

**Erstinbetriebnahme der
Viendrahtproportionalkammer des
BGO-OD-Experiments**

Barbara Leibrock

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

September 2014

1. Gutachter: Prof. Dr. Hartmut Schmieden
2. Gutachter: Dr. Michael Lang

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das BGO-OD-Experiment	3
2.1	Elektronen-Stretcher-Anlage	3
2.2	BGO-OD-Versuchsaufbau	3
3	Vieldrahtproportionalkammer	7
3.1	Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise einer MWPC	7
3.2	MWPC im BGO-OD-Experiment	9
3.3	Nutzen der MWPC	12
4	Temperatur- und Spannungsüberwachung	17
4.1	Schaltplan	17
4.2	Design	19
4.3	Bestücken	19
5	Status des Detektors bei Fertigstellung der Bachelorarbeit	20
6	Fazit	22
A	Weitergehende Informationen	23
A.1	Code für Effizienzsimulation	23
A.2	Pläne der Platine	24
	Literatur	33
	Abbildungsverzeichnis	35
	Tabellenverzeichnis	37

Einleitung

In der Grundlagenforschung der Teilchenphysik wurde es im Laufe der letzten Jahrzehnte möglich, mit Hilfe großer Energien innere Strukturen von Teilchen bis hin zu punktförmigen Teilchen aufzulösen. Zur Erforschung der Eigenschaften und Wechselwirkungen von Hadronen, Leptonen und weiterer möglicherweise noch unbekannter Elementarteilchen werden große Beschleunigeranlagen mit aufwändigen Detektoraufbauten benutzt. An vielen finden Experimente zur Überprüfung des Standardmodells der Teilchenphysik und der **Quantenchromodynamik (QCD)** statt.

Das Standardmodell liefert eine einheitliche Erklärung der elementaren Quarks und Leptonen, kann die elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung durch Eichbosonen und die Massen der Elementarteilchen durch das Higgs-Feld erklären. Weiterhin werden die Vorgänge der starken Wechselwirkung zwischen Quarks speziell in der QCD erfasst, die somit auch die Grundlage zur Erforschung der Nukleonen bietet. In diesem Zusammenhang ist besonders die Frage nach der inneren Struktur der Protonen und Neutronen noch nicht geklärt, da die addierten Massen der Valenzquarks nur ein Prozent der gemessenen Massen der Nukleonen ausmachen. Zur genaueren Erforschung der inneren Struktur werden Experimente mit angeregten Baryonresonanzen und Mesonen durchgeführt. Die Untersuchung der Erzeugung und Funktion stark wechselwirkender Teilchen ist im Zuge des DFG-geförderten Sonderforschungsbereichs *SFB 16 - Elektromagnetische Anregung subnuklearer Systeme* [1] auch das Ziel des *BGO-OD*-Experiments.

Das *BGO-OD*-Experiment am Teilchenbeschleuniger *ELSA* der Universität Bonn untersucht Meson-Baryon-Wechselwirkungen und die wechselwirkenden Kräfte zwischen Quarks. Es sollen vor allem neue Daten für die Photoproduktion von Mesonen und die Erzeugung seltsamer Teilchen, engl. *strange particles*, genommen werden. Dazu ist der *BGO-OD*-Aufbau dadurch geeignet, dass er zusätzlich zu einem elektromagnetischen Kalorimeter noch mit einem Vorwärtsspektrometer ausgestattet ist.

Der experimentelle Aufbau ist allerdings noch nicht abgeschlossen und es fehlen insbesondere noch zwei wichtige Detektoren. Bei der *Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC)*, die eine Akzeptanzlücke in Vorwärtsrichtung schließen soll, bestehen noch konstruktionsbedingte Probleme, so dass der erste Prototyp wieder ausgebaut wurde. Der Spurdetektor innerhalb des *BGO*-Balls dagegen, der die Flugbahnrekonstruktion geladener Teilchen und die Detektion von Sekundärvertizes ermöglicht, wurde

im Zeitrahmen dieser Bachelorarbeit eingebaut und getestet. Es handelt sich um zwei Vieldrahtproportionalkammern, engl. *Multiwire Proportional Chamber* (MWPC), die dem Detektor auch seinen Namen verleihen. Neben einiger Probleme beim Einbauen der MWPC in das Experiment stellte auch die Überwachung der Vorverstärkerkarten der MWPC einige Schwierigkeiten dar. Diese wurden durch eine im Rahmen dieser Bachelorarbeit erstellte elektronische Platine gelöst.

In der vorliegenden Bachelorarbeit werden das Gesamtexperiment, die Funktionsweise einer MWPC im Allgemeinen, sowie die Besonderheiten und der Nutzen des am *BGO-OD*-Experiment verwendeten Detektors vorgestellt und beschrieben. Der Produktionsprozess der Kontrollplatine wird dargestellt. Die Möglichkeit der baldigen, vollständigen Inbetriebnahme wird diskutiert.

Das BGO-OD-Experiment

Das *BGO-OD*-Experiment ist wie bereits in der Einleitung erwähnt nicht der einzige experimentelle Aufbau zur Erforschung der Nukleonenstruktur. So wurde beispielsweise auch in Grenoble am *Grenoble Anneau Accelerateur Laser* (GrAAL) bis 2008, sowie noch gegenwärtig in Mainz am *Mainzer Mikrotron* (MAMI) und in Harima, Japan, am *Laser Electron Photon Experiment at SPring-8* (LEPS) daran geforscht. Das *BGO-OD*-Experiment hat diesen gegenüber den Vorteil, dass es sowohl aus einem elektromagnetischen Kalorimeter als auch einem Vorwärtsspektrometer besteht und somit fast den gesamten Raumwinkel mit Detektoren abdeckt. Das *BGO-OD*-Experiment ist am Beschleuniger ELSA in Bonn angesiedelt. Die Beschleunigeranlage wird zunächst kurz vorgestellt.

2.1 Elektronen-Stretcher-Anlage

Die Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA) wird von der Universität Bonn betrieben und liefert einen quasikontinuierlichen Elektronenstrahl. In Abbildung 2.1 ist der Grundriss der Anlage zu sehen. Der Beschleuniger ist dreistufig aufgebaut: Zuerst werden die Elektronen in LINAC I (unpolarisiert) oder in LINAC II (sowohl polarisiert wie auch unpolarisiert) vorbeschleunigt. Im Booster-Synchrotron erreichen sie Energien bis zu 1,6 GeV. Damit wird der 164,4 m lange Stretcherring mit einzelnen Pulsen gespeist. Der dort erzeugte quasikontinuierliche Strahl mit variabler Energie von 0,5–3,5 GeV wird zu den zwei Experimentierplätzen der Hadronenexperimente *Crystal Barrel* und *BGO-OD* extrahiert.

2.2 BGO-OD-Versuchsaufbau

Der Gesamtaufbau des *BGO-OD*-Experiments ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Das verwendete Koordinatensystem aller Detektoren orientiert sich an der Strahlrichtung und benennt diese als Z-Achse. Im Folgenden werden die wichtigsten Komponenten näher beschrieben. Der Name *BGO-OD* setzt sich aus den beiden Hauptkomponenten des Aufbaus zusammen. Der erste Namensteil berücksichtigt den als Kalorimeter eingesetzten **BGO**-Ball (3) aus Bismutgermanat mit der chemischen Formel $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$. Die zwei weiteren Buchstaben stehen für das Vorwärtsspektrometer (4, 5, 6 & 7) mit einem **O**pen

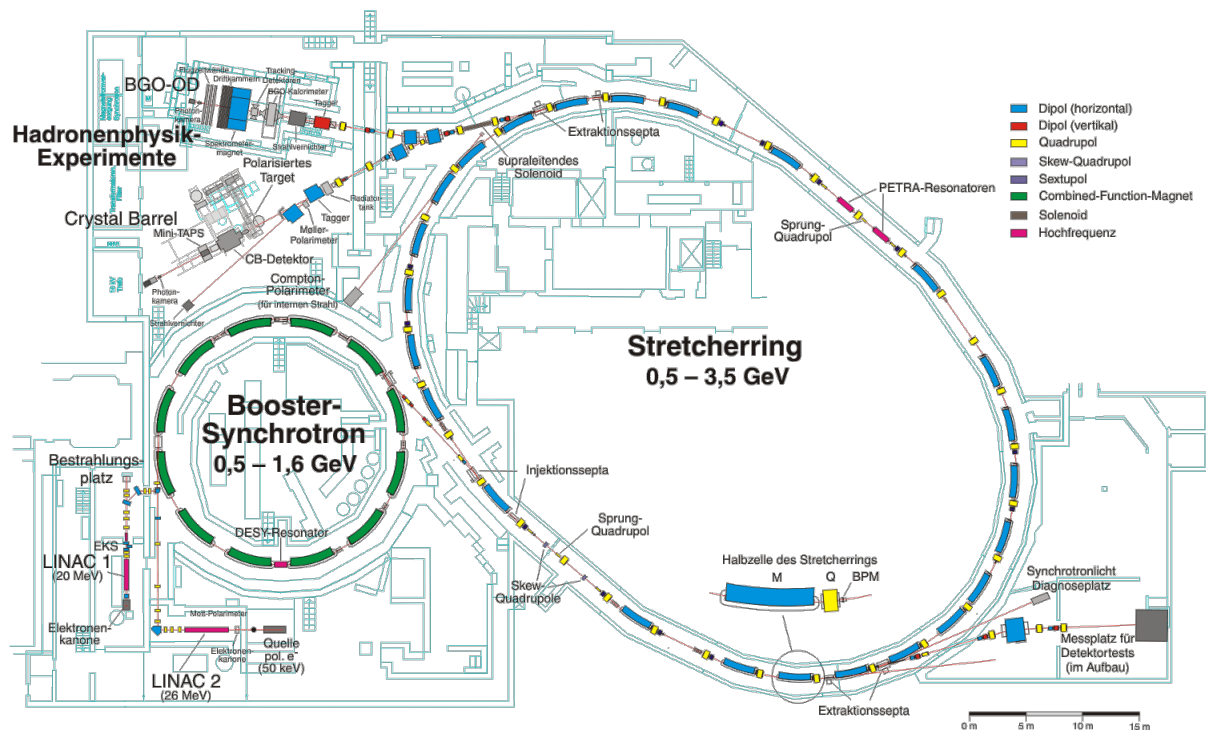


Abbildung 2.1: Grundriss der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA von [2]

Dipole-Magneten. In diesem Versuchsaufbau werden unter anderem angeregte Baryonzustände durch auftreffende Photonen erzeugt, um die Struktur der Nukleonen zu untersuchen. Beim Zerfall dieser angeregten Zustände entstehen meist Mesonen. Da der BGO-Ball die Teilchen detektiert, die mit großem Winkel zentral um den Reaktionspunkt gestreut werden, und das Vorwärtsspektrometer Teilchen mit kleinem Polarwinkel noch nachweisen kann, ist dieses Experiment für den Nachweis der entstandenen Teilchen besonders gut geeignet.

2.2.1 Photonenstrahl

Nach der Extraktion des Elektronenstrahls aus dem Beschleunigerring wird an der Photonenmarkierungsanlage (1), engl. *Tagger*, durch Bremsstrahlung ein Photonenstrahl erzeugt und die Energie der Photonen gemessen. Hierzu werden die Elektronen durch den Taggermagneten abgelenkt, bevor sie in einer dicken Schicht Blei (2) absorbiert werden. Durch ein Szintillator-Hodoskop werden Zweier- und Dreierkoinzidenzen benutzt, um die Flugbahn der Elektronen zu rekonstruieren. Der Radius dieser kreisförmigen Flugbahn ermöglicht, den Impuls des detektierten Elektrons zu bestimmen. Mit dieser Information kann im Weiteren die Energie des Elektrons errechnet werden. Die Differenz der berechneten Energie zur Energie des Elektrons im extrahierten Strahl entspricht der Energie des erzeugten Photons. Es wird die Koinzidenz zwischen *Tagger* und nachfolgendem Detektor gefordert. Dadurch wird ermöglicht, dass bei einer detektierten Reaktion die Ursprungsenergie bekannt ist und Rückschlüsse auf die Masse nicht-detektierter Teilchen gezogen werden können.

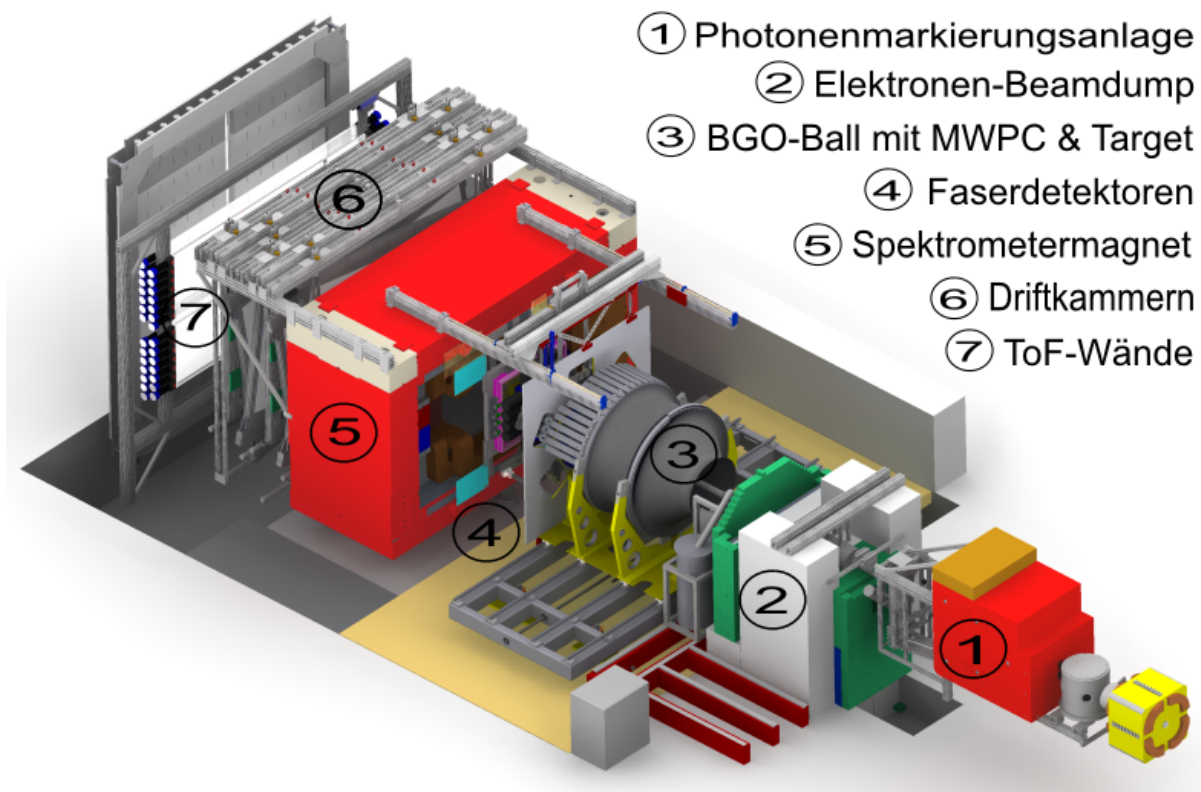


Abbildung 2.2: Aufbau des BGO-OD-Experiments

2.2.2 BGO-Ball

Der erzeugte Photonenstrahl trifft innerhalb des BGO-Balls (3) auf ein 6 cm langes zylinderförmiges Target mit einem Durchmesser von 4 cm. Das Target wird entweder mit flüssigem Wasserstoff (Arbeitstemperatur 17 K) oder flüssigem Deuterium (Arbeitstemperatur 22 K) gefüllt. Die auftreffenden Photonen reagieren mit den Nukleonen und bilden neue Teilchenkombinationen. Die entstandenen Teilchen werden in der MWPC, in Plastikszintillatoren und im BGO-Ball detektiert. Aus den aufgezeichneten Daten kann auf die Teilchenbahnen und die Teilchenart geschlossen werden.

Die MWPC wird zur Detektion geladener Teilchen genutzt. Der hier verwendete Aufbau besteht aus einer inneren und einer äußeren zylinderförmigen Kammer. Jede Kammer besteht aus drei Ebenen, die zusammen über elektronische Signale einen Punkt auf der Flugkurve des Teilchens liefern. Durch die zwei Kammern ergeben sich somit zwei Punkte, durch die eine Gerade gezogen werden kann. Dadurch können genauere Aussagen über die Reaktionsposition im Target gemacht werden, als dies mit nur einem detektierten Punkt im BGO-Ball der Fall ist.

Der Hohlraumzylinder aus Plastikszintillatoren, engl. *plastic scintillator barrel*, dient als Detektor zur Teilchenidentifikation. Jedes Teilchen deponiert unterschiedlich viel Energie pro Wegstrecke in einem Material. Dieser Wert (dE/dx) wird bestimmt und zur Identifikation genutzt.

Der BGO-Ball besteht aus 480 Bismutgermanatkristallen von 24 cm Länge. An jeden Kristall sind ein Photomultiplier und ein Dämpfer angeschlossen. Letzterer kann je nach auftreffender Energie unterschiedlich eingestellt werden und wird dafür eingesetzt, das Signal so anzupassen, dass es in der Elek-

tronik verarbeitet werden kann. Angeordnet sind die Kristalle in 15 polaren Ringen über den Winkelbereich von 25° – 155° zur Strahlachse. Diese Ringe sind jeweils weiterhin in 32 azimutale Sektionen von 0° – 360° unterteilt. Die Kristalle sind gut zur Detektion von Photonen geeignet, da diese elektromagnetische Schauer bilden und ihre Energie dadurch in den Kristallen deponieren.

2.2.3 Vorwärtsspektrometer

Das Vorwärtsspektrometer besteht aus zwei Szintillationsfaserdetektoren (4), einem großen, in der Mitte offenen Magneten (5), acht Driftkammern (6) und vier Flugzeitspektrometern (7), engl. *Time of Flight spectrometer* (TOF). Es soll ermöglichen, auch Teilchen mit kleinem Polarwinkel, die durch den BGO-Ball nicht mehr detektierbar sind, noch nachzuweisen.

Die Szintillationsfaserdetektoren *Monitor of Mesonic Observables* (MOMO) und *Scintillating Fibres* (SciFi) werden vor dem Magneten eingesetzt, um bereits dort die Flugbahn der Teilchen und einen Ausgangspunkt für die Krümmung durch den Magneten rekonstruieren zu können.

Der Magnet hat die Maße (H x B x T) $\approx (2800 \times 3900 \times 1500) \text{ mm}^3$ und wiegt 90 t. In der Mitte ist er durchteilt und besitzt somit einen variablen vertikalen Abstand von momentan 840 mm. Abhängig von ihrem Impuls werden die geladenen Teilchen durch das Magnetfeld auf gekrümmte Bahnen abgelenkt und können von den folgenden Detektoren nachgewiesen werden.

Die Driftkammern bestehen jeweils aus einer doppelten Lage von hexagonalen Driftzellen. Diese werden mit einem Gasgemisch von 70 % Argon und 30 % Kohlenstoffdioxid bei 0,5 l/min Flussgeschwindigkeit gefüllt. Die acht Driftkammern sind mit jeweils zwei Kammern in vier unterschiedlichen Orientierungen montiert. Vertikale und horizontale Drähte messen die X- und Y-Koordinate. Mögliche Ambiguitäten zwischen diesen Driftkammern bei mehreren Spuren werden durch die vier anderen ausgeschlossen, die jeweils um $\pm 9^\circ$ zur X-Achse geneigt sind.

Das Flugzeitspektrometer kann im Gegensatz zu den Driftkammern wiederum sowohl geladene als auch ungeladene Teilchen detektieren. Es deckt den Polarwinkel von 12° zur Strahlachse in 5 m Entfernung zum Target ab. Der Detektor besteht aus vertikalen und horizontalen Plastikszintillatoren, engl. *plastic scintillators*, an die Photomultiplier angeschlossen werden. Er dient der Identifikation von Teilchen, da sich über die Flugzeit und den Impuls die Masse des detektierten Teilchens berechnen lässt.

Vieldrahtproportionalkammer

Eine Vieldrahtproportionalkammer, engl. *Multiwire Proportional Chamber* (MWPC), wird zur Detektion geladener Teilchen verwendet. Sie dient der Rekonstruktion der Flugbahn und ermöglicht im BGO-OD-Experiment die Bestimmung des Reaktionspunktes innerhalb des Targets. Zuerst werden jedoch einige allgemeinere Informationen gegeben, die aus [4] und [5] entnommen sind.

3.1 Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise einer MWPC

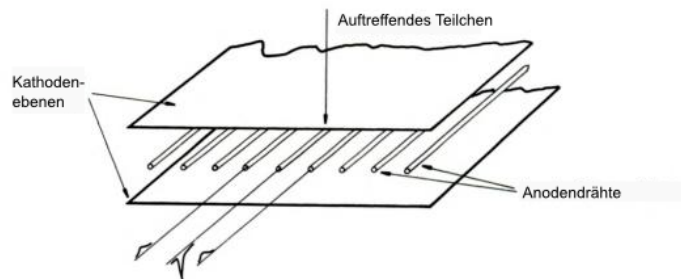


Abbildung 3.1: Schematische Zeichnung des grundlegenden Aufbaus einer MWPC aus [4] mit ins Deutsche übersetzten Bezeichnungen

Der grundlegende Aufbau einer MWPC ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Eine MWPC besteht aus einer Lage äquidistanter Drähte (Anoden) zwischen zwei Kathodenebenen. Im Allgemeinen beträgt der Abstand zwischen den Kathoden etwa 8 mm. Der Zwischenraum ist mit Gas gefüllt. An die Kathoden wird eine negative Spannung angelegt, die zu einem homogenen Feld nahe der Kathodenebenen führt. Die Feldstärke wird um die Anodendrähte herum reziprok vom Radius abhängig. Im gleichmäßigen Feld werden durch ein auftreffendes geladenes Teilchen freie Elektronen und Ionen erzeugt. Sie driften an den Feldlinien entlang zur nächsten Anode bzw. Kathode. Die Elektronen werden im stärkeren Feld um die Anodendrähte herum zur Elektronenlawinenbildung angeregt. Die positiv geladenen Ionen, die in diesem Multiplikationsprozess erzeugt werden, driften zu den Kathodenebenen. Die Ionen legen eine

längere Strecke als die Elektronen, die direkt am Draht erzeugt und dort aufgenommen werden, zurück und influenzieren ein negatives Spiegelladungssignal auf dem Anodendraht. Auf den Nachbardrähten wird ein kleines positives Signal erzeugt. Die Signale auf den Anodendrähten sind in Abbildung 3.1 skizziert. In ähnlicher Weise entsteht ein positives Signal auf den Kathoden.

In der gegebenen Beschreibung wird nur eine eindimensionale Positionsinformation gemessen. Um sowohl X- wie Y-Koordinate zu erhalten, muss in diesem Aufbau mindestens eine zweite Kammer hinzukommen, deren Anodendrähte orthogonal zu denen der ersten Kammer ausgerichtet sind. Eine weitere Möglichkeit stellt die Unterteilung der Kathodenebene in einzelne Streifen dar, so dass die Streifen orthogonal zu den Drähten ausgerichtet sind. Es ergibt sich eine gaußförmige Verteilung des Signals über die Kathodenstreifen. Deren Schwerpunkt bestimmt das Zentrum der auftreffenden Energie. Zur Spur-rekonstruktion werden immer mehrere Kammern benötigt.

Die räumliche Auflösung der MWPC hängt vom Abstand der Anodendrähte ab, der meistens 2 mm beträgt. Dies führt zu einer Auflösung von ≈ 1 mm. Es können mehrere Flugbahnen gleichzeitig detektiert werden.

Der geringe Abstand der Drähte stellt bei der Konstruktion ein mechanisches Problem dar. Die Drähte werden häufig auf glasverstärktem Kunststoff oder Epoxidharz befestigt. An den Enden sind sie auf eine Leiterplatte festgelötet. Normalerweise wird Wolframdraht mit einem Durchmesser von 20–40 μm benutzt. Da die exakte Position der Drähte für die Genauigkeit der Ortsbestimmung entscheidend ist, muss diese sowohl mechanisch wie elektrisch sichergestellt werden. Die auftretende elektrostatische Abstoßung beim Anlegen einer Spannung muss durch die mechanische Spannung ausgeglichen werden, um die Auslenkung der Drähte aus der Anodenebene zu verhindern.

Als Füllgas der MWPC hat sich das folgende, als *Magic gas* bezeichnete, Gasgemisch als besonders sinnvoll herausgestellt. Es besteht laut [4] aus 75 % Argon (Ar), 24,5 % Methan (CH_4) oder einem anderen Alkan, 0,5 % Freon (Bromtrifluormethan CF_3Br) oder Bromethan ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$) und häufig einem sehr geringen Anteil Methylal (Dimethoxymethan $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$). Es erzeugt gesättigte Signale, die zwar keine Aussage über die Energie zulassen, aber eine gute Zeitauflösung bieten. Durch große Signalamplituden wird das Auslesen vereinfacht. Hierbei ist zu beachten, dass die in der Lawine erzeugten ultravioletten Photonen sich radial vom Anodendraht wegbewegen können und dadurch die Lawinenbildung in ein größeres Raumelement tragen. Die Driftstrecken der darin erzeugten Elektronen nehmen zu und tragen somit auch zum Signal bei. Im Folgenden werden die Einzelkomponenten des Gasgemisches genauer betrachtet.

Argon ist ein Edelgas und als solches als Ionisationsgas gut geeignet. Edelgase haben im Gegensatz zu mehratomigen Molekülen keine nicht-ionisierenden Energieniveaus, die das Molekül in ein dissipatives System verwandeln. Krypton und Xenon sind noch besser geeignet, da sie durch Ionisation noch mehr Energie aufnehmen (größere dE/dx -Werte). Sie sind allerdings deutlich teurer als Argon und erzeugen mehr Vielfachstreuung. Da Argon eine sehr geringe Elektronegativität hat, lagert es sich nicht an den Detektoroberflächen ab. Mit reinem Argon kann allerdings nur eine Verstärkung von 10^3 – 10^4 erreicht werden. Angeregte Argonatome emittieren außerdem Photonen mit mindestens 11,6 eV und sind somit in der Lage, die Metalle, aus denen die Kathode besteht, über den Photoeffekt zu ionisieren.

Methan wird als Quenchergas hinzugefügt. Da in einem reinen Edelgas bei der gewünschten Verstärkung viele UV-Photonen erzeugt werden, käme es in der Kammer zu konstanter Entladung. Durch Quenching werden diese Photonen absorbiert. Hierbei ist es im Gegensatz zum Ionisationsgas von Vorteil, dass mehratomige Moleküle durch Vibrations- und Rotationsfreiheitsgrade mehr angeregte Energieniveaus erreichen können. Damit kann Methan emittierte Photonen im Energiebereich von 7,9–14,5 eV

aufnehmen. Es gibt diese zusätzliche Energie durch elastische Stöße und Dissoziation in leichtere Moleküle ab. Damit wird die Beschädigung der MWPC eingedämmt und die Verstärkung auf 10^6 erhöht.

Das Chlorfluorkohlenwasserstoff Freon nimmt bereits mit einem geringen Anteil am Gasgemisch die Elektronen auf, die trotz des hinzugefügten Methans noch durch Photoeffekt aus der Kathode ausgeschlagen werden. Die Elektronen würden sonst ebenso wie die ursprünglich erzeugten Teilchen zu den Anodendrähten driften und dort wiederum Lawinen bilden. Die Verstärkung durch das Gasgemisch kann damit auf 10^7 erhöht werden.

Um zu verhindern, dass sich die rekombinierten Stoffe des organischen Quenchers an Anode oder Kathode festsetzen, wird Methylal in sehr geringer Menge hinzugegeben. Ablagerungen können passieren, wenn die Zerfallsprodukte des Methans wieder rekombinieren und dabei flüssige oder feste Polymere bilden. Wenn sich eine solche Ablagerungsschicht an den Kathoden absetzt, müssen ankommende Ionen durch diese hindurch diffundieren. Wird die Rate groß, können die Ionen nicht mehr ausreichend schnell durch die Schicht diffundieren und die kumulierte positive Ladung führt zu einer konstanten Entladung der Kammer. Sollte dies passieren, muss die Kammer auseinandergelassen und die Elektroden gereinigt werden.

Die Zeitauflösung der MWPC hängt vor allem von der Driftzeit der Elektronen zwischen Eintreffen in der Kammer bis zur Auslösung der Elektronenlawine ab. Da Ionisation in der ganzen Kammer stattfindet, kommen Elektronen über einen längeren Zeitraum an der Anode an. Die ansteigende Flanke ist näherungsweise linear. Dabei sind die ersten ankommenden Elektronen die interessantesten, da es diese sind, die ganz nahe an der Anode mit einem maximalen Abstand von 1 mm erzeugt wurden. Der Fehler der Zeitauflösung beträgt also nicht mehr als die Driftzeit für die halbe Strecke zwischen zwei Drähten. Für den Standardabstand von 2 mm beträgt sie $\approx 25\text{--}30$ ns.

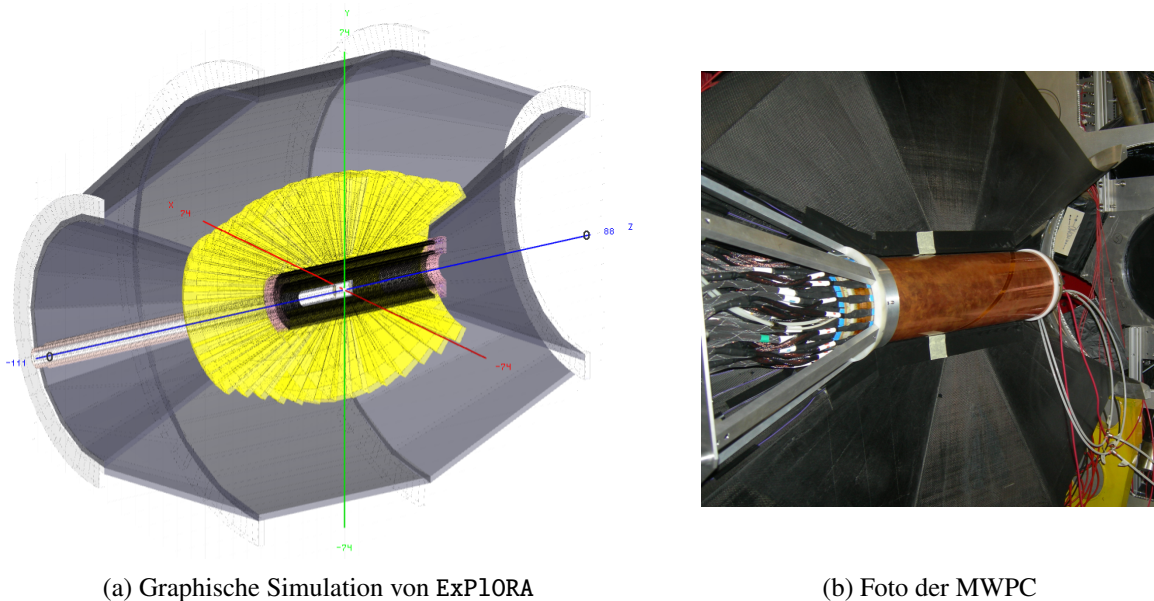
Die Standardmethode zum Auslesen der Signale betrachtet jeden Anodendraht als einzelnen Detektor. Das Signal wird zunächst zu einem auswertbaren logischen Signal verstärkt und im Folgenden geformt, diskriminiert und gespeichert. Wenn aufwändigere Verfahren zur Ortsbestimmung verwendet werden, wird auch das Signal der Kathoden ausgelesen und ein Reaktionspunkt ermittelt.

Die Effizienz einer MWPC hängt vom Bremsvermögen, engl. *stopping power*, des Gases, dem Abstand zwischen Kathode und Anode, dem Gasdruck, dem Anteil elektronegativen Gases, der Höhe der Hochspannung, der Schwellenspannung in der Elektronik und anderen verstellbaren Parametern ab. Vor allem durch die Wahl des Gasgemischs, der Elektronik und der Hochspannung kann die Effizienz der Kammer wesentlich beeinflusst werden. Typischerweise liegt die Effizienz für geladene Teilchen nach [4] bei 98–99 %.

3.2 MWPC im BGO-OD-Experiment

Die Kammern, die im BGO-OD-Experiment benutzt werden, wurden mit den Erkenntnissen der bereits am GrAAL-Experiment in Grenoble und in Mainz an MAMI genutzten MWPC konstruiert. Dies bietet den Vorteil, dass zuvor gemachte positive wie negative Erfahrungen genutzt werden können, um die Funktionsweise der MWPC zu verbessern. Es wurde und wird versucht, Konstruktion und Betrieb so ähnlich wie möglich zum GrAAL-Experiment zu gestalten. Die in Bonn verwendeten Kammern wurden am Instituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) Sezione di Pavia, Italien, gebaut. In Abbildung 3.2a ist die MWPC (schwarz) innerhalb des BGO-Balls (gelb und grau) zusammen mit dem Target (weiß) dargestellt. Die Graphik wurde mit der graphischen Simulation von ExPLORA erzeugt. Rechts daneben

in Abbildung 3.2b ist ein Foto aus dem Mai 2014 zu sehen. Darauf ist die MWPC der bronzene Zylinder inmitten des schwarzummantelten BGO-Balls.



(a) Graphische Simulation von ExPIORA

(b) Foto der MWPC

Abbildung 3.2: Die MWPC im BGO-Ball, erstellt mit *ExPIORA* und beim Einbau fotografiert

Die Kammern haben zu den in Abschnitt 3.1 beschriebenen einen entscheidenden Unterschied. Da der Detektor im Inneren des BGO-Balls möglichst große Polar- und Azimutalwinkel abdecken soll, werden keine flachen Platten, sondern zwei zylinderförmige, hohle Kammern (dargestellt in Abbildung 3.3a) benutzt. Diese sind jedoch als zu einem Zylinder gebogene Platten vorstellbar und die Grundfunktion unterscheidet sich nicht stark von der zuvor beschriebenen. Die Anodendrähte sind jeweils parallel zur Strahlachse gespannt und von zwei Schichten Kathodenstreifen umgeben. Die Kathoden bestehen dabei aus orthogonal zueinander orientierten Streifen, die um $\pm 45^\circ$ zu den Drähten verdreht diagonal um den Zylinder gedreht sind. Die Lücke zwischen den beiden Kathoden ist die aktive, gasdurchflutete Region der Kammer. Sie beträgt für beide Kammern 8 mm.

Die Detektion eines Teilchens ist in Abbildung 3.3b skizziert. Es werden zunächst die Streifensignale berücksichtigt. Da es zwei Kathodenebenen mit Streifen gibt, müssen auch mindestens zwei Streifen durch ankommende Ionen aktiviert werden. Meist sind es mehr, so dass das Signal in der Software über Schwerpunktbildung auf jeweils einen Streifen pro Ebene reduziert wird. Da die Kathodenstreifen jedoch diagonal um die Kammern gewickelt sind, kreuzen sich zwei Streifen über die Länge der Kammer doppelt. Deshalb wird zusätzlich das Signal des Drahtes benötigt, mit dem anschließend die Position des Signals bestimmt werden kann.

Das verwendete Gasmischung ist sehr ähnlich zum oben beschriebenen *Magic gas*. Es besteht zunächst aus 69,5 % Argon (Ar), 30 % Ethan (C_2H_6) und 0,5 % Tetrafluormethan (CF_4), die in einem Gasmixer zusammengemischt werden. Die zuvor beschriebenen Eigenschaften treffen auch hier zu. Das Argon wird zur leichten Ionisation genutzt, das Ethan erfüllt die beschriebenen Aufgaben des Methans als Quencher gas und Tetrafluormethan soll anstelle der mittlerweile verbotenen Chlorfluorkohlenwasserstoffe die dennoch ausgeschlagenen Elektronen absorbieren. Nachdem das Gasmischung als solches erzeugt wurde, wird ein Teil des Gemisches durch gekühltes Methylal (Dimethoxymethan $C_3H_8O_2$)

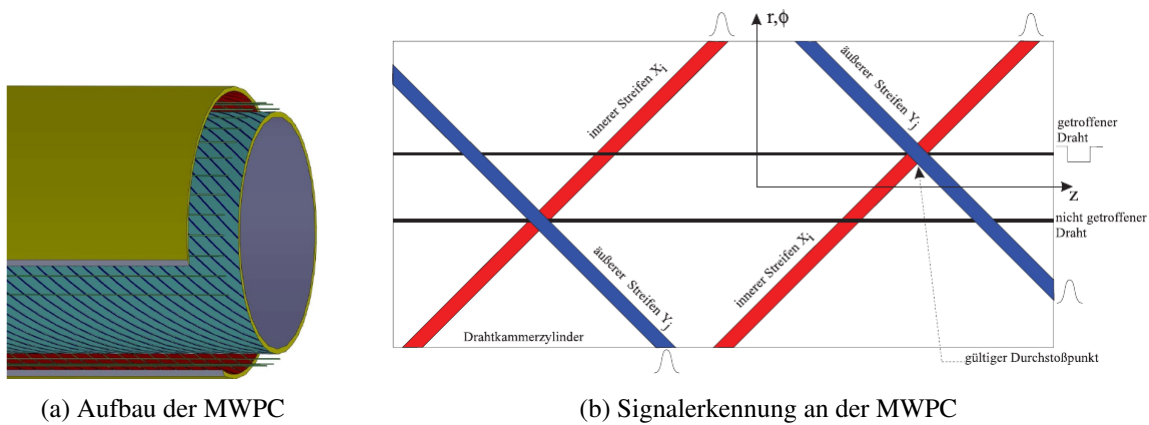


Abbildung 3.3: Anordnung der Anodendrähte und Kathodenstreifen und Signalerkennung, entnommen aus [6] und [7]

geleitet und mit dem Rest anschließend wieder zusammengeführt. Somit kann über die Temperatur reguliert werden, wie groß der Methylalanteil im letztendlich verwendeten Gas für die MWPC sein soll.

Mit einem Gasfluss von $250 \text{ cm}^3/\text{min}$ wird in den Kammern ein leichter Überdruck gegenüber dem Umgebungsdruck erzeugt. Zur Überprüfung, dass Gas fließt, wird das aus den Kammern abgeführte Gas durch Blubberflaschen geführt. Diese sind mit etwas Öl gefüllt und solange Gas fließt, steigen Gasblasen durch die Flüssigkeit auf.

Weitere geometrische und technische Daten der MWPC finden sich in Tabelle 3.1.

Daten		Kammer 1	Kammer 2
Abstand der Drähte	2 mm	520 mm	520 mm
Durchmesser der Drähte	$20 \mu\text{m}$	48,2 mm	79,5 mm
Streifenbreite	4,5 mm	56,2 mm	87,5 mm
Azimutale Auflösung	$\Delta\phi \approx 2^\circ$	160	256
Polare Auflösung	$\Delta\theta \approx 1^\circ$	48	80
z-Auflösung	$\Delta z \approx 300 \mu\text{m}$	56	88

(a) Allgemeine Daten

(b) Kammerspezifische Daten

Tabelle 3.1: Daten zur MWPC im BGO-OD-Experiment aus [6]

Die angelegte Hochspannung liegt zwischen 2–3 kV. Wie bereits in 3.1 beschrieben, spielt die Driftzeit der Elektronen bis zur Lawinenbildung eine entscheidende Rolle bei der Signalerzeugung.

Die erwartete Effizienz der Kammern liegt bei 90 % für Protonen und 80 % für geladene Pionen. Seit die ursprüngliche Mischung des *Magic gas* zum Schutz der Ozonschicht nicht mehr verwendet werden darf, ist noch kein äquivalenter Ersatz für das zu den Chlorfluorkohlenwasserstoffen gehörende Freon gefunden worden. Deshalb können momentan die in 3.1 angegebenen fast 100 % Effizienz nicht mehr erreicht werden.

Auf den Kammern selbst ist aus Platzgründen so wenig Elektronik wie möglich montiert. Es befinden sich lediglich Kondensatoren und Widerstände für die Anodendrähte, Kondensatoren für die Kathodenstreifen und Anschlüsse für die Kabel direkt am Detektor. Die Vorverstärkermodule sind so nahe wie

möglich an der Kammer selbst platziert, um keine Störsignale durch lange Kabel zu erzeugen und starke Dämpfung zu vermeiden. Die Kabel haben eine Länge von $\approx 1,8$ m. Die Vorverstärkerkarten der Drähte haben einen Diskriminator hinter den Vorverstärker geschaltet. Die dafür angelegten Schwellenspannungen betragen einstellbare Spannungen von -15 mV bis -100 mV, da die Signale auf den Anodendrähten negativ sind. Die vorverstärkten Pulse gehen über ≈ 12 m lange Kabel auf die Empore oberhalb des experimentellen Aufbaus und werden dort für Drähte und Streifen unterschiedlich weiterverarbeitet.

Die Anodendrahtsignale werden jeweils mit einem **Time-to-Digital-Converter (TDC)** ausgelesen. Hierbei ist nur die Information wichtig, welcher Draht der Flugbahn des Teilchens am nächsten war. Dies entspricht dem ersten Signal, das der TDC ausgibt. Es lässt sich damit bestimmen, welches die wahrscheinlichste Flugbahn des Teilchens durch die Kammer war. Zusätzlich erlaubt die Zeitinformation die Korrelation mit den anderen Detektoren des Experiments, da der TDC den Zeitpunkt relativ zum globalen Triggersignal bestimmt. Das globale Triggersignal gibt für die Elektronik der unterschiedlichen Detektoren ein gemeinsames Startsignal. Es wird hierfür evaluiert, ob an ausreichend vielen Stellen im Experiment ein Signal gesehen werden konnte. Wenn dies der Fall ist, wird ein Triggersignal an die Elektronik der Detektoren weitergeleitet.

Die Kathodenstreifen werden mit **Sampling Analog-to-Digital-Converter (SADC)** ausgelesen. Diese digitalisieren das ankommende Signal mit einer Frequenz von 160 MHz. In einem festen Zeitfenster um das globale Triggersignal sucht der SADC in den digitalen Datensätzen nach Werten, die oberhalb einer eingestellten Schwelle liegen und wertet diesen Wert und die folgenden Datensätze als Puls. Für die Pulse wird das Integral und die Startzeit relativ zum globalen Triggersignal ausgegeben. [8].

3.3 Nutzen der MWPC

Da es einige Verzögerungen mit der Elektronik gab, wurde die MWPC erst im Mai 2014 in den Versuchsaufbau eingebaut. Die bisherigen Messdaten wurden ohne diesen Detektor genommen. Dies bedeutet einen Verzicht auf Genauigkeit und auf die Ereignisrekonstruktion schwacher Zerfälle, weshalb im Folgenden betrachtet wird, welche Mehrinformation durch die Kammern erwartet werden kann.

3.3.1 Berechnung

Ohne die MWPC wird mangels gemessener Punkte angenommen, dass die zu detektierende Reaktion in der Mitte des zylinderförmigen, 60 mm langen Targets stattgefunden hat. Die einzige messbare Information über die Flugbahn eines Teilchens ist der zurückgerechnete Schwerpunkt des durch die Photonen erzeugten Clusters aktivierter Kristalle im BGO-Ball. Von geladenen Teilchen lässt sich zumeist auch diese Information nicht bestimmen, da nur ein Kristall angesprochen bzw. nicht die gesamte Energie des Teilchens deponiert wird. Die Reaktion kann an einem beliebigen Ort im Target stattgefunden haben. Dies führt zu einem Fehler des Reaktionsortes von $\Delta z = 30$ mm.

Durch die Kammern ist es für geladene Teilchen möglich, zwei Punkte der Flugbahn zu bestimmen. Anhand dieser kann die Flugbahn als Gerade rekonstruiert und der Reaktionspunkt im Target ermittelt werden. Es bleibt allerdings die Unsicherheit auf dem Geradenabschnitt, der den Photonenstrahl durchkreuzt, da der Durchmesser des Strahls nach Daten aus der Strahlzeit im Dezember 2013 $d \approx 10$ mm

beträgt. Die Unsicherheit, die sich daraus für den Reaktionspunkt ergibt, ist anhand von Abbildung 3.4 und Gleichung 3.1 mit einfachsten Rechenmethoden kurz abgeschätzt.

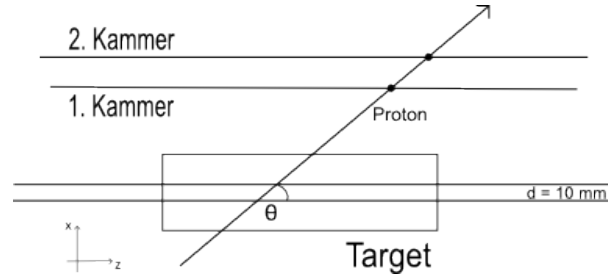


Abbildung 3.4: Zeichnung zur Berechnung des möglichen Reaktionsbereiches a im Target

Die Geometrie aus Abbildung 3.4 zur Grundlage nehmend, kann mit folgender Rechnung der mögliche Reaktionsbereich a in Z-Richtung innerhalb des Targets bestimmt werden.

$$a = \left| \frac{d}{\tan(\theta)} \right|$$

$$\Delta a = \left| -\frac{d}{\sin^2(\theta)} \cdot \Delta\theta \right| \quad (3.1)$$

Die Ungenauigkeit des Polarwinkels in der Rekonstruktion liegt für die Kammern bei $\Delta\theta < 2^\circ$ [6]. Zur Abschätzung wird sicherheitshalber ein Fehler von $\Delta\theta = 2^\circ$ angenommen. Für sechs unterschiedliche Polarwinkel θ sind die errechneten Werte in Tabelle 3.2 verzeichnet.

Winkel	Reaktionsbereich a in mm	Fehler Δa in mm
30°	17,32	$\pm 1,40$
55°	7,00	$\pm 0,52$
80°	1,76	$\pm 0,36$
105°	2,68	$\pm 0,37$
130°	8,39	$\pm 0,60$
150°	17,32	$\pm 1,40$

Tabelle 3.2: Mögliche Reaktionspositionen im Target für einige Beispielwinkel

Aus den errechneten Werten ergibt sich eine verbesserte Ortsbestimmung der Reaktion von nur noch maximal 18 mm Breite für besonders kleine bzw. besonders große Polarwinkel θ . Diese Winkel bilden jedoch die Extremfälle und sollten statistisch verteilt weniger häufig auftreten als Winkel nahe $\theta = 90^\circ$. Die Verbesserung liegt bereits für die unwahrscheinlicheren Winkel bei über 200 % und wird nahe der Orthogonalen um fast eine Größenordnung besser. Weitere Verbesserungen in der Konstruktion des Reaktionspunktes könnten erreicht werden, wenn Teilchen im Vorwärtsspektrometer detektiert werden. Deren zurückkonstruierte Gerade würde einen Schnittpunkt mit der hier betrachteten Geraden ergeben und damit den Fehler auf den Reaktionspunkt verringern.

3.3.2 Simulation

Um nun abschätzen zu können, welche Auswirkungen diese Verbesserung auf die Berechnung der invarianten Masse hat, werden die folgenden beiden Reaktionen ohne seltsame Teilchen simuliert:

$$\gamma p \longrightarrow \pi^0 p \longrightarrow \gamma \gamma p$$

und

$$\gamma p \longrightarrow \eta p \longrightarrow \gamma \gamma p$$

Die zur Simulation verwendete Software basiert auf *Extended Pluggable Objectoriented ROOT(ified) Analysis (ExP1ORA)*, die in Bonn von der CBELSA/TAPS-Kollaboration entwickelt wurde [9]. Sie ist modular aufgebaut und kann sowohl simulierte Daten erzeugen und verarbeiten als auch Realdaten bearbeiten. In Anhang A.1 befindet sich ein Teil des C++-Codes der Simulation. Dieser wurde mit Hilfe von Dr. T. Jude erstellt und berechnet die invariante Masse und Energie des π^0 respektive des η .

Für die Simulation des Falles ohne Kammer werden folgende Parameter eingestellt: Der Startpunkt der Reaktion wird während der gesamten Simulation im Mittelpunkt des Targets angenommen. Die reale Reaktion kann dagegen zylinderförmig über die Länge des Targets verteilt stattgefunden haben. Als Zylinderdurchmesser wird der Strahldurchmesser angenommen. Die Variable *startpoint* bekommt unter diesen Voraussetzungen die Größe (0, 0, 0), was im Mittelpunkt des Targets liegt. Die Variable *smearstart* stellt den Fehler auf *startpoint* dar. *smearstart* = (0.5, 0.5, 3.0) bedeutet also $\Delta x = 5$ mm, $\Delta y = 5$ mm und $\Delta z = 30$ mm.

Die Ergebnisse der Simulation von 100.000 Ereignissen zur Berechnung der invarianten Masse des π^0 sind mit angepasster (roter) Gaußfunktion in Abbildung 3.5a dargestellt. Weiterhin sind die Simulationsdaten der invarianten Masse des η von ebenfalls 100.000 Ereignissen mit angepasster (roter) Gaußfunktion aus Abbildung 3.5b graphisch ersichtlich.

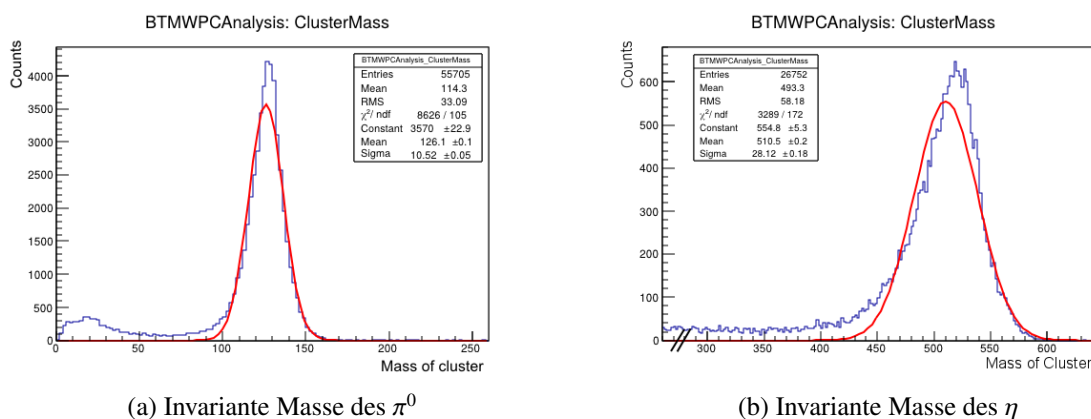


Abbildung 3.5: Simulationsdaten der invarianten Masse ohne die MWPC

Da es noch keine fertige Simulation für die Kammern gibt, wird der oben beschriebene Fall lediglich leicht abgewandelt: Der Startpunkt der Reaktion kann nun durch die Flugbahn des Protons genauer festgelegt werden. Über eine zurückkonstruierte Gerade durch die beiden Auftreffpunkte in der MWPC lässt sich die Unsicherheit der Z-Koordinate verringern. Aus Tabelle 3.2 ist ersichtlich, dass der maximale Wert der Abweichung vom angenommenen Reaktionspunkt bei $\Delta z = 9$ mm liegt. Daraus wird

geschlossen, dass ein $startpoint = (0, 0, 0)$ nur noch einen Fehler von $\Delta z = 9$ mm aufweist. Es folgt also $smearstart = (0.5, 0.5, 0.9)$.

Ebenso wie die Ergebnisse der Simulation von 100.000 Ereignissen ohne Nutzung der MWPC zuvor dargestellt wurden, sind in den Abbildungen 3.6a und 3.6b die Darstellungen der invarianten Masse des π^0 und des η mit angepasster (roter) Gaußfunktion unter Benutzung der MWPC zu sehen.

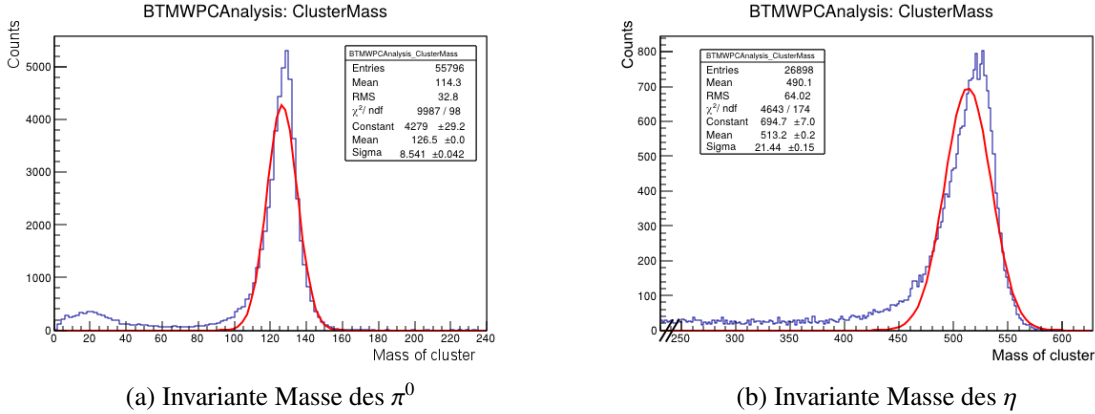


Abbildung 3.6: Simulationsdaten der invarianten Masse mit MWPC

In den Abbildungen 3.5 und 3.6 weicht die Anzahl der Ereignisse von den simulierten 100.000 Ereignissen ab. Das liegt an der programmierten Vorgabe, nur die Datensätze mit genau zwei detektierten Photonen aufzunehmen. Nicht erfasste Ereignisse sind also diejenigen, in denen nur ein oder kein Photon detektiert werden konnte. Die aufgetragenen Ereignisse, die sich links des Maximums befinden, sind fälschlicherweise als relevante Signale aufgenommen worden. Der aus diesen Teilchen errechnete Impuls ist zu klein, als dass es sich um die gesuchten Teilchen handeln könnte. Bei den Darstellungen des η ist zu beachten, dass es sich um eine Ausschnittsvergrößerung des Maximums handelt. Die X-Achse ist nicht kontinuierlich.

Im Vergleich der Abbildungen miteinander ist bereits zu erkennen, dass die Breite der Maxima (Standardabweichung σ) schmaler wird. Daraus lässt sich eine erhöhte Genauigkeit im Falle der Nutzung der MWPC ableiten. In der folgenden Tabelle 3.3 sind der Schwerpunkt des Maximums (engl. *mean*) und die Standardabweichung σ bei 100.000 Ereignissen zum Vergleich aus den Histogrammen entnommen und aufgelistet.

Teilchen	$startpoint$	$smearstart$	mean in MeV	σ in MeV
π^0	(0, 0, 0)	(0.5, 0.5, 3.0)	$126,1 \pm 0,1$	$10,52 \pm 0,05$
π^0	(0, 0, 0)	(0.5, 0.5, 0.9)	$126,5 \pm 0,1$	$8,54 \pm 0,04$
η	(0, 0, 0)	(0.5, 0.5, 3.0)	$510,5 \pm 0,2$	$28,12 \pm 0,18$
η	(0, 0, 0)	(0.5, 0.5, 0.9)	$513,2 \pm 0,2$	$21,44 \pm 0,15$

Tabelle 3.3: Simulierte Verbesserung durch MWPC bei der Errechnung der invarianten Masse

Bei den Ergebnissen der Simulationen fällt auf, dass sich am Schwerpunkt des Maximums, das der Masse des Teilchens entspricht, nicht viel ändert. Dies war zu erwarten, da die Berechnung der invarianten Masse lediglich auf Grund der im BGO-Ball detektierten Photonen stattfindet. Für beide Mesonen kann die Masse mit weniger als 10 % Abweichung zu den in [10] angegebenen Literaturwerten

($m_{\pi^0} = (134,9766 \pm 0,0006) \text{ MeV}$, $m_{\eta} = (547,75 \pm 0,12) \text{ MeV}$) bestimmt werden. Die Begründung dafür liegt im Energieverlust der Teilchen zwischen den Kristallen, für die in der Simulation keine Kompensation programmiert ist.

Die Literaturwerte der Standardabweichung können für $\sigma_{\pi^0} = (9,83 \pm 0,56) \text{ eV}$ aus der Lebenszeit ($\tau = (8,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-17} \text{ s}$) berechnet und für $\sigma_{\eta} = (1,29 \pm 0,07) \text{ keV}$ direkt aus [10] entnommen werden. Diese natürlichen Linienbreiten sind also um einige Größenordnungen kleiner als die aus der Simulation bestimmten Werte. Dies lässt den Schluss zu, dass es sich bei der Verbesserung, die sowohl für das π^0 als auch für das η festgestellt werden kann, um eine Verringerung der Breite der invarianten Massenverteilung handelt. Für das π^0 wird schon in dieser einfachen Simulation, die einen nicht-seltsamen Zerfall betrachtet, eine Verbesserung von etwa 20 % erzielt, für das η sogar von etwa 25 % des Wertes ohne die Verwendung der MWPC.

Weiterhin können nur mit Hilfe der MWPC und der Spurrekonstruktion Sekundärvertices rekonstruiert werden. Ohne die Kammern ist es folglich nicht möglich, schwache Zerfälle mit ihrem Ursprungsort nachzuweisen.

Temperatur- und Spannungsüberwachung

Wenn der Detektor vollständig in Betrieb genommen wird, ist es wichtig, die Temperatur der Vorverstärkerkarten und die Schwellenspannung der Diskriminatoren auf den Karten der Drähte überwachen und diese im Notfall abschalten zu können. Dies soll auch noch funktionieren, wenn es z.B. zu Strahlzeiten nicht möglich ist, Messwerte direkt auf den Karten nahe der MWPC nachzuschauen. Aus diesem Grund wurde eine Platine entwickelt, die diese Daten für jeweils eins der zwei Vorverstärkerracks liefern kann. Die detaillierten Schaltpläne befinden sich in Anhang A.2.

Auf den Vorverstärkerkarten sind bereits Chips vorhanden, die die Temperatur auslesen. Die dafür genutzten *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors* von *Texas Instruments* liefern Signale mit $0\text{ mV} + 10\text{ mV}/^\circ\text{C}$, die in Temperaturen umgerechnet werden können. Die Signale werden mit 2×34 -poligen Pfostenleisten nach außen geführt, was die Größe der Leistenstecker auf der Platine vorgibt. Die Signale werden über **Analog-to-Digital Converter (ADC)** ausgelesen. Weiterhin gibt es auf den Vorverstärkerkarten die Möglichkeit, diese abzuschalten. Mit 2×20 -poligen Pfostenleisten wird der Statuswert der Karte nach außen geführt und über einen Input/Output Expander sowohl ausgelesen als auch möglicherweise geändert. Im Laufe des Erstellungsprozesses stellte es sich als sinnvoll heraus, auch die Schwellenspannung der Vorverstärkerkarten der Drähte auslesen zu können. Diese wird über ein LEMO-Kabel auf eine 34-polige Pfostenleiste geführt und ebenso verarbeitet wie die Temperatur.

Zur Kontrolle der Temperatur- und Spannungswerte wird ein *Raspberry Pi* von der *Raspberry Pi Foundation* genutzt, da es ein kleiner, preiswerter Computer ist, der fast alle benötigten Voraussetzungen erfüllt und auf der Platine Platz findet. Der *Raspberry Pi* stellt allerdings nur zwei SPI-Datenleitungen zur Verfügung. Um mit allen benötigten Chips kommunizieren zu können, werden sechs Leitungen benötigt. Deshalb wird ein Demultiplexer eingebaut, um je nach Bedarf einen Chip direkt auszuwählen.

4.1 Schaltplan

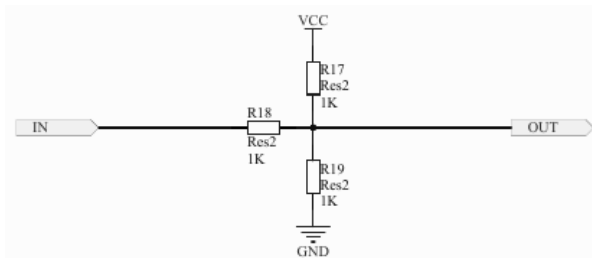
Der Schaltplan wurde zusammen mit T. Zimmermann entworfen und die entsprechenden elektronischen Komponenten mit den richtigen Eigenschaften von ihm ausgewählt. Die Platine ist in drei unterschiedlich funktionale Teile unterteilt. Diese wurden teilweise bereits angesprochen und werden nachfolgend näher beschrieben. Die drei Anteile mit Namen *P2_bla1*, *P2_bla2* und *P2_bla3* sind zum Auslesen der

Temperatur und Spannung gedacht und daher mit 34-poligen Pfostenleisten ausgestattet. Mit den Abschnitten *PI_en1* und *PI_en2* können die Vorverstärkerkarten einzeln ausgeschaltet werden. Sie sind durch die 20-poligen Pfostenleisten zu erkennen. Der *Raspberry Pi* wird als Steuerungsinstrument genutzt, um die Chips anzusprechen und ausgelesene Werte übers Netz senden zu können.

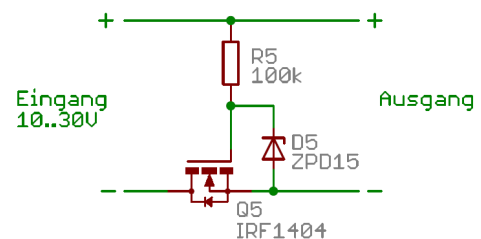
Die Spannungssignale der Vorverstärkerkarten werden zu einem ADC (*MCP3008 2,7 V 8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface* von *Microchip*) geleitet, der sie in ein digitales Signal umwandelt. Dieses Signal kann über ein SPI-Protokoll (2 Datenleitungen, 1 Clock) durch den *Raspberry Pi* ausgelesen werden. Der ADC braucht eine Referenzspannung, die ihm von einer *LM4140 High Precision Low Noise Low Dropout Voltage Reference* von *Texas Instruments* geliefert wird. Sie beträgt 1024 mV, was binär dargestellt gerade 2^{10} ist. Folglich entspricht eine Änderung des ADC-Wertes um 1 gerade einer Änderung um 1 mV bzw. 0,1 °C. Um mit allen ADC-Chips gleichermaßen kommunizieren zu können, wird als Demultiplexer der *MM74HCT138M 3-to-8 Line Decoder* von *Fairchild Semiconductor* verwendet. Durch ihn wird jedem ADC-Chip eine binäre Adresse zugewiesen, unter der der *Raspberry Pi* den Chip ansprechen kann.

Um das ankommende Spannungssignal von den Vorverstärkerkarten an den Arbeitsbereich des ADC anpassen zu können, wurden Spannungsteiler in die Schaltung eingebaut, wie sie in Abbildung 4.1a dargestellt sind. Diese können sowohl gegen VCC (3,3 V) als auch gegen Masse bestückt werden, um nach Spannungsteilerregel die gewünschten Ausgangsspannungen abbilden zu können. Dies hat den Vorteil, dass sowohl negative Signale (durch Nutzen des VCC-Zweiges) als auch größere Signale als 1 V (gegen Masse bestücken) auf den Arbeitsbereich des ADC von 0–1024 mV abgebildet werden können.

Sollten die ausgelesenen Spannungswerte zu hoch werden oder es aus einem anderen Grund nötig werden, die Vorverstärkerkarten einzeln abzuschalten, wird dies durch den *MCP23018 16-Bit I/O Expander with Open-Drain Outputs* von *Microchip* ermöglicht. Er kommuniziert über ein I²C-Protokoll (1 Datenleitung, 1 Clock) mit dem *Raspberry Pi*. Es wird jeweils der gleiche Kanal benutzt, um die Karten an- und abzuschalten wie auch zur Kontrolle des momentanen Status. Normalerweise sind die Karten angeschaltet, da sie durch einen *Pull-up*-Widerstand auf Operationspotenzial gebracht werden. Abgeschaltet werden sie folglich indem die Ausgangsspannung auf Massepotenzial gebracht wird.



(a) Spannungsteiler, aus Anhang A.2 entnommen



(b) Verpolschutz für die Platine von [11]

Die Platine wird von außen mit einer Spannung von 5 V versorgt. Der *Raspberry Pi* braucht als Versorgungsspannung 3,3 V, die mit einem eingebauten Spannungswandler erzeugt werden. Diese Spannung wird für den Prozessor benötigt und die Mitversorgung der 12 Chips auf der Platine würde den Spannungswandler zu stark belasten. Deshalb wird mit einem *LD1117 Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator* die Versorgungsspannung in ebenfalls 3,3 V für die Chips umgewandelt. Ein Verpolschutz verhindert, dass eine versehentlich falsch angeschlossene Stromversorgung zu Beschädigung der Chips führt. Er ist in Abbildung 4.1b dargestellt und arbeitet mit dem in umgekehrter Richtung betriebenen Mosfet *IRF1404* von *International Rectifier*.

4.2 Design

Ein großer Anteil dieser Bachelorarbeit wird durch das Design der bereits in 4.1 vorgestellten Schaltung und die nachfolgende Bestückung der Platine mit Chips, Pfostenleisten, Kondensatoren und Widerständen beansprucht. Die Anordnung der beschriebenen Bauteile auf einer $100\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ -Platine wurde mit dem Programm *Altium Designer* vorgenommen. Eine besondere Schwierigkeit stellte der geringe Platz auf der Platine dar. Ein Drittel nimmt bereits der *Raspberry Pi* ein, so dass die großen Pfostenleisten, etwa 200 Widerstände, die aufgelisteten Chips, einige Kondensatoren sowie die entsprechenden Leiterbahnen gedrängt platziert sind. Bei der Einarbeitung in das Programm, haben sich vor allem die zur Verfügung gestellten Tutorials auf der Webseite der Firma als sehr hilfreich erwiesen. Insbesondere das sehr ausführliche Einführungstutorial unter [12] stellt viele Details zum generellen Umgang bereit.

Mit Hilfe der schließlich erstellten sogenannten Gerberdokumente wurde die Platine durch die Firma *Multi Circuit Boards (multi-cb)* produziert.

4.3 Bestücken

Bei ersten Tests der gelieferten Platine wurden Fehler im Platinendesign deutlich, die noch beseitigt werden müssen. Der 3,3 V-Anschluss des *Raspberry Pi* wurde mit der Polygonfläche auf der Oberseite verbunden. Dadurch versorgt der *Raspberry Pi* die Chips alle selbst mit Spannung und überhitzt dadurch schnell. Dies wurde erst bemerkt, als der Steckverbinder bereits verlötet war, so dass der gesamte Pin entfernt werden musste. Die Zuordnung der Pins an der Referenzspannungsquelle war vertauscht und am Demultiplexer wurde das *Chip Enable*-Signal an die verkehrten Pins angelegt, so dass an beiden Chips die Pins mit zusätzlichen Kabeln neu verbunden werden mussten. Weiterhin sind die Löcher für den Spannungswandler zu klein geworden, so dass er nicht durchgesteckt werden kann, sondern lediglich von oben aufgelötet wird.

Die einzelnen Bauteile wurden festgelötet, wozu auch ein Reflow-Lötverfahren genutzt wurde. Bei diesem werden die zu bestückenden Pads mit einer Lötpaste (in diesem Fall *Lotpaste CR44* von *Edsyn*) bedeckt und die Bauteile in die noch feuchte Paste gesetzt. Die gesamte Platine wird erwärmt und mit einer Infrarotlichtlampe kann der zu verlötende Bereich noch zusätzlich erhitzt werden. Dies erspart die aufwändige Arbeit, jedes Bauteil einzeln festlöten zu müssen, was bei mehr als 100 bestückten Widerständen und mehr als doppelt so vielen Pins eine enorme Zeitersparnis bringt. Das Verfahren hat lediglich den Nachteil, dass die Lötpaste schnell austrocknet.

Da die Schwellenspannungen der Diskriminatoren (-15 mV bis -100 mV) durch die negativen Signale an den Anoden ebenfalls negativ sind, müssen sie durch den Spannungsteiler (siehe Pläne der Platine in Anhang A.2) an den Bereich des ADC angepasst werden. Dazu wird ein hoher Eingangswiderstand benötigt und ein zweiter nach Spannungsteilerregel zum Eingangswiderstand passender Widerstand Richtung VCC platziert. Da -1 V auf 100 mV abgebildet werden soll, werden Widerstände mit den Werten $115\text{ k}\Omega$ als Eingangswiderstand und $332\text{ k}\Omega$ als zweiter Widerstand verwendet. Die Spannungsteiler für die Temperaturkontrolle sind lediglich mit je einem $0\text{ }\Omega$ -Widerstand bestückt worden, da der erwartete Spannungsbereich nicht über 1 V hinausgehen, so aber die elektrische Leitung ermöglicht wird.

Status des Detektors bei Fertigstellung der Bachelorarbeit

Die in Pavia, Italien, gebaute MWPC wurde im Mai 2014 nach Bonn gebracht und dort eingebaut. Zuerst wurde die Halterung der Vorverstärkerracks, die vom Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences (INRRAS) mit den Vorverstärkerkarten zusammen gebaut wurden, zwischenzeitlich abgeschraubt. Die Isolation zwischen den Kammern und der Elektronik wurde durch zusätzliche Kunststoffplatten an der Verschraubung zwischen Kammern und Vorverstärkerelektronik verbessert. Es soll so verhindert werden, dass Masseschleifen und dadurch Störsignale entstehen. Parallel zu diesen mechanischen Maßnahmen wurden die Kammern vollständig durchgetestet, um sicherzustellen, dass alle Anodendrähte und Kathodenstreifen funktionieren und beim Transport nichts beschädigt wurde. Der einwandfrei funktionierende Detektor wurde anschließend auf den dafür vorgesehenen Ring montiert und durchnummerierte Kabel mit den Anschlüssen verbunden. Die Kabel wurden mit Kabelbindern an den dafür eingeplanten Stellen am Befestigungsring der MWPC fixiert und zu den Vorverstärkerkarten gelegt. Durch die montierten Kammern wurde das Targetrohr hindurchgeschoben, so dass das Target selbst in der Mitte der MWPC sitzt. Zuletzt wurden die Kabelverbindungen von den Vorverstärkerkarten hoch auf die Empore durch eine Kabeltrasse verlegt und dort an den Racks fixiert.

Im Juni wurden in einer Teststrahlzeit von zwei Tagen erste Tests des Detektors vorgenommen. Dabei ließen sich statt Signalen lediglich überlagernde Störsignale beobachten. Im Folgenden wurde nach möglichen Störquellen und Fehlern gesucht und alles erneut kontrolliert. Im Juli wurden vor allem an der Isolation der Kammern einige Verbesserungen vorgenommen. Dazu zählten beispielsweise die Isolation der inneren Kammer gegen das Targetrohr mit Mylarfolie, sowie ein Kupferkabel auf der Empore, das die einzelnen Einschübe im Rack für die Ausleseelektronik auf Masse legt. Außerdem wurden alle Kabel vom Befestigungsring gelöst und an den Befestigungsstellen mit Isolierband umwickelt. So wird verhindert, dass die stark zusammengedrückte Netzisolation der Kabel die umhüllten Kupferkabel freilegt und diese in Kontakt mit dem Metallring kommen. Zwischen Befestigungsring und Vorverstärkerelektronik wurden größere Abschnitte der Kabel mit Adhäsionsfolie umwickelt, um sie gegen die metallische Halterung zu isolieren.

Weiterhin gab es ein Problem mit der Stromversorgung der Vorverstärkerkarten, da diese mit einem Schaltnetzteil versorgt wurden. Diese Methode spart zwar Platz, erzeugt aber zu viele Störsignale, wie

sich mittlerweile herausgestellt hat. Als Übergangslösung stehen nun alte längsgerichtete Netzteile des Vorgängerexperimentes *Spectrometer Arrangement for Photon induced Reactions* (SAPHIR) neben dem BGO-Ball, die auf Dauer aber zu groß und unhandlich sind. Damit ließ sich bereits eine deutliche Verbesserung erzielen, so dass die Probleme auf Grund von Störsignalen weitestgehend behoben sind.

Momentan wird noch an der Elektronik zur Formänderung des Kathodensignals, engl. *shaping*, gearbeitet, da es damit bislang noch Probleme gibt. Ebenfalls unklar ist, wann die Kammern mit dem vorgesehenen Gasgemisch betrieben werden können. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es von der Universitätsleitung noch nicht genehmigt, das brennbare Ethan zu nutzen, so dass die ersten Tests der MWPC mit einem Argon-CO₂-Gemisch durchgeführt wurden, das aber deutlich schlechter für den dauerhaften Betrieb bei den gewünschten Hochspannungen geeignet ist.

Ende September sollen letzte Tests und Verbesserungen in Bonn durchgeführt und das Problem der Kathodenelektronik behoben werden, so dass die Hoffnung besteht, den Detektor bald vollständig einsetzen zu können.

Fazit

Eine MWPC ist ein Spurdetektor, der über proportionale Gasverstärkung und elektronische Ausleseverfahren der Anoden und Kathoden Informationen über die Trajektorie geladener Teilchen bieten kann. Dabei werden zur Flugbahnrekonstruktion zwar immer mehrere Kammern benötigt, aber sonstige Parameter wie Form, Größe oder Gaszusammensetzung lassen sich auf die Gegebenheiten des experimentellen Aufbaus anpassen.

Im BGO-OD-Experiment wird die MWPC, bestehend aus zwei zylinderförmigen Kammern, zur Rekonstruktion der Spur und des Reaktionsvertex im Target bzw. des Sekundärvertex außerhalb des Targets benötigt. Der Detektor ist für den Gesamtaufbau des Experiments ausgesprochen wichtig und wird zukünftig insbesondere die Bestimmung des Reaktionspunktes schwacher Zerfälle mit seltsamen Teilchen ermöglichen.

Bereits für Zerfälle ohne Beteiligung von seltsamen Teilchen bieten die Kammern eine Verbesserung von 200–2000 %, wie für zwei Reaktionen gezeigt werden konnte. In der daraufhin durchgeführten Simulation ergab sich eine Reduktion der Breite der invarianten Massenverteilung von bis zu 25 %.

Die zur Temperatur- und Spannungskontrolle erstellte Platine für die Vorverstärkerkarten wird insbesondere bei laufendem Betrieb während der Strahlzeit zur Überprüfung der Werte, sowie zum möglicherweise benötigten An- und Abschalten der Vorverstärkerkarten gebraucht. Dabei wird der *Raspberry Pi* als Steuerungsinstrument benutzt, um von außen eine Kommunikation mit den Chips der Platine zu ermöglichen.

Momentan kann die MWPC noch nicht in gewünschtem Maße genutzt werden, da die Signale nicht ausreichend gut ausgelesen werden können und das benötigte Gasgemisch noch nicht genutzt werden darf. In beiden Fällen ist nicht absehbar, wann sich das Problem vollständig lösen lässt. Es ist somit zwar möglich, dass der Detektor in der nächsten Strahlzeit in vollem Ausmaß genutzt werden kann, aber in keinem Falle garantiert.

Weitergehende Informationen

A.1 Code für Effizienzsimulation

```

void BTMWPCAnalysis::fProcess(){
    TString msg;
    Double_t energy, mass;           // to use for the 4-momentum-vector
    mass = 0.0;                      // mass of photon
    Int_t Ncl = lSource->GetEntries(); // number of clusters per event
    if(Ncl != 2) return;             // only look at events with two clusters
    BTCluster *cl = NULL;           // pointers to clusters
    TLorentzVector *p4bgo = new TLorentzVector[Ncl];

    for(Int_t i = 0; i<Ncl; i++){    // loop over the clusters

        cl = static_cast<BTCluster*>( lSource->UncheckedAt(i) );
        lHist_ClustAngl->Fill(cl->fGetEnergy(), cl->fGetPosition().Theta()*TMath::RadToDeg());

        // Set the 4-momentum:
        energy = cl->fGetEnergy();

        p4bgo[i].SetVect(cl->fGetPosition().Unit() * energy);
        p4bgo[i].SetE( energy + mass );
        p4bgo[i].SetRho( sqrt( (energy+mass)*(energy+mass) - mass*mass) );

    }

    // Take all combinations of clusters and add them together
    // (in the case of only two events, its not important)
    for(Int_t i = 0; i<Ncl; i++){
        for(Int_t j = i+1; j<Ncl; j++){

```

```
    TLorentzVector p4pion = p4bgo[i] + p4bgo[j];
    Double_t pionmass = p4pion.M();           // calculates invariante mass
    Double_t pionenergy = p4pion.E();        // and energy of 4-momentum-vector

    lHist_ClustMass->Fill(pionmass);         // histogram filled with pionmass
    lHist_EnergyMass->Fill(pionmass, pionenergy); // histogram filled with energy
}
}

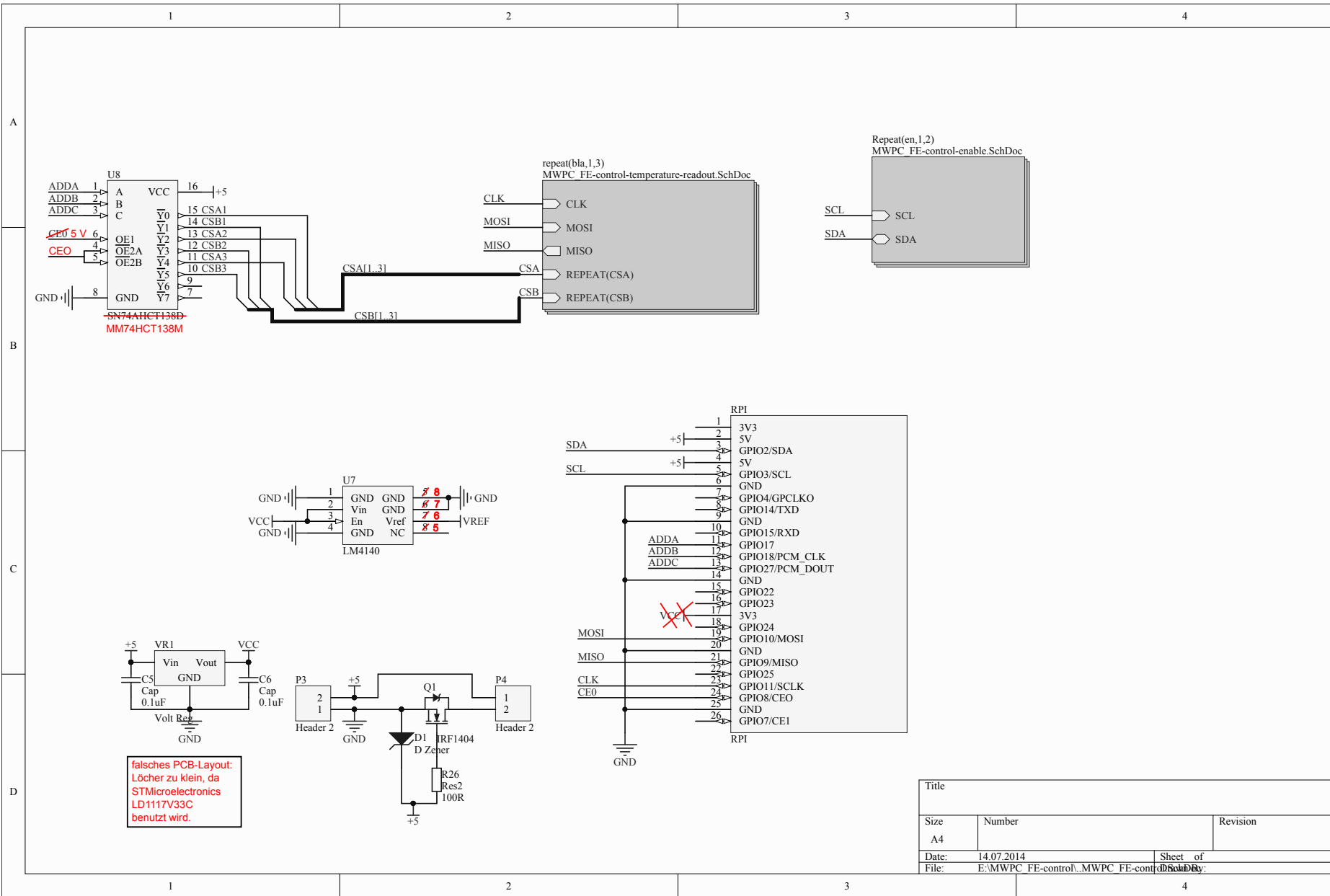
lHist_TotNClusters->Fill(Ncl);

delete [] p4bgo;
}
```

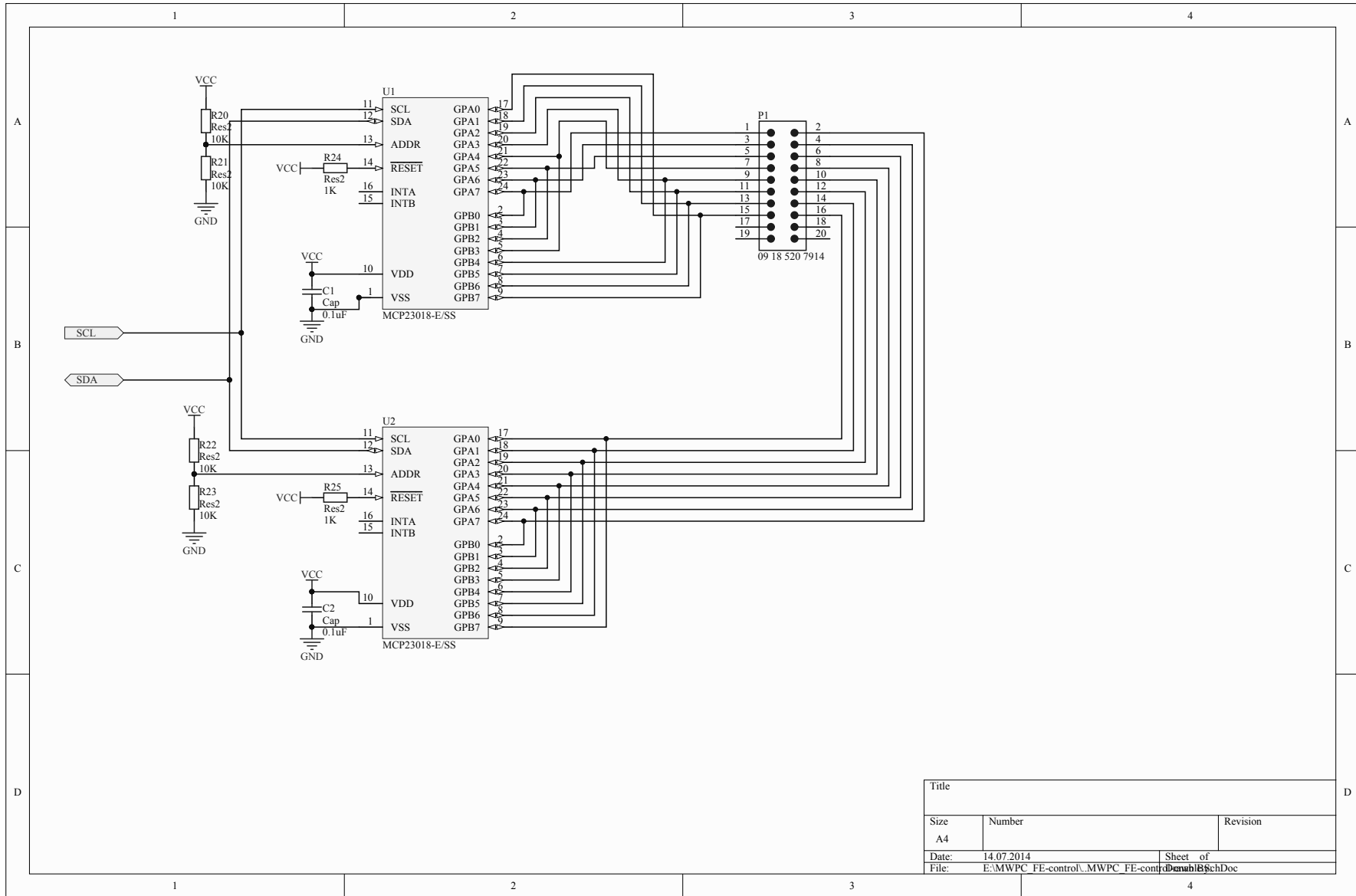
A.2 Pläne der Platine

Auf den folgenden Seiten sind die Schaltpläne der Platine zur Temperatur- und Spannungsüberwachung der Vorverstärkerkarten in aufgelisteter Reihenfolge angehängt:

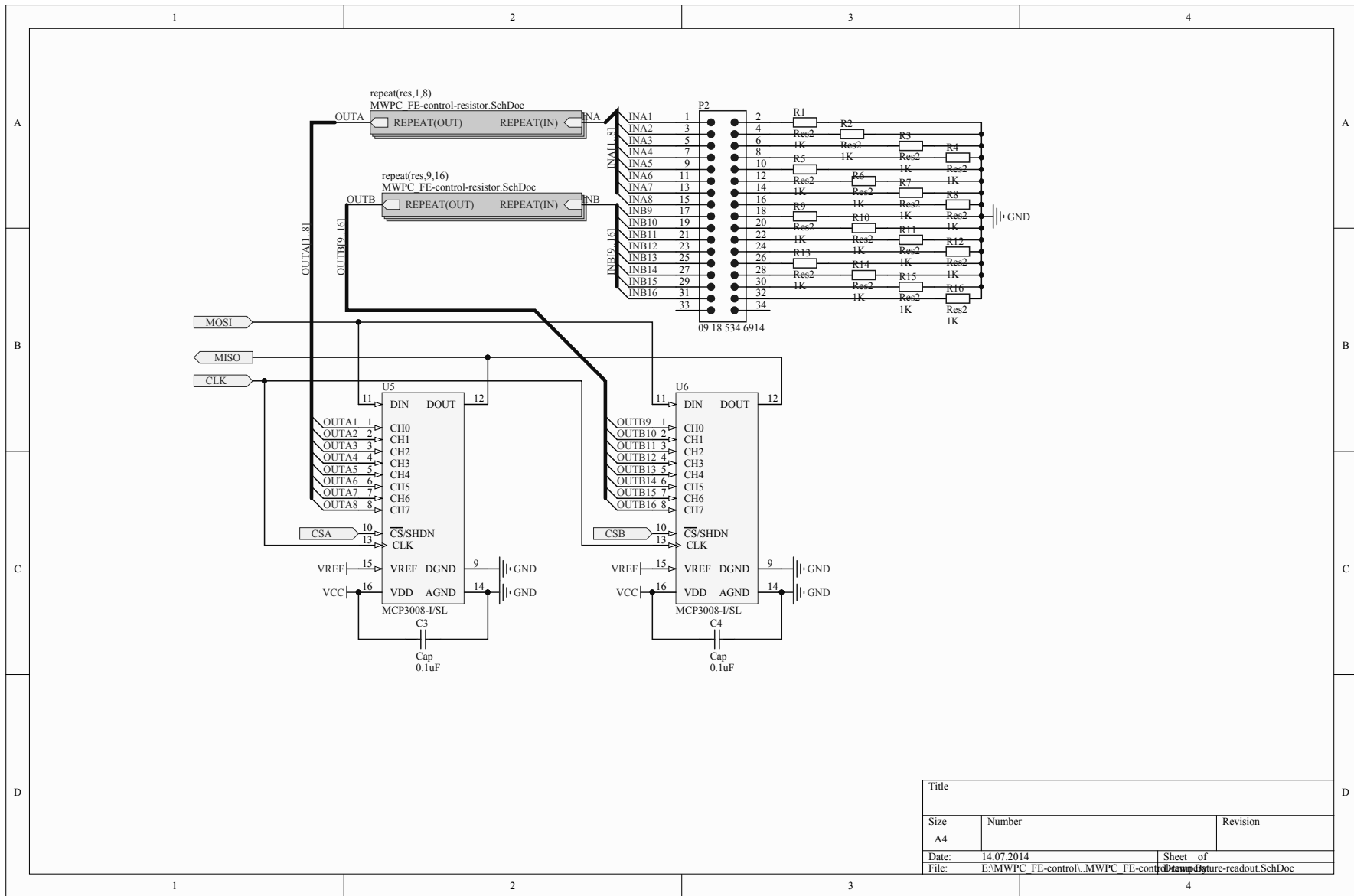
- Übersicht der Verschaltung von Chips mit der Stromversorgung und dem *Raspberry Pi*, wobei die roten Markierungen die nachträglich notwendigen Veränderungen an der geätzten Platine darstellen
- Pläne für die Abschnitte *P1_en1* und *P1_en2* zum An- und Abschalten der Chips
- Pläne für die Abschnitte *P2_bla1*, *P2_bla2* und *P2_bla3* zum Auslesen der Spannungswerte
- Spannungsteilerschaltung, die für die ADC gebraucht werden
- Gesamte Platine mit Polygonflächen
- Oberseite mit 3,3 V-Polygonfläche
- Unterseite mit Ground-Polygonfläche



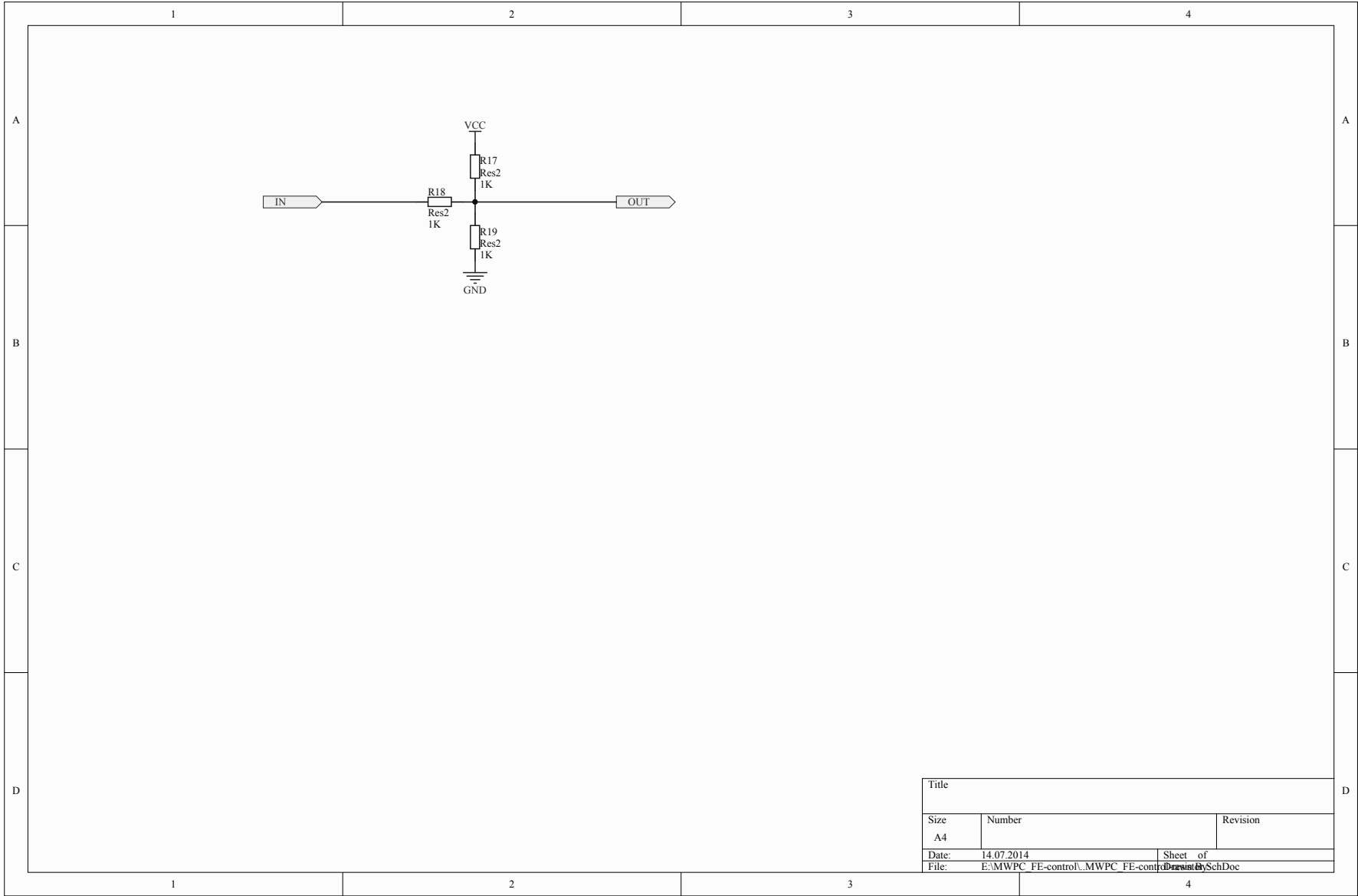
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	14.07.2014	Sheet of
File:	E:\MWPC FE-control\MWPC FE-control	Drawn By:



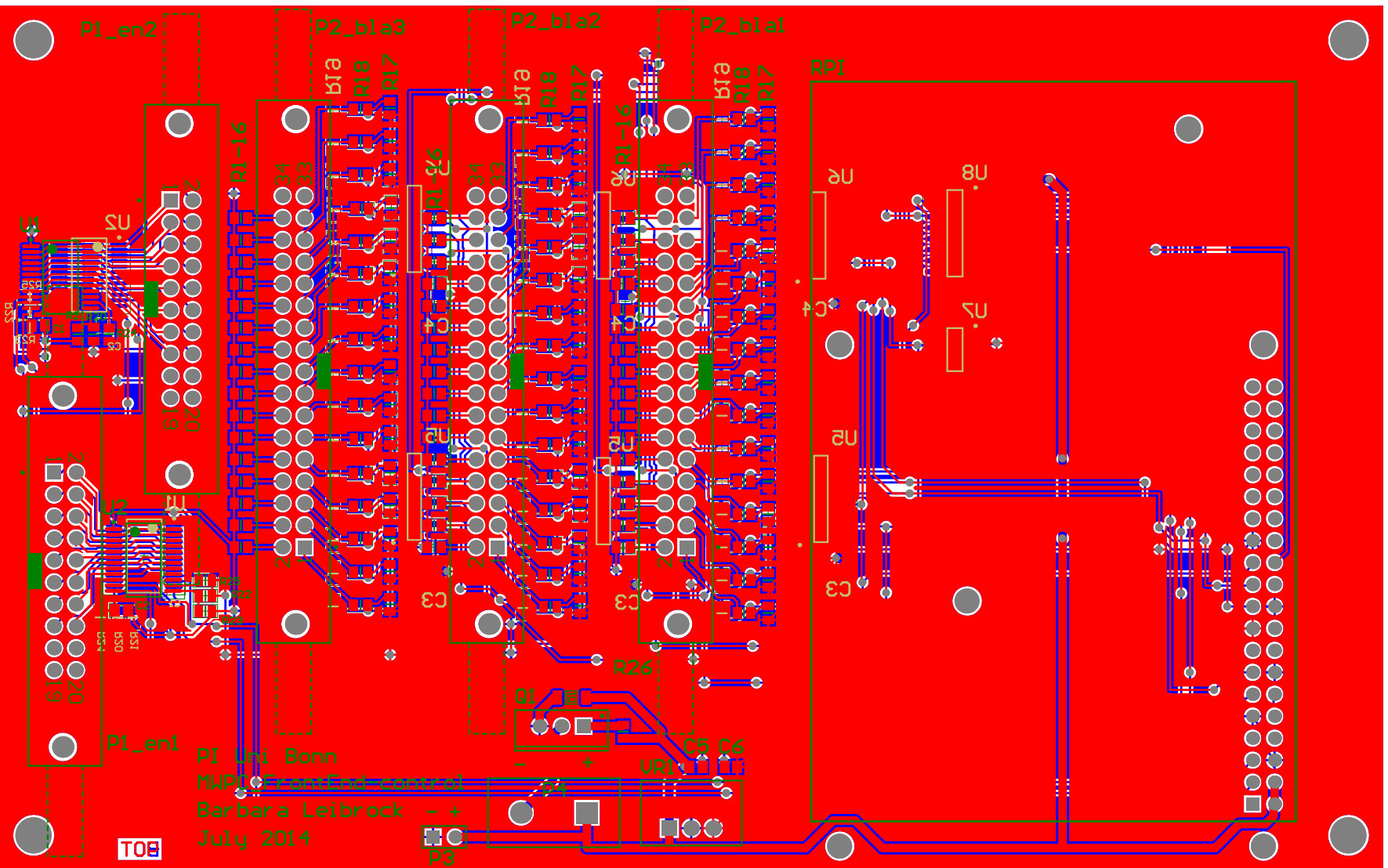
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	14.07.2014	Sheet of
File:	E:\MWPC FE-control\MWPC FE-control\Denholm\BschDoc	

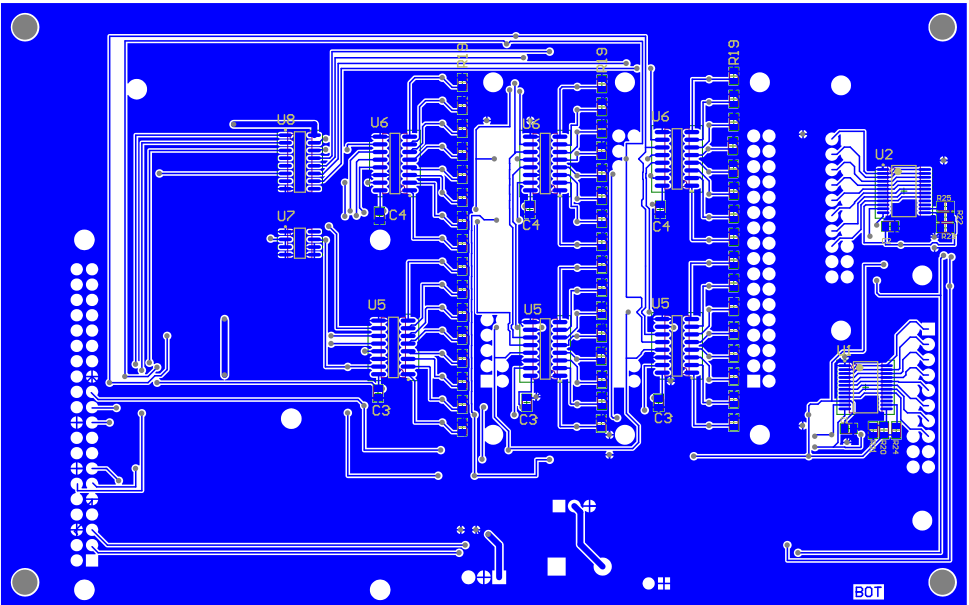


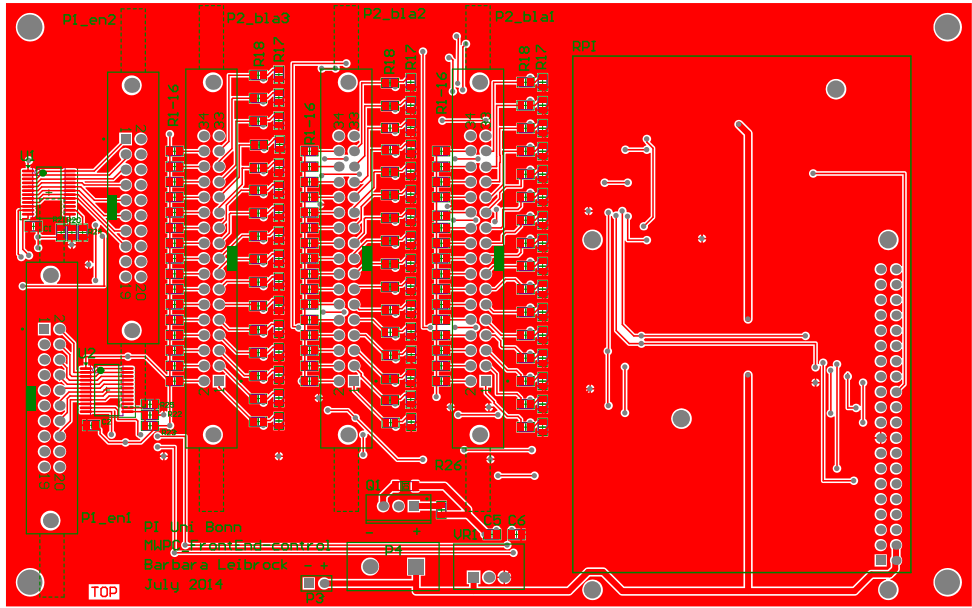
Title		
Size	Number	Revision
Date:	14.07.2014	Sheet of
File:	E:\MWPC FE-control\MWPC FE-control\Hardware-readout.SchDoc	



Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	14.07.2014	Sheet of
File:	E:\MWPC FE-control\MWPC FE-control\Drawings\SchDoc	







Literatur

- [1] *Sonderforschungsbereich 16 - Elektromagnetische Anregung subnuklearer Systeme*, abgerufen am 23.8.2014,
URL: <http://sfb-tr16.physik.uni-bonn.de/vfs/de/startseite/>.
- [2] *Grundriss der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, abgerufen am 3.9.2014,
URL: <http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/index.html>.
- [3] *Informationen zum Aufbau des BGO-OD-Experiments und der zu untersuchenden Physik*, abgerufen am 12.6.2014, URL: <https://bgo-od.physik.uni-bonn.de/>.
- [4] W. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach*, U.S. Government Printing Office, 1994.
- [5] F. Sauli, *Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers*, Lectures given in the Academic Training Programme of CERN 1975-1976, 1977.
- [6] A. Braghieri,
The Project for a new set of 2-Multi Wire Proportional Chambers for the B1 Collaboration, 2009.
- [7] M. Lang, „Einsatz des Datenerfassungssystems ACQU für den DAPHNE-Detektor“, Diplomarbeit: Mainz, 1993.
- [8] *W-Ie-Ne-R AVM16/AVX16*,
16 channel ADC, 160 MHz with features extraction, User's manual V2.0, 2011.
- [9] C. Schmidt, A. Suele, J. Hartmann, U. Thoma u. a.,
Extended Pluggable Objectoriented Root(ified) Analysis (ExPIORA).
- [10] Particle Data Group, „Review of Particle Physics“, *Phys. Rev. D* 86 (2012) 010001.
- [11] *Lothar Miller*, abgerufen am 14.8.2014,
URL: <http://www.lothar-miller.de/s9y/categories/39-Verpolschutz>.
- [12] P. Loughhead, *Tutorial - Getting Started with PCB Design*, abgerufen im Juni 2014,
URL: <http://techdocs.altium.com/display/ADOH/Tutorial+-+Getting+Started+with+PCB+Design>.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundriss der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA	4
2.2	Aufbau des BGO-OD-Experiments	5
3.1	Schematische Zeichnung des grundlegenden Aufbaus einer MWPC	7
3.2	Die MWPC im BGO-Ball	10
3.3	Anordnung der Anodendrähte und Kathodenstreifen und Signalerkennung	11
3.4	Zeichnung zur Berechnung des möglichen Reaktionsbereiches a im Target	13
3.5	Simulationsdaten der invarianten Masse ohne die MWPC	14
3.6	Simulationsdaten der invarianten Masse mit MWPC	15

Tabellenverzeichnis

3.1	Daten zur MWPC im BGO-OD-Experiment	11
3.2	Mögliche Reaktionspositionen im Target für einige Beispielwinkel	13
3.3	Simulierte Verbesserung durch MWPC bei der Errechnung der invarianten Masse . . .	15

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

Bonn,
Datum

.....
Unterschrift