

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Bachelorarbeit

im Studiengang Physik

vorgelegt von

Jonathan Philipp

geboren in Heidelberg

2015

Effizienzanalyse von HV-MAPS

anhand des MuPix-Teleskops

Diese Bachelorarbeit wurde von Jonathan Philipp

ausgeführt am

Physikalischen Institut der Universität Heidelberg

unter der Betreuung von

Herrn Prof. Dr. André Schöning

Effizienzanalyse von HV-MAPS anhand des MuPix-Teleskops:

Im Standardmodell der Teilchenphysik ist der Lepton-Flavour-verletzende Zerfall $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$ mit einem Verzweigungsverhältnis von weniger als 10^{-54} sehr stark unterdrückt. Daher wäre dessen Beobachtung ein klarer Hinweis für Physik jenseits des Standardmodells. Das Mu3e-Experiment wird nach diesem Zerfall mit einer Sensitivität genauer als 10^{-16} suchen. Um dies in einer angemessenen Zeit erreichen zu können, wird ein intensiver Myonenstrahl benötigt, sodass 10^9 Myonen pro Sekunde auf dem Target gestoppt werden und zerfallen. Der Detektor muss eine ausgezeichnete Vertex-, Zeit-, und Impulsauflösung haben um Untergrundprozesse vom Signal zu trennen. Vertex- und Impulsauflösung werden aufgrund der geringen Impulse der Zerfallsprodukte durch Vielfachstreuung limitiert. Daher werden zur Spurrekonstruktion hochspannungsbetriebene monolithische aktive Pixelsensoren (HV-MAPS) verwendet, die sich auf $50\text{ }\mu\text{m}$ dünnen lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Verbesserungen am ersten HV-MAPS basierten Strahlteleskop, dem MuPix-Teleskop, vorgenommen. Mit diesem wurden zwei Teststrahlkampagnen durchgeführt. Die Messdaten dieser Kampagnen wurden analysiert um die Effizienz des neusten HV-MAPS-Prototypen zu bestimmen. Dabei wurden bei geringer Rauschrate von $10\frac{1}{s}$ pro Pixel mittlere Effizienzen von über 98 % für den gesamten Sensorchip ermittelt.

Efficiency Analysis of HV-MAPS by Means of the MuPix Telescope:

In the Standard Model of particle physics the lepton flavour violating decay $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$ is highly suppressed with a branching ratio below 10^{-54} . Hence, the observation of this decay would be a clear sign for physics beyond the Standard Model. The Mu3e experiment is going to search for this decay with a sensitivity of better than 10^{-16} . In order to reach this in a reasonable time, an intensive muon beam is required so that 10^9 muons per second are stopped on a target and decay. The detector needs an excellent vertex, time and momentum resolution to separate background processes from the signal. Due to the low momentum, vertex and momentum resolution are limited by multiple scattering. Therefore, High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors (HV-MAPS) will be used for the track reconstruction, which can be thinned down to $50\text{ }\mu\text{m}$.

In the context of this thesis, improvements were made of the first HV-MAPS based beam telescope, the MuPix Telescope. Two testbeam campaigns were carried out using this telescope. The resulting data was used to analyse the efficiency of the most recent HV-MAPS prototype. At low noise rates of about $10\frac{1}{s}$ mean efficiencies over 98 % for the whole sensor chip were determined.

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung	9
1	Einleitung	11
2	Theorie	13
2.1	Standardmodell der Teilchenphysik	13
2.2	Myonenzerfälle	13
2.3	Vielfachstreuung	15
2.4	Definition von Effizienz und ihres Fehlers	16
3	Das Mu3e-Experiment	17
3.1	Der Mu3e-Detektor	17
4	HV-MAPS	19
II	MuPix-Teleskop	21
5	MuPix-Teleskop	23
5.1	Aufbau	23
5.2	MuPix-Prototypen	23
5.3	Auslese	26
5.4	Weiterentwicklungen	26
III	Effizienzanalyse	29
6	Theorie und Methoden	31
6.1	Spurrekonstruktion	31
6.2	Finden passender Treffer	32
6.2.1	Zeitliche Zuordnung	32
6.2.2	Räumliche Zuordnung	32
7	Teststrahlkampagnen	35
7.1	DESY	35
7.1.1	Aufbau	35
7.1.2	Einstellungen und Auslese	36

7.1.3	Ausrichtung	37
7.1.4	Spurrekonstruktion	37
7.1.5	Festlegung des Zeitfensters und des Suchradius	39
7.1.6	Ergebnisse	42
7.2	MAMI	43
7.2.1	Aufbau	44
7.2.2	Einstellungen und Auslese	44
7.2.3	Ausrichtung	45
7.2.4	Spurrekonstruktion	45
7.2.5	Festlegung des Zeitfensters und des Suchradius	45
7.2.6	Ergebnisse	47
IV	Zusammenfassung und Ausblick	51
8	Zusammenfassung und Ausblick	53
V	Appendix	55
A	DAC-Werte	57
B	Verzeichnisse	59
B.1	Abbildungsverzeichnis	59
B.2	Tabellenverzeichnis	60
C	Literaturverzeichnis	61

Teil I

Einleitung

1 Einleitung

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt zwar alle bekannten Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen, lässt aber noch Fragen offen. Die Gravitation zum Beispiel ist nicht integriert. Daher wird nach Theorien jenseits des Standardmodells gesucht.

Eine Möglichkeit nach neuer Physik zu suchen, besteht darin Zerfälle nachzuweisen, die nach dem Standardmodell verboten bzw. stark unterdrückt sind. Mit der Entdeckung von Neutrinooszillationen wurde nachgewiesen, dass die Leptonenumwandlung zwischen verschiedenen Generationen erlaubt ist. Das Mu3e-Experiment sucht nach dem Lepton-Flavour-verletzenden Zerfall $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$, der im Standardmodell zwar durch Neutrino-Mischung vermittelt werden kann, aber mit einem Verzweigungsverhältnis kleiner 10^{-54} stark unterdrückt ist. Deshalb wäre die Beobachtung dieses Zerfalls ein klarer Hinweis für neue Physik. Die Sensitivität, mit der das Experiment den Zerfall nachweisen will, liegt bei 10^{-16} . Um dies in einer angemessenen Zeit erreichen zu können, sind die Anforderungen an den Detektor sehr hoch. Der Detektor muss über 10^9 Myonenzerfälle pro Sekunde auf dem Target detektieren können und muss eine hohe Impuls- und Vertexauflösung haben, was sich mit hochspannungsbetriebenen monolitischen aktiven Pixelsensoren (HV-MAPS) realisieren lässt. Bei dieser Art von Chip sind Sensor, analoge und digitale Elektronik auf einem Chip integriert. Dadurch, dass sich diese Sensoren auf bis zu $50\text{ }\mu\text{m}$ dünnen lassen, wird die Vielfachstreuung reduziert, die bei Zerfällen mit niedrigen Impulsen, die Vertex- und Impulsauflösung dominiert. Eine Pixeldetektorlage hat somit eine Dicke von ca. 0,1 % einer Strahlungslänge. Außerdem zeichnen sich HV-MAPS durch ihre schnelle Ladungssammlung und Auslese der Pixel aus. Eine hohe Effizienz von über 99 % der Sensoren ist ebenfalls wichtig, weshalb in dieser Arbeit die Effizienz von HV-MAPS-Prototypen genauer analysiert wird. Die Daten für diese Analyse wurden mit Hilfe des MuPix-Teleskops während zwei Teststrahlkampagnen genommen.

2 Theorie

2.1 Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell der Teilchenphysik besteht aus sechs Quarks und sechs Leptonen und deren Antiteilchen [1]. Sowohl Quarks als auch Leptonen sind in drei Generationen angeordnet. Die Komponenten des Standardmodells sind in Abbildung 2.1 veranschaulicht. Die erste Generation besteht aus den Up- und Down-Quarks, dem Elektron (e^-) und dem Elektron-Neutrino (ν_e). Die zweite Generation besteht aus dem Charm- und dem Strange-Quark, dem Myon (μ^-) und dem Myon-Neutrino (ν_μ). Die dritte Generation besteht aus dem Top- und Bottom-Quark, dem Tau (τ^-) und dem Tau-Neutrino (ν_τ). Die Lepton-Flavours der drei Generationen sind L_e , L_μ und L_τ . Im Standardmodell sind die Lepton-Flavours erhalten.

Die Wechselwirkungen zwischen diesen Teilchen wird durch die vier Eichbosonen vermittelt. Das Photon γ überträgt die elektromagnetische Wechselwirkung, die acht Gluonen übertragen die starke Wechselwirkung und die W- und Z-Bosonen übertragen die schwache Wechselwirkung. Gluonen koppeln an Quarks, Photonen an geladene Teilchen und W- und Z-Bosonen an alle Quarks und Leptonen. Das Higgs-Boson, das am LHC entdeckt wurde [2, 3], verleiht dem W- und Z-Boson Masse.

2.2 Myonenzerfälle

Das Myon hat eine Masse von 105,658 MeV und eine mittlere Lebensdauer von 2,197 μs [5]. Wegen seiner kleinen Masse und aufgrund von Ladungserhaltung kann das Myon nur in Elektronen, Neutrinos und Photonen zerfallen. Im erweiterten Standardmodell wird der Zerfall $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$ mit Loop-Diagrammen mit Neutrinooszillation beschrieben (Abbildung 2.2). Da die Masse des W^+ verglichen mit der Massendifferenz der Neutrinos sehr groß ist, ist dieser Zerfall sehr stark unterdrückt und hat ein Verzweigungsverhältnis kleiner als 10^{-54} ($\sim \frac{(\Delta m_\nu^2)^2}{m_W^4}$). Daher wäre die Beobachtung dieses Zerfalls ein klarer Hinweis auf neue Physik jenseits des Standardmodells. Es existieren mehrere Theorien, die ein größeres Verzweigungsverhältnis für diesen Zerfall vorhersagen. Lepton-Flavour-verletzende Zerfälle, die durch Loop-Diagramme beschrieben werden, sind möglich durch supersymmetrische (SUSY) Teilchen im Loop (Abbildung 2.3a). Zusätzlich sind direkte Zerfälle über neue, unbekannte Teilchen, die an Myon und Elektron koppeln, möglich (Abbildung 2.3b).

	Drei Generationen der Materie (Fermionen)				
	I	II	III		
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W[±] W Boson	Eichbosonen
Leptonen					

Abbildung 2.1: Elementarteilchen des Standardmodells [4].

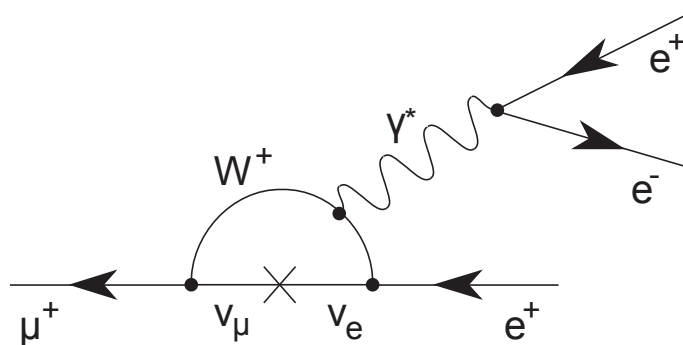


Abbildung 2.2: Feynmandiagramm des Lepton-Flavour-verletzenden Zerfalls $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$ durch Neutrinooszillation.

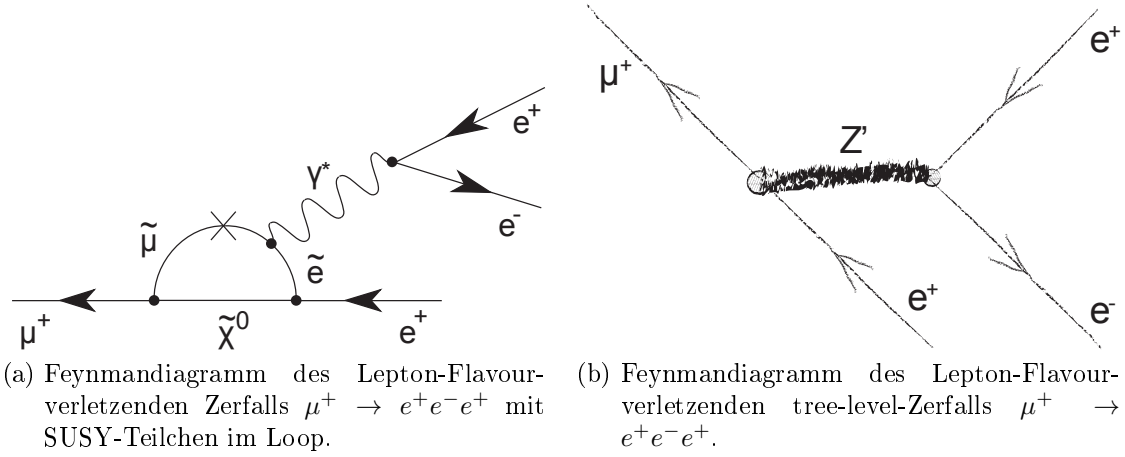


Abbildung 2.3: Feynman-Diagramme des Zerfalls $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$ mit Prozessen jenseits des Standardmodells.

2.3 Vielfachstreuung

Geladene Teilchen werden aufgrund von Coulomb-Streuung am Atomkern beim Durchqueren von Materie gestreut. Für kleine Streuwinkel kann eine Gauß-Verteilung angenähert werden, wobei Θ_{VS} die inneren 98 % der Breite der Verteilung angibt:

$$\Theta_{VS} = \frac{13,6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0,038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right) \right) \quad (2.1)$$

β gibt die Geschwindigkeit der Teilchen in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit an, c die Lichtgeschwindigkeit, p den Impuls, z die Kernladungszahl, x die Dicke des Materials und X_0 die Strahlungslänge [5]. Eine Zeichnung, die die Streuung von Teilchen beim Durchqueren von Materie zeigt, ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Wobei für dünne Schichten die Näherung $y_{\text{plane}} \approx 0$ gemacht werden kann.

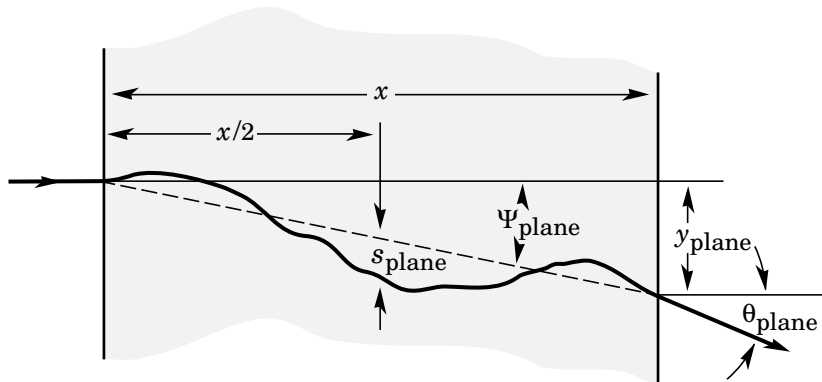


Abbildung 2.4: Zeichnung zur Veranschaulichung der Vielfachstreuung bei kleinen Winkeln[6].

2.4 Definition von Effizienz und ihres Fehlers

Für die Effizienz ϵ gilt:

$$\epsilon = \frac{p}{N} \quad (2.2)$$

p gibt die Anzahl der passenden Ereignisse und N die Anzahl aller Ereignisse an. Für die Berechnung der Effizienzen in dieser Analyse wurde die `TEfficiency` Klasse von `Root` verwendet [7]. Diese verwendet das Bayesianische Verfahren. In diesem wird die Effizienz durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(\epsilon | (p, N))$ angegeben. Diese ist das Produkt aus einer Binomialverteilung $Bin(p | \epsilon, N)$ und einer Betaverteilung $Beta(\epsilon | \alpha, \beta)$:

$$P(\epsilon | (p, N)) = Bin(p | \epsilon, N) \cdot Beta(\epsilon | \alpha, \beta) \quad (2.3)$$

$$= \binom{N}{p} \cdot \epsilon^p (1 - \epsilon)^{N-p} \cdot \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \epsilon^{\alpha-1} (1 - \epsilon)^{\beta-1} \quad (2.4)$$

Die daraus resultierende Verteilung ist eine Betaverteilung mit den Parametern α und β . Für die Bestimmung der Fehler wird das kürzeste Konfidenzintervall der Verteilung bestimmt, in dem 68 % der Werte liegen. Die Grenzen des Intervalls geben die Fehler der Effizienz an.

3 Das Mu3e-Experiment

Das Mu3e-Experiment sucht nach dem Lepton-Flavour-verletzenden Zerfall $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$ mit einer Sensitivität genauer als 10^{-16} [8], welche vier Größenordnungen präziser als das vorherige SINDRUM-Experiment [9] ist. Um das in akzeptabler Zeit erreichen zu können, wird ein Myonenstrahl mit einer Stopp-Rate von $2 \cdot 10^9$ Myonen pro Sekunde benötigt.

3.1 Der Mu3e-Detektor

In Abbildung 3.1 ist der Detektor schematisch dargestellt. Die Myonen werden an einem Mylar-Target in Form eines doppelten Hohlkegels gestoppt und zerfallen in Ruhe. In einem 1 T starken Magnetfeld werden über die gekrümmte Trajektorie der Zerfalls-Elektronen und -Positronen Vertex des Zerfalls und Impuls der Teilchen bestimmt. Die Vertexbestimmung erfolgt mit Hilfe der inneren Pixellagen, die sich nahe dem Target befinden. Die äußeren Pixellagen sorgen für eine gute Impulsauflösung. Um Vielfachstreuung zu minimieren, werden auf $50 \mu\text{m}$ gedünnte HV-MAPS als Pixelsensoren verwendet, die auf $25 \mu\text{m}$ dünner Kapton[®]-Folie geklebt und mit Aluminium-Bonddrähten verbunden sind. Die szintillierenden Fasern in der zentralen Station und die szintillierenden Kacheln in den Recurl-Stationen ermöglichen eine gute Zeitauflösung. Der Faserdetektor wird etwa eine Auflösung von 1 ns haben und der Kacheldetektor eine von etwa 0,1 ns. Gekühlt wird der Detektor mit gasförmigen Helium, was eine hohe Wärmeleitfähigkeit hat und die Vielfachstreuung weiter gering hält.

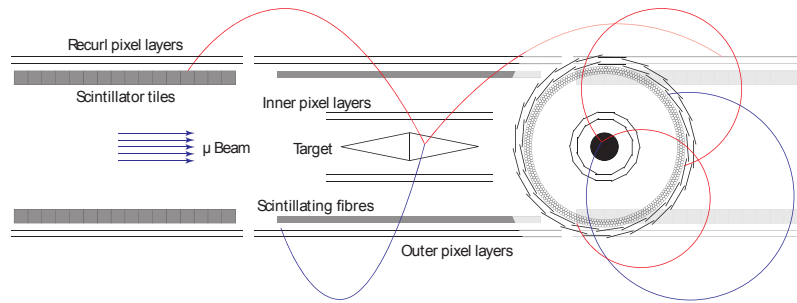


Abbildung 3.1: Schematische Seitenansicht (links) und Querschnitt (rechts) des Mu3e-Detektors.

4 HV-MAPS

Der Spurdetektor basiert auf hochspannungsbetriebenen monolithischen aktiven Pixelsensoren (HV-MAPS). Das Konzept der HV-MAPS wurde erstmals von Ivan Perić [10] vorgeschlagen. Es vereinigt das MAPS-Konzept mit dem der schnellen Ladungssammlung einer Diode. Bei MAPS ist die Ausleseelektronik im Gegensatz zu klassischen Pixelsensoren auf dem Sensor integriert, womit keine zusätzlichen Bump-Bonds benötigt werden. Realisiert wird das HV-MAPS-Konzept in einem kommerziellen HV-CMOS-Prozess durch eine tiefe n-dotierte Wanne in einem p-dotierten Substrat. Diese Diode wird in Sperrrichtung mit einer Spannung zwischen 60 V und 90 V betrieben. Diese Hochspannung führt zu einer Verarmungszone. Geladene Teilchen erzeugen Elektron-Loch-Paare entlang ihrer Flugbahn. Die Ladungsträger in der Verarmungszone werden via Ladungsdrift schnell gesammelt. Die Verarmungszone ist, abhängig von der angelegten Hochspannung, etwa 10 μm dick. Da die Verarmungszone der zum Detektieren von Teilchen relevante Bereich ist, lassen sich die Chips dünnen. Industriell ist das auf 50 μm möglich. Dadurch erhält man für eine Lage des Pixeldetektors eine Strahlungslänge von etwa 0,1 %.

Um eine hohe Effizienz zu erreichen wird ein möglichst großes Detektorvolumen benötigt, was die Zahl der gesammelten Elektronen erhöht. Daher wird die Hochspannung so gewählt, dass die Verarmungszone maximiert wird. Für den in dieser Arbeit verwendete Chip, liegt die Durchbruchspannung bei etwa -93 V. Für die hier präsentierten Messungen wurde eine Hochspannung von -85 V angelegt.

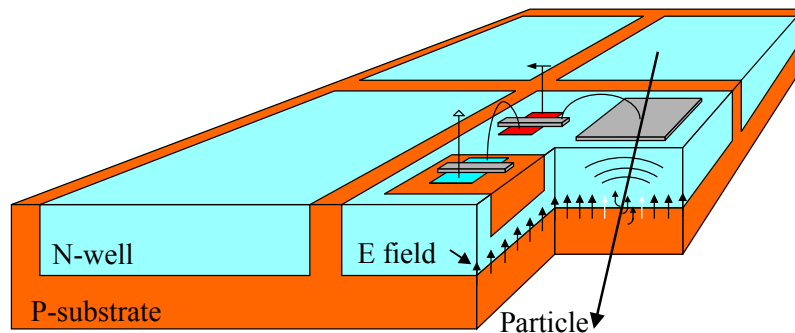


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung von vier HV-MAPS-Pixeln [10].

Teil II

MuPix-Teleskop

5 MuPix-Teleskop

Als Integrationstest und zur Analyse der MuPix-Prototypen wurde ein Strahlteleskop aus MuPix-Sensoren entwickelt [11].

5.1 Aufbau

Das Teleskop besteht aus vier Lagen von MuPix-Chips, die auf Leiterplatten (PCB, Printed Circuit Board) gebondet sind (Abbildung 5.1). Vor und hinter den Pixel-Lagen befinden sich szintillierende Kacheln, die zusätzliche Zeitinformationen liefern. Die PCBs sind auf Halterungen befestigt, die sich auf fünf Mikrometer genau in x-Richtung einstellen lassen, um die Ausrichtung zueinander und relativ zum Strahl zu ermöglichen. Der Rest der Mechanik besteht aus kommerziellen, optomechanischen Bauteilen von Thorlabs®. Die Halterungen sind auf zwei parallel verlaufenden optischen Schienen angebracht, sodass sie sich auch in z-Richtung einstellen lassen. Der minimale Abstand zwischen zwei Lagen beträgt 2,5 cm. Die Schienen wiederum sind auf einer optischen Platte befestigt (Abbildung 5.2). Gesteuert und ausgelesen wird das Teleskop über zwei FPGAs (Field Programmable Gate Array), die sich in einem leistungsstarken PC befinden.

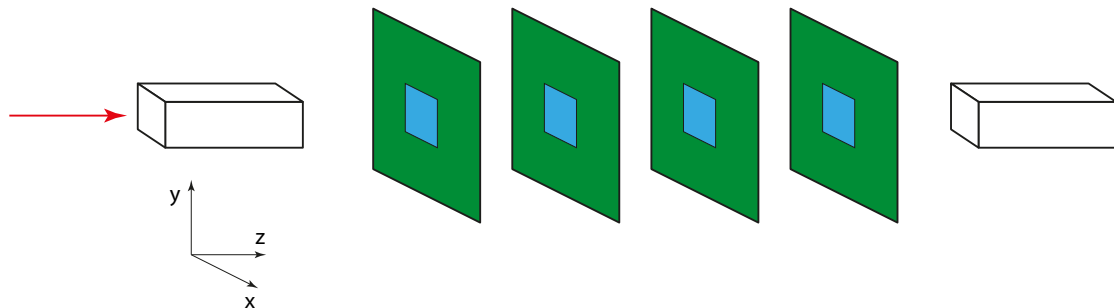


Abbildung 5.1: Konzept des MuPix-Teleskops: In weiß die Szintillatoren, in grün die PCBs und blau die Chips [11].

5.2 MuPix-Prototypen

In der Zeit dieser Arbeit wurden für das Teleskop die HV-MAPS-Prototypen MuPix6 und MuPix7 verwendet. Abgesehen von der zusätzlichen seriellen Auslese des MuPix7 unterscheiden sich die Sensoren nicht. Daher wird hier nur auf den MuPix6 [12] weiter eingegangen. Der Chip besteht aus 32 mal 40 Pixeln, die eine Größe von 102 μm

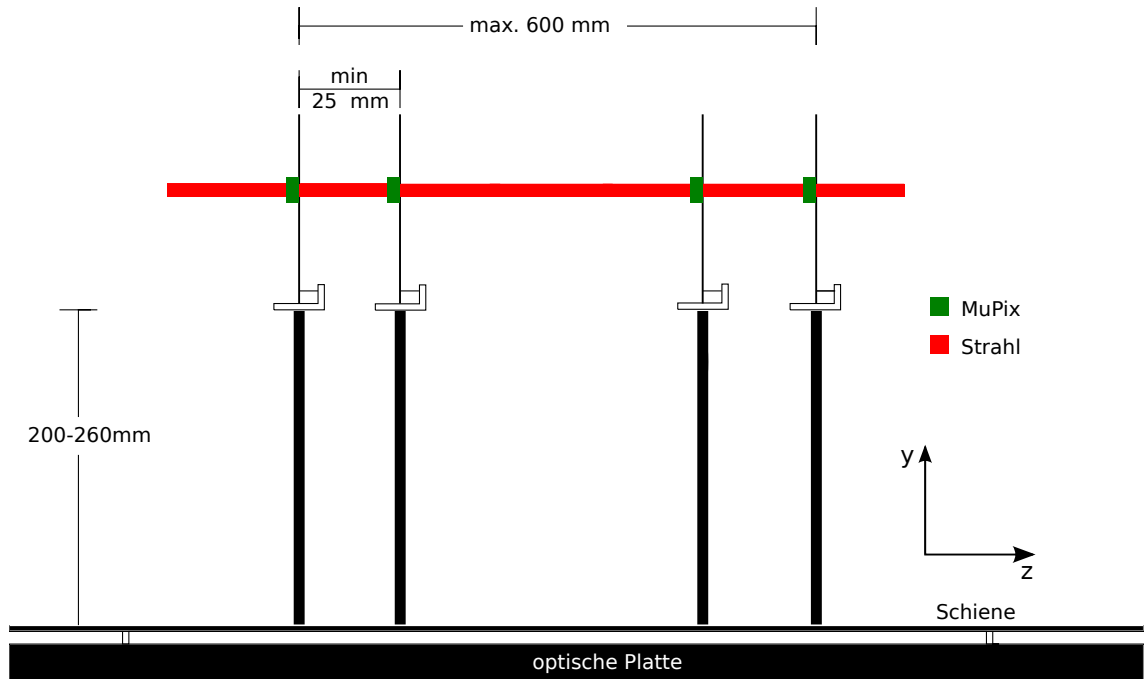


Abbildung 5.2: Übersicht über den mechanischen Teil des Teleskops [11].

mal $80\text{ }\mu\text{m}$ haben. Der Aufbau der Elektronik des Chips ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die deponierte Ladung an der Sensordiode wird an einem Kondensator gesammelt und von dem ladungsempfindlichen Verstärker (CSA, Charge Sensitive Amplifier) verstärkt. Durch eine Injektion an einem weiteren Kondensator kann das Sensorsignal simuliert werden. Von einem Source-Folger wird das Signal in die Peripherie getrieben. Dort wird das Signal von einer zweiten Verstärkerstufe verstärkt. Ein CR-Filter lässt nur schnelle Signale durch. Dadurch wird das Ladungssignal von den anderen Strömen auf dem Chip entkoppelt. Da das Signals an der zweiten Verstärkerstufe invertiert wird, wird am Komparator ein digitales Ausgangssignal dann erzeugt, wenn die Spannung unter einer bestimmten Schwelle liegt. Durch einen Tune DAC lässt sich die Schwelle für jedes Pixel individuell fein justieren. Um die Charakteristiken des Chips anzupassen, lassen sich durch DACs die Verstärkung des CSAs, die Stärke des Leitungs-Treibers und die Signalformung ändern. Aus Vergleichsgründen befinden sich noch vier Spalten von Pixeln ohne zweite Verstärkerstufe auf dem Chip (Abbildung 5.4). Diese Art der Pixel wurde bei dem Vorgängermodell MuPix4 [13] verwendet.

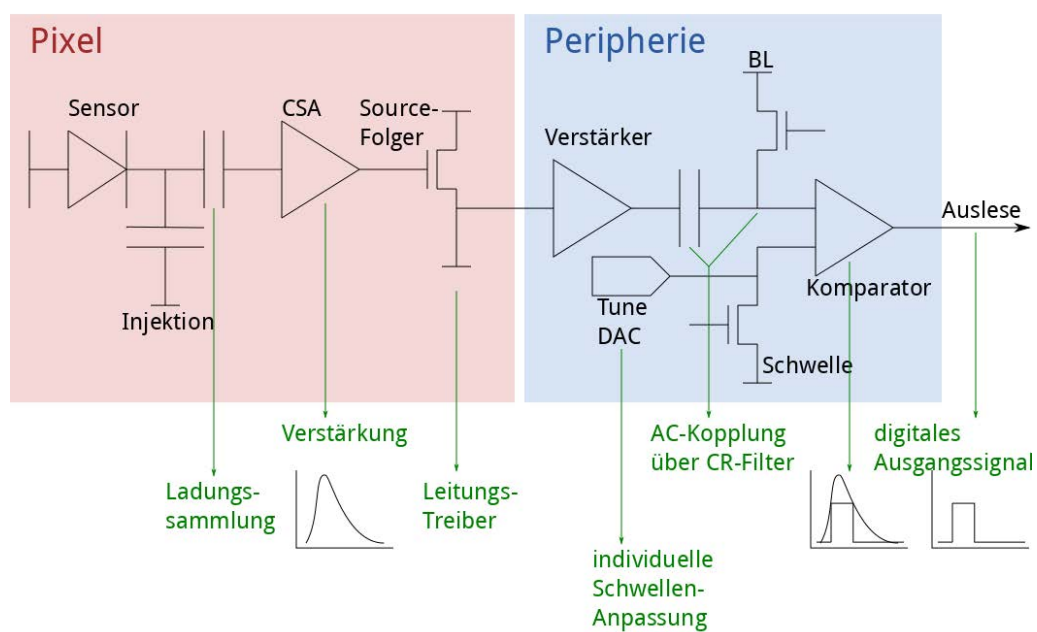


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der analogen Elektronik auf den MuPix-Prototypen [14].

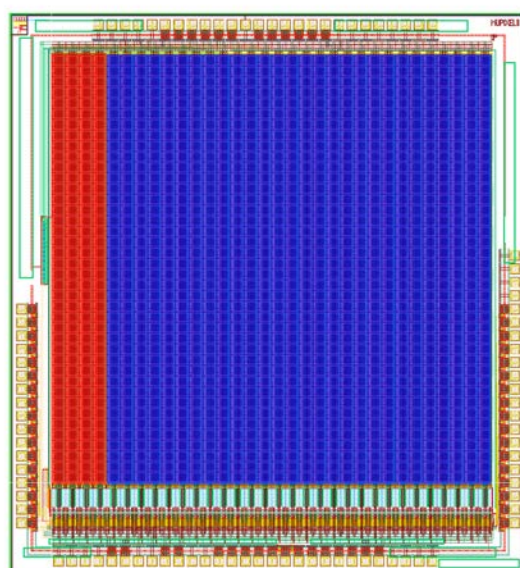


Abbildung 5.4: MuPix6-Chip-Layout. In rot sind die Pixel mit einer Verstärkerstufe dargestellt und in blau Pixel mit zwei Verstärkerstufen. [12].

5.3 Auslese

Die Struktur der Datennahme des Teleskops ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Die vier Chips werden durch zwei FPGAs gesteuert und ausgelesen. Die Steuerung erfolgt über eine graphische Benutzeroberfläche am PC (Abbildung 5.6). Die Basistaktfrequenz des FPGAs ist auf 50 MHz eingestellt. Diese kann durch einen Taktvervielfacher auf 400 MHz erhöht werden. Dieser schnelle Takt wird verwendet um einen 48-Bit-Zähler hochzuzählen, von dem 8 Bit als Zeitstempel an den Chip geschickt werden. Man kann festlegen, welche 8 der unteren 24 Bits dafür verwendet werden. Die FPGAs leiten die Daten via PCI Express an den PC weiter, wo sie sortiert werden und erste Ergebnisse direkt im Monitoring angezeigt werden.

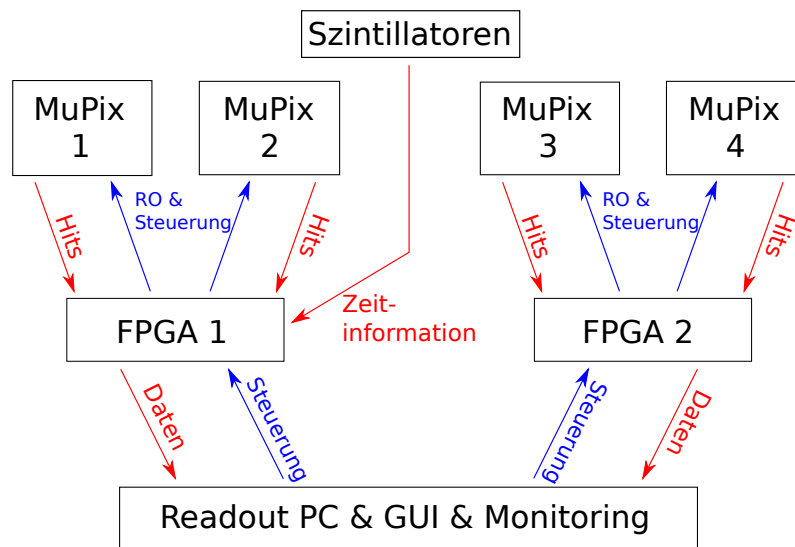


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung des Auslesesystems des Teleskops (adaptiert aus [11]).

5.4 Weiterentwicklungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in der Software des Teleskops für die Speicherallokation ein Ringpuffer eingeführt. Dadurch, dass erforderlicher Speicher nicht mehr vom dynamischen Speicher angefordert werden muss, wurde die Auslesegeschwindigkeit etwa verdoppelt. Die maximale Ausleserate beträgt nun ca. 4 Millionen Treffer pro Sekunde, was einer Spurrate von 1 MHz entspricht. Außerdem werden nun die Füllstände der Warteschlangen der einzelnen Threads in der graphischen Benutzeroberfläche angezeigt. Zudem wird, um das Sortieren der Daten nach der Auslese einfacher zu machen, die Auslese der beiden FPGAs synchronisiert. Das bedeutet, dass beide FPGAs die Chips zu gleichen Zeiten auslesen, statt wie bisher nur gleich lange Wartezeiten nach der Auslese zu haben. Dadurch haben die Datenpakete beider FPGAs die gleiche Zeit und können leichter einander zugeordnet werden. Mit

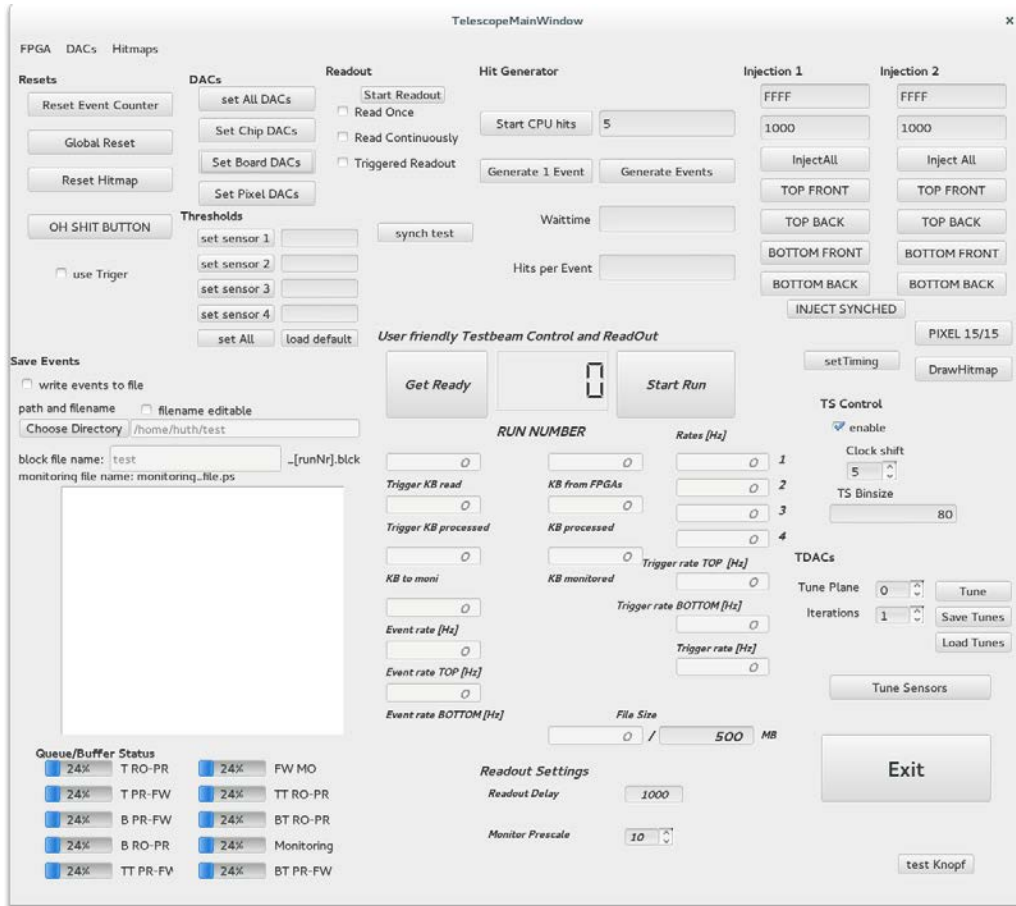


Abbildung 5.6: Graphische Benutzeroberfläche der MuPix-Teleskop-Software

dem neuen PCB [15], das für den MuPix7 entwickelt wurde, lassen sich nun auch für die Steuerung der Chips SCSI III-Kabel verwenden, welche eine bessere Signalqualität als die bis dahin verwendeten Flachbandkabel haben. Die bessere Signalqualität ergibt sich unter anderem daraus, dass die SCSI III-Kabel ein geringes Übersprechen und eine schnelle Signalübertragung haben.

Teil III

Effizienzanalyse

6 Theorie und Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Effizienzen von HV-MAPS-Prototypen betrachtet. Dafür wurden Spuren durch drei Lagen des MuPix-Teleskops rekonstruiert und auf eine vierte Lage (Prüfling) extrapoliert. Dann wurde überprüft, ob der Prüfling in einem bestimmten zeitlichen und räumlichen Bereich um die extrapolierte Spur einen Treffer gesehen hat. Am Ende wurden alle Treffer, die einer Spur zugeordnet werden konnten, durch die Gesamtzahl der Spuren geteilt.

6.1 Spurrekonstruktion

Für die Rekonstruktion der Spuren wurde ein kartesisches Koordinatensystem gewählt, bei dem die z-Achse parallel zum Teilchenstrahl verläuft und die x- und y-Achse parallel zu Spalte und Reihe der Chips. Da für die Analyse Messdaten mit 1 GeV bzw. 5 GeV Elektronen verwendet wurden, wurde die Streuung an den Lagen für den Fit nicht berücksichtigt. Daher wurde als Spurverlauf eine Gerade angenommen:

$$\vec{x}(z) = \vec{x}_0 + \vec{a} \cdot z \quad (6.1)$$

$\vec{x}(z)$ ist ein zweidimensionaler Vektor, der die x- und y-Position in Abhängigkeit von der z-Position angibt, $\vec{x}_0$ gibt die Anfangsposition der Spur an und $\vec{a}$ die Steigung der rekonstruierten Spur. Die Passgenauigkeit einer Spur zu den Daten wird durch das χ^2 angegeben, das auf diese Weise definiert ist:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - (x_0 + a_x \cdot z_i))^2}{\sigma_{x_{m_i}}^2} + \frac{(y_i - (y_0 + a_y \cdot z_i))^2}{\sigma_{y_{m_i}}^2} \right) \quad (6.2)$$

Wobei x_i und y_i für die x- und y-Komponente des Treffers stehen, n für die Anzahl der Lagen und σ_x und σ_y für die Pixelauflösungen. Für diese gilt:

$$\sigma_x = \frac{\text{Pixelbreite}}{\sqrt{12}} \quad \sigma_y = \frac{\text{Pixellänge}}{\sqrt{12}} \quad (6.3)$$

Der Abstand von Treffer zu Spur wird als Residuum bezeichnet:

$$Res_x = x_i - (x_0 + a_x \cdot z_i) \quad Res_y = y_i - (y_0 + a_y \cdot z_i) \quad (6.4)$$

Dabei geben Res_x die Residuen in x-Richtung und Res_y die Residuen in y-Richtung an. Je kleiner die Residuen sind, desto besser passt eine Spur zu den Daten.

Um die Parameter des Fits zu bestimmen wird der minimale Wert für χ^2 ermittelt. Dafür setzt man die partiellen Ableitungen nach den Komponenten von $\vec{a}$ und $\vec{x}_0$

der Gleichung 6.2 gleich null. Daraus resultiert ein analytisch lösbares lineares Gleichungssystem, dessen Lösungen die Fitparameter bilden. Durch Kombinatorik aller Treffer, ohne Zulassen von Doppelnutzung desselben Treffers, werden alle möglichen Spuren gebildet. Aus diesen Spuren werden diese für die weitere Analyse ausgewählt, welche ein reduziertes χ^2 kleiner einem gewissen Wert haben, wobei für das reduzierte χ^2 gilt:

$$\chi_{red}^2 = \frac{\chi^2}{A.d.F.} \quad (6.5)$$

A.d.F. steht für die Anzahl der Freiheitsgrade. Hierbei gilt zu beachten, dass Vielfachstreuung bei der Berechnung von χ^2 nicht beachtet wird und somit das hier verwendete χ^2 nicht der mathematisch korrekten Definition entspricht.

6.2 Finden passender Treffer

Es wird der Schnittpunkt der Fit-Geraden mit der Ebene gebildet, in der der Prüfling liegt. Um diesen Schnittpunkt herum wird nach einem passenden Treffer gesucht, der der Spur zugeordnet werden kann. Um feststellen zu können, ob ein Treffer zu der Spur passt, wird geprüft, ob er in einem bestimmten Zeitfenster und in einem bestimmten räumlichen Suchfenster um die Spur herum liegt. Dadurch wird auch die Fehlzuordnung von Rausch-Treffern reduziert. Eine Veranschaulichung ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

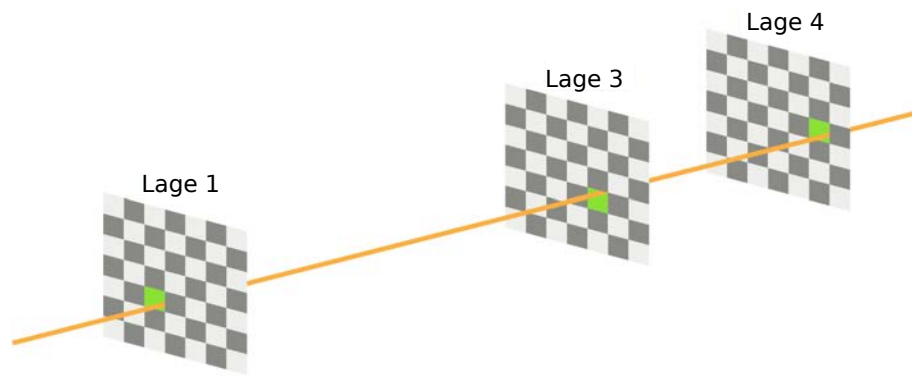
6.2.1 Zeitliche Zuordnung

Um die Zeit des Treffers auf dem Prüfling mit der Zeit der Spur vergleichen zu können, wurde der Mittelwert der Zeiten der drei Spurtreffer ermittelt. Dann wurde die Differenz der Zeit des zu untersuchenden Treffers des Prüflings und der gemittelten Spurzeit berechnet. Diese Differenz darf nicht größer als ein gewisser Wert sein, damit der Treffer der Spur zugeordnet wird. Durch diese Bedingung, wird die Treffermultiplizität möglichst klein gehalten. Damit wird verhindert, dass Pixel aufgrund von Rauschen der Spur zugeordnet werden. Die maximal erlaubte Zeitdifferenz wird im jeweiligen Kapitel der Teststrahlkampagnen genauer besprochen.

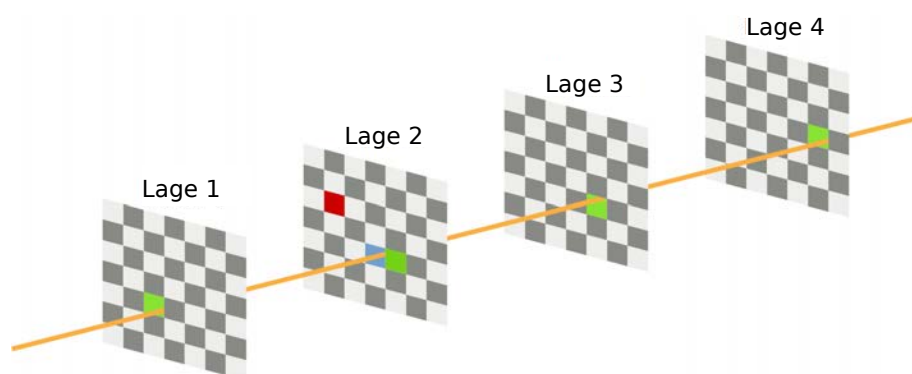
6.2.2 Räumliche Zuordnung

Das räumliche Suchfenster für die Analyse wurde kreisförmig gewählt. Wenn in diesem Kreis ein getroffenes Pixel liegt, wird dieses der Spur zugeordnet.

Die Rohdaten, die das Teleskop erzeugt, werden bei der Digitalisierung so umgewandelt, dass die Koordinaten eines Treffers dem Mittelpunkt des Pixels entsprechen. Bedingt durch die Größe und Ausrichtung der Pixel werden die Spuren auf den Prüfling in diskreten Abständen von $10\text{ }\mu\text{m}$ in x und $8\text{ }\mu\text{m}$ in y extrapoliert. Da jedes Pixel, das von dem Suchkreis um den extrapolierten Punkt geschnitten wird, als



(a) Rekonstruktion einer Spur durch drei Lagen [16].



(b) Finden eines zur Spur passenden Treffers auf dem Prüfling [16].

Abbildung 6.1: Veranschaulichung der Zuordnung von Treffern zu Spuren.

möglicher passender Treffer der Spur zugeordnet wird, wurden folgende vier Fälle bei der Suche unterschieden, die in der hier angegebenen Reihenfolge abgefragt werden um möglichst effizient bei der Berechnung zu sein:

1. Wenn der Abstand zwischen Mittelpunkt des Treffers und extrapolierte Spurposition kleiner als der Suchradius ist, wird der Treffer dieser Spur zugeordnet.
2. Wenn der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Treffers und dem extrapolierten Punkt größer ist als der Suchradius plus die halbe Pixeldiagonale, wird der Treffer als nicht passend gezählt.
3. Der Suchradius befindet sich komplett in dem zu untersuchenden Pixel. Dieser Fall muss bei sehr kleinen Suchradien berücksichtigt werden. Dafür werden die Abstände der x-Werte und der y-Werte von Treffer und extrapoliertem Spurpunkt betrachtet. Um als passend gewertet zu werden, müssen beide Abstände kleiner oder gleich der Hälfte der jeweiligen Seite des Pixels sein: $d_x \leq \frac{x_p}{2}$ und $d_y \leq \frac{y_p}{2}$.
4. Es wird nach Schnittpunkten des Suchkreises mit den vier Seiten des Pixels gesucht. Wenn mindestens eine Seite vom Kreis geschnitten wird, wird dieser Treffer als passend gewertet.

In Abbildung 6.2 sind die vier Fälle graphisch dargestellt. Die Größe des Suchradius muss bei jeder Teststrahlanalyse neu gewählt werden, da er je nach Größe von Θ_{VS} angepasst werden muss.

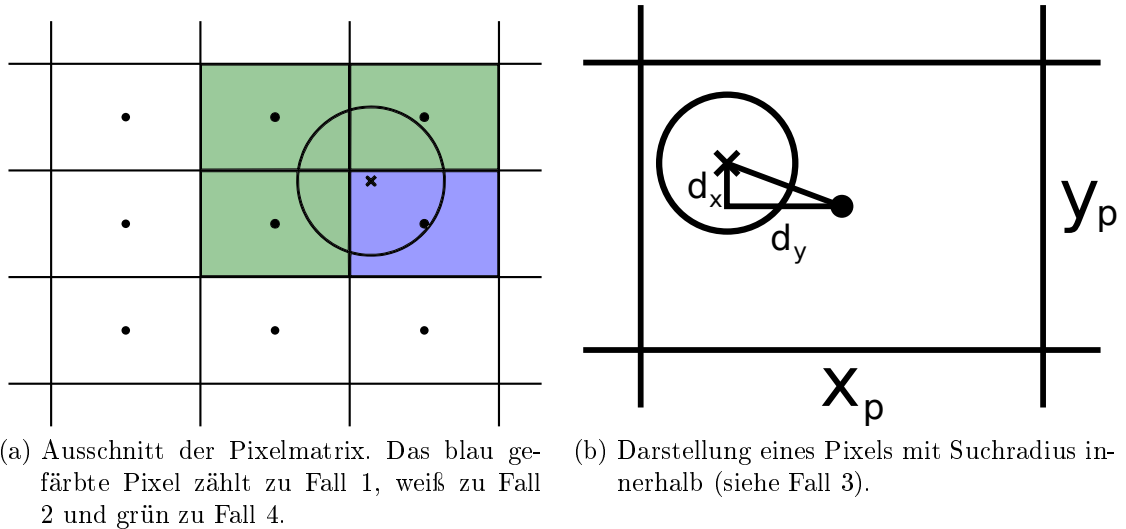


Abbildung 6.2: Ausschnitt der Pixelmatrix zur Veranschaulichung der räumlichen Zuordnung von Treffern zu Spuren.

7 Teststrahlkampagnen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Effizienzen von MuPix-Prototypen mit dem MuPix-Teleskop für zwei Teststrahlkampagnen analysiert. Eine Kampagne fand am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg (Deutschland) statt und eine am Mainzer Mikrotron (MAMI) in Mainz (Deutschland). In beiden Kampagnen wurden MuPix6-Prototypen als Referenz und MuPix7-Prototypen als Prüfling verwendet.

7.1 DESY

Die Teststrahlkampagne am DESY fand vom 01.03.2015 bis 08.03.2015 am Messplatz T21 statt. Eine Kohlenstofffaser im Strahl des Synchrotron DESY II erzeugt Bremsstrahlung, welche auf eine Metallplatte trifft. Durch Paarbildung entstehen an der Metallplatte Elektronen und Positronen. Ein Magnet trennt diese Elektronen und Positronen auf (siehe Abbildung 7.1). Die Energie der Elektronen bzw. der Positronen lässt sich zwischen 1 GeV und 6 GeV einstellen. Während die Messungen durchgeführt wurden, hatte der Strahl eine Energie von 5 GeV.

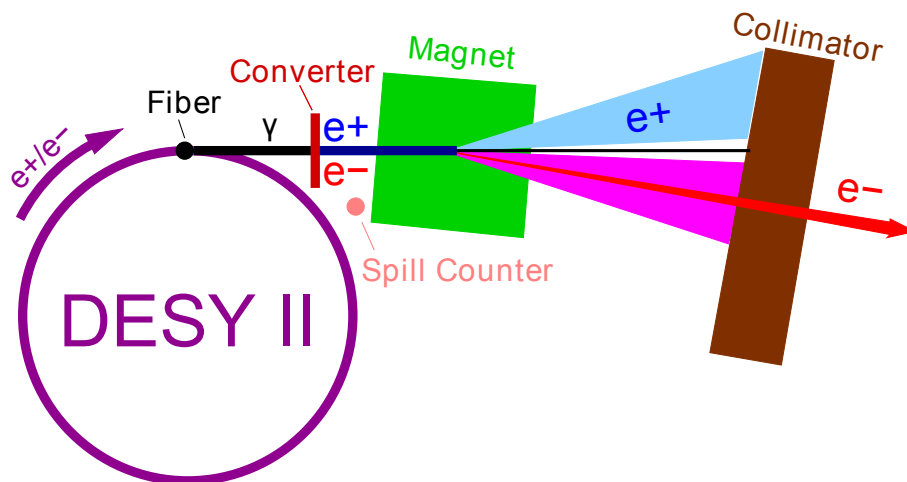


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des Teststrahls am DESY [17].

7.1.1 Aufbau

Der Prüfling im Teleskop war ein 250 μm dicker MuPix7-Chip und befand sich in der zweiten Lage. Auf allen anderen Lagen befanden sich 250 μm dicke MuPix6-Chips.

Alle Chips waren auf 25 μm dicker Kapton[®]-Folie geklebt und mit dieser auf den PCBs angebracht, welche an der Stelle des Chips eine Aussparung hatten, sodass der Strahl nur an den Chips und an der Kapton[®]-Folie streuen konnte. Dies entspricht einer relativen Strahlungslänge $\frac{x}{X_0}$ von etwa 2,7 ‰. Das Teleskop war auf einem xy-Tisch hinter dem in dem Messplatz T21 befindlichen EUDET-Teleskop aufgebaut. Die Abstände der Lagen relativ zur ersten sind in Tabelle 7.1 aufgelistet.

Lage 1	Lage 2	Lage 3	Lage 4
0,00 cm	6,49 cm	13,03 cm	19,47 cm

Tabelle 7.1: Abstände der Lagen im Bezug zu Lage 1.

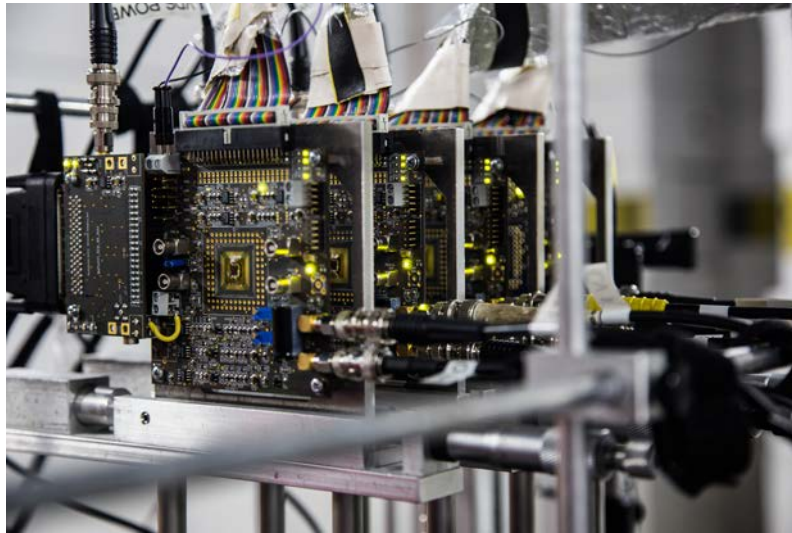


Abbildung 7.2: Die vier Lagen des MuPix-Teleskops.

7.1.2 Einstellungen und Auslese

Im Anhang A sind die verwendeten DAC-Werte der Chips aufgelistet. Während der Messungen war an den Chips eine Hochspannung von -85 V angelegt. Die Zeitstempel der Treffer waren so eingestellt, dass sie alle 80 ns hochzählten. Die Messungen wurden in 500 MB großen Dateien auf die Festplatten des Auslese-Computers geschrieben. Die Auslese des Teleskops lief stabil und war auf 2 MHz Trefferrate auf dem Prüfling limitiert. Die Spurrate lag im 1 Hz-Bereich. In Abbildung 7.3b ist die Korrelation der Zeitstempel zweier Lagen aufgetragen. Da beide Lagen von verschiedenen FPGAs ausgelesen wurden, bedeutet dies, dass die FPGAs synchron waren. Die Baseline aller verwendeten Chips war auf 0,8 V eingestellt.

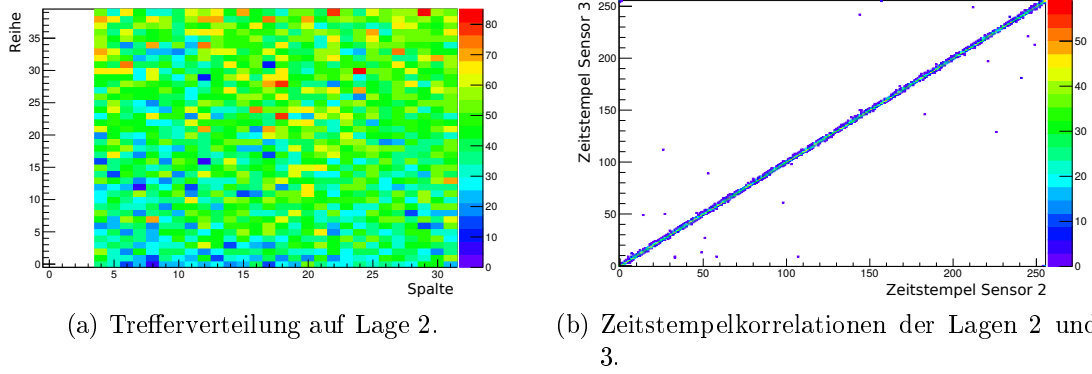


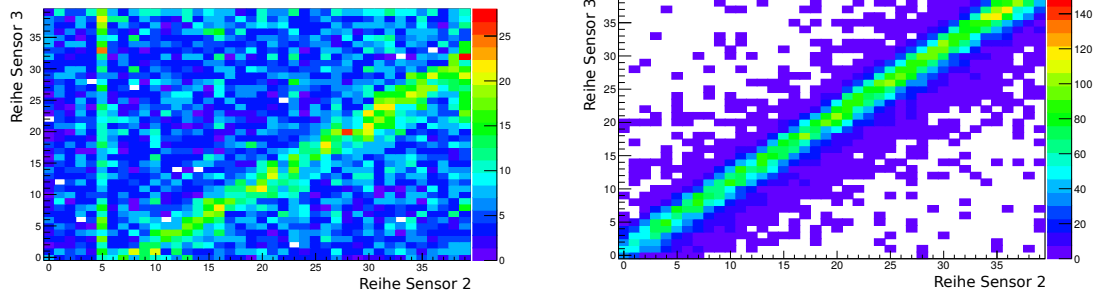
Abbildung 7.3: Trefferverteilung und Zeitstempelkorrelationen.

7.1.3 Ausrichtung

Bevor die Messungen begonnen wurden, wurde das MuPix-Teleskop mit Hilfe des Online Monitorings auf etwa $100\text{ }\mu\text{m}$ genau ausgerichtet. Dafür wurde eine Zeit lang gemessen und anhand der Korrelationsgraphen, die in Echtzeit erstellt werden, die relative Verschiebung in x- und y-Richtung ermittelt. Beispiele für solche Korrelationsgraphen sind in Abbildung 7.4 dargestellt. Für kurze Zeit wurde dann der Kollimator geschlossen, sodass am Teleskop im Messbereich die Lagen mechanisch korrigiert werden konnten. Für die Spurrekonstruktion und Effizienzberechnung wurden die Lagen nachträglich in den Daten nochmals genauer ausgerichtet. Die Ausrichtung wurde für jede Messung durchgeführt. Das Ergebnis dieser Ausrichtung ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Alle Lagen waren auf $6\text{ }\mu\text{m}$ genau ausgerichtet und damit genauer als die Pixelauflösung von $24\text{ }\mu\text{m}$.

7.1.4 Spurrekonstruktion

Bevor die Spuren durch die drei Lagen rekonstruiert wurden, wurden die Hotpixel dieser Lagen entfernt. Als Hotpixel wurden alle Pixel gewertet, die mehr als 3 % der Gesamttreffer hatten. Jede Lage hatte weniger als fünf Hotpixel. Die Spuren wurden, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, rekonstruiert. Für den Spurfitt wurden drei Lagen verwendet. Um einen geeigneten maximalen χ^2_{red} -Wert einer Spur zu bestimmen, wurde für eine Messung bei gleichem Schwellwert die Effizienz und Anzahl aller Spuren gegen verschiedene χ^2_{red} -Werte aufgetragen (Abbildung 7.6). Die Effizienzen in dem Graphen bleiben hier unter 65%, da eine Messung mit hoher Schwelle hierfür ausgewählt wurde, um Rauschen zu unterdrücken. Man kann erkennen, dass mit größer werdendem χ^2_{red} -Wert mehr Spuren gebildet werden können und die Effizienz abnimmt. Mehr Spuren werden deshalb gebildet, da bei größerem χ^2_{red} auch schlechtere Fits zugelassen werden. Das bedeutet, dass auch Treffer für den Fit verwendet werden, die weiter gestreut wurden. Da der Suchradius bei diesen Berechnungen gleich gelassen wurde, können bei schlechteren Fits weniger Treffer der Spur zuge-



- (a) Korrelationen der jeweiligen Reihen von Sensor 2 und 3 bei einer Messung, bei der beide Lagen noch nicht ausgerichtet waren. Der senkrechte Streifen in Reihe 5 des zweiten Sensors liegt an stark rauschenden Pixeln in dieser Reihe.
- (b) Korrelationen der jeweiligen Reihen von Sensor 2 und 3 bei einer Messung, nachdem die Lagen mechanisch ausgerichtet worden waren.

Abbildung 7.4: Korrelationen zweier Lagen vor und nach der mechanischen Ausrichtung bei unterschiedlichen Schwellwerten.

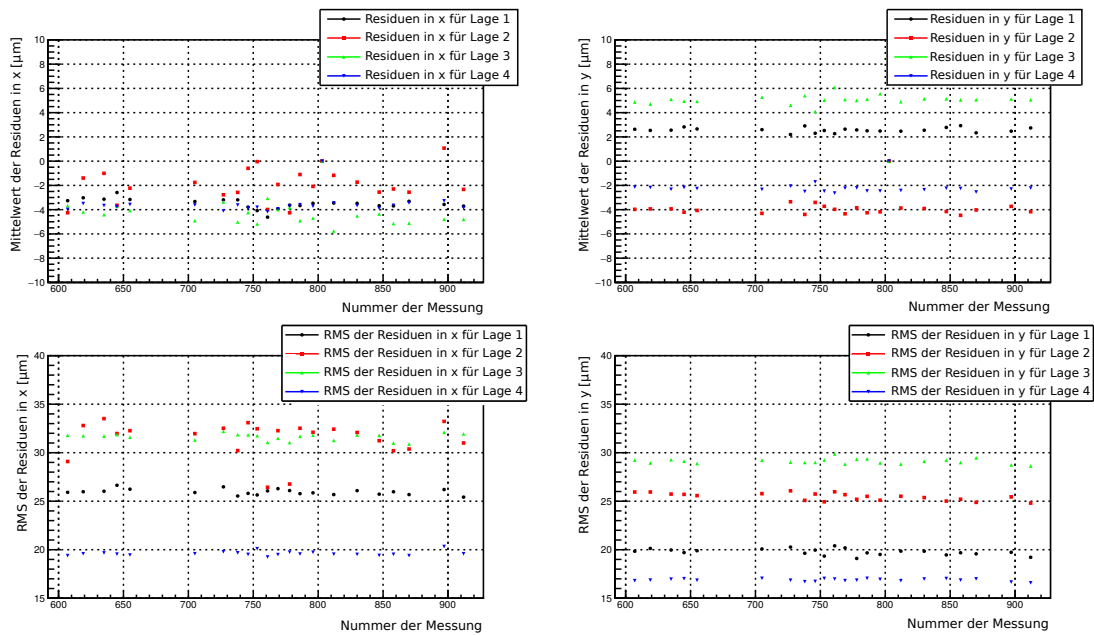


Abbildung 7.5: Residuen und RMS aller Lagen für x- und y-Richtung [18].

ordnet werden. Um einen guten Kompromiss zwischen hoher Effizienz und genügend Statistik zu erhalten wurde als χ^2_{red} -Wert für alle weiteren Berechnungen ein Wert von zehn gewählt.

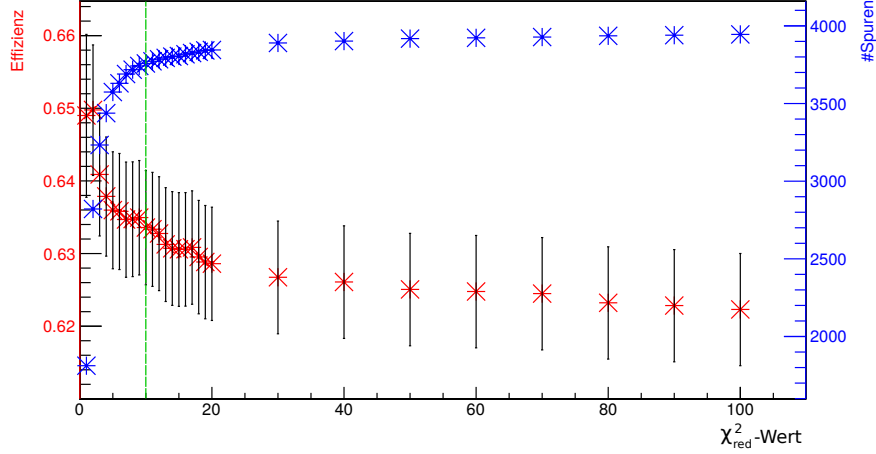


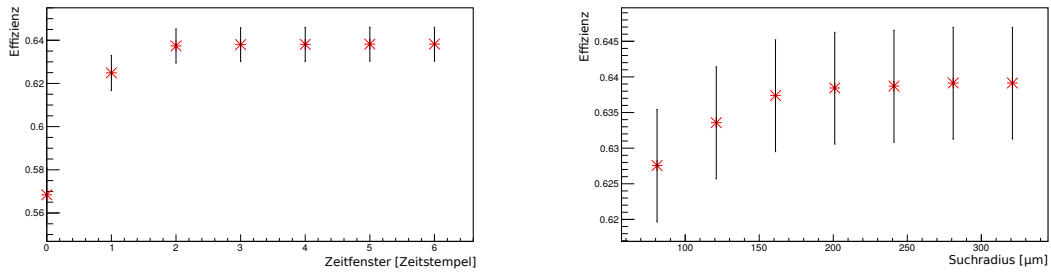
Abbildung 7.6: Effizienz des Prüflings in rot und Anzahl der durch drei Lagen rekonstruierten Spuren in blau gegen verschiedene χ^2_{red} -Werte aufgetragen bei einem Schwellwert von 0,65 V. Grün markiert ist der χ^2_{red} -Schnitt, der für die Analyse genutzt wurde.

7.1.5 Festlegung des Zeitfensters und des Suchradius

Um zu sehen wie sich die Wahl des Zeitfensters auf die Effizienz auswirkt, wurden Effizienzen für verschiedene Zeitfenster berechnet. Ein Zeitstempel eines Treffers hat eine Bingröße von 80 ns. In Abbildung 7.7a wurden die Effizienzen gegen verschiedene Zeitfenster aufgetragen. Die verwendete Messung lief bei hoher Schwelle und hatte ausreichend Statistik. Deshalb eignete sie sich gut für solche Analysen. Schon ab einem Zeitfenster von zwei Zeitstempelbins ist keine Verbesserung der Effizienz mehr zu erkennen. Und da die Treffermultiplizitäten (Abbildung 7.8) bei einem Zeitfenster von zwei Zeitstempelbins noch unter 1,6 liegen, wurde für alle weiteren Berechnungen dieses Zeitfenster gewählt, was einem maximal erlaubten Zeitunterschied von 240 ns entspricht.

Die Wahl des Suchradius hängt stark von der Streuung des Strahls an den Lagen des Teleskops ab. Da der Strahl am DESY eine Energie von 5 GeV hatte, war die Streuung der Teilchen gering ($\Theta_{VS} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ rad). Um einen sinnvollen Wert als Suchradius festlegen zu können, wurde bei demselben Messlauf die Effizienz für verschieden große Suchradien berechnet und in einen Graphen gezeichnet (siehe Abbildung 7.7b). Für größere Suchradien als 161 μm ändert sich die Effizienz nur noch im 0,1% Bereich. Außerdem wurden für diese Messung Berechnungen bei großem Suchradius von 400 μm durchgeführt und geschaut, wie weit die Treffer, die einer

Spur zugeordnet wurden, von dieser entfernt liegen. Dann wurden die Anzahl der zugeordneten Treffer und die Anzahl der Spuren, zu denen keine Treffer zugeordnet werden konnten, gegen den Abstand zwischen extrapolierte Spur und passendem Treffer aufgetragen (Abbildung 7.9a). Dabei wurde immer der Treffer als passend befunden, der am nächsten an der Spur lag und in dem gewählten Zeitfenster von 240 ns lag. Bei der Vergrößerung des Graphen (Abbildung 7.9b) kann man erkennen, dass bei einem Radius größer als 160 μm kaum noch zusätzliche passende Treffer gefunden werden. Um die Auswirkung der unterschiedlich großen Suchradien auf die Effizienzen bei verschiedenen Schwellen sehen zu können, wurde in Abbildung 7.10 die Effizienz für verschieden große Suchradien gegen den Schwellwert aufgetragen. Man sieht, dass die Effizienzen ab einem Suchradius von 161 μm nahezu identisch sind. Daher wurde für die weiteren Berechnungen ein Suchradius von 161 μm verwendet.



- (a) Effizienz aufgetragen gegen verschiedene Zeitfenster bei einem Schwellwert von 0,65 V und einem Suchradius von 161 μm . (b) Effizienz aufgetragen gegen verschiedene Suchradien bei einem Schwellwert von 0,65 V und einem Zeitfenster von 240 ns.

Abbildung 7.7: Effizienzen für einen Messlauf bei gleicher Schwelle.

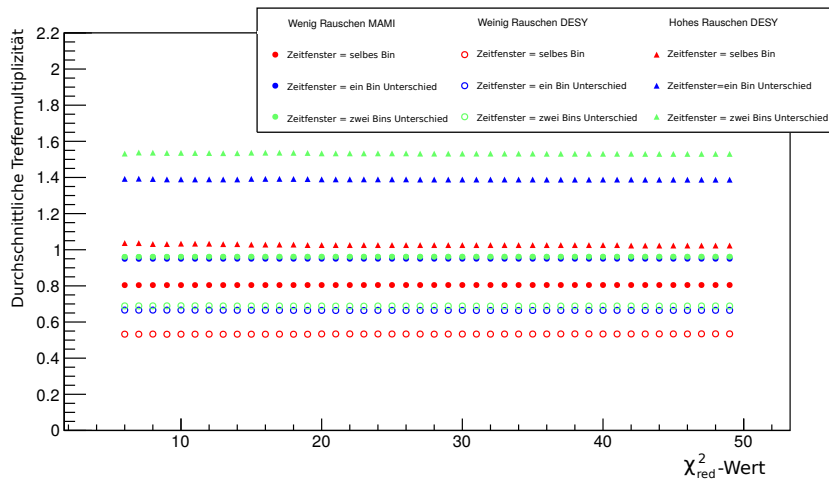
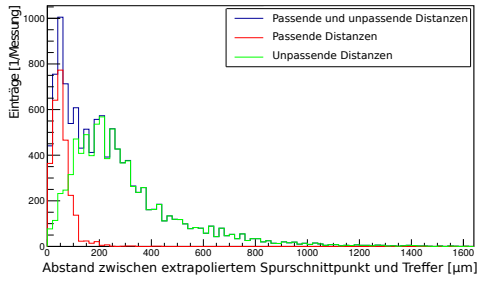
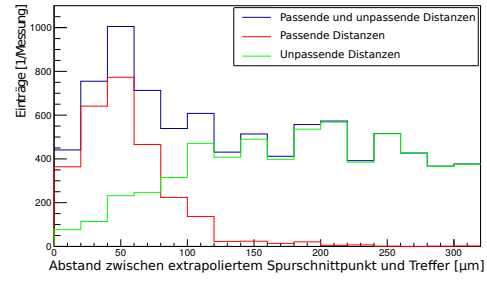


Abbildung 7.8: Multiplizitäten gegen χ^2_{red} -Werte [18].



(a) Anzahl der passenden Treffer und extrapolierten Spuren gegen die Distanz beider [18].



(b) Vergrößerung von Abbildung 7.9a.

Abbildung 7.9: Finden des passenden Suchradius.

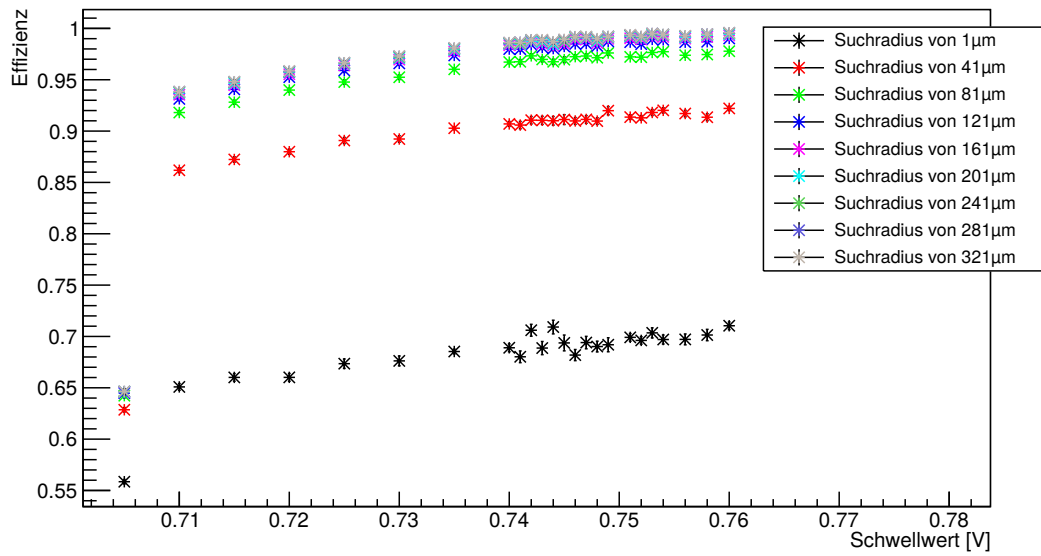
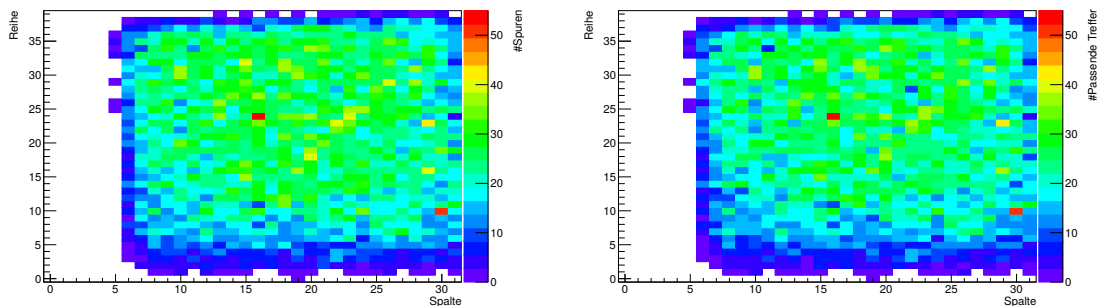


Abbildung 7.10: Schwellwert-Messreihe für verschiedene Suchradien und gleichem Zeitfenster von 240 ns.

7.1.6 Ergebnisse

Trefferverteilungen

Für die Berechnung der Effizienzen wurde die Anzahl der zu einer extrapolierten Spur passenden Treffer auf dem Prüfling durch die Anzahl der extrapolierten Spuren geteilt. Die Effizienzen wurden dabei für jedes Pixel einzeln berechnet. Um die Gesamteffizienz des Chips zu berechnen, wurde der Mittelwert für alle Pixel bis auf die äußeren drei Reihen und Spalten gebildet. Diese wurden ausgelassen um Randeffekte auszuschließen. Die folgenden Trefferverteilungen sind alle von einer Messung mit Schwellwert nahe der Baseline erstellt worden. In Abbildung 7.11 sieht man die berechneten Verteilungen für die Anzahl der extrapolierten Spuren auf dem Prüfling (Abbildung 7.11a) und die Verteilung für alle zu einer Spur passenden Treffer (Abbildung 7.11b). Da bei dieser Messung eine Effizienz von 94,5% erreicht wurde, sehen beide Karten nahezu identisch aus. In Abbildung 7.12a sieht man die dazugehörige Verteilung, die für jedes Pixel des Chips die Effizienz anzeigt. Das Rauschen pro Pixel wurde berechnet, indem von allen gesehenen Treffern die Treffer, die einer Spur zugeordnet wurden, abgezogen wurden. In der dafür gezeichneten Rausch-Verteilung (Abbildung 7.12b) ist aufgrund der niedrigen Schwelle eine hohe Rauschrate zu erkennen. Die Pixel mit weitaus höheren Raten als die restlichen Pixel sind die Hotpixel.

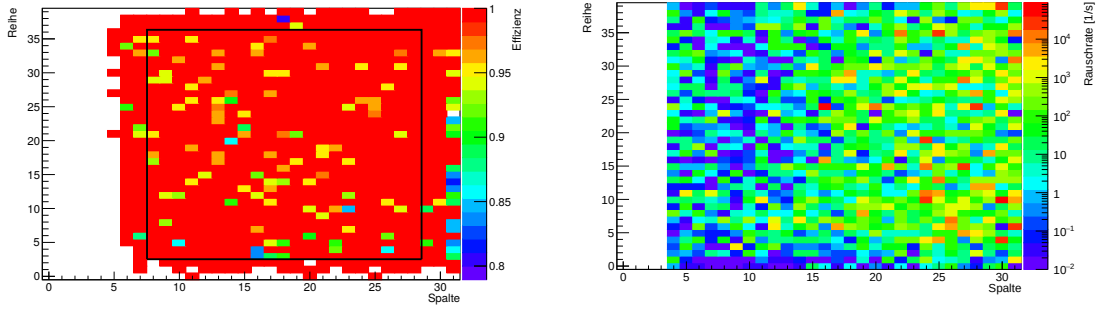


(a) Verteilung aller extrapolierten Spuren bei einem Schwellwert von 0,715 V (b) Verteilung aller zu einer Spur passenden Treffer bei einem Schwellwert von 0,715 V.

Abbildung 7.11: Spur- und Trefferverteilungen.

Schwellwert-Messreihen

Es wurden Messungen bei unterschiedlichen Schwellwerten durchgeführt. Die Schwelle des Prüflings wurde dabei immer weiter Richtung Baseline (0,8 V) geschoben. Dadurch erhöht sich zwar auch das Rauschen des Chips, er wird aber auch effizienter. In Abbildung 7.13 ist die Effizienz und Rauschrate pro Pixel in Abhängigkeit von dem Schwellwert bei einem Suchradius von 161 μm aufgetragen. Man kann erkennen, dass die Effizienz schon ab einem Schwellwert von 0,74 V über 98% erreicht und



- (a) Verteilung der Effizienzen aller Pixel bei einem Schwellwert von 0,76 V mit einer Gesamteffizienz von 99,31%. Zur Berechnung der mittleren Effizienz wurden die Pixel innerhalb des schwarz gezeichneten Rechtecks verwendet.
- (b) Verteilung der Rauschraten aller Pixel bei einem Schwellwert von 0,76 V mit einer mittleren Rauschrate von $668 \frac{1}{s}$ pro Pixel.

Abbildung 7.12: Effizienz- und Rauschverteilung.

die Rauschrate ab einer Schwelle von 0,76 V stark ansteigt. Die maximal erreichte Effizienz bei dieser Messreihe lag bei 99,31%. Die durchschnittliche Rauschrate pro Pixel bei diesem Schwellwert beträgt $668 \frac{1}{s}$. In der Abbildung ist zu erkennen, dass ein guter Arbeitsbereich zwischen 0,74 V und 0,75 V liegt, da bei diesen Werten die Effizienz schon über 98 % liegt und die Rauschrate pro Pixel noch unter 200 Treffer pro Sekunde. Dass der letzte Messwert bei der kleinsten gewählten Schwelle unter den Effizienzwerten der vorherigen Messungen liegt, kommt von der limitierten Ausleserate. Das Rauschen des Chips war so hoch, dass die maximale Ausleserate des MuPix-Teleskops erreicht wurde. Dadurch können nicht mehr alle Spurtreffer erfasst werden. Außerdem steigt bei hohem Rauschen die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel ein Teilchen aufgrund von Rauschen nicht detektieren kann. Ein Pixel kann pro Auslesezyklus nur einen Treffer speichern. Und wenn vor dem „echten“ Treffer ein Rausch-Treffer abgespeichert wurde, wird das Teilchen nicht detektiert.

7.2 MAMI

Die Teststrahlkampagne in Mainz fand vom 24.03.2015 bis 15.05.2015 statt. Die Elektronen werden in einem Linearbeschleuniger mit hochfrequenten elektrischen Feldern von Mikrowellenstrahlung beschleunigt. Mithilfe von Magneten werden die Elektronen so umgelenkt, dass sie den Beschleuniger mehrmals durchlaufen [19]. Die Messungen wurden mit Elektronen mit ca. 1 GeV Energie durchgeführt.

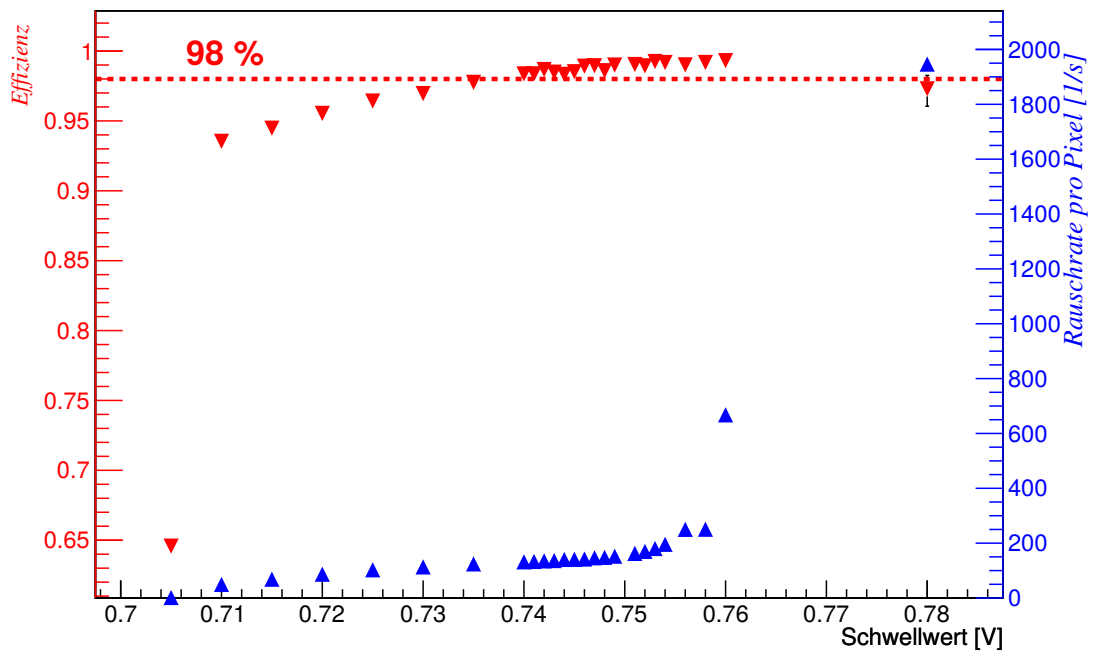


Abbildung 7.13: Schwellwert-Messreihe bei einem Zeitfenster von 240 ns und einem Suchradius von 161 μm .

7.2.1 Aufbau

Bei der Teststrahlkampagne am MAMI wurden wie auch am DESY 250 μm dicke MuPix6- und MuPix7-Chips verwendet. Als Prüfling wurde derselbe MuPix7-Chip eingesetzt und befand sich ebenfalls in der zweiten Lage. Ein Bild des Aufbaus sieht man in Abbildung 7.14. Die Distanzen zwischen den Lagen sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

Lage 1	Lage 2	Lage 3	Lage 4
0,00 cm	6,40 cm	13,00 cm	19,50 cm

Tabelle 7.2: Abstände der Lagen im Bezug zu Lage 1.

7.2.2 Einstellungen und Auslese

Die verwendeten DAC-Werte der Chips sind in Anhang A aufgelistet. Bevor die Schwellwert-Messreihen durchgeführt wurden, wurden die Pixelschwellen getuned [20]. Dafür wurden die Tune DACs so eingestellt, dass bei allen Pixeln die Schwelle individuell soweit erhöht wurde bis alle Pixel bei einem gewissen Schwellwert ins Rauschen übergangen. Auf diese Weise werden Pixelunterschiede ausgeglichen um ein gleichförmiges Pixelverhalten zu erreichen. An den Chips war eine Hochspannung

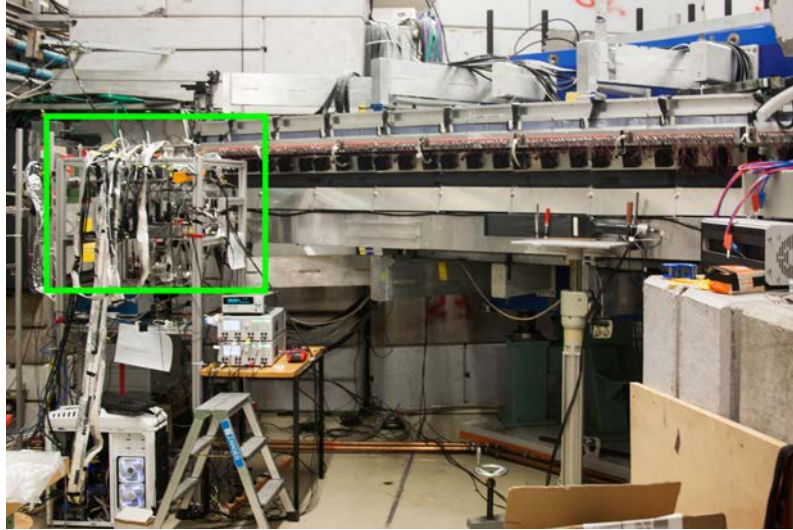


Abbildung 7.14: Aufbau des MuPix-Teleskops in Mainz. In dem grün gezeichneten Rechteck sind die Lagen des MuPix-Teleskops zu sehen, welches über Kabel mit dem darunterliegenden PC verbunden ist.

von -85 V angelegt und die Auslese lief stabil. Die Spurrate lag im 1 kHz-Bereich. Die Zeitstempel der Treffer waren so eingestellt, dass sie alle 80 ns hochzählten und die Baseline aller verwendeten Chips war auf 0,8 V eingestellt.

7.2.3 Ausrichtung

Bei der Ausrichtung wurde so verfahren wie in Unterabschnitt 7.1.3 beschrieben. In Abbildung 7.15 sind die Residuen und der RMS eingetragen. Alle Lage waren auf 10 μm genau ausgerichtet.

7.2.4 Spurrekonstruktion

Bei der Spurrekonstruktion wurde wie in Unterabschnitt 7.1.4 vorgegangen. Die Effizienzen und Anzahl der Spuren wurden ebenfalls gegen verschiedene χ^2_{red} -Werte aufgetragen (Abbildung 7.16). Als χ^2_{red} -Wert wurde mit Hilfe dieses Graphen ein Wert von zehn gewählt um hohe Effizienzen bei ausreichend Statistik zu erhalten. Dieses χ^2_{red} wurde für die Spurrekonstruktion der Analyse verwendet.

7.2.5 Festlegung des Zeitfensters und des Suchradius

Da am Teststrahl in Mainz ebenfalls Elektronen verwendet wurden, wurde als Zeitfenster auch ein Wert von zwei Zeitstempelbins gewählt, was einer Zeit von 240 ns entspricht. In Abbildung 7.8 ist zu erkennen, dass die Multiplizitäten für die Mainz-Daten für alle verwendeten χ^2_{red} -Werte bei ca. 0,8 liegen. Für die Suchradien mussten größere Werte gewählt werden, da der Strahl am MAMI nur etwa eine Ener-

7 Teststrahlkampagnen

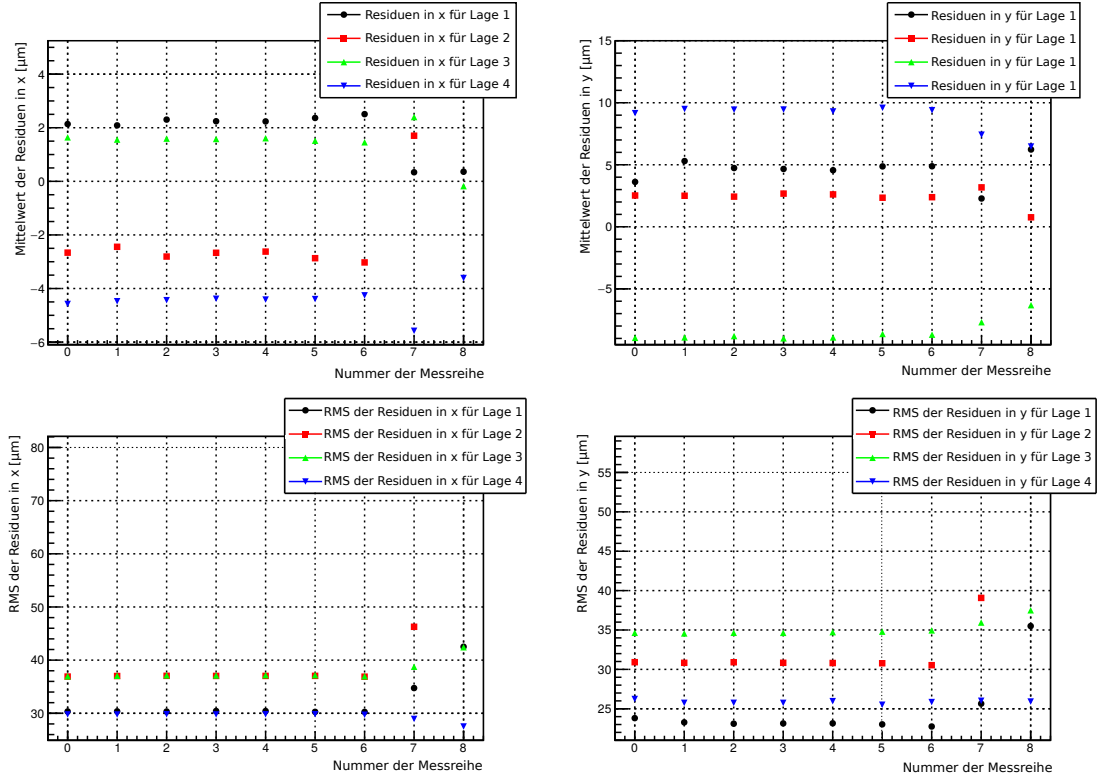


Abbildung 7.15: Residuen und RMS aller Lagen für x- und y-Richtung. Aufgrund geringer Statistik in einzelnen Messungen wurden Messungen bei gleichen Einstellungen zu Messreihen zusammengefasst. [18].

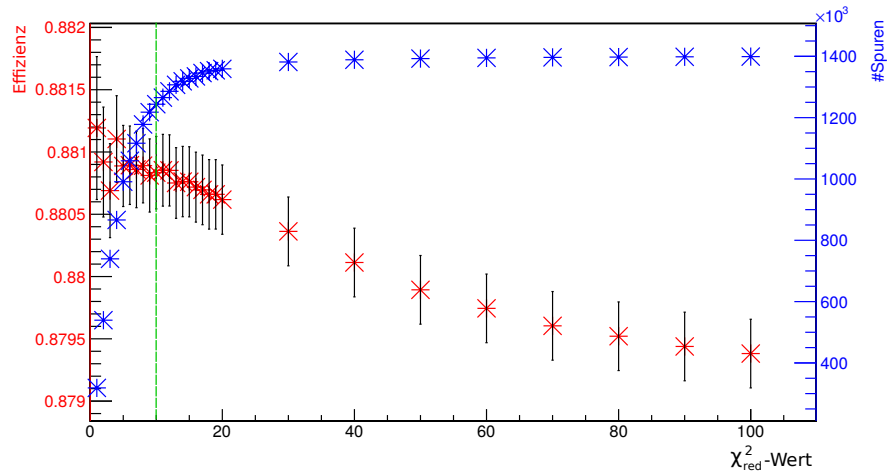
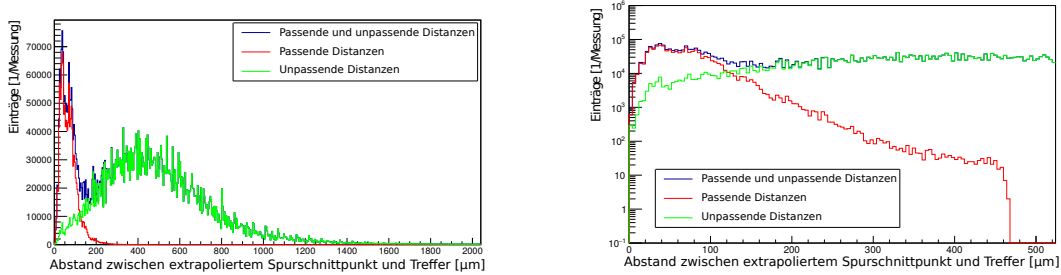


Abbildung 7.16: Effizienz des Prüflings in rot und Anzahl der durch drei Lagen rekonstruierten Spuren in blau gegen verschiedene χ^2_{red} -Werte aufgetragen bei einem Schwellwert von 0,70 V. Grün markiert ist der χ^2_{red} -Schnitt, der für die Analyse genutzt wurde.

gie von 1 GeV hatte und die Teilchen somit in größeren Winkeln streuten ($\Theta_{VS} \approx 7,6 \cdot 10^{-3}$ rad). Bei der Festlegung des Suchradius wurde wie in Unterabschnitt 7.1.5 verfahren und äquivalente Graphen mit den Mainzdaten erstellt (Abbildung 7.17a). Man erkennt, dass beinahe alle passenden Treffer einen Abstand unter $320 \mu\text{m}$ zu der Spur haben. Da für diese Berechnung ein Suchradius von $470 \mu\text{m}$ verwendet wurde, werden ab diesem Wert keine Treffer mehr zugeordnet. Für die weiteren Berechnungen wurde daher ein Suchradius von $320 \mu\text{m}$ gewählt.



(a) Anzahl der passenden Treffer und extrapolierten Spuren gegen die Distanz beider [18].

(b) Vergrößerung von Abbildung 7.17a mit logarithmischer Skala.

Abbildung 7.17: Finden des passenden Suchradius.

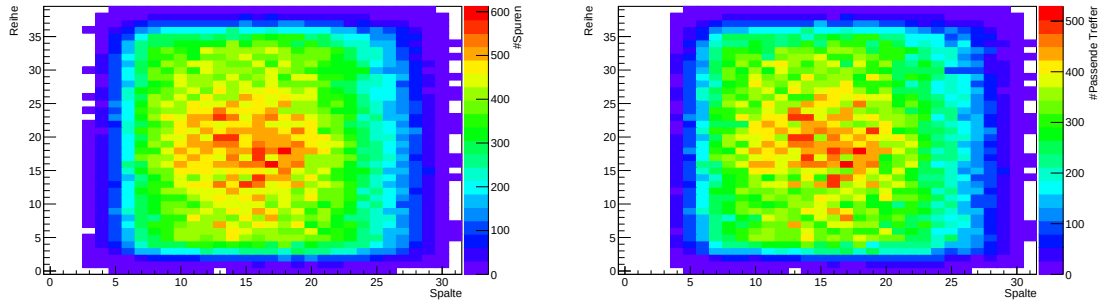
7.2.6 Ergebnisse

Trefferverteilungen

In Abbildung 7.18 sind die Verteilungen der extrapolierten Spuren auf dem Prüfling und die Verteilung der Treffer, die diesen Spuren zugeordnet wurden, zu sehen. Da die Elektronen am MAMI weiter gestreut werden als am DESY, können in der Mitte des Chips mehr Spuren rekonstruiert werden als am Rand, was in den Verteilungen zu sehen ist. Elektronen, die die Sensoren am Rand treffen, gelangen aufgrund der Streuung nicht immer durch alle Lagen. Bei dieser Messung lag die mittlere Effizienz des gesamten Chips bei 82,91 %. In Abbildung 7.19 ist die Verteilung der Effizienzen und der Rauschraten über den Chip bei einem Schwellwert von 0,76 V dargestellt. Die mittlere Effizienz dieser Messung lag bei 98,87 %. Die mittlere Rauschrate pro Pixel betrug $4 \frac{1}{s}$. Die geringe Rauschrate im Vergleich zu Abbildung 7.12b kommt daher, dass bei dieser Messung auf diesen Schwellwert getuned wurde.

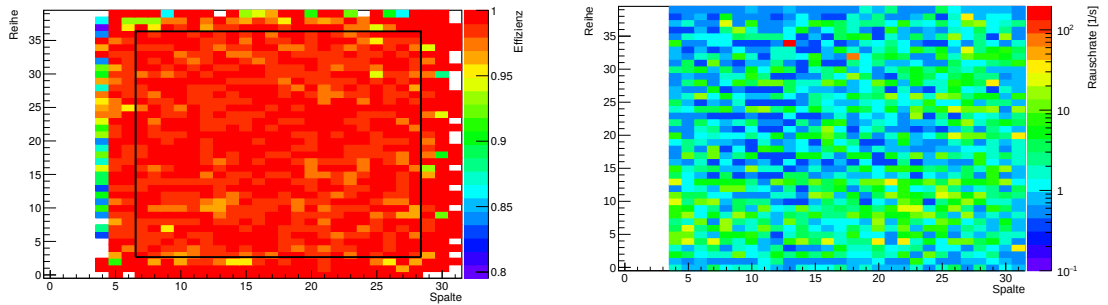
Schwellwert-Messreihen

Bei dieser Kampagne wurde auch eine Schwellwert-Messreihe durchgeführt, bei welcher in 10 mV-Schritten die Schwelle näher an die Baseline gesetzt wurde (Abbildung 7.20). Bei einem Schwellwert von 0,76 V wurde eine Effizienz von 98,87 % erreicht und die Rauschrate lag noch unter $5 \frac{1}{s}$. Die niedrigere Rauschrate im Vergleich zu der DESY-Messung (Abbildung 7.13) liegt daran, dass die Pixelschwellen getuned



- (a) Verteilung aller extrapolierte Spuren bei einem Schwellwert von 0,71 V
- (b) Verteilung aller zu einer Spur passenden Treffer bei einem Schwellwert von 0,71 V.

Abbildung 7.18: Spur- und Trefferverteilungen.



- (a) Verteilung der Effizienzen aller Pixel bei einem Schwellwert von 0,76 V mit einer Gesamteffizienz von 98,87%. Zur Berechnung der mittleren Effizienz wurden die Pixel innerhalb des schwarz gezeichneten Rechtecks verwendet.
- (b) Verteilung der Rauschraten aller Pixel bei einem Schwellwert von 0,76 V mit einer mittleren Rauschrate von $4 \frac{1}{s}$ pro Pixel.

Abbildung 7.19: Effizienz- und Rauschverteilung.

waren. In kommenden Teststrahlkampagnen wird dieser Bereich in kleineren Schritten durchgemessen um den potentiellen Arbeitspunkt genauer zu charakterisieren. Die beiden letzten Werte der Messreihe erreichen zwar Effizienzen von 99,79 % und 99,87 %, aber durch die sehr hohe Rauschrate von $1960 \frac{1}{s}$ pro Pixel, ist dieser Bereich nicht als Arbeitsbereich geeignet. Zu hohe Rauschraten können aufgrund von Auslese- und Rechenleistungslimitierung nicht verarbeitet werden. Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass Rausch-Treffer Spuren zugeordnet werden. Im späteren Experiment darf die Rauschrate deshalb nicht über $20 \frac{1}{s}$ betragen.

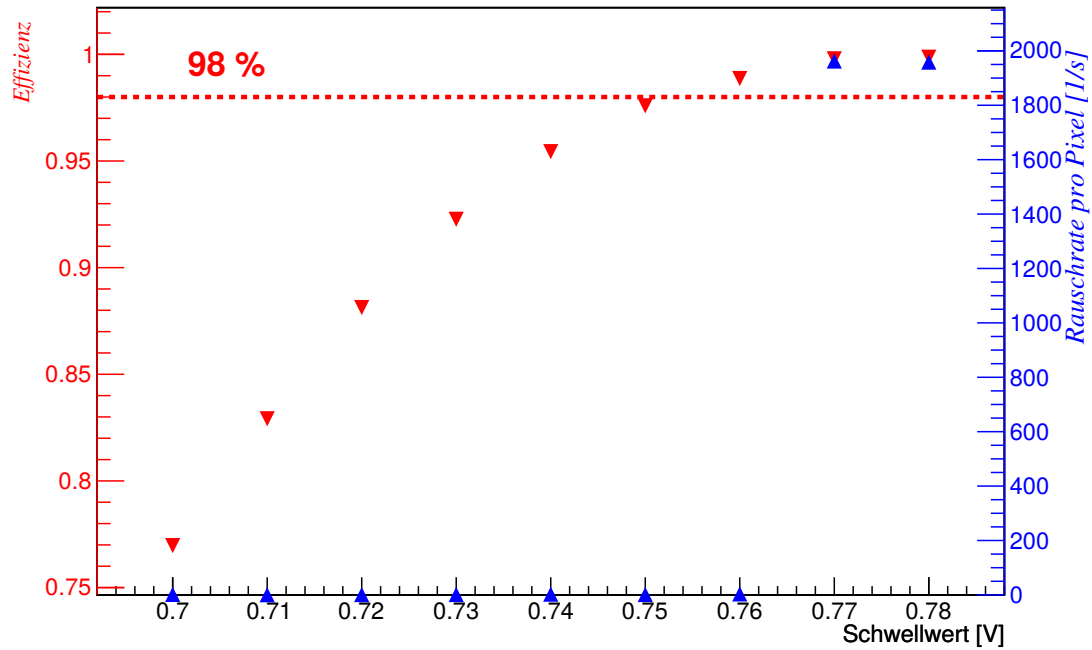


Abbildung 7.20: Schwellwert-Messreihe bei einem Zeitfenster von 240 ns und einem Suchradius von 320 μm .

Teil IV

Zusammenfassung und Ausblick

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Effizienz von HV-MAPS-Prototypen für das Mu3e-Experiment erfolgreich analysiert. Dafür wurden die Messdaten aus zwei Teststrahlkampagnen verwendet, die mit Hilfe des MuPix-Teleskops genommen wurden. Als Prüfling für die Effizienzanalyse diente ein MuPix7. Die übrigen Lagen des Teleskops waren mit MuPix6-Sensoren bestückt. Nach einer systematischen Analyse des Einflusses von Suchradius, Zeitfenster und χ^2 -Schnitt wurden Messungen bei verschiedenen Schwellen analysiert. Am DESY wurden dabei Effizienzen von über 98 % erreicht, bei denen die mittlere Rauschrate pro Pixel unter $200 \frac{1}{s}$ lag. Die maximale mittlere Effizienz lag bei 99,31 % bei einer mittleren Rauschrate pro Pixel von $668 \frac{1}{s}$. Mit der Schwellwert-Messreihe am MAMI, die mit getunten Sensoren durchgeführt wurde, wurde eine maximale mittlere Effizienz von 99,87 % erreicht, bei der aufgrund des hohen Rauschens die maximale Ausleserate erreicht wurde. Bei einer mittleren Rauschrate von unter $5 \frac{1}{s}$ pro Pixel wurde eine Effizienz von 98,87 % erreicht. Aus beiden Messreihen lässt sich der Arbeitsbereich für das verwendete Tuning und den verwendeten DACs auf die Schwellwerte zwischen 0,74 V und 0,77 V einschränken. Durch Tuning der Sensoren werden die Rauschraten um mehr als den Faktor 10 reduziert und man unterschreitet somit schon die maximale Rauschrate, die für das spätere Experiment vorgesehen ist.

Zurzeit wird die serielle Auslese des MuPix7 getestet. Sobald die Tests abgeschlossen sind, wird das MuPix-Teleskop mit vier MuPix7 bestückt werden, die auf $50 \mu\text{m}$ gedünnt sind. Es ist vorgesehen, dass statt zwei nur noch ein FPGA für die Auslese benötigt wird. Außerdem wird DMA (Direct Memory Access) integriert, womit die Ausleserate weiter erhöht wird. Um die Ausrichtung der Lagen weiter zu verbessern, befinden sich neue PCB-Halter in Entwicklung, mit denen sich zusätzlich die Höhe der PCBs mikrometergenau einstellen lassen. Für zukünftige Teststrahlkampagnen soll ermöglicht werden, schon während den Messungen erste Analyseergebnisse zu erhalten. Als nächster Schritt zum finalen Detektor wird eine Echtzeitspurrekonstruktion implementiert.

Teil V

Appendix

A DAC-Werte

DAC	MuPix6	MuPix7
VPDAC	0x20	0x20
VPComp	0x3C	0x3C
VNDel	0xA	0xA
VNLoad	0x5	0x5
VNFoll	0x10	0x10
VNFB	0xA	0xA
VN	0x3C	0x3C
THRes	0x0	0x0
BLRes	0x1E	0x1E
VNFB2	0xA	0xA
VNLoad2	0x5	0x5
VN2	0x3C	0x3C
BLRes2	0x1E	0x1E

Tabelle A.1: DAC-Werte am DESY.

DAC	MuPix6	MuPix7
VPDAC	0x10	0x9
VPComp	0x3B	0x3B
VNDel	0x9	0x9
VNLoad	0x9	0x9
VNFoll	0xE	0xE
VNFB	0x9	0x9
VN	0x3B	0x3B
THRes	0x3B	0x3B
BLRes	0x3E	0x3E
VNFB2	0x9	0x9
VNLoad2	0x4	0x4
VN2	0x3B	0x3B
BLRes2	0x3E	0x3E

Tabelle A.2: DAC-Werte am MAMI.

B Verzeichnisse

B.1 Abbildungsverzeichnis

2.1	Elementarteilchen des Standardmodells.	14
2.2	Feynmandiagramm des Lepton-Flavour-verletzenden Zerfalls $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$ durch Neutrinooszillation.	14
2.3	Feynman-Diagramme jenseits des Standardmodells.	15
2.4	Vielfachstreuung.	15
3.1	Schematische Seitenansicht des Mu3e-Detektors.	17
4.1	Schematische Darstellung von vier HV-MAPS-Pixeln	19
5.1	Teleskope Designkonzept	23
5.2	Übersicht über den mechanischen Teil des Teleskops.	24
5.3	Analoge Elektronik eines MuPix-Prototypen.	25
5.4	MuPix6-Chip-Layout.	25
5.5	Schematische Darstellung des Auslesesystems des Teleskops.	26
5.6	Graphische Benutzeroberfläche	27
6.1	Spurrekonstruktion.	33
6.2	Ausschnitt der Pixelmatrix.	34
7.1	Schematische Darstellung des Teststrahls am DESY.	35
7.2	Die vier Lagen des MuPix-Teleskops.	36
7.3	Trefferverteilung und Zeitstempelkorrelationen.	37
7.4	Korrelationen zweier Lagen.	38
7.5	Residuen und RMS aller Lagen für x- und y-Richtung.	38
7.6	Effizienz und Anzahl der Spuren aufgetragen gegen χ^2_{red} -Werte.	39
7.7	Effizienzen für verschiedene Suchfenster.	40
7.8	Multiplizitäten gegen χ^2_{red} -Werte.	40
7.9	Finden des passenden Suchradius.	41
7.10	Schwellwert-Messreihe für verschiedene Suchradien und gleichem Zeit- fenster von 240 ns.	41
7.11	Spur- und Trefferverteilungen, DESY.	42
7.12	Effizienz- und Rauschverteilung, DESY.	43
7.13	Schwellwert-Messreihe bei einem Zeitfenster von 240 ns und einem Suchradius von 161 μm	44
7.14	Aufbau des MuPix-Teleskops in Mainz.	45
7.15	Residuen und RMS aller Lagen für x- und y-Richtung.	46

7.16	Effizienz und Anzahl der Spuren aufgetragen gegen χ^2_{red} -Werte	46
7.17	Finden des passenden Suchradius.	47
7.18	Spur- und Trefferverteilungen, Mainz.	48
7.19	Effizienz- und Rauschverteilung, Mainz.	48
7.20	Schwellwert-Messreihe bei einem Zeitfenster von 240 ns und einem Suchradius von 320 μm	49

B.2 Tabellenverzeichnis

7.1	Abstände der Lagen am DESY	36
7.2	Abstände der Lagen am MAMI	44
A.1	DAC-Werte am DESY.	57
A.2	DAC-Werte am MAMI.	57

C Literaturverzeichnis

- [1] David J. Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. Wiley-VCH, second, rev. edition, 2011.
- [2] G. Aad et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. 2012.
- [3] S. Chatrchyan et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys.Lett.B*, 2012.
- [4] Wikimedia Commons. Standard model of elementary particles-de, 2015. URL https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg. [Online; aufgerufen am 04.07.2015].
- [5] K.A. Olive et al. (Particle Data Group). Review of particle physics. *Chin. Phys.*, C38,090001 (2014), 2014. URL <http://pdg.lbl.gov>.
- [6] K. Nakamura et al. Review of particle physics. *J. Phys.*, G37:075021, 2010. doi: 10.1088/0954-3899/37/7A/075021.
- [7] Root, TEfficiency class. URL <https://root.cern.ch/root/html/TEfficiency.html>. [Online aufgerufen am 10.07.2015].
- [8] A. Blondel et al. Letter of intent for an experiment to search for the decay $\mu \rightarrow eee$, 2012.
- [9] U. Bellgardt et al. Search for the Decay $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$. *Nucl.Phys.*, B299:1, 1988. doi: 10.1016/0550-3213(88)90462-2.
- [10] I. Perić. A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology. *Nucl.Instrum.Meth.*, A582:876, 2007. doi: 10.1016/j.nima.2007.07.115.
- [11] L. Huth. Development of a Tracking Telescope for Low Momentum Particles and High Rates consisting of HV-MAPS. Master Thesis, Heidelberg University, 2014.
- [12] H. Augustin. Characterization of a novel HV-MAPS Sensor with two Amplification Stages and first examination of thinned MuPix Sensors. Master Thesis, Heidelberg University, 2014.

- [13] R. Philipp. Characterisation of High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors for the Mu3e Experiment. Master thesis, Heidelberg University, 2014.
- [14] I. Peric. MuPixel small pixel detector description. Internal Note.
- [15] Dirk Wiedner. MuPix Test PCB Development. Personal Contact.
- [16] J. Repening. TBD-MuPix Telescope Testbeam Analysis. Bachelor Thesis, Heidelberg University, 2015. In Progress.
- [17] DESY Testbeam Homepage. URL <http://testbeam.desy.de/e130573>. [Online aufgerufen am 26.06.2015].
- [18] L. Huth. Personal Contact.
- [19] Universität Mainz Homepage. URL <http://www.kph.uni-mainz.de/375.php>. [Online aufgerufen am 02.07.2015].
- [20] J. Hammerich. TBD-MuPix Tuning. Bachelor Thesis, Heidelberg University, 2015. In Progress.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Als erstes bedanke ich mich bei Prof. Dr. André Schöning, der mir ermöglicht hat diese Arbeit zu diesem interessanten Thema durchführen zu können. Des weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr. Norbert Herrmann, der sich bereit erklärt hat, die Zweitkorrektur zu übernehmen.

Mein besonderer Dank gilt Lennart Huth, der mir jede Frage geduldig beantwortet hat und mir immer mit Rat und Tat zu Seite stand.

Heiko Augustin danke ich für die Einweisung in das Thema und die Unterstützung bei technischen Fragen.

Jan Hammerich danke ich nicht nur für die Hilfen während dieser Arbeit, sondern auch für das gemeinsame Lernen während des gesamten Studiums.

Dirk Wiedner danke ich für seine Unterstützung während meiner Zeit in der Arbeitsgruppe und das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Der gesamten Mu3e-Gruppe danke ich für die tolle Atmosphäre.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinen Freunden für die Unterstützung während des Studiums und bei meiner Familie, die mir mein Physikstudium ermöglicht hat.

Erklärung:

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

Heidelberg, den 14.07.2015

.....