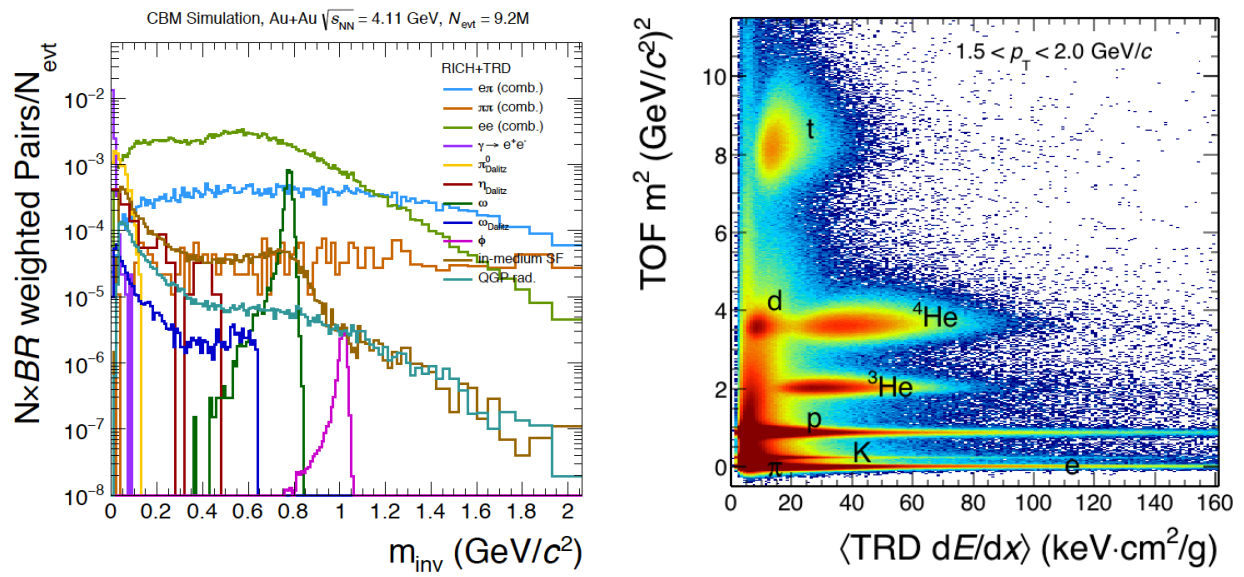


Abb. 5: Links: Simuliertes Di-Elektronen Massenspektrum für Au+Au Kollisionen bei 11 AGeV. Rechts: Identifizierung von Fragmenten mit Hilfe von TOF und TRD Informationen.

Publikationen

Veröffentlichungen:

1. “*Studies on the QCD Phase Diagram at SPS and FAIR*”,
C. Blume, J. Phys.: Conf. Ser. **422**, 012022 (2013).

Konferenzbeiträge und Vorträge:

1. “*Review of Experimental Data and Future FAIR Prospects*”,
Christoph Blume, eingeladener Vortrag auf dem ECT* Workshop “QCD Hadronization and the Statistical Model”, Trento, Italien, Oktober 2014.
2. “*Quarkonia as a Probe of QCD Matter: from LHC to FAIR*”,
Christoph Blume, eingeladener Plenarvortrag auf der „3rd International Conference on New Frontiers of Physics, ICNFP 2014“, Kolymbari, Kreta, Griechenland, Juli 2014.
3. “*The CBM Experiment – Status Report*”,
Christoph Blume, Gruppenbericht auf Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Frankfurt, März 2014.
4. “*Simulation and Construction of MWPCs without Drift Region for the CBM-TRD*”,
Florian Roether, Vortrag auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Frankfurt, März 2014.
5. “*First Test Results of TRD Prototypes for CBM with Alternating Wires*”,
Susanne Gläsel, Poster auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Frankfurt, März 2014.
6. “*Status of the CBM-TRD*”,
Pascal Dillenseger, Vortrag auf dem 4. HICforFAIR Detector Networking Workshop, Gießen, Februar 2014.
7. “*A new Prototype with Alternating Wires*”,
Susanne Gläsel, Poster auf der International Conference on Science and Technology at FAIR, Worms, Oktober 2014.
8. “*CERN Test Beam Performance of the CBM Transition Radiation Detector*”,
Milad Tanha, Poster auf der International Conference on Science and Technology at FAIR, Worms, Oktober 2014.
9. “*In-beam Performance Studies of the First Full-Size CBM-TRD Prototypes Developed in Frankfurt*”,
Pascal Dillenseger, Vortrag auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Dresden, März 2013.
10. “*Construction and Simulations of Full-Size CBM-TRD Prototypes*”,
Ernst Hellbär, Vortrag auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Dresden, März 2013.
11. “*Foil Stretching Device for the CBM-TRD*”,
Kathrin Reuß, Poster auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Dresden, März 2013.
12. “*Expert Group 3: CBM and PANDA Overview*”,
Christoph Blume, Vortrag auf dem HICforFAIR PAC-Treffen, Gießen, November 2012.

13. "*Beam Energy Scan Programs in HIC* ",
Christoph Blume, eingeladene Vorträge auf der Helmholtz International Summer School (HISS) "Dense Matter in HIC and Astrophysics", Dubna, Russland, September 2012.
14. "*Studies on the QCD Phase Diagram at SPS and FAIR* ",
Christoph Blume, eingeladener Vortrag auf der internationalen Konferenz "Rencontres du Vietnam: Heavy Ion Collisions in the LHC Era", Quy Nhon, Vietnam, Juli 2012.

Beiträge zum CBM Progress Report und GSI Scientific Report:

2015:

1. „*Summary on the TRD project*“,
C. Blume.
2. „*Physics performance of the CBM-TRD in Au+Au collisions at the SIS100*“,
J. Book and C. Blume.
3. „*Combined MWPC prototype test of Münster and Frankfurt using SPADICv1.0 data taking at CERN-SPS/T2-H4 in 2015*“,
C. Bergmann et al.
4. „*Construction of the first large prototypes for the CBM-TRD*“,
C. Bergmann et al.
5. „*CBM-TRD prototype tests in Frankfurt*“,
M. Tanha, C. Blume, J. Book, F. Roether, S. Gläsel, W. Amend and E. Bechtel.

2014:

1. „*Common CBM beam test of the RICH, TRD and TOF subsystems at the CERN PS T9 beam line in 2014*“,
C. Bergmann et al.
2. „*Construction and test of a new CBM-TRD prototype in Frankfurt*“,
M. Tanha, W. Amend, H. Appelshäuser, A. Arend, C. Blume, P. Dillenseger, S. Gläsel and F. Roether.

2013:

1. „*Construction and first performance studies of a CBM TRD prototype with alternating wires developed in Frankfurt*“,
S. Gläsel, W. Amend, A. Arend, C. Blume, P. Dillenseger and F. Roether.

2012:

1. „*Construction and simulations of full-size CBM-TRD prototypes without drift region*“,
E. Hellbär, H. Appelshäuser, A. Arend, C. Baumann, T. Bel, C. Blume, P. Dillenseger, K. Reuß, F. Roether and M. Seidl.
2. „*In-beam performance studies of the first full-size CBM-TRD prototypes developed in Frankfurt*“,
P. Dillenseger, H. Appelshäuser, A. Arend, C. Baumann, T. Bel, C. Blume, E. Hellbär, K. Reuß, F. Roether and M. Seidl.
3. „*Analysis of TRD beam test data of 2011 in CBMROOT*“,
A. Lebedev, S. Lebedev and G. Ososkov.

Abschlussarbeiten

Doktorarbeiten:

„Optimization of a Transition Radiation Detector for the Compressed Baryonic Matter Experiment“,

Dissertationsschrift von Andreas Arend, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, 9.12.2014.

Master-Arbeiten und Diplom-Arbeiten:

„Entwicklung und Bau von Prototypen eines Transition-Radiation-Detektors für das CBM-Experiment“,

Diplom-Arbeit von Florian Röther, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, Juni 2015.

„Charakterisierung und Signalanalyse von TRD-Prototypen für das CBM-Experiment“,

Master-Arbeit von Pascal Dillenseger, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, September 2013.

Bachelor-Arbeiten:

„Analyse von Daten der Teststrahlzeit am CERN-PS des CBM-TRDs“,

Bachelor-Arbeit von Etienne Bechtel, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, Oktober 2015.

„Studien zur Ausdehnung des Eingangsfensters des CBM-TRDs“,

Bachelor-Arbeit von Michael Seidl, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, März 2014.

„Studien zum Einfluss der Ausdehnung des Eingangsfensters auf die Gasverstärkung des CBM-TRD“,

Bachelor-Arbeit von Tanita Ballé, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, Dezember 2013.

„Studien zur Ausdehnung des Eingangsfensters des CBM-TRDs“,

Bachelor-Arbeit von Kathrin Reuß, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, März 2013.

„Elektrostatistische Simulationsstudien zum Übergangsstrahlungsdetektor des CBM-Experiments“,

Bachelor-Arbeit von Ernst Hellbär, Fachbereich Physik der Goethe-Universität Frankfurt, Januar 2013.