

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn



Bachelorarbeit in Physik am Physikalischen Institut

Charakterisierung eines MRPC-Prototypdetektors für das BGO-OD Experiment

Von

Manuel Becker

vorgelegt der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

September 2014

Erstkorrektor:
Prof. Dr. Hartmut Schmieden

Zweitkorrektor:
Prof. Dr. Klaus Desch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das BGO-OD Experiment	2
3	Die η'-Photoproduktion	4
4	Die Resistive Plate Chamber (RPC)	6
5	Die MRPC	8
5.1	Aufbau und Funktionsweise der MRPC	9
5.2	Effizienz einer MRPC	11
6	Die MRPC für das BGO-OD Experiment	12
6.1	Aufbau des Detektors	12
6.2	Erwartungen an Zeitauflösung und Effizienz	14
7	Strahlzeit	16
7.1	Vorbereitungen	16
7.2	Setup	17
7.2.1	Mapping der MRPC	17
7.2.2	Installation und Inbetriebnahme der MRPC	19
7.3	Analyse von Daten	20
7.3.1	Probleme bei der Datennahme	20
7.3.2	Auswertung von Diagrammen	20
7.4	Probleme des Detektors	25
7.5	Problemanalyse	27
8	Zweiter Detektor	27
8.1	Verhalten und Probleme des zweiten Detektors	28
8.2	Problemanalyse	29
9	Zusammenfassung und Ausblick	30

1 Einleitung

Bei dem Versuch, die Natur zu verstehen, hat der Mensch bereits sehr viele Erkenntnisse über den Aufbau und die Struktur der Materie gewonnen. Dabei sind zahlreiche Theorien und Modelle entstanden, um das Beobachtete zu erklären und Vorhersagen über Existenz und Verhalten von Teilchen zu machen. Doch die Physik bietet mit jeder neuen Erkenntnis weitere offene Fragen. So ist die innerste Struktur von Teilchen und Kernen immer noch ein sehr offenes Gebiet der Forschung.

Ein bisher noch wenig erforschtes Gebiet ist die Struktur von Resonanzen bei der Anregung von Nukleonen mit Hilfe von hochenergetischen Photonen. Bei diesen Prozessen entstehen für einen kurzen Zeitraum Teilchen wie das Kaon, Lambda, η - oder η' -Meson. Durch die Untersuchung der entstandenen Endzustände der möglichen Reaktionen, können Rückschlüsse auf das Anregungsspektrum des Nukleons und damit auf dessen innere Struktur gezogen werden. Diese Untersuchung solcher Anregungsspektren steht aber erst am Anfang, denn die vorherrschenden Theorien, wie auch das Quarkmodell, decken sich bislang noch nicht vollständig mit den experimentellen Beobachtungen. So ist es z. B. auch möglich, den kurzzeitigen Bindungszustand von Meson und Nukleon, aufgrund des Einflusses der starken Wechselwirkung, als eine Art Molekül zu betrachten, wodurch eine andere Auffassung des Anregungsspektrums möglich wird.

Um diese Zustände also zu untersuchen und näher zu verstehen, eignet sich unter anderem die Beobachtung der η' -Photoproduktion am Proton, da das η' -Meson ein pseudoskalares Meson mit Isospin null ist und dementsprechend hier als Isospin-Filter wirkt. Die Kinematik dieser Photoproduktion führt dazu, dass die meiste Energie auf das Proton übertragen wird. Damit hat das Meson eine sehr geringe kinetische Energie und könnte so kurzzeitig einen gebundenen Zustand mit dem Proton eingehen. Danach kann das Meson in verschiedene andere Teilchen zerfallen, die sich dann im Raum ausbreiten. So sind sogenannte *mixed-charged final states*, also Endzustände mit sowohl neutralen als auch geladenen Teilchen möglich. Durch Detektion dieser Teilchen und des Rückstoßprotons ist es möglich, die Resonanzen zu studieren. Da die Lebensdauer des Mesons allerdings recht gering ist, gestaltet sich die Unterscheidung der verschiedenen, sich überlappenden Resonanzen schwierig. Um diese dennoch gut auflösen zu können, ist eine präzise Rekonstruktion der Endzustände wichtig. Um die Spur des Rückstoßprotons zu rekonstruieren, ist wiederum ein Detektor mit einer hervorragenden Impuls- und Zeitauflösung in allen Raumrichtungen notwendig.

Das BGO-OD Experiment in Bonn wird diesen hohen Anforderungen gerecht. Lediglich eine kleine Akzeptanzlücke in Vorwärtsrichtung ist nicht durch den bereits existierenden Aufbau abgedeckt. Die Tatsache, dass das Rückstoßproton aber aufgrund der Kinematik in einem Großteil der Fälle genau in diese Lücke gelangt, stellt einen Nachteil dar, da die Endzustände so nur schwer rekonstruiert werden können. Um diese Akzeptanzlücke zu schließen, ist ein weiterer Detektor notwendig, mit dessen Hilfe eine gute Energieauflösung des hochenergetischen Protons möglich ist. Dafür ist eine gute Flugzeitauflösung und dementsprechend, für einen ToF-Detektor, eine gute Zeitauflösung von großer Wichtigkeit. Der zurzeit beste Detektor, der diese Voraussetzung erfüllt, ist die Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC). Diese soll in dieser Arbeit charakterisiert werden, das heißt es werden die Funktionsweise erklärt und die Ergebnisse von ersten Tests präsentiert.

2 Das BGO-OD Experiment

Das BGO-OD Experiment befindet sich an der Elektron-Stretcher-Anlage (ELSA) im Physikalischen Institut der Universität Bonn und dient der Untersuchung der subnuklearen Struktur von Materie mit Hilfe der Mesonen-Photoproduktion am Nukleon. Dazu wird ein Photonenstrahl verwendet, der durch die Abgabe von Bremsstrahlung des von ELSA bereitgestellten Elektronenstrahls entsteht. Der Elektronenstrahl kann zunächst in einem Linearbeschleuniger, dann im Booster-Synchrotron und zuletzt im großen Beschleunigerring auf eine Maximalenergie von 3.5 GeV beschleunigt werden. Mit einem Radiator kann mittels Bremsstrahlung aus dem extrahierten Elektronenstrahl ein linear oder zirkular polarisierter Photonenstrahl erzeugt werden [4]. Die abgebremsten Elektronen werden im sogenannten Tagger (120 Szintillatoren) detektiert. Aus der Energie der Elektronen kann dann die Energie des Photonenstrahls rekonstruiert werden. Für die Messung des Gesamtflusses der Photonen sind am Ende des Strahls hinter dem Detektor zwei Hilfsmittel positioniert: Zum einen wird der GIM (Gamma Intensity Monitor), ein Bleiglas-Detektor mit einer Effizienz von 100%, bei kleinen Raten verwendet. Zum anderen wird für höhere Raten der FluMo (Flux Monitor) mit geringerer, aber gut bekannter Effizienz gebraucht, der aus drei Szintillationszählern besteht.

Eine Besonderheit des BGO-OD Experiments ist, dass geladene und neutrale Teilchen sowohl zentral um den Vertex (durch den BGO-Ball) als auch in Vorwärtsrichtung (durch das Open Dipole Spektrometer) detektiert werden können. Die einzelnen Detektoren sollen im Folgenden kurz erläutert werden und sind in Abb. 1 dargestellt.

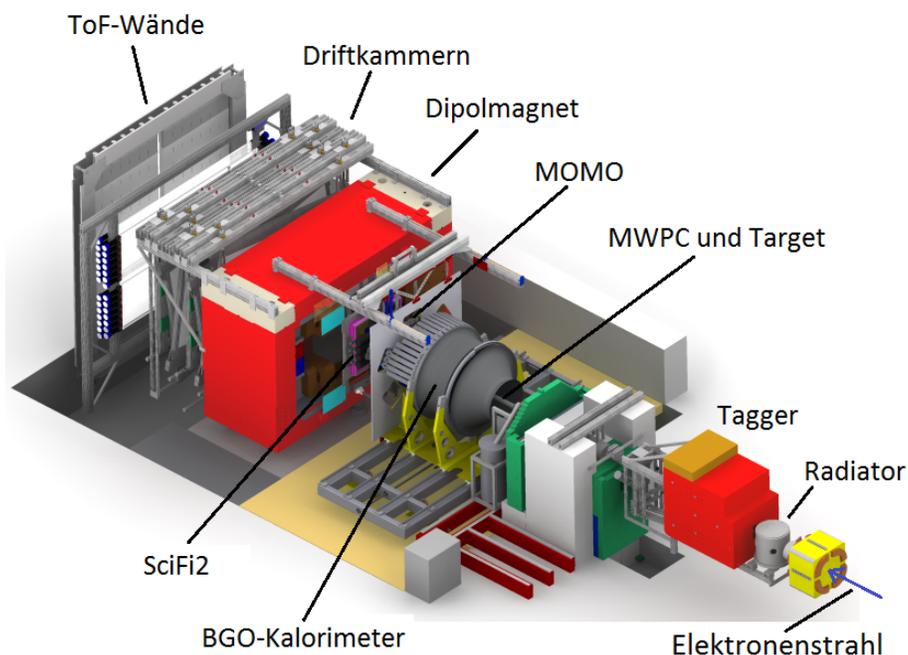


Abb. 1: Darstellungen des BGO-OD-Detektors mit den einzelnen Elementen und eingezeichneter Strahlachse[4]

Zentraler Teil:

Der zentrale Teil des Detektors ist ein hervorragendes elektromagnetisches Kalorimeter und eignet sich auch gut zum Nachweis von Neutronen [4]. Es besteht aus den folgenden Elementen: Der BGO-Rugby-Ball (BGO von der chemischen Bezeichnung für dessen Material Wismutgermanat) deckt einen θ -Winkel zwischen 25° und 155° und den kompletten ϕ -Winkelbereich ab. Dabei bezeichnet θ den Winkel, der sich von der Strahlachse weg orientiert und ϕ den Winkel um die Strahlachse. Der BGO-Ball besteht aus 480 BGO-Kristallen. Jeder Kanal liefert Informationen zu Zeit und Energie der im Vertex entstandenen Teilchen.

Innerhalb des BGO-Balls befinden sich zwei ineinander liegende MWPCs (Multi-Wire Proportional Chamber) zur Rekonstruktion der Spur geladener Teilchen. Jede besteht aus zwei koaxialen zylindrischen Kathoden und einer Anode, die aus mehreren, in der aktiven Zone verteilten, Drähten entlang der Zylinderachse besteht [5]. Die MWPC besitzt einen Akzeptanzbereich für Teilchenspuren von 8° bis 163° [5]. Der Bereich zwischen 8° und 17° wird aber teils durch Flansche verdeckt [5].

Zwischen den BGO-Kristallen und der MWPC befindet sich ein *plastic scintillator barrel*, bestehend aus 32 Szintillationszählern, das über die Messung von dE/dx die detektierten Teilchen identifiziert. Im zentralen Teil können neben den Photonen als Zerfallsprodukte auch Protonen mit einer kinetischen Energie von bis zu etwa 100 MeV zuverlässig nachgewiesen werden. Protonen mit kinetischen Energien ab 450 MeV verlassen diesen Detektor allerdings in Vorwärtsrichtung [4].

Im Mittelpunkt des BGO-Balls befinden sich das Target und dessen Haltevorrichtung. Es kann zwischen flüssigem Wasserstoff (LH_2) für die Photoproduktion am Proton und flüssigem Deterium (LD_2) für die Photoproduktion an quasi-freiem Proton und Neutron gewählt werden.

Vorwärtsrichtung:

Das Dipolspektrometer in Vorwärtsrichtung verfügt über eine gute Impulsauflösung und besteht aus den folgenden Detektoren [4]: Hinter dem BGO-Ball befindet sich der sogenannte MOMO, ein Szintillationsfaser-Detektor mit 672 Kanälen und einem aktiven Bereich mit 44 cm Durchmesser, der kreisförmig um die Strahlachse angeordnet ist. Die Auslese erfolgt über Photomultiplier mit jeweils 16 Kanälen [5].

Hinter dem MOMO befindet sich der SciFi2, ein planer Detektor mit einer aktiven Fläche von $66\cdot51\text{ cm}^2$, bestehend aus 640 Szintillationsfasern. Er besitzt eine Zeitauflösung von etwa 2 ns und einen Akzeptanzbereich von $\pm 10^\circ$ in horizontaler und $\pm 8^\circ$ in vertikaler Richtung [4]. Hinter diesem ist der offene Dipolmagnet positioniert, der eine maximale Feldstärke von 0.54 T erzeugen kann. Der Akzeptanzbereich beträgt $\pm 12^\circ$ in horizontaler und $\pm 8^\circ$ in vertikaler Richtung [4]. Hinter dem Magneten folgen zwei weitere Detektoren zur Spur-Rekonstruktion: Zum einen gibt es acht Driftkammern, die jeweils aus einer doppelten Lage von hexagonalen Driftzellen bestehen, sodass ein Teilchen in jeder Kammer mindestens zwei Driftzellen zum Ansprechen bringen muss. Es gibt vier Orientierungen: Zwei Kammern besitzen vertikale Drähte und messen die horizontale Koordinate, zwei besitzen horizontale Drähte und messen die vertikale Koordinate und vier haben Drähte, die um $\pm 9^\circ$ gegen die Vertikale geneigt sind, um eindeutig zwischen echten und falschen Ereignissen zu unterscheiden [4]. Zuletzt gibt es die vier ToF-Wände (Time of Flight), die aus Lagen von Szintillationszählern bestehen. Dieser Detektor liefert die Flugzeit-Information der geladenen Teilchen und Neutronen.

Insgesamt bietet das BGO-OD Experiment beste Voraussetzungen, um auf der Suche nach den bisher unentdeckten Resonanzen bei der Meson-Photoproduktion Fortschritte durch neue Erkenntnisse zu erzielen. Die damit verbundenen Anforderungen eines hochenergetischen polarisierten Photonenstrahls und die Notwendigkeit eines Detektors mit einer größtmöglichen räumlichen Akzeptanz, werden hier erfüllt. Besonders das Zusammenspiel von zentralem Teil um den Vertex und Spektrometer in Vorwärtsrichtung sichert eine hervorragende Energieauflösung und Effizienz für neutrale und geladene Teilchen, um so beste Voraussetzungen für die Untersuchung von gemischten Endzuständen zu schaffen.

3 Die η' -Photoproduktion

Für die Untersuchung der Anregungsstrukturen der Nukleonen werden im BGO-OD Experiment flüssiger Wasserstoff (LH₂) für die Anregung des Protons und flüssiges Deuterium (LD₂) für die Anregung von quasi-freiem Proton und Neutron verwendet. Die Messung der η - bzw. η' -Photoproduktion am Proton gestaltet sich am Einfachsten, da im LH₂-Target nahezu freie Protonen zur Verfügung stehen. Für die Untersuchung am Deuterium ist dies schwieriger, da aufgrund des Fermi-Impulses und der Interaktion der Teilchen im Endzustand die Informationen zur Anregung des bloßen Neutrons nur schwer von der Gesamtstruktur aus dem D₂-Anregungsspektrum zu trennen sind [7].

Bei der Penetration des Protons mit Photonen können verschiedene Teilchen wie Kaonen, Lambdas oder η - bzw. η' -Mesonen entstehen. Da η und η' pseudoskalare Mesonen mit Isospin null sind, wirken sie bei der Anregung des Nukleons als Isospin-Filter [8] und es entstehen neben dem angeregten Proton die Zerfallsprodukte des Mesons, die dann detektiert werden können. Das η -Meson ist mit einer Masse von etwa 550 MeV/c² leichter als das η' -Meson mit etwa 960 MeV/c².

Die Entstehung des Mesons und die Anregung des Protons sind in Abb. 2 dargestellt. Ein η -Meson kann in die folgenden Kanäle zerfallen:

$$\begin{aligned}\eta &\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 \\ \eta &\rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0 \\ \eta &\rightarrow \gamma\gamma\end{aligned}$$

Bei der Entstehung eines η' -Mesons zerfällt dieses wieder, in etwa 70% der Fälle, in leichtere Mesonen, wobei vorzugsweise ein Zustand aus einem η -Meson und Nukleon entsteht [10].

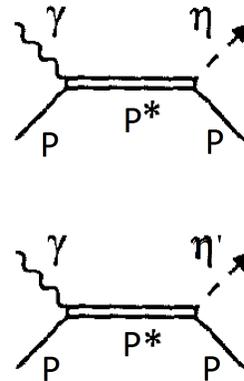


Abb. 2: Feynmandiagramm zur η - (oben) und η' -Photoproduktion (unten) am Proton

Die Anregung des Nukleons lässt sich mit Hilfe der Quantenchromodynamik (QCD) beschreiben, die nicht analytisch lösbar ist. Für hohe Energien können allerdings mittels Störungstheorie Näherungslösungen erhalten werden, da dann die Stärke der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung relativ klein ist) [7]. Für kleine Energien gibt es jedoch eine starke

Kopplung zwischen Kern und dem, unter Einwirkung der starken Wechselwirkung entstandenen, Meson, sodass keine Lösung mehr möglich ist. Da bei der η - bzw. η' -Photoproduktion der größte Teil der Energie des einfallenden Photons auf das Nukleon übertragen wird, besitzt das Meson nur eine relativ geringe kinetische Energie und fällt damit in diesen Bereich. In dieser Energie-Region liegen Grundzustand und Resonanzen des Nukleons, weshalb kaum theoretische Berechnungen für das Anregungsspektrum existieren. Die Struktur des Spektrums kann dann durch verschiedene theoretische Modelle beschrieben werden [7]. So könnte der kurzzeitig gebundene Zustand von Meson und Nukleon auch als eine Art Molekül aufgefasst werden, wodurch sich ein spezielles Anregungsspektrum ergäbe [8]. Um herauszufinden, welche Theorie der Realität am nächsten kommt, müssen experimentelle Ergebnisse erzielt und mit den jeweiligen Erwartungen verglichen werden.

Das BGO-OD Experiment ist optimal für die Messung der Koinzidenz von η -Meson und Proton in Vorwärtsrichtung ausgelegt [9]. Es bleibt hier jedoch zu beachten, dass noch eine Akzeptanzlücke zwischen 8° und 25° besteht.

Abbildung 3 zeigt die simulierte Winkelverteilung des Protons in Abhängigkeit des Winkels des η' -Mesons im Laborsystem für verschiedene Photonenenergien. Es ist zu sehen, dass für nahezu alle Winkel des η' -Mesons, und für einen sehr großen Bereich der Photon-Energie, das Rückstoßproton in die Akzeptanzlücke gelangt. Aus diesem Grund ist es wichtig, einen Detektor mit guter Zeitauflösung in diesem Bereich zu installieren, der dann das hochenergetische Proton mit einer hohen Genauigkeit detektieren kann. Dieser Detektor wird eine ϕ -symmetrische MRPC sein. Die geplante Position ist in Abbildung 4 zu sehen.

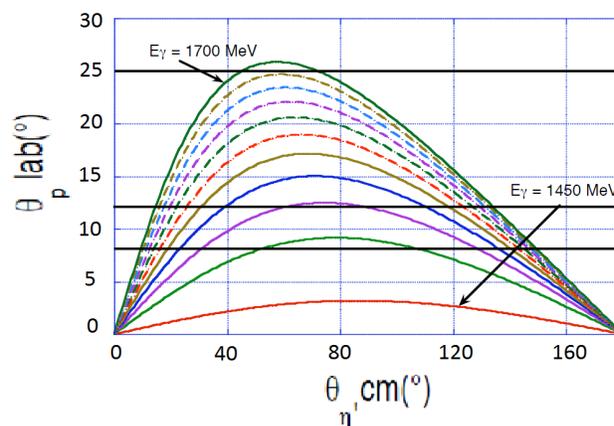


Abb. 3: Winkelverteilung des Protons in Abhängigkeit des Winkels des η' -Mesons im Laborsystem für verschiedene Photonenenergien[11]

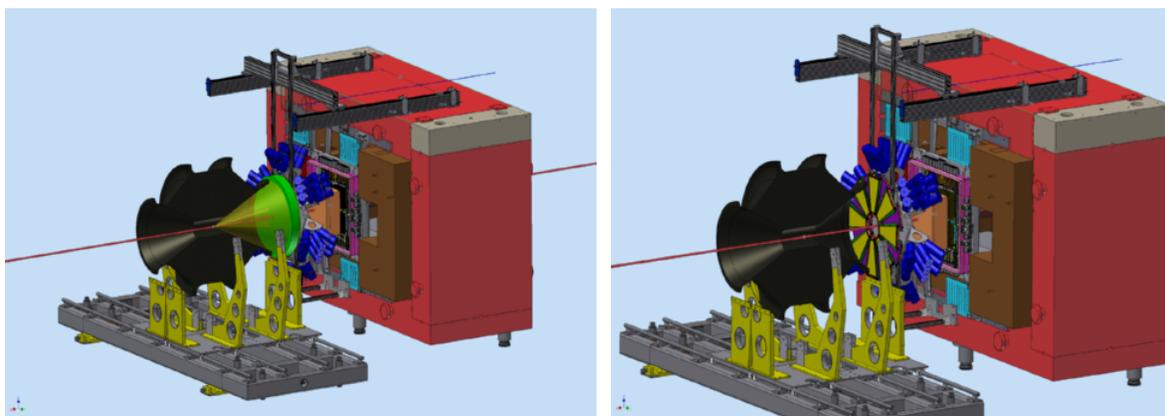


Abb. 4: Akzeptanzlücke (links) und geplante Position der MRPC (rechts) am BGO-OD Experiment[21]

4 Die Resistive Plate Chamber (RPC)

Eine RPC (*Resistive Plate Chamber*) ist ein Detektor zum Nachweis ionisierender Strahlung. Wegen seiner guten Zeitauflösung wird er typischerweise zur Flugzeitmessung (Time of Flight ToF) verwendet, um die Bewegung von geladenen Teilchen im Raum zu rekonstruieren. Da die Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) eine Weiterentwicklung und damit der RPC sehr ähnlich ist, sollen zunächst der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise der RPC erläutert werden, um eine Grundlage für das Verständnis der MRPC zu schaffen. Es wird hier zunächst mehr Wert auf die Grundlagen und das Prinzip gelegt, als auf den exakten Aufbau des Detektors.

Die RPC besteht im Wesentlichen aus *resistive plates* (im Folgenden nur 'Platten' genannt) zwischen zwei Elektroden (vgl. Abb. 5).

Der Zwischenraum ist mit Gas gefüllt. Die Platten bestehen meist aus Phenolharz und besitzen einen spezifischen elektrischen Widerstand in der Größenordnung von $10^{13} \Omega\text{cm}$. Als *Gap* wird der Spalt zwischen zwei Platten bezeichnet. An den Elektroden wird eine Hochspannung im 10 kV-Bereich angelegt, sodass ein starkes Elektrisches Feld im *Gap* vorliegt. Die Platten verhalten sich dielektrisch, das heißt bei anliegender Hochspannung sind sie *electrically floating* und es verändert sich die Ladungsverteilung in den Platten so, dass sie im Inneren möglichst feldfrei sind. Die Oberflächen der Platten sind dann durch die Elektronen und Defektelektronen („Löcher“) geladen.[3] Die influenzierten Signale (siehe unten) werden mittels sogenannter *readout-pads* bzw. *-strips* ausgelesen.

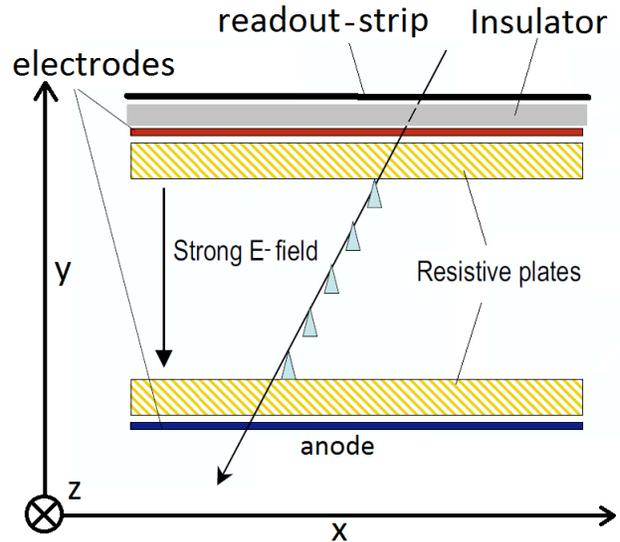


Abb. 5: Darstellung einer RPC mit eingezeichnetem Teilchenstrahl, angedeuteten Elektronen-Lawinen und x-Achse[3]

Die Funktionsweise ist dem Prinzip einer einfachen Ionisationskammer sehr ähnlich: Wenn ein einfallendes Teilchen den Detektor durchquert, ionisiert es die Gas-Atome im *Gap* zwischen den Platten und die gebildeten Ionen und Elektronen bewegen sich auf Grund des hohen Feldes in Richtung der Elektroden. Die Vervielfachung der freien Ionen und Elektronen erfolgt nach der Theorie von TOWNSEND. Die Anzahl der sich durch das *Gap* bewegenden Elektronen wird durch Stoßionisationen vergrößert, sodass Ladungslawinen entstehen. Der Strom I durch das Gas wird dann theoretisch durch die Relation

$$\frac{I}{I_0} \sim \frac{\exp(\alpha_n \cdot d)}{1 - \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_n}\right) \cdot \exp(\alpha_n \cdot d)} \quad (1)$$

beschrieben, wobei I_0 der Strom zu Beginn des Prozesses, α_n der TOWNSEND-Koeffizient für Elektronen, α_p der TOWNSEND-Koeffizient für die Ionen und d die Breite des *Gaps* sind. Der TOWNSEND-Koeffizient bezeichnet die Anzahl der gebildeten Ionenpaare pro Einheitslänge

durch ein positives Ion (α_p) bzw. durch ein Elektron (α_n), das sich von einer zur anderen Elektrode bewegt. Er ist also der Kehrwert der mittleren freien Weglänge im Gas.

Unter der Annahme, dass die positiven Ionen im Vergleich zu den Elektronen sehr viel träger sind, gilt $\alpha_p \ll \alpha_n$ und damit Formel 2:

$$I = I_0 \cdot \exp(\alpha_n \cdot d) \quad (2)$$

Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die Geschwindigkeit der geladenen Teilchen im *Gap* mit ihrer Masse sinkt und die Ionen eine sehr viel größere Masse besitzen als die Elektronen. Die Stromstärke durch die Elektronen im *Gap* im Prozess der Stoßentladungen steigt also exponentiell an. Das Anwachsen des Stromes ist durch das sogenannte RAETHER-Limit begrenzt, das bei einer Verstärkung von etwa 10^8 liegt. An dieser Grenze kommt es zu einer Blitz-Entladung im Gas.[15][3]

Es gibt Gasdetektoren, welche die Entstehung eines Funkens ausnutzen (sogenannter *Streamer-Modus*), um ein Signal zu erzeugen. Diese besitzen metallische Platten, welche nach einer Blitzentladung allerdings zunächst erst wieder aufgeladen werden müssen. Dadurch entsteht eine Totzeit. Bei der RPC wird diese Totzeit vermieden, indem Glasplatten verwendet werden. Da ein Funke und der resultierende Blitz dann aber zu einer Beschädigung der Platten führen würde, wird die RPC im sogenannten *Avalanche-Modus* betrieben, in dem zwar Elektronen-Lawinen, aber keine Funken entstehen.

Mit der Bewegung der Ladungen verändert sich die Ladungsverteilung im *Gap*. Durch die Driftbewegung der Elektronen aus den Lawinen entsteht ein influenziertes Signal, das an den *readout-strips* (vgl. Abb. 5) abgegriffen werden kann. So ist es nicht nötig, dass ein Elektron oder Ion eine der Elektroden erreicht, sondern einzig die Bewegung der Ladungen in den Lawinen reicht aus, um ein Signal zu erzeugen. Aufgrund der relativ großen Trägheit und der deshalb geringen Driftgeschwindigkeit der Ionen, im Vergleich zu den Elektronen, leisten die Elektronen den Hauptbeitrag zum influenzierten Signal. Der Signalbeitrag der Ladungsträger, welche die Platten erreichen und in diesen rekombinieren, ist deutlich geringer. Das influenzierte Signal ist umso stärker, je größer die entstandenen Elektronen-Lawinen sind. Aus diesem Grund entsteht der Hauptbeitrag zum Signal, wenn sich die Lawinen maximal vergrößert haben, also nahe der Elektrode [3]. Da die Lawinen in Richtung der Anode anwachsen, gehen die größten Lawinen von Primärisationen nahe der Kathode aus. Der Bereich, in dem diese entstehen müssen, um einen merklichen Beitrag zum Signal zu liefern, ist nur ein kleiner Teil des *Gaps* nahe der Kathode [3]. Dass dieser Bereich klein im Vergleich zur Breite des *Gaps* ist, sorgt auch dafür, dass der Detektor eine gute Zeitauflösung besitzt.

Anders als z.B. bei einer Drahtkammer gibt es in der RPC keinen ausgezeichneten Bereich, in dem Gasverstärkung stattfindet. Hier ist es erwünscht, eine möglichst gleiche Gasverstärkung über das gesamte *Gap* zu erhalten, was durch das homogene elektrische Feld gewährleistet wird. Die Abnahme des influenzierten Signals findet also nicht an einer bestimmten Stelle in der Zone der Gasverstärkung statt, sondern außerhalb des *Gaps*, mittels sogenannter *readout-pads* bzw. *-strips*. Das bedeutet, dass zwar die Position der Teilchen in x-Richtung festgestellt werden kann, nicht jedoch die vertikale y-Koordinate. (Hier handelt es sich um ein anderes Koordinatensystem als im obigen Kapitel, siehe Abb. 5.) Die Oberfläche des Detektors kann durch die *readout-pads* segmentiert werden, um eine Ortsauflösung in der xz-Ebene zu erhalten. Von *readout-strips* spricht man, wenn der Detektor in Streifen einer

bestimmten Breite segmentiert wird, die sich über die gesamte Länge (x- oder z-Richtung) des Detektors erstrecken. Dann ist nur eine Ortsauflösung in z- oder x-Richtung möglich. Da keine Information über die y-Koordinate des Detektors vorliegt, kann die Spur eines einfallenden Teilchens innerhalb des Detektors nicht rekonstruiert werden. Orts- und Zeit-Information dienen deshalb üblicherweise als Stopp-Signal. Um die Spur zu rekonstruieren, wird mindestens noch ein anderer (Start-) Detektor benötigt.

Zwischen den Platten befindet sich ein Gasgemisch, das aus einem Gas für die Signalverstärkung und mindestens einem *Quenching*-Gas besteht. Letzteres ist zu einem geringen Anteil (bis zu 10%) beigemischt, um Störsignale zu unterdrücken:

Wenn ein durch Stoßionisation entstandenes Elektron mit einem Ion im Gas rekombiniert, dann wird ein Photon emittiert. Dieses Photon könnte an einer anderen Stelle im Detektor ein Gas-Atom ionisieren und es entstünde ein „Geister-Elektron“, also ein Signal-Beitrag, den es eigentlich nicht geben dürfte. Um die Entstehung solcher „falscher“ Signale zu verhindern bzw. zu vermindern, wird das *Quenching*-Gas beigemischt, das die emittierten Photonen absorbiert. Aufgrund des geringen Anteils dieses Gases in der Gasmischung ist die Wahrscheinlichkeit, dass durch dieses „Geister-Elektronen“ entstehen, vernachlässigbar.[14]

Neben der Ausbildung von Elektronen-Lawinen kommt es auch zur Entstehung von positiven Raumladungen im Detektor: Die relativ trägen Ionen sind nahezu stationär (verglichen mit der Geschwindigkeit der Elektronen) und schirmen deshalb das elektrische Feld ab, sodass die Elektronen der nachfolgenden Stoßionisationen ein effektiv schwächeres Hochspannungsfeld erfahren und weniger beschleunigt werden [1]. Es entstehen also positive Raumladungen, die mit den frei gewordenen Elektronen wieder rekombinieren können. Dadurch wird das Signal schwächer. Die Raumladungen haben allerdings auch einen positiven Effekt:

Dadurch, dass die Beschleunigung der Elektronen mit der Größe der positiven Raumladungen abnimmt, verlangsamt sich die Entwicklung der Lawinen und es kommt zu einer Sättigung. So wachsen die Lawinen auf eine Größe an, die für ein brauchbares Signal ausreicht und gehen dann in Sättigung. Das optimiert die Arbeitsweise auf „natürliche“ Weise insofern, dass eine schnelle Signalerzeugung garantiert wird.[3] Eine Sättigung ist allerdings nur schnell erreicht, wenn man ein schmales *Gap* hat, in dem die Raumladungen von Ionen und Lawinen möglichst dicht sind. Da aber auch die Größe der Lawinen und damit die Signalstärke mit der Breite des *Gaps* steigt, wäre es von Vorteil, das Signal als Summe mehrerer Signale aus schmalen *Gaps* zu erhalten.

5 Die MRPC

Die ersten Überlegungen zu einer RPC mit mehreren schmalen *Gaps* entstanden 1995 in Italien [3]. Die Weiterentwicklung von der RPC zu einer MRPC (*Multigap Resistive Plate Chamber*) besteht im Wesentlichen aus diesem Übergang von einem *Gap* zu mehreren übereinanderliegenden schmalen *Gaps*, die durch *resistive plates* getrennt sind. Durch diese Modifikation konnten charakteristische Eigenschaften wie Effizienz und Zeitauflösung im Vergleich zur RPC verbessert werden. Die ausschlaggebenden Überlegungen, die zur Weiterentwicklung geführt haben, sind im Folgenden dargestellt.

5.1 Aufbau und Funktionsweise der MRPC

Neben dem Wunsch, eine schnelle Sättigung der Ladungs-Lawinen zu erreichen, ist auch eine hohe Zeitauflösung sehr wünschenswert:

Bei einer maximalen Verstärkung von $\exp(\alpha \cdot d) = 10^8$ erhält man die Relation $\lambda \sim d/18$ für die mittlere freie Weglänge λ (vgl. auch Gl. 2). Für die Zeitfluktuationen τ gilt

$$\tau \sim \frac{\lambda}{v} \sim \frac{d}{v},$$

wobei v die Geschwindigkeit der Elektronen bezeichnet [3]. Um die Fluktuationen zu verkleinern, liegt es also nahe, den Plattenabstand d , also die *Gap*-Breite, zu verkleinern.

Eine weitere Möglichkeit, die Zeit-Fluktuationen zu verringern, ist, die Spannung an den Elektroden zu vergrößern, denn dadurch erhöht sich die Geschwindigkeit der Ladungen in den *Gaps*. Die Spannung kann allerdings nicht beliebig erhöht werden, da für zu große Spannungen Blitz-Entladungen in den *Gaps* entstehen (RAETHER-Limit).

Eine weitere Möglichkeit, die Zeitauflösung zu verbessern, ist hier aber auch die Erhöhung der Anzahl der *Gaps*, denn da es mehrere Lawinen gibt und das Signal sich aus der Summe all dieser zusammensetzt [2], können die Auswirkungen von (unberücksichtigten) Störeffekten, so durch mehr Statistik verringert werden. Ein solcher Störeffekt könnte z. B. sein, dass in einem *Gap* ein Signal erzeugt wird, das aber nicht durch ein Teilchen erzeugt wurde und somit wahrscheinlich in den anderen *Gaps* nicht vorliegt. Bei vielen *Gaps* wird diese Störung dann vernachlässigbar. Die Anzahl der verwendeten *Gaps* wird aber u. a. durch die Konstruktionskosten limitiert.

Die Funktionsweise der MRPC ist ähnlich wie die der RPC. Der größte Unterschied im Aufbau ist, dass hier zusätzliche Platten in gleichen Abständen zwischen die äußeren beiden eingebaut werden. So werden die oben erläuterten Probleme der RPC durch die Erhöhung der *Gap*-Anzahl reduziert bzw. abgeschwächt. Die bedeutendste Verbesserung im Vergleich zur RPC ist, dass die Zeit-Fluktuationen geringer werden und so eine noch bessere Zeitauflösung möglich ist. Das ist auch der Grund, warum für das BGO-OD Experiment eine MRPC verwendet werden soll. Als *Stack* bezeichnet man eine Einheit, bestehend aus einer Anzahl an *resistive plates*, den dadurch definierten *Gaps*, den Elektroden und den *readout-pads* bzw. *-strips*. Um statistische Fehler zu minimieren, können auch mehrere *Stacks* übereinander genutzt werden. Das Signal ergibt sich dann aus den einzelnen Signalen aller *Stacks*.

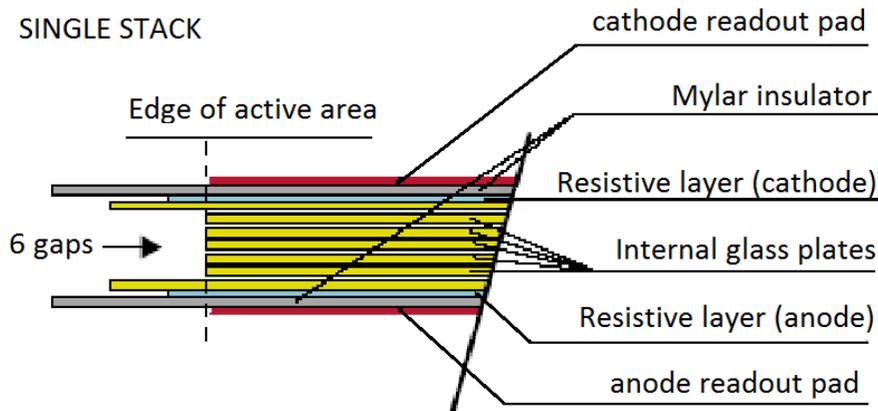


Abb. 6: Darstellung einer MRPC aus einem Stack mit sechs Gaps, Elektroden und readout-pads[17]

Der prinzipielle Aufbau einer MRPC ist in Abbildung 6 zu sehen. Die *resistive plates* bestehen hier aber aus Glas und nicht aus Phenolharz, wie es bei der RPC typischerweise der Fall ist. Es wäre theoretisch möglich, auch hier z. B. Phenolharz als hochohmiges Material für die Platten zu verwenden, Glas eignet sich allerdings genauso gut:

Bei der Verwendung von Phenolharz fließen (entgegen der eigentlichen Stromrichtung) von den äußersten Platten Ionen ab (und nicht Elektronen wie etwa bei Glas). Das Glas erhält die abgegebenen Elektronen von der Spannungsquelle wieder zurück, da diese Ladungsträger mit der Elementarladung (Elektronen bzw. Löcher) „liefert“.[14]

Beim Fluss von Ionen ist das aber nicht möglich, da diese nicht von der Quelle bereitgestellt werden. So löst sich also das Material der Phenolharz-Platten mit der Zeit auf und der Widerstand erhöht sich. Das verändert die Wirkungsweise des Detektors, denn das Prinzip funktioniert zwar mit hochohmigen Platten, nicht jedoch mit Isolatoren, da die Platten einen geringen Strom leiten müssen.[14]

Bei der Verwendung von Glas hat man allerdings einen Alterungs-Nachteil: Das *Quenching*-Gas (SF_6 bei BGO-OD) sorgt mit der Zeit dafür, dass es an den Glasplatten zu einer Korrosion kommt und die Oberflächen der Platten inhomogen werden. Es kommt auch hier mit dem Alter zu einer Verschlechterung der Arbeitsweise des Detektors. Wie stark dieser Effekt ist und wie lange es dauert, bis er relevant für die Funktionsweise des Detektors wird, ist noch nicht vollständig untersucht worden. Die Entscheidung, das Material Glas (und nicht etwa Phenolharz wie bei der RPC) für die MRPC zu verwenden, geht auf ihren Begründer Crispin Williams zurück. Prinzipiell macht diese Wahl aber keinen funktionalen Unterschied aus.[14]

Die Platten sind *electrically floating*, d. h. die Elektronen und Ionen in diesen ordnen sich so, dass die Platten im Inneren feldfrei sind und an jedem *Gap* die gleiche Spannung anliegt. (vgl. Abb. 7) Dies gilt natürlich unter der Voraussetzung, dass die Breiten der verschiedenen *Gaps* möglichst gleich sind. Die Lawinen in den *Gaps* werden durch die Platten gestoppt, wenn diese die Platten erreichen. Aus diesem Grund sind die Signalentstehungen in den einzelnen *Gaps* unabhängig voneinander und das gemessene Signal ist die Summe aus den einzelnen Signalen der verschiedenen *Gaps*. [3]

Wie bei der RPC lassen sich die Zeitfluktuationen auch hier über höhere Spannungen an den Elektroden verringern.

Bei den anliegenden Hochspannungen im kV-Bereich liegen so große elektrische Felder vor, dass es zu leichten Verformungen der Glasplatten kommen kann [3]. Durch diese Störungen entstehen Fluktuationen in den charakteristischen Größen des Detektors wie Effizienz und Zeitauflösung. Das liegt insbesondere daran, dass dann der Plattenabstand nicht mehr an allen Stellen des Detektors gleich und das elektrische Feld nicht mehr homogen ist. So sind die Signale von verschiedenen Stellen nicht mehr gleich stark, was Einfluss auf Orts- und

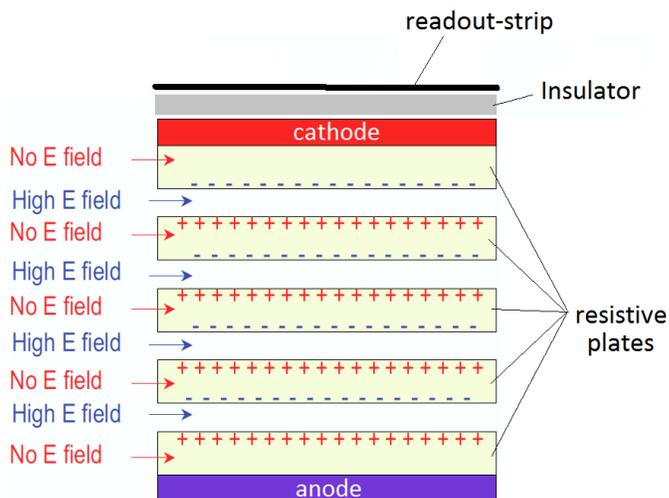


Abb. 7: Schematische Darstellung einer MRPC mit vier Gaps und anliegender Hochspannung [3]

Zeitauflösung hat. Da die *Gaps* eine Breite in der Größenordnung von etwa 100 Mikrometern besitzen, haben in der Regel schon kleine Verformungen und Schwankungen in der *Gap*-Breite einen merklichen Einfluss auf die Arbeitsweise des Detektors. Diese Art von Detektor ist also recht empfindlich gegenüber mechanischen Einwirkungen.

Die Verformung der Platten allein durch die anliegende Hochspannung ist vermutlich vernachlässigbar. Die Verengung eines *Gaps* an einer bestimmten Stelle aufgrund von Staub oder anderen Partikeln ist allerdings kritischer, da dort Blitz-Entladungen entstehen können, die dann möglicherweise die Glasplatten zerstören.[14]

Die Entstehung solcher Blitz-Entladungen ist analog zu der eines Blitzes bei einem Gewitter. Dieser Blitz verändert dann die Oberfläche der Glasplatten so, dass deren Breite nicht mehr homogen ist. An Stellen, wo das *Gap* dann schmaler ist, liegt ein stärkeres elektrisches Feld vor (gleiche Spannung über kleineren Abstand). Wird die Feldstärke nicht gesenkt, wird der Effekt noch verstärkt und der Detektor arbeitet an dieser Stelle nicht mehr richtig. Wird der Prozess nicht gestoppt, dann führt das zu einer Zerstörung der betroffenen Glasplatten.[14] Um den Detektor weiterhin sinnvoll nutzen zu können, müssten diese dann ausgetauscht werden. Der gleiche Effekt kann entstehen, wenn sich Verunreinigungen wie z. B. Staub auf den Platten befinden. An den betroffenen Stellen setzen sich dann aufgrund der Elektrostatik Ionen bzw. Elektronen an den Staubkörnern ab, wodurch das elektrische Feld an diesen Stellen im *Gap* auch größer wird. Beim Bau dieses sensiblen Detektors ist also Reinheit besonders wichtig.[12]

5.2 Effizienz einer MRPC

Die Quanteneffizienz (QE) ist definiert als die Wahrscheinlichkeit ϵ_q dafür, dass ein den Detektor durchquerendes Teilchen diesen auch zum Ansprechen bringt, also ein Signal auslöst. Sie kann allerdings nicht direkt gemessen werden, da auch immer Faktoren wie die Effizienz ϵ_{el} der verwendeten Auslese-Elektronik eine Rolle spielen. Für die messbare Effizienz gilt dann $\epsilon \propto \epsilon_{el} \cdot \epsilon_q$, wobei die Effizienz der Elektronik meist als nahezu eins angenommen werden kann. In jedem Fall ist sie aber invariant unter der Veränderung von Parametern wie der anliegenden Hochspannung oder der Gasmischung, die nur Einfluss auf die QE haben sollten. Dadurch wird dann mit einer Messung der Effizienz im Prinzip die QE gemessen, bis auf einen konstanten Faktor durch die Elektronik, oder ggf. auch andere invariante Faktoren.

Anstatt von der Effizienz kann also auch von der QE gesprochen werden. Der einzige Unterschied ist eine vertikale Verschiebung (in Abb. 8) zwischen der Effizienz- und der QE-Kurve aufgrund des konstanten Faktors.

Abbildung 8 stellt den prinzipiellen Verlauf der Quanteneffizienz einer RPC bzw. MRPC dar [14]. Bis zu einer anliegenden Hochspannung von etwa 8 kV verhält sich die QE analog zur Stromstärke linear, entsprechend dem Ohmschen Gesetz $I = U/R$. Aus diesem Grund muss der Detektor beim Einschalten und stufenweise Vergrößern der Spannung ab 8 kV langsamer aufgeladen werden als bis dahin. Ansonsten könnten Blitz-Entladungen im Gas entstehen.[14] Über dieser Schwelle fängt der Detektor an zu arbeiten, das bedeutet bei einfallenden Teilchen kommt es zu Stoßionisationen und Elektronen-Lawinen [14]. Der Strom steigt dann exponentiell an.

Für Spannungen über etwa 10 kV steigen Stromstärke und Quanteneffizienz langsamer an. Das liegt an der hohen Anzahl der gebildeten Ionen und den großen positiven Raumladungen. Es kommt zu vielen Rekombinationen der Elektronen. Es gibt dann für einen Spannungsbereich ab etwa 12 kV ein leichtes Plateau. Diese Grenzspannung hängt allerdings vom verwendeten Gasgemisch ab. Ab einer bestimmten Hochspannung sinkt der Strom wieder, da die Gas-Atome alle ionisiert sind und es zu einer Sättigung kommt. Für besonders hohe Spannungen sorgen die Blitz-Entladungen für einen schnellen Abfall der Quanteneffizienz.[14]

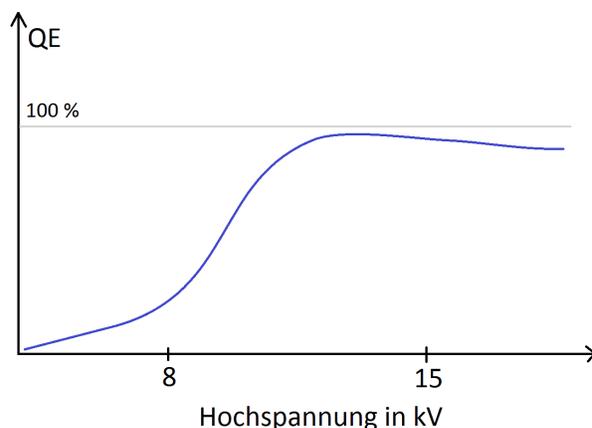


Abb. 8: Schematischer Verlauf der Quanteneffizienz QE in Abhängigkeit der anliegenden Hochspannung am Detektor[14]

6 Die MRPC für das BGO-OD Experiment

6.1 Aufbau des Detektors

Bevor der vollständige MRPC-Detektor für das BGO-OD Experiment, der aus 16 trapezförmigen Segmenten zusammengesetzt ist (vgl. Abb. 4 in Kap. 3), produziert und eingebaut werden kann, wird zunächst das Verhalten eines Prototyps (eines der 16 Segmente) untersucht. Dieser Prototypdetektor besitzt vier übereinanderliegende *Stacks*, die jeweils aus sechs *Gaps* bestehen. In Abb. 9 ist der Aufbau des Detektors dargestellt. Zwecks einer kompakten Darstellung sind hier nur zwei der vier *Stacks* abgebildet. In Abb. 10 ist ein Foto der Seite des offenen Detektors zu sehen. Der gesamte Detektor ist durch eine Honeycomb-Konstruktion gegen äußere mechanische Einwirkungen geschützt und mit Kupferfolie umwickelt.

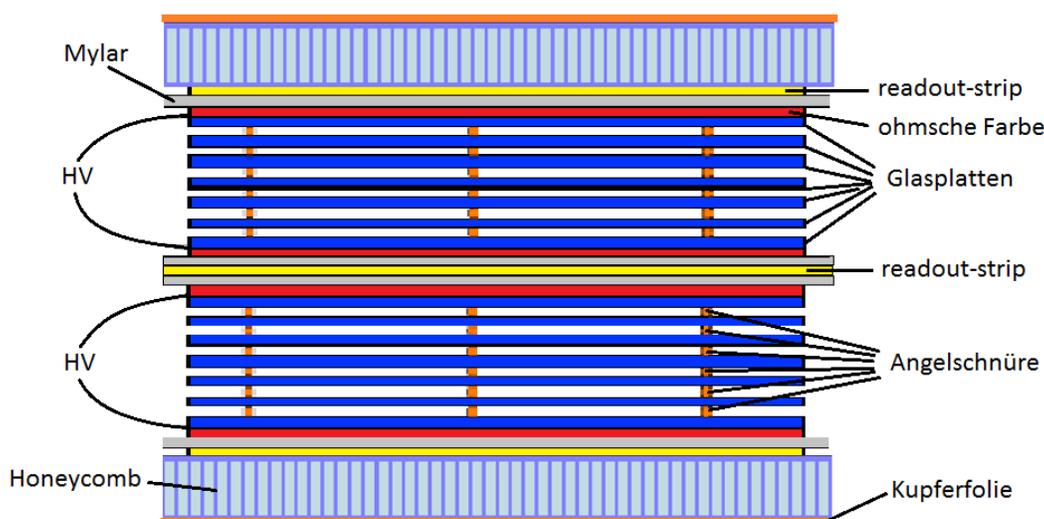


Abb. 9: Schematische Darstellung zweier von insgesamt vier *Stacks* mit jeweils sechs *Gaps* des MRPC-Detektors für das BGO-OD Experiment[6]

Als *resistive plates* werden hier 550 μm dicke Platten aus gewöhnlichem Spiegelglas mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von etwa $10^{12} \Omega\text{cm}$ verwendet [14]. Diese werden durch 160 μm dicke Angelschnüre getrennt. Deren Dicke entspricht also der Breite eines *Gaps*. Es werden Angelschnüre verwendet, da diese über die gesamte Länge eine nahezu konstante Dicke haben und somit eine kostengünstige, sehr genaue Konstruktion schmaler *Gaps* ermöglichen. Die nahezu konstante Dicke, also die Breite der *Gaps*, ist von großer Wichtigkeit, da es ansonsten zu Fehlfunktionen des Detektors kommen könnte (vgl. Kapitel 4).



Abb. 10: *Fotografie der Seite des offenen MRPC-Detektors für das BGO-OD Experiment mit sichtbarem NINO-Anschluss (rechts im Bild)[12]*

Es gibt auch die Möglichkeit, anstatt der Angelschnüre dünne Holme zu verwenden, die dann wie kleine Pfeiler die Glasplatten auseinanderhalten. Die Angelschnüre haben zwar den Nachteil, dass sie die sensible Fläche des Detektors mehr verkleinern als die Stützen und dass sie den Gasfluss im Detektor einschränken, allerdings sind die Konstruktionskosten, die mit den Holmen entstehen, sehr viel größer als bei der Verwendung von Angelschnüren, sodass hier die günstigere Variante gewählt wird.[12]

Auslese der Signale: Abbildung 11 zeigt die Anordnung der 16 gebogenen *readout-strips*. Die Konstruktion ist ein Standard-PCB mit FR-4-Basis und etwa 70 μm dicken Kupfer-*Strips* [14]. Diese sind gebogen, um die ϕ -Symmetrie des gesamten Detektors zu erhalten. Die Strips werden von insgesamt vier NINO ASICs (im Folgenden nur als NINO bezeichnet) ausgelesen.

Ein NINO ASIC* ist ein Front-End-Elektronikbauteil, das ein diskriminiertes LVDS[†]-Signal ausgibt. Der NINO wurde speziell für die Auslese von MRPCs für ALICE entwickelt und zeichnet sich durch eine schnelle Performance aus [19]. Zwei NINOs lesen jeweils die gleichen *Strips* an den beiden verschiedenen Enden aus. Das Signal wird also doppelt ausgelesen. Jeder NINO ist an acht *Strips* angeschlossen. Die Kanalnummer wird als Index bezeichnet und läuft von 1 bis 32, wobei jedes Ende der sechzehn *readout-strips* über einen Kanal, also einen NINO-Eingang, ausgelesen wird.

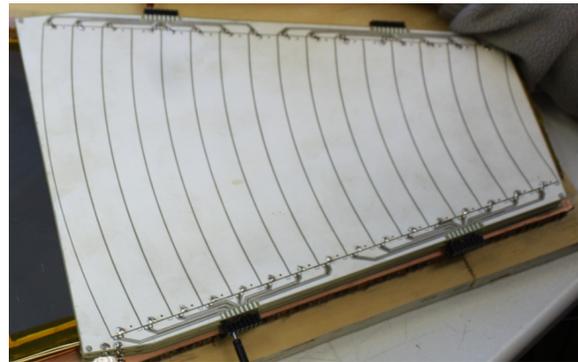


Abb. 11: *Fotografie des offenen MRPC-Detektors mit den 16 sichtbar gebogenen readout-strips und den vier dazugehörigen NINO-Anschlüssen (seitlich)[12]*

*ASIC (Application Specific Integrated Circuit) bedeutet, dass es sich um ein speziell für eine bestimmte Aufgabe entwickeltes Bauteil handelt. Ein solches ist für diese Aufgabe dann in der Regel besser geeignet als z. B. ein FPGA, das zwar die gleiche Aufgabe erfüllen kann, allerdings nicht so optimal wie das ASIC

[†]LVDS bedeutet „Low Voltage Differential Signal“ und bezeichnet ein digitales Ausgangssignal

Der gesamte Detektor aus 16 MRPC-Segmenten soll im eingebauten Zustand den Winkelbereich zwischen 8° und 25° abdecken, in dem bisher keine Teilchen detektiert werden konnten (vgl. Abb. 3 und 4 in Kap. 3).

Die Gasmischung der MRPC besteht zu etwa 90 % aus $C_2H_2F_4$ (Tetrafluorethan) und zu 10 % aus SF_6 (Schwefelhexafluorid). Ersteres ist das Gas, das hauptsächlich für die Erzeugung der Stoßionisationen und der Elektronen-Lawinen benötigt wird. Es wurde schon bei Vorgänger-Detektoren, wie z. B. dem an ALICE, verwendet. Das SF_6 wird als *Quenching*-Gas gebraucht. Die idealen prozentualen Anteile der Gasmischung wurden in vorhergegangenen Messungen ermittelt und erfüllen ihren Zweck hinreichend gut [14].

Eigentlich wäre eine Mischung von 95 % $C_2H_2F_4$, 3 % C_4H_{10} (Isobutan) und 2 % SF_6 optimal, da das SF_6 teurer ist als das Isobutan. Allerdings ist letzteres brennbar und um Risiken zu minimieren, wird nur mit den anderen beiden Gasen gearbeitet. Bei einer Erhöhung des SF_6 -Anteils auf 10 % wird der Nachteil des SF_6 gegenüber dem Isobutan hinreichend ausgeglichen und der Detektor arbeitet nahezu gleich.[14]

Um den Verbrauch des relativ teuren SF_6 so gering wie möglich zu halten, werden die Gasrohre so kurz wie möglich gehalten, das heißt die Gasflaschen werden nahe dem Detektor (jedoch im sicheren Bereich) gelagert. Der Verbrauch wird dadurch minimiert, da bei der Befüllung des Detektors mit dem Gas zunächst das Rohr von „altem“ Gas und Luft durch Durchströmen mit dem neuen Gas gereinigt werden muss und die Menge des zu verdrängenden „alten“ Gases größer ist, je länger das Rohr ist.

Unerwünschte Beiträge: Es gibt im Detektor einen Dunkelstrom, der u. a. durch den Strom durch den Rahmen/ das Gehäuse des Detektors entsteht. Der Rahmen besteht aus hochohmigem Material (FR-4, ein Flammen hemmendes Material aus Epoxidharz und Glasfasergewebe) mit einem spezifischen elektrischen Widerstand in der Größenordnung von $10^{13} \Omega cm$. Bei einer anliegenden Hochspannung in der Größenordnung von 10 kV erhält man also einen Dunkelstrom von wenigen Nanoampere.

Um den Gleichstromanteil zu eliminieren, kann der Detektor mit einem Kondensator gekoppelt werden. Da die geometrische Ausdehnung eines Kondensators für eine Spannung im kV-Bereich allerdings sehr unhandlich wäre, lässt sich dessen Zweck auch durch einen Isolator erfüllen. Dieser ist hier Mylar. Er befindet sich zwischen den *readout strips* und der ohmschen Farbe. Die ohmsche Farbe ist eine Graphit33-Beschichtung (Kontakt Chemie) und dient hier als Elektrode (vgl. Abb. 9).[14]

6.2 Erwartungen an Zeitauflösung und Effizienz

Zeitauflösung:

MRPCs wurden bereits in verschiedenen Kompositionen von *Stack*- und *Gap*-Anzahl an verschiedenen Experimenten getestet. Die Zeitauflösung dieses Detektortyps lag dabei in der Regel unter 100 ps. So wurden zum Beispiel 2004 für das ALICE ToF-System 18 MRPCs mit zwei *Stacks* und jeweils fünf *Gaps* von 250 μm Breite getestet. Die Glasplatten wurden auch hier mit Angelschnüren getrennt. Für anliegende Hochspannungen über 12 kV ergibt sich für alle MRPCs eine Zeitauflösung besser als 80 ps. Für 14 kV erhält man sogar Zeitaufösungen, die besser als 60 ps sind.[18]

Da die MRPC für das BGO-OD sehr ähnlich gebaut ist, sind hier ähnlich gute Werte zu erwarten. Da es sich hier sogar um doppelt so viele *Stacks* mit jeweils sechs 160 μm breiten *Gaps* handelt, ist es sogar gut möglich, noch bessere Ergebnisse zu erreichen.

Effizienz:

Die Effizienz der MRPCs bei ALICE liegt für Spannungen über 12 kV bei etwa 99,9% [18]. Ein ähnlich guter Wert kann also auch hier erwartet werden.

Das Verhalten der Effizienz der MRPC für das BGO-OD Experiment wurde bereits in Italien im Rahmen einer Diplomarbeit[20] untersucht. Dabei wurde die MRPC mit zwei verschiedenen Gasmischungen unter Ausnutzung der kosmischen Strahlung getestet:

Die erste Gasmischung (Gas 1) bestand aus 90% Tetrafluorethan ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$), 5% Isobutan (C_4H_{10}) und 5% Schwefelhexafluorid (SF_6). Bei der zweiten Mischung (Gas 2) wurden 90% $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$, 8% C_4H_{10} und nur 2% SF_6 verwendet.[20]

Die Effizienz wurde dabei wie folgt bestimmt: Über und unter dem waagrecht aufgebauten Detektor wurde jeweils ein Szintillationsdetektor angebracht. Gezählt wurde die Gesamtzahl der Koinzidenz-Ereignisse der beiden Szintillationsdetektoren und der Koinzidenz-Ereignisse von beiden Szintillationsdetektoren und der MRPC. Die Quanteneffizienz (QE) der MRPC lässt sich dann experimentell durch das Verhältnis der beiden Zahlen abschätzen. Dieses wurde für verschiedene Hochspannungen am Detektor bestimmt. Der sich ergebende Verlauf ist in Abbildung 12 dargestellt.[20]

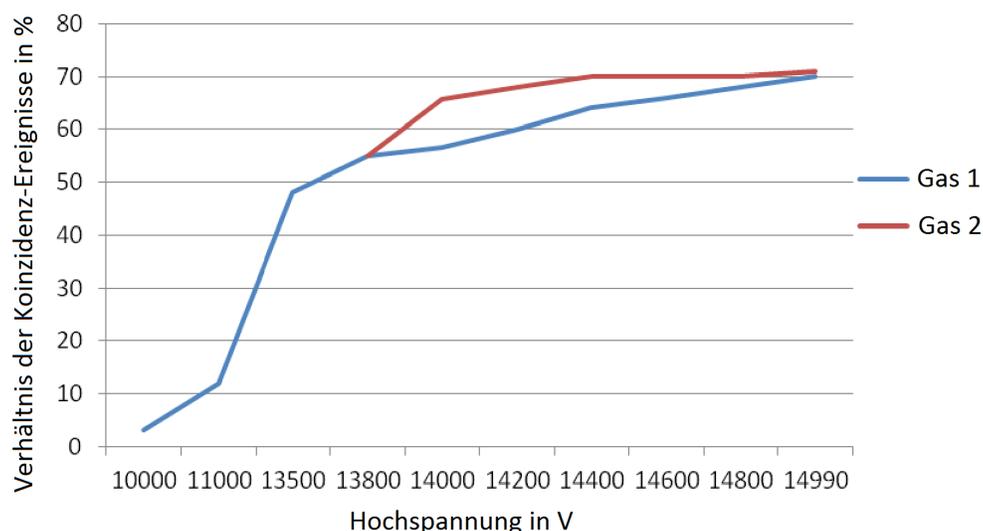


Abb. 12: Verhalten des Verhältnisses der Anzahlen der Koinzidenz-Ereignisse der Szintillationsdetektoren und der Koinzidenz-Ereignisse von beiden Szintillationsdetektoren und der MRPC, als Maß für die Quanteneffizienz, in Abhängigkeit der am Detektor anliegenden Hochspannung für zwei verschiedene Gasmischungen[20]

Es ist zu erkennen, dass das Verhältnis nicht über 70% ansteigt. Das liegt daran, dass die detektierende Fläche der Szintillationszähler größer ist als die aktive Zone der MRPC und diese somit sicherlich mehr Ereignisse registrieren als der Detektor (vgl. dazu auch Abb. 6 in Kap. 5). Nach geeigneter Korrektur ergibt sich ein Maximum von annähernd 100%.[20]

Man sieht, dass die Effizienz für die zweite Gasmischung bereits mit Spannungen unter 15 kV

eine Art Plateau erreicht. Das verwendete Modul für die Hochspannungsversorgung konnte keine Spannungen über 15 kV liefern, es ist jedoch zu erwarten, dass die Effizienz für die erste Gasmischung bei höheren Spannungen auch ein Plateau erreicht hätte [14]. Ein höherer Anteil von SF₆ scheint die Effizienz zu verringern, bzw. das Erreichen eines Plateaus zu verzögern. Um Risiken zu minimieren, wird beim BGO-OD Experiment dennoch auf die Verwendung vom brennbaren Isobutan verzichtet und der Anteil des SF₆ stattdessen auf 10% erhöht. Der einzige Nachteil sollte dann sein, dass höhere Spannungen nötig sind, um die gleiche Effizienz wie mit Isobutan zu erreichen. Hier ist also eine recht gute Effizienz von annähernd 100% zu erwarten.

7 Strahlzeit

Die erste Strahlzeit ging vom 17.06. bis zum 18.06.2014. Dabei wurden Daten für die MRPC in der Nacht zwischen den beiden Tagen aufgenommen.

7.1 Vorbereitungen

Zuerst musste sichergestellt werden, dass Rate und Verhalten der Stromstärke der MRPC für die Verwendung unter den Bedingungen des BGO-OD Experimentes geeignet sind. Dazu wurde untersucht, wie sich die Stromstärke des Detektors mit und ohne extrahierten Strahl von ELSA verhält. Es wurde ein Prototyp-Segment der MRPC an der angestrebten Position installiert. Es wurde zwar eine MRPC mit nur zwei *Stacks* und jeweils vier *Gaps* verwendet, doch für die aktuelle Konstruktion ist ein mindestens genauso gutes Verhalten zu erwarten. Stellt man den zeitlichen Verlauf von Strahl und MRPC-Stromstärke dar, dann sieht man eine starke Korrelation (vgl. Abb. 13). Die Stromstärke reagiert also auf Veränderungen in der Strahlcharakteristik. D. h., dass die MRPC eine geeignete Detektionsrate im angestrebten Winkelbereich des Experiments besitzt, um sinnvoll verwendet werden zu können. Diese Messungen wurden bereits vor Beginn dieser Arbeit durchgeführt.[12]

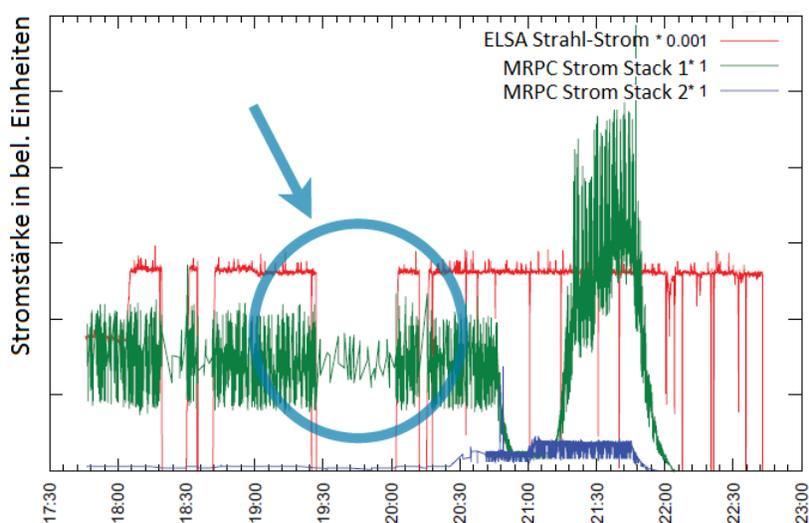


Abb. 13: Überprüfung der Korrelation zwischen Strahl-Charakteristik von ELSA und Verhalten der Stromstärke der MRPC[13]

7.2 Setup

7.2.1 Mapping der MRPC

Um den Detektor sinnvoll nutzen und die erhaltenen Daten analysieren zu können, musste zunächst herausgefunden werden, welche Kanalnummer (Index) des NINOs welchem *readout-strip* des Detektors entspricht. Diese Zuordnung ist das sogenannte *Mapping*. Um dieses durchzuführen, müssen die *readout*-Elemente des Detektors und die Anschlüsse der vier NINOs eindeutig gekennzeichnet werden. Dazu wird jedem Detektor-*Strip* ein Detektor-Index zugewiesen. Da jeder der vier NINOs über acht Anschlüsse verfügt, werden $4 \cdot 8 = 32$ NINO-Indizes vergeben.

Die in ExPIORA[‡] verankerte Software kann die doppelt belegten Detektor-Indizes nicht eindeutig zuordnen, deshalb wird ein zusätzlicher Index, der Software-Index (1 bis 32), eingeführt. Die 16 *readout-strips* des Detektors und die Zuordnung sind in Abb. 14 schematisch dargestellt. Jedem *Strip*, also jedem Detektor-Index, werden zwei benachbarte Software-Indizes zugewiesen. So erhält z. B. der Detektor-Index 15 die Software-Indizes 3 und 4. Bei der späteren Analyse von Daten muss dann beachtet werden, dass die Software zwar jeden Index einzeln behandelt, jedoch zwei entsprechende Indizes den gleichen *Strip* bezeichnen. Beim *Mapping* kann nun jeder NINO-Index eindeutig einem Software-Index zugeordnet werden.

Abbildung 14 zeigt schematisch die geometrische Anordnung der 16 *Strips* (schwarz), den entsprechenden Software-Index (rot, 1 bis 32) und die Nummerierung der verschiedenen NINO-Indizes (blau, 1 bis 32) für die vier NINOs.

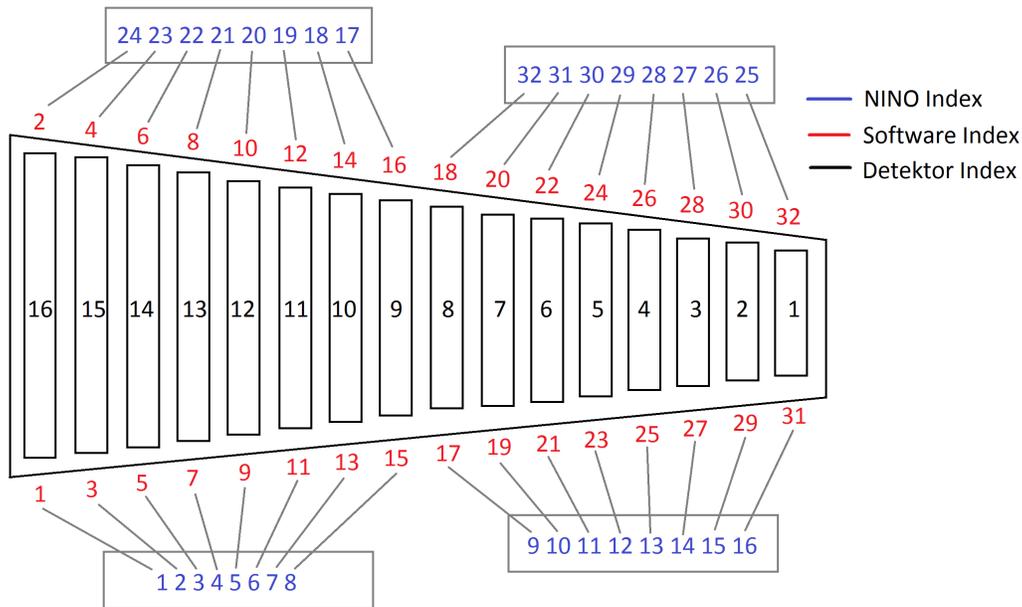


Abb. 14: Graphische Darstellung des durchgeführten Mappings mit zugeordneten Software-Indizes, NINO-Indizes und Detektor-Indizes

Diese Darstellung zeigt bereits die endgültigen Zuordnungen nach dem *Mapping*. Für das

[‡]ExPIORA ist eine objektorientierte Analysesoftware des BGO-OD Experiments, die auf der ursprünglichen „**E**xtended **P**luggable **O**bjectoriented **R**OOT(ified) **A**nalysis“ basiert, welche in Bonn von der CBELSA/TAPS Kollaboration entwickelt wurde (Version von 2011) [16]

Mapping selbst wurden geometrische und korrelative Überlegungen angestellt: Da jeder *Strip* des Detektors von zwei verschiedenen NINOS ausgelesen wird, müssen jeder *Strip*-Nummer (Detektor-Index) zwei NINO-Indizes zugeordnet werden. Um herauszufinden, um welche beiden Indizes es sich jeweils handelt, wird die Darstellung der Korrelationshäufigkeiten für zwei beliebige Indizes verwendet. Abbildung 15 zeigt, wie häufig zwei beliebige Indizes im Betrieb gleichzeitig angesprochen wurden.[§]

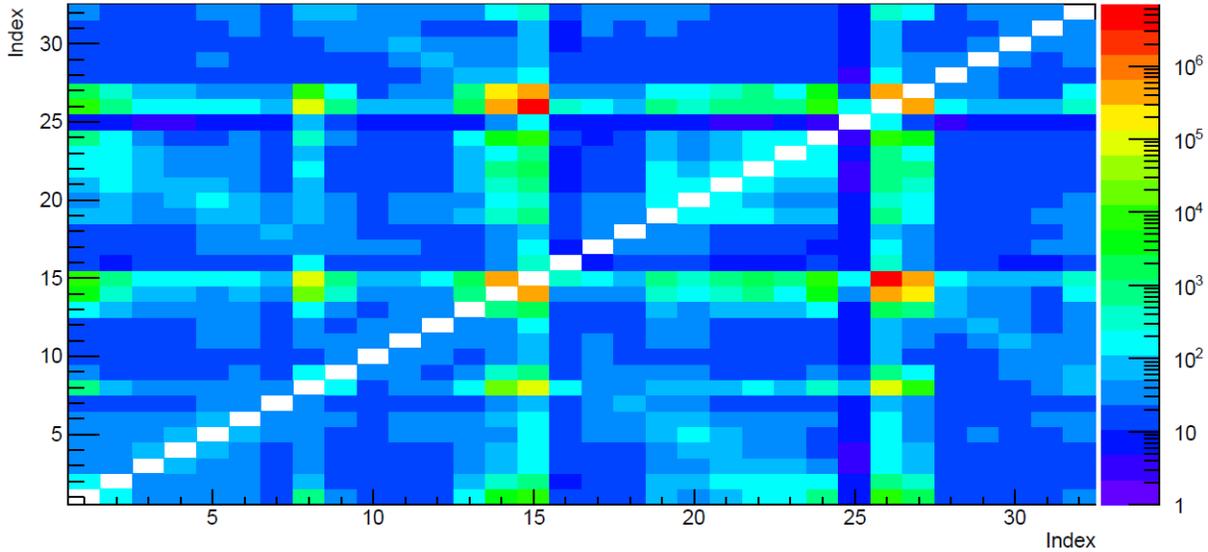


Abb. 15: Darstellung der Korrelationshäufigkeiten der 32 verschiedenen Indizes (Kanäle) für das Mapping mit Daten, die vor dieser Strahlzeit erhalten wurden[12]

Die korrelierten Indizes eines *Strips* sollten dann die größten Häufigkeiten aufweisen. Außerdem sollten benachbarte Detektor-Indizes ebenfalls benachbarten NINO-Indizes entsprechen. So sollte z. B., wenn Detektor-Index 1 dem NINO-Index 25 entspricht, der Detektor-Index 2 dem NINO-Index 26 entsprechen. Andernfalls würden Indizes im NINO selbst vertauscht sein, was theoretisch nicht möglich ist.

In Abbildung 15 ist beispielsweise eine starke Korrelation zwischen den Indizes 15 und 26 und 14 und 27 zu erkennen. Diese ist auch mit den geometrischen Überlegungen konform. Man kann auch eine relativ starke Korrelation zwischen den Indizes 1 und 24, 5 und 20 erkennen. Betrachtet man die Korrelationen und überprüft die Kompatibilität mit den geometrischen Überlegungen, dann erhält man nach eingehender Analyse als bestes Ergebnis die Zuordnung aus Abbildung 14. Sie ist in Tabelle 1 noch einmal kompakt dargestellt.

Detektor-Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
NINO-Index	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Software-Index	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
NINO-Index	25	26	27	28	29	30	31	32	17	18	19	20	21	22	23	24
Software-Index	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1

Tab. 1: Mapping-Tabelle für die MRPC

[§]Die Daten wurden bei einem früheren Test des Detektors aufgezeichnet, sodass Abbildung 15 bereits für die weitere Auswertung zur Verfügung stand.

Dieses *Mapping* ist das endgültige für diesen Detektor, das dann im Folgenden auch für die Analyse von Daten verwendet wird. Dabei ist aber zu beachten, dass *Strip 1* in dieser Strahlzeit nicht an die Ausleseelektronik angeschlossen ist. Die Software-Indizes 31 und 32 werden also nicht belegt.

7.2.2 Installation und Inbetriebnahme der MRPC

Das MRPC-Prototypdetektorsegment wurde in waagerechter Stellung an der Wand zwischen BGO-Ball und MoMo angebracht. (vgl. auch Abb. 4) Dabei wurde der Detektor an einer Haltevorrichtung montiert, die um 16.5° gegenüber der Strahlachse verkippt ist. Diese Verkipfung ist nötig, um Projektionsfehler aufgrund der kugelsymmetrischen Ausbreitung der aus dem BGO-Ball kommenden Teilchen zu vermeiden.

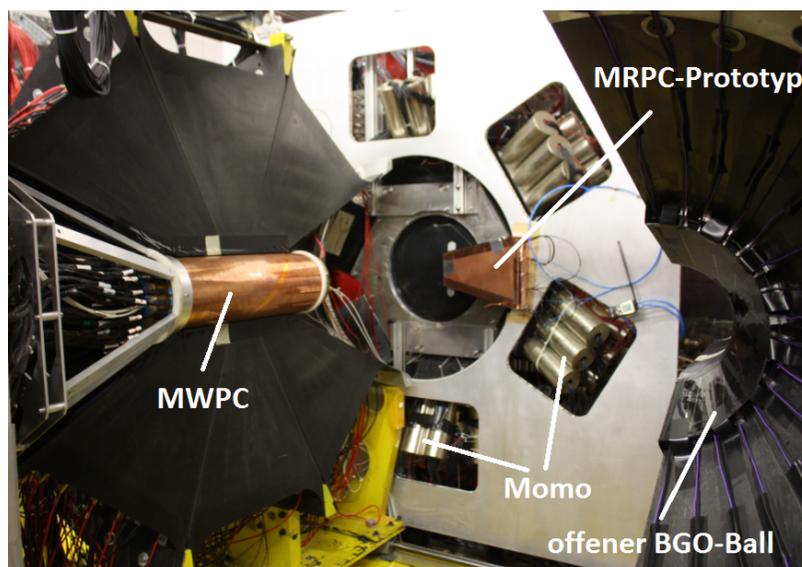


Abb. 16: Foto des eingebauten MRPC-Prototypsegments am BGO-OD Experiment in waagerechter Stellung mit sichtbaren Gasleitungen (blau) und offenem BGO-Ball[12]

Die Hochspannung am Detektor wurde für alle *Stacks* gleichermaßen schrittweise bis 12 kV erhöht. Dabei wurde die Spannung über 8 kV langsamer erhöht als bis dorthin, um Probleme zu vermeiden (vgl. auch Abschnitt „Effizienz einer MRPC“ in Kapitel 5). Für die Spannungsversorgung wurde ein CAEN-A1526N-Modul verwendet. Dieses versorgt zum einen den Detektor mit Spannung, und gibt gleichzeitig ein Feedback über den momentanen Spannungswert und Stromfluss zurück. So kann das Modul die aktuelle Spannung bzw. den fließenden Strom zur Analyse verwenden. Für das Modul konnten u. a. auch einige Kontrollwerte eingestellt werden: Für den Fall, dass der Strom der Spannungsversorgung bzw. die am Detektor anliegende Hochspannung zu groß werden, lassen sich sowohl für die Spannung als auch für die Stromstärke Maximalwerte einstellen. Wird einer der beiden dann aus irgendeinem Grund überschritten (das sogenannte *Tripping*), wird der Output des Moduls schrittweise gesenkt. Außerdem kann die Schrittweite und -geschwindigkeit festgelegt werden, d. h. z. B. ein Absenken der Spannung mit 10 V/s nach einem *Tripping* (das sog. *Rampdown*). Des Weiteren kann eingestellt werden, wie lange der Strom bzw. die Spannung den Maximalwert überschreiten darf, bis es als *Tripping* gezählt wird.

Für die MRPC wurde eine Zeit von einer Sekunde bei maximal $1\ \mu\text{A}$ mit einem *Rampdown* von $10\ \text{V/s}$ eingestellt. Bei einem *Tripping* wird die Hochspannung automatisch und unmittelbar auf OFF angezeigt und der *Rampdown* eingeleitet. Es gibt allerdings die Möglichkeit, die Hochspannung manuell wieder auf ON einzustellen, welche dann vom momentanen Wert an mit der angegebenen Geschwindigkeit steigt. Dieses Vorgehen lässt sich für jedes *Tripping* wiederholen. Es ist möglich, die Parameter des Hochspannungsmoduls für alle *Stacks* der MRPC separat einzustellen.

Der Detektor arbeitete bei extrahiertem Strahl zunächst wie erwartet bei einer Spannung von $12\ \text{kV}$. Die Stromstärke lag meist in einem angemessenen Bereich zwischen 0.1 und $0.4\ \mu\text{A}$.

7.3 Analyse von Daten

Die Analyse von Daten beschränkt sich beispielhaft auf einen beliebigen *Run* aus der Strahlzeit, da die Ergebnisse aller *Runs* sehr ähnlich sind. Es wird *Run17471* gewählt, der zeitlich etwa in der Mitte der Strahlzeit aufgenommen wurde.

7.3.1 Probleme bei der Datennahme

Bei der Visualisierung der gespeicherten Daten der MRPC während der Strahlzeit fiel auf, dass die ersten acht der 32 Kanäle keine Daten lieferten. Vermutet wurde zunächst, dass einer der NINOs der MRPC nicht korrekt angeschlossen war. Dies wurde überprüft, verbesserte die Situation jedoch nicht. Der Grund für die fehlenden Kanäle war, dass die Daten der MRPC zusammen mit den Daten des Taggers gespeichert wurden. Dessen erste acht Kanäle werden nicht ausgelesen, sodass offensichtlich keine Daten sichtbar waren. Um die Daten der MRPC unabhängig zu betrachten, wurden sie von denen des Taggers getrennt. Das Signal der MRPC wird mit dem des BGO-Balls getriggert. Es kann ein Zeitfenster zwischen Signal von BGO-Ball und MRPC gesetzt werden, das angibt, in welchem Zeitraum vor oder nach dem Trigger-Signal ein Signal im Detektor entstehen muss, damit es gespeichert wird. So wird sichergestellt, dass beide Signale vom gleichen Teilchen stammen. Dabei kommt es auch auf den geometrischen Abstand von Trigger-Detektor und MRPC an. Dieses Zeitfenster wurde allerdings falsch gewählt, sodass die Ereignisse in der MRPC nicht richtig getriggert wurden. Es liegen also zwar Daten für Ereignisse von Teilchen vor, da diese aber nicht mit den Ereignissen im BGO-Ball in Verbindung gebracht werden können, ist es nicht möglich, die Signale von echten Teilchen vom Untergrund zu unterscheiden. Es können also im Folgenden nur unkorrelierte Daten untersucht werden.[12]

7.3.2 Auswertung von Diagrammen

Etwas, das auch nur mit den zum BGO-Tagger-Trigger unkorrelierten Daten überprüft werden kann, ist ob die Daten zu dem vorangegangenen *Mapping* passen. Die Darstellung der Korrelationshäufigkeiten der verschiedenen Software-Indizes sind in Abbildung 17 dargestellt. Der Software-Index (vgl. Kap. 7.2) wird im Folgenden nur als Index bezeichnet. Es ist zu erkennen, dass, wie erwartet, die Indizes 29 und 30 stark miteinander korreliert sind, da sie beide dem selben Detektor-Index (*Strip*) entsprechen (siehe Tab. 1). Auch die Indizes 27 und 28 und einige andere scheinen wie erwartet stark korreliert. Hier ist auch zu sehen, dass *Strip* 1 nicht an einen NINO angeschlossen ist.

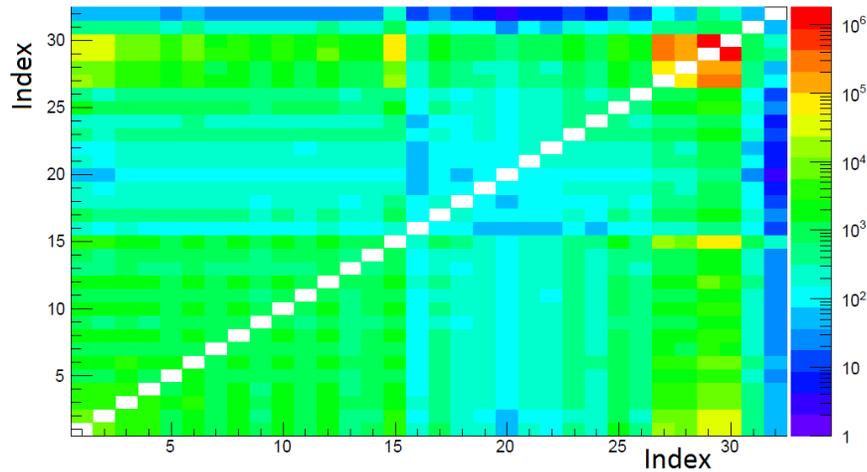


Abb. 17: Darstellung der Korrelationshäufigkeiten der verschiedenen Software-Indizes der MRPC mit logarithmischer Skalierung der z-Achse

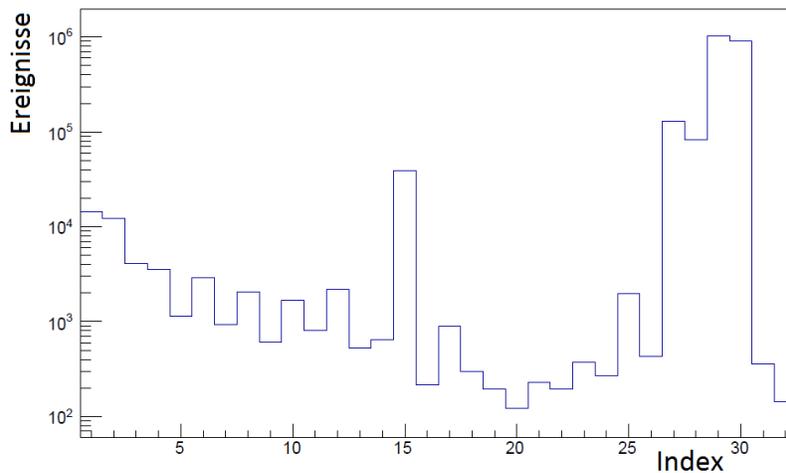


Abb. 18: Darstellung der Gesamtzahl von Ereignissen für jeden Index mit logarithmischer Skalierung der Ordinate

In Abb. 18 ist zu erkennen, dass für *Strip 2* sehr viel mehr Ereignisse detektiert wurden als für die anderen. Das ist allerdings nicht besonders verwunderlich, da die hohen Detektor-Indizes nahe an der Strahlachse liegen und somit die meisten Teilchen detektieren sollten [12]. Ohne Strahl sollte die Verteilung dann deutlich homogener erscheinen. Es könnte allerdings auch sein, dass *Strip 2* aufgrund eines Fehlers sensibler arbeitet als die anderen und schon zufällige Ionisationen als Ereignis detektiert. Diese Annahme kann allerdings soweit nicht untersucht werden, da dafür Daten ohne Strahl notwendig sind, solche aber nicht zur Verfügung stehen. Der teils merkbare Unterschied in der Anzahl der Ereignisse für zwei Software-Indizes zum gleichen *Strip* ist durch die Unterschiede in den Diskriminatorschwellen der NINOs bedingt. Außerdem fällt noch auf, dass z.B. für Index 15 eine relativ hohe Anzahl an Ereignissen vorliegt, nicht jedoch für Index 16 vom selben *Strip*. Daraus lässt sich schließen, dass es sich bei den Ereignissen um Rauschen handelt [12]. Das gleiche gilt für einige andere kleinere Indizes.

Ein Signal aus dem Detektor befindet sich (wenn dessen Maximum hoch genug ist) für eine bestimmte Zeit über der Diskriminatorschwelle. Diese Zeit wird als *Time over Threshold* (ToT) bezeichnet und ergibt sich durch $ToT = T_{ab} - T_{auf}$. Dabei ist T_{auf} die Zeit, zu der das Signal über die Diskriminatorschwelle gelangt (aufsteigende Flanke) und T_{ab} die Zeit, zu der das Signal wieder unter die Schwelle fällt (abfallende Flanke). Beim Speichern der Daten sollten genauso viele aufsteigende wie abfallende Flanken vom MTDC-Modul (Multihit Time to Digital Converter) erkannt und aufgezeichnet werden. Da die Größenordnung der Länge der einzelnen Signale aufgrund des gleichen Entstehungsprinzips gleich sein sollte, ist ein besonders starker Peak um eine bestimmte ToT zu erwarten. Die ToT hängt von der Energiedeposition der Teilchen im Detektor ab. Da diese einer Landau-Verteilung folgt, ist auch eine solche Form für den Peak zu erwarten. Stellt man die Anzahl der Ereignisse gegen die ToT dar, erhält man Abbildung 19. Es fällt auf, dass nur für kleine ToTs ein dominanter Peak zu sehen ist. Die Feinstruktur zwischen benachbarten Kanälen entsteht durch das *Binning* des Diagramms. Der Peak mit der größten Anzahl an Ereignissen im Maximum ist in den Abbildungen 20 und 21 vergrößert dargestellt.

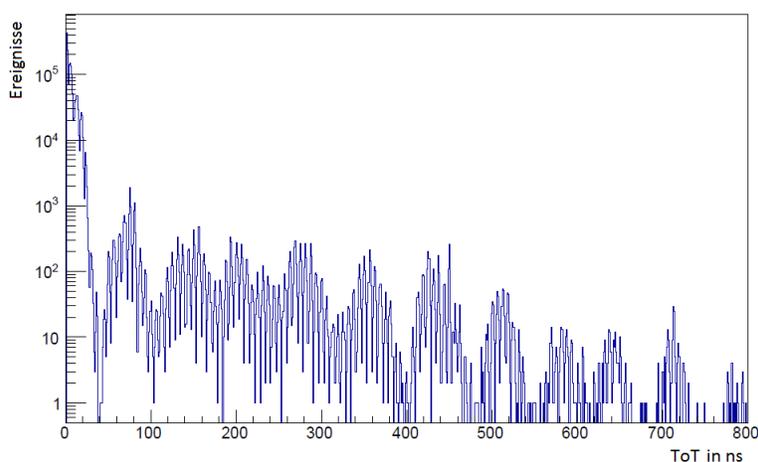


Abb. 19: Darstellung der Häufigkeiten der verschiedenen ToTs mit logarithmischer Skalierung der Ordinate

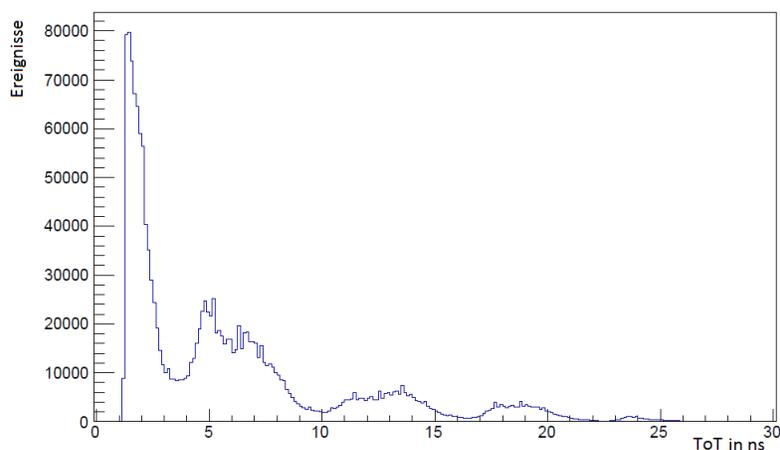


Abb. 20: Vergrößerung eines ausgewählten Bereiches der Darstellung der Häufigkeiten der verschiedenen ToTs

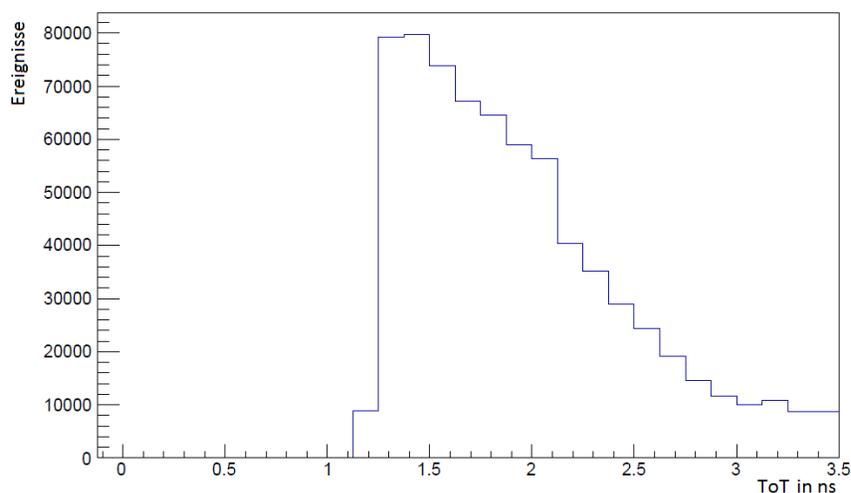


Abb. 21: Vergrößerung des ersten Peaks aus der Darstellung der Häufigkeiten der verschiedenen ToTs

Neben dem Peak sind noch vereinzelt kleinere Peaks zu erkennen. Aus der Vergrößerung des ersten Peaks ist zu sehen, dass das Maximum bei einer sehr kleinen ToT liegt. Dies entspricht einem sehr kurzen Signal von wenigen Nanosekunden. Die Stelle dieses Maximums ist allerdings nicht bestimmbar, da zwar die rechte, nicht jedoch die linke Flanke des Peaks zu erkennen ist. Die Flanke für kleinere ToTs wird also „abgeschnitten“. Das sieht man auch daran, dass (bis auf offensichtlich statistisches Rauschen) keine Werte unterhalb von etwa 1.3 ns vorliegen. Der Grund dafür ist, dass der MTDC diese kurzen Signale nicht mehr aufnehmen kann. Dieser Fall tritt ein, wenn ein Signal der MRPC so kurz ist, dass die, zu einer aufsteigenden Flanke gehörende, abfallende Flanke während der Zeit kommt, in welcher der MTDC noch damit beschäftigt ist, die bemerkte aufsteigende Flanke zu registrieren bzw. zu speichern [12]. T_{ab} befindet sich dann sozusagen in der Totzeit des MTDC. Die Totzeit ist allerdings nicht bekannt und kann deshalb nicht mit den Ergebnissen verglichen werden. Sie liegt aber unter 5 ns.

Ein weiteres Indiz dafür wäre, dass viele aufsteigende bzw. abfallende Flanken nicht gemessen werden können, bzw. es Flanken gibt, die kein entsprechendes Komplement besitzen. Die Abbildungen 22 bis 24 zeigen die Anzahl solcher Ereignisse. Folgt z. B. auf eine aufsteigende Flanke wieder eine aufsteigende, bevor eine abfallende Flanke detektiert wird, dann wird diese vom MTDC als zusätzliche aufsteigende Flanke gezählt. Nach dem gleichen Prinzip werden zusätzliche abfallende und fehlende abfallende Flanken gezählt.

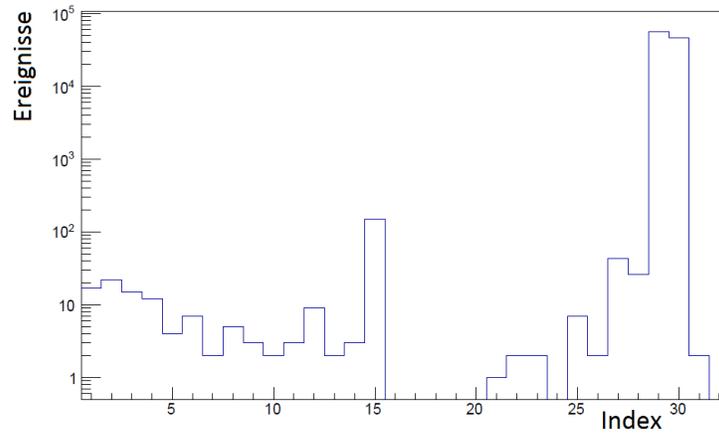


Abb. 22: Anzahl der zusätzlichen abfallenden Flanken für die verschiedenen Software-Indizes mit logarithmischer Skalierung der Ordinate

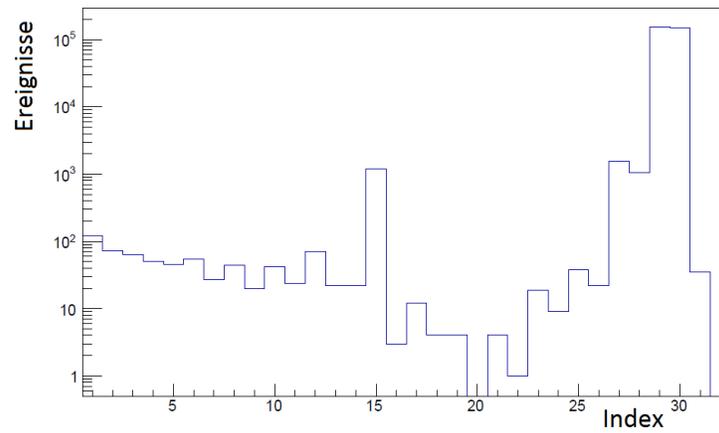


Abb. 23: Anzahl der zusätzlichen aufsteigenden Flanken für die verschiedenen Software-Indizes mit logarithmischer Skalierung der Ordinate

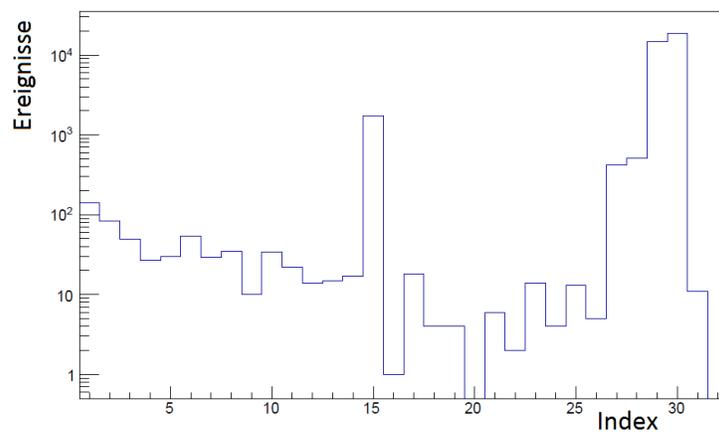


Abb. 24: Anzahl der fehlenden abfallenden Flanken für die verschiedenen Software-Indizes mit logarithmischer Skalierung der Ordinate

Es fällt auf, dass hier umfangreiche Daten aufgezeichnet werden, besonders für *Strip 2*. Die Dominanz der Anzahl der Ereignisse für diesen *Strip* im Vergleich zu den anderen rührt daher, dass für diesen *Strip* mehr Ereignisse detektiert wurden als für die anderen (siehe Abb. 18). Folglich gibt es für diesen auch mehr aufsteigende bzw. abfallende Flanken. Eigentlich ist zu erwarten, dass es kaum fehlende oder zusätzliche aufsteigende bzw. abfallende Flanken gibt, und dass die Anzahl dieser Ereignisse auf alle Indizes mehr oder weniger gleich verteilt ist. Die große Anzahl solcher Flanken lässt jedoch darauf schließen, dass die Signale nicht richtig detektiert werden. Beachtet man die Argumentation zu Abb. 19, dann scheint dies verständlich. Denn wenn der MTDC aufgrund seiner Totzeit nur eine von zwei Flanken detektieren kann, dann gibt es viele nicht gepaarte Flanken, die dann in einer der Abbildungen 22 bis 24 erscheinen. So könnten auch die kleineren Peaks aus Abb. 19 für höhere ToTs erklärt werden, denn sollte die ToT sich aus einer aufsteigenden Flanke und einer „falschen“ abfallenden Flanke zusammensetzen, kommt es zu einer Vergrößerung der ToT und damit zu einem verschobenen Peak.

Um den ersten Peak korrekt zu erfassen, könnten die Diskriminatorschwellen der NINOs (die noch nicht besonders sorgfältig eingestellt sind) geringer gestellt werden. So würde insgesamt die ToT steigen. Damit würde allerdings das Rauschen stärker werden. Eine andere Möglichkeit ist, ein MTDC mit einer geringeren Totzeit zu verwenden. Beide Änderungen bedürfen aber einem größeren zeitlichen bzw. finanziellen Aufwand. Außerdem ist das Flachbandkabel für die Signalübertragung nicht in der Lage, Signale mit einer Länge unter einer Nanosekunde zu transportieren.

7.4 Probleme des Detektors

Der Detektor zeigte bis gegen Ende der Testphase mit Strahl keine Auffälligkeiten. Am 18.06. um 08:18 Uhr kam es allerdings zum *Tripping* des Detektors durch eine zu hohe Stromstärke. Die Diagramme für den Verlauf von Spannung und Stromstärke sind für das Ende der Testphase in den Abbildungen 25 und 26 dargestellt.

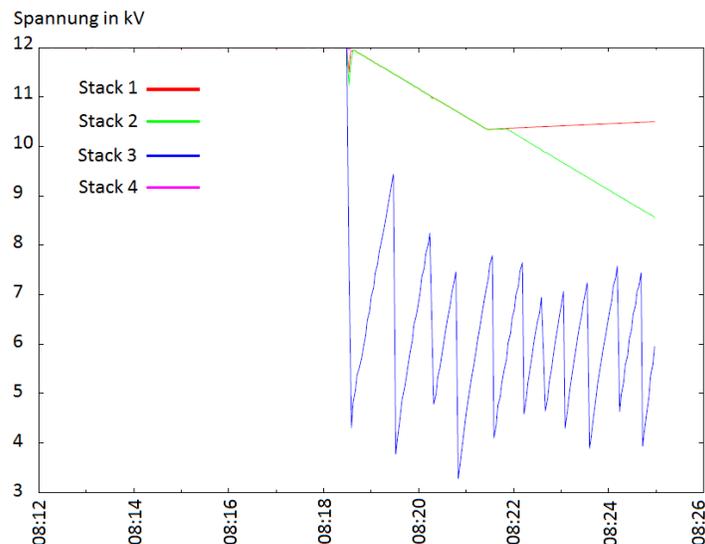


Abb. 25: Verhalten der Spannung zu verschiedenen Zeiten am Ende der Testphase mit sichtbarem *Tripping*

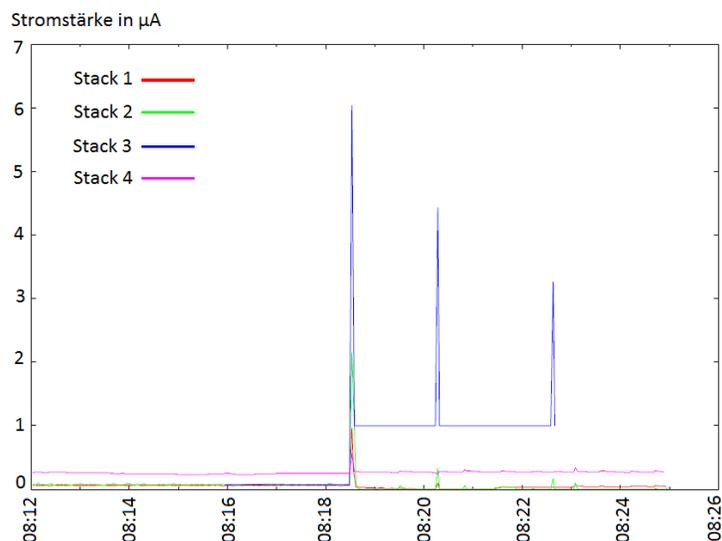


Abb. 26: Verhalten der Stromstärke zu verschiedenen Zeiten am Ende der Testphase mit sichtbarem Tripping

Es ist zu erkennen, dass sich Spannung und Stromstärke des Detektors bis etwa 08:18 Uhr normal verhalten. Die Spannungen der vier *Stacks* liegen alle bei 12 kV und die Stromstärke deutlich unter 1 μA . Die Stromstärke von *Stack 4* liegt zwar etwas über den der anderen, jedoch immer noch deutlich unter der *Tripping*-Grenze von 1 μA . Zum Zeitpunkt des *Trippings* steigt die Stromstärke in *Stack 3* dann drastisch an und die Spannung fällt dementsprechend ab. Die Stromstärke in den *Stacks 1* und *2* steigt auch über die *Tripping*-Grenze an, jedoch nicht so stark wie die in *Stack 3*. Die Stromstärke im vierten *Stack* steigt zwar auch an, jedoch nicht über die Grenze. So sinkt die Spannung von *Stack 4* zwar kurzzeitig, stellt sich dann aber wieder auf 12 kV ein. Die Spannung an den *Stacks* mit *Tripping* sinkt hingegen aufgrund des *Rampdowns* (vgl. Kap. 7.2.2). Die Spannungen von *Stack 1* und *2* sinken kontinuierlich mit der *Rampdown*-Geschwindigkeit von 10 V/s, da die Hochspannungseinstellungen an diesen nicht mehr auf ON geändert wurde. Bei *Stack 3* hingegen wurde die Hochspannung wieder erhöht, um möglichst schnell wieder eine nahezu gleiche Spannung an allen *Stacks* zu erhalten und den Detektor nicht zu gefährden. Allerdings stellte sich heraus, dass (wie in Abb. 25 und 26 zu sehen) die Stromstärke von *Stack 3* nicht mehr unter die *Tripping*-Grenze gelangte, die Spannung sich also nicht mehr stabilisieren ließ. Nach mehrmaligem vergeblichen Versuch, den Detektor wieder zu stabilisieren, wurde für alle *Stacks* der *Rampdown* eingeleitet, um weitere Schäden am Detektor zu vermeiden.

Nach ein paar Stunden wurde versucht, die Spannungen an allen *Stacks* simultan wieder langsam auf die Arbeitsspannung von 12 kV zu erhöhen, es stellte sich jedoch heraus, dass es bereits bei etwa 8 kV wieder zu einem *Tripping* kommt. Der Detektor wurde langsam abgestellt, um ihn später zu untersuchen.

7.5 Problemanalyse

Um zu untersuchen, wo das Problem des Detektors liegt, wurde nach Beendigung der Strahlzeit dessen Außenabdeckung (die als Schutz gegen mechanische Einflüsse fungiert) abgenommen und eine Kamera so installiert, dass man mit dieser von der Seite die Struktur der *Stacks* sehen konnte. Dann wurde langsam wieder die Hochspannung erhöht. Ab einer Spannung von etwa 8 kV zeigt das CAEN-Modul ein *Tripping* an und es war in diesem Moment ein leises Knacken im Detektor zu hören, was auf eine Blitz-Entladung schließen lässt. Bei näherer Betrachtung der Kamera-Aufzeichnungen war zu sehen, dass zum Zeitpunkt des *Trippings* ein Funke bzw. ein Blitz am Rand eines *Stacks* entsteht. Da die Auflösung der Kamera allerdings nicht hinreichend gut war, um den Blitz genau zu lokalisieren, konnte nicht festgestellt werden, in welchem *Gap* der Blitz entsteht.

Um festzustellen, wo genau das Problem des Detektors liegt, wurde er ausgebaut und ein Impedanztest durchgeführt. Dabei wurden die Widerstände aller NINO-Anschlüsse kontrolliert, um festzustellen, ob es sich bei dem Problem um einen defekten Widerstand handelt. Allerdings konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Das Problem muss also einen anderen Ursprung haben.

Sollte die Gasmischung an einer Stelle des Detektors nicht ideal sein, ist es möglich, dass dort bevorzugt Blitze entstehen. Außerdem könnte bei zu geringem Gasfluss das ionisierte Gas zu lange an einer Stelle „stehen“, wodurch der Widerstand im *Gap* sinken und auch hier die Wahrscheinlichkeit für eine Blitz-Entladung steigen würde. Ein solcher mangelhafter Gasfluss ist bei der Verwendung von Angelschnüren eher möglich als bei der Verwendung von Holmen (vgl. auch Kapitel 6). Allerdings wurde der Detektor zwischen den Tests zur Problemanalyse bewegt, sodass die Verteilung des Gases sich verändert hat. Dass die Blitze dennoch an der selben Stellen entstehen wie zuvor, lässt darauf schließen, dass das Problem nicht die Gasmischung und damit auch nicht die Verwendung der Angelschnüre ist. Zur weiteren Untersuchung wurde der Detektor wieder nach Italien transportiert.[12]

8 Zweiter Detektor

Um in einer zweiten Strahlzeit im Juli brauchbare Daten zu erhalten, wurde in Rom ein zweiter Prototypdetektor gebaut. Da die Ursache für die Fehlfunktion der ersten MRPC nicht bekannt ist, unterscheidet sich dieser nur in zwei Punkten vom ersten Detektor: Zum einen wurde eine andere ohmsche Farbe verwendet, um Probleme mit der Spannungsversorgung zu vermeiden, zum anderen wurde die Erdung des Detektors verändert. Beim zweiten Detektor wurde die Graphit33-Beschichtung durch LICRON[®] ersetzt. Dieses besitzt einen etwa zehn mal größeren Widerstand [14], um mögliche Blitzentladungen zu vermeiden. Das Material für den Rahmen wurde von FR-4 zu LEXAN[®] geändert.

Der zweite Prototyp war vom 20. bis zum 22.07. erstmalig in Betrieb. Die Installation und die Inbetriebnahme erfolgte analog zu der des ersten Detektors, allerdings mit etwas weniger Geduld, da der Zeitraum für den Einbau sehr knapp und kurz vor der nächsten Strahlzeit lag.

8.1 Verhalten und Probleme des zweiten Detektors

Nach dem Einbau des zweiten Prototypdetektors wurde die Hochspannung zunächst stufenweise bis 8 kV erhöht (siehe Abb. 27 und 28). Ein *Tripping* tritt auf, wenn die Stromstärke eines *Stacks* länger als eine Sekunde über $1 \mu\text{A}$ liegt.

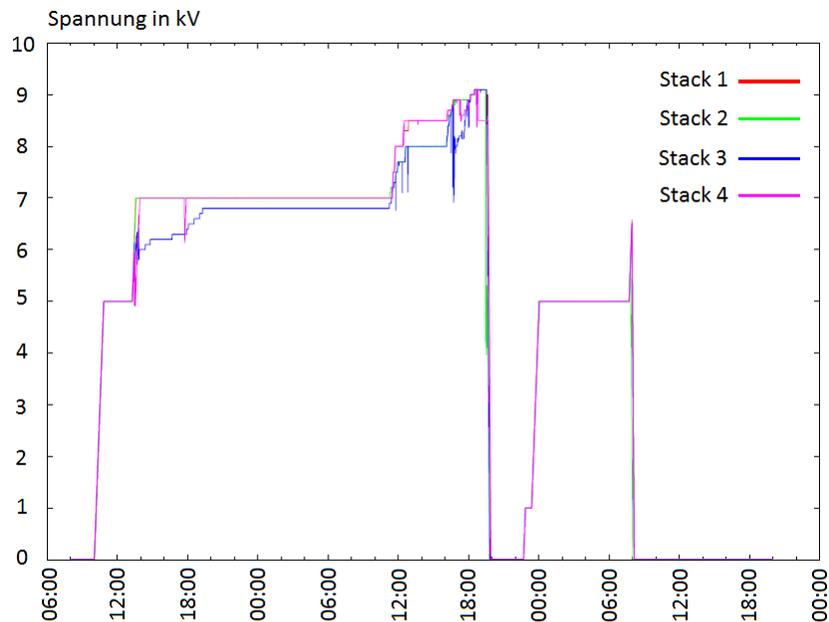


Abb. 27: Verhalten der Spannung zu verschiedenen Zeiten für den zweiten MRPC-Prototypdetektor mit sichtbarem Tripping

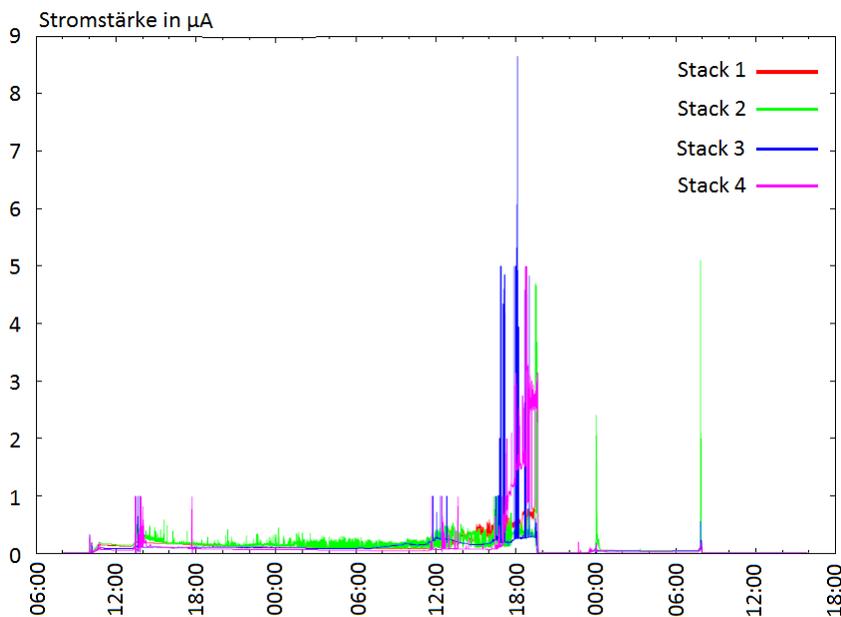


Abb. 28: Verhalten der Stromstärke zu verschiedenen Zeiten für den zweiten MRPC-Prototypdetektor mit sichtbarem Tripping

Während der Erhöhung der Hochspannung kam es stellenweise immer wieder zum *Tripping* in *Stack* 3 und 4. Diese waren aber nur einmalige *Trippings*, denn nach erneutem Einstellen des Hochspannungsmoduls auf ON stabilisierten sich Stromstärke und Spannung wieder und der Detektor konnte weiter aufgeladen werden. Ab ca. 16:00 Uhr kam es dann aber im Spannungsintervall zwischen etwa 8 kV und 9.5 kV zu mehrfachem *Tripping* mit relativ hohen Stromstärken von 5 μ A und einmal sogar fast 9 μ A. Bei 9.5 kV kam es dann auch in *Stack* 2 zum *Tripping*. Da sich der Detektor nicht mehr stabilisieren ließ, keine Verbesserung abzusehen war und die Stromstärken zusehends höher wurden, wurde der Detektor langsam abgestellt. Die hohe Anzahl von *Trippings* könnte an dieser Stelle noch durch Unreinheiten oder nicht ganz optimale Verteilung des Gases bedingt sein, was nicht ganz untypisch für die erste Inbetriebnahme eines neuen Detektors ist.

Um etwa 22:30 Uhr wurde der Detektor erneut eingeschaltet [14]. Diesmal wurden die Rahmenbedingungen für ein *Tripping* geändert, um ein effektives Aufladen des Detektors zu ermöglichen. Ein *Tripping* tritt nun erst auf, wenn sich die Stromstärke länger als zehn Sekunden über 3 μ A befindet. Der Verlauf von Spannung und Stromstärke ist in den Abbildungen 27 und 28 dargestellt.

Beim erneuten Erhöhen der Hochspannung verhielt sich die Stromstärke wieder wie gewohnt deutlich unter 1 μ A. Etwa um Mitternacht kam es beim Erreichen von etwa 5 kV in *Stack* 2 zu einer relativ hohen Stromstärke, jedoch nicht zum *Tripping*, da sie dennoch unter der erhöhten Grenze von 3 μ A lag. Die Hochspannung wurde daraufhin über Nacht nicht mehr verändert. Am Morgen wurde sie weiter erhöht, bis es bei etwa 7 kV erneut zum *Tripping* von *Stack* 2 mit höherer Stromstärke als zuvor kam. Da dies ein recht hoher Wert über einen relativ langen Zeitraum ist, wurde der Detektor daraufhin endgültig langsam abgestellt, um größere Schäden zu vermeiden. Hier wird (wie beim ersten Detektor) eine Problemanalyse in Italien folgen.

8.2 Problemanalyse

Der zweite Detektor wurde unverzüglich nach dem Test und Ausbau nach Italien transportiert. Somit waren keine weiteren Tests in Bonn möglich. Es gibt aber zwei Vermutungen, was die Ursache für die vielen *Trippings* sein könnte:

Zum einen ist es möglich, dass die Glasplatten des Detektors nicht vollkommen rein von Staub sind. Der Grund dafür ist, dass die Platten (anders als beim ersten Prototyp) nur trocken durch „Abwischen“ gereinigt wurden und nicht mit Säure, wie es bei der Endversion für die MRPC der Fall sein wird. Sollte das der Fall sein, dann würde sich der Staub im *Gap* elektrostatisch aufladen und die Feldstärke des *Gaps* an dieser Stelle erhöhen. Der Widerstand an dieser Stelle sinkt dann, sodass es leichter zu einem *Tripping* kommen kann. Bei einer Breite von nur 160 μ m hat selbst Staub einen solch großen Einfluss. Im Idealfall würde eine Blitzentladung an solch einer Stelle dafür sorgen, dass der Staub sich vom Glas löst und vom Gas aus dem Detektor transportiert wird. Dazu ist aber ein hinreichend großer Gasfluss nötig. Ist dieser zu gering, werden die Platten mit der Zeit beschädigt.[14]

Hier ist nicht klar, ob der Gasfluss ausreicht, um einen solchen Effekt zu vermeiden.

Zum anderen könnte die Konstruktion des Detektors einen Fehler verursachen: Anders als es bei der Konstruktion des endgültigen Detektors sein wird, wurden die Angelschnüre bei diesem Prototyp nicht maschinell verklebt. Stattdessen wurde der Kleber mit einer Spritze

manuell jeweils zwischen Platte und Angelschnur platziert (siehe Abb. 29).[14]

Da beim Auftragen des Klebers aufgrund der relativ großen Öffnung der Spritze eine entsprechend große Menge Klebstoff austritt, konnte ein Teil des Klebers entlang der Angelschnur in das *Gap* fließen. Dies war allerdings erst zu beobachten, nachdem der Kleber platziert war. [14] Aus diesem Grund befindet sich eine geringe Menge Klebstoff als Störkörper im *Gap*, wodurch an dieser Stelle (wie auch beim Staub) bevorzugt Blitzentladungen entstehen können. Wo und wie viel Kleber sich in einem *Gap* befindet, wird in Italien unter einem Mikroskop untersucht werden.

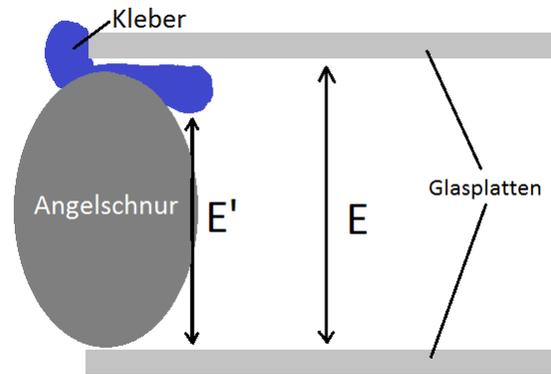


Abb. 29: Schematische Darstellung der Problementstehung beim Verkleben von Platte und Angelschnur. Es ergibt sich an dieser Stelle eine verringerte Feldstärke E' [14]

Insgesamt ist es also gut möglich, dass die Probleme durch eine sorgfältigere Konstruktion des Detektors verringert werden können oder sogar verschwinden.

Bislang konnte weder für den ersten noch für den zweiten MRPC-Prototypdetektor festgestellt werden, was die Ursache für die Probleme ist. Es folgen weitere Untersuchungen in Italien.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit war es möglich, die wichtigsten Informationen über die MRPC zusammenzutragen und einheitlich zu dokumentieren. Es konnte ein Einblick in die Konstruktion, die Funktionsweise, die Installation und die Inbetriebnahme der MRPC im BGO-OD Experiment gegeben werden. Die Inbetriebnahme und der Betrieb des Detektors gestalteten sich problematisch, da es im Detektor immer wieder zu Blitzentladungen kam. Diese Probleme konnten nicht behoben werden und es ließ sich auch nicht feststellen, wo genau die Ursache der Probleme liegt. Ein zweiter, nachträglich nahezu identisch konstruierter, MRPC-Detektor zeigte sehr ähnliche Probleme.

Eine Aussage über charakteristische Eigenschaften, wie Effizienz und Zeitauflösung des Detektors, konnte nur im Rahmen einer Abschätzung der Erwartungen aufgrund von früheren Messungen getroffen werden. Die Gründe dafür sind zum einen die Probleme der beiden Detektoren und zum anderen die bereits erläuterten Probleme bei der Datennahme. Dennoch konnten einige Darstellungen der unkorrelierten Daten diskutiert und erklärt werden. Hier deutet sich bereits an, dass es außer den Problemen mit dem Detektor noch weitere Probleme, wie z. B. einer zu großen Totzeit des verwendeten MTDC-Moduls, geben könnte. Es ist sinnvoll, zunächst einen funktionierenden Detektor mit einer erfolgreichen Datennahme zu testen, bevor darüber weitere Aussagen gemacht werden können. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, die Ursache für die Probleme des Detektors zu finden. Hier wurden bereits einige Überlegungen zu möglichen Ursachen für die Blitzentladungen ausgeführt, nähere Untersuchungen werden aber in Italien stattfinden. Erst dann kann mit den gewonnenen Erkenntnissen ein neuer Prototypdetektor konstruiert werden.

In dieser Arbeit wird deutlich, dass die Umsetzung eines theoretischen Gedankens, so gut und praktisch er auch sein mag, meist schwieriger und problematischer ist, als es erhofft und erwartet wird. So zeigt sich hier, dass sich die Inbetriebnahme des MRPC-Detektors, der einem relativ „einfachen“ Funktionsprinzip gehorcht, aufgrund seines sensiblen Aufbaus meist recht kompliziert gestaltet. Wegen der großen Empfindlichkeit des Detektors können selbst kleine Störfaktoren, wie zum Beispiel Staub im Detektor, zu ungewollten Blitzentladungen führen, die dann die Arbeit erschweren. Auch wenn MRPCs schon oft in anderen Experimenten, wie beispielsweise bei ALICE, erfolgreich betrieben wurden, ist es dennoch immer wieder eine Herausforderung, einen solch delikaten Detektor zu verwenden.

Literatur

- [1] Crispin Williams: „What is new in the world of the Multigap Resistive Chambers?“, Präsentation am Centro Fermi - Extreme Energy Events Symposium am 11.12.2009
- [2] Crispin Williams: „Latest advances in MRPC's for Fast Timing“, Präsentation am Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna
- [3] Crispin Williams: „Status report of the ALICE TOF“, Präsentation
- [4] BGO-OD Collaboration: „The BGO-OD Experiment at ELSA“, veröffentlicht am 14.01.2014 vom International Journal of Modern Physics, Conference Series Vol. 26 (2014)
- [5] Abschnitt zum experimentellen Aufbau auf der offiziellen Webseite des BGO-OD Experiments: www.bgo-od.physik.uni-bonn.de, Stand: 27.08.2014
- [6] Dario Moricciani: „Joint Research Activity KLOE-2(Gr.1) - Mambo(Gr.3)“, Präsentation für das BGO-OD meeting in Frascati am 26.10.2010
- [7] Joseph Mancell & I. J. Douglas MacGregor (for the Mainz A2 Collaboration): „Eta Photo-production on the Proton“, Proceeding zur Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics, veröffentlicht von Journal of Physics: Conference Series **381** (2012) 012024
- [8] Prof. Hartmut Schmieden: „BGO-OD @ ELSA: status and first results“, Präsentation Menu 2013 in Rom, Italien
- [9] Volker Metag: „Search for η' mesic states with BGO-OD@ELSA“, Präsentation zum Mini-Workshop in Tokyo, Japan am 29.10.2013
- [10] E. Oset und A. Ramos, PLB 704 (2011) 334
- [11] Paolo Levi Sandri: „status of MRPC“, Präsentation zum BGO-OD meeting am 15.09.2011
- [12] Informationen, die im Gespräch mit Francesco Messi (Universität Bonn, Physikalisches Institut) erlangt wurden
- [13] Francesco Messi (Universität Bonn, Physikalisches Institut): „MRPC: first in-beam tests“, Präsentation vom 14.03.2014 in Bonn
- [14] Informationen, die im Gespräch mit Prof. Roberto Messi (Universià di Roma „Tor Vergata“ & Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma „Tor Vergata“) erlangt wurden
- [15] Auszug aus einer Vorlesung zu Detektoren von Franziska Schneyder, Physikalisches Institut Universität Heidelberg, SS2009
- [16] C. Schmidt, A. Suele, J. Hartmann, U. Thoma et al.
- [17] Letter of Intent: „Multi-gap Resistive Plate Chambers: Time-of-Flight system of the PHENIX high- p_T Detector“, Juli 2004, von J. Velkovska, T.Chujo, V.Greene, C. Maguire, H. Valle, D. Mukhopadhyay, D. Pal, I.Ojha, M. Velkovsky, M. Holmes, M. Mendenhall, J. Wallace

- [18] „The MRPC detector for the ALICE Time Of Flight System: Final Design and Performances“, Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, Volume 158, August 2006, Pages 60-65
A. Akindinov, S. Alessandrini, A. Alici, P. Antonioli, S. Arcelli, M. Basile, G. Cara Romeo, D. Cavazza, L. Cifarelli, F. Cindolo, I. D’Antone, A. De Caro, S. De Pasquale, A. Di Bartolomeo, M. Furini, M. Fusco Girard, V. Golovin, Yu. Grishuk, M. Guerzoni, M. Guida, D. Hatzifotiadou, et al.
- [19] „NINO: an ultra-fast and low-power front-end amplifier/discriminator ASIC designed for the multigap resistive plate chamber“, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 533 (2004) 183-187
F. Anghinolfi, P. Jarron, A.N. Martemyanov, E. Usenko, H. Wenninger, M.C.S. Williams, A. Zichichi
- [20] Desy Malatesta: „Caratterizzazione di un rivelatore a gas per esperimenti di fisica nucleare“, Diplomarbeit 2011/2012 an der Universität Rom Tor Vergata, “Facoltà di Scienze MM.FF.NN.“, betreut von Prof. Roberto Messi
- [21] Desy Malatesta: „Caratterizzazione di un rivelatore a gas per esperimenti di fisica nucleare“, Präsentation zur Diplomarbeit 2011/2012

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn, den _____

Datum

Unterschrift