

Energiekalibration und Charakterisierung von Timepix-Detektoren



Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von
Tobias Ziegler
05. 11. 2014

Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Physikalisches Institut IV
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Betreuerin: Prof. Dr. G. Anton

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Einführung | 1 |
| 1 Theoretischer Hintergrund | 3 |
| 1.1 Timepix-Detektoren | 4 |
| 1.1.1 Grundsätzliches | 4 |
| 1.1.2 Detektionsablauf | 4 |
| 1.1.3 ToT-Modus | 8 |
| 1.1.4 Wichtige Effekte innerhalb des Detektors | 8 |
| 1.2 Kalibrationsablauf | 10 |
| 2 Experiment | 13 |
| 2.1 Aufbau | 14 |
| 2.1.1 Versuchsaufbau | 14 |
| 2.1.2 Verwendete Timepix-Detektoren | 14 |
| 2.2 Messung | 17 |
| 2.2.1 Einstellungen | 17 |
| 2.2.2 Angleichen der Energieschwelle | 18 |
| 2.2.3 Datennahme | 18 |
| 3 Datenauswertung | 21 |
| 3.1 Globale Kalibration | 22 |
| 3.2 Pixelweise Kalibration | 26 |
| 3.2.1 Angleichen der Spektren | 26 |
| 3.2.2 Angleichen der Kalibrationskurve | 30 |
| 3.2.3 Schematischer Ablauf | 31 |
| 4 Ergebnisse und Anmerkungen | 33 |
| 4.1 Energieauflösung | 34 |
| 4.2 Timepix-Detektor E3W83 | 36 |
| 4.3 Timepix-Detektor D7W78 | 40 |
| 4.4 Timepixquad D6W15 | 43 |
| 4.5 Stack F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89 | 47 |
| Fazit und Ausblick | 51 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| A Tabellen | 53 |
| B Abbildungsverzeichnis | 57 |
| C Literatur | 61 |

Einführung

Pixelierte Halbleiterdetektoren sind Gegenstand aktueller Forschung, welche in den letzten Jahren viele neue Entwicklungen hervorgebracht hat. Als Beispiele sind dabei Medipix-, Hexitec- und diverse Varianten von Timepix-Detektoren zu nennen, welche alle für unterschiedliche Anwendungsschwerpunkte entwickelt worden sind. Die Pixelierung und die Möglichkeit einzelne Photonen detektieren zu können eröffnen ein breites Anwendungsfeld, das von der medizinischen Bildgebung bis zur Detektion seltener Zerfälle und der Teilchenidentifikation reicht.

Die in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden Timepix-Detektoren sind für Experimente, bzw. vorbereitende Experimente zur Detektion seltener Zerfälle gedacht. Timepix-Detektoren bieten unter anderem die Möglichkeit, simultan Ort und Energie eines Ereignisses messen zu können. So lassen sich Teilchen anhand ihrer Energiedeposition und der Rekonstruktion ihrer Spuren identifizieren. Dies ist ein wesentlicher Bestandteil der Experimente, da sich so unerwünschte Ereignisse des Untergrunds herausfiltern lassen.

Die verwendeten Timepix-Detektoren mit Si-Sensor werden in Experimenten eingesetzt, die den extrem seltenen doppelten Elektroneneinfang direkt nachweisen sollen. Die Schwierigkeit des Nachweises liegt in der hohen Halbwertszeit des Zerfalls, die das Alter des heutigen Universums um Größenordnungen übersteigt. Die anderen verwendeten Timepix-Detektoren, die einen Sensor aus CdTe haben, sind für vorbereitende Experimente auf der Suche nach dem neutrinolosen $\beta\beta$ -Zerfall ($0\nu\beta\beta$) bestimmt. Die Beobachtung eines solchen Zerfalls hätte wichtige Auswirkungen auf die Teilchenphysik und würde unter anderem die Majorana-Natur der Neutrinos beweisen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Charakterisierung und der Energiekalibration verschiedener Timepix-Detektoren. Dazu wird in Kapitel 1 die Funktionsweise der Detektoren detailliert erklärt und der Ablauf einer Energiekalibration erläutert. Für die Energiekalibration ist die Messung bekannter Energien mit Hilfe von Fluoreszenzfolien nötig, deren Ablauf in Kapitel 2 dargelegt wird. Der verwendete Messaufbau und Möglichkeiten zu Einstellungen der Detektoren werden auch in diesem Kapitel erläutert. In Kapitel 3 werden zwei Methoden vorgestellt um mit Hilfe der Messdaten eine globale bzw. pixelweise Energiekalibration eines Timepix-Detektors durchzuführen. Dabei werden Vor- und Nachteile beider Methoden aufgezeigt. Die Resultate werden in Kapitel 4 vorgestellt und schließlich wird die Qualität der kalibrierten Timepix-Detektoren anhand ihrer relativen Energieauflösung verglichen. Erst nach einer Energiekalibration lassen sich konkrete Aussagen über die Energie eines gemessenen Ereignisses machen. Die Energiekalibration ist daher unerlässlich für die erwähnten Experimente.

Kapitel 1

Theoretischer Hintergrund

Kapitelübersicht

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1.1 | Timepix-Detektoren | 4 |
| 1.1.1 | Grundsätzliches | 4 |
| 1.1.2 | Detektionsablauf | 4 |
| 1.1.3 | ToT-Modus | 8 |
| 1.1.4 | Wichtige Effekte innerhalb des Detektors | 8 |
| 1.2 | Kalibrationsablauf | 10 |

Dieses Kapitel erklärt die physikalischen und technischen Grundlagen sowohl für die verwendeten Detektoren als auch für das Ziel dieser Arbeit, eine Energiekalibration bei diesen Detektoren durchzuführen.

In Abschnitt 1.1 werden grundlegende Begriffe, der Aufbau und die Funktionsweise eines Timepix-Detektors erklärt. Der vorwiegend genutzte Betriebsmodus wird eingehend erläutert. Des Weiteren werden die wichtigsten physikalischen Phänomene im Detektor aufgezeigt und ihre Auswirkungen für diese Arbeit dargelegt.

In Abschnitt 1.2 wird der Ablauf der Energiekalibration kurz umrissen und auf die unterschiedlichen Arbeitsschritte eingegangen. Es werden zwei unterschiedliche Methoden zur Erzeugung von Strahlung bekannter Energie vorgestellt. Zusätzlich werden Näherungen, die für die Kalibration angenommen werden, motiviert und deren Konsequenzen eingeordnet.

1.1 Timepix-Detektoren

1.1.1 Grundsätzliches

Der Timepix ist ein hybrider, aktiver, pixelierter Halbleiterdetektor, der von der MEDIPIX-Kollaboration [1] in Zusammenarbeit mit dem CERN [2] entworfen wird. Basierend auf der Technik eines Medipix2 – einem photonenzählenden Detektor für die Röntgenbildgebung – bietet der Timepix den Vorteil auch die Ankunftszeit des Signals oder dessen Energie messen zu können [3].

In Abbildung 1.1a ist ein Timepix-Detektor zu sehen. Darin ist die Sensorfläche erkennbar. Diese befindet sich auf dem elektronischen Chipboard, über welches die Signale mit Hilfe der USB-Ausleseelektronik an einen Rechner weitergegeben werden. Wie in Abbildung 1.1b zu sehen ist, ist der Sensor (*S*) über Lötperlen (engl. „bump bonds“, siehe *B*) mit der Elektronik (ASIC¹, siehe *A*) verbunden. Über die Lötperlen ist jeder Pixel mit einer eigenen Elektronik verbunden (engl. „bonding“). Durch diesen sogenannten hybriden Aufbau können unterschiedliche Halbleiter als Sensormaterial verwendet werden. Für diese Arbeit kommen Detektoren mit Si bzw. CdTe als Sensormaterial zum Einsatz. Des Weiteren kann auch GaAs eingesetzt werden. Der Sensor besitzt eine effektive Fläche von $1,4 \times 1,4 \text{ cm}^2$ und der ASIC besteht aus 256×256 quadratischen Pixeln mit einer Kantenlänge von $55 \mu\text{m}$. Die Größe der Pixel kann in Schritten von $55 \mu\text{m}$ variiert werden, indem nur jeder n -te Pixel mit dem Sensor verbunden wird. Abhängig vom Sensormaterial variiert die Dicke der Sensorschicht zwischen 0,3 mm und 2 mm.

1.1.2 Detektionsablauf

Gelangt ein ionisierendes Teilchen in den Sensor, deponiert dieses durch Streuprozesse seine Energie schrittweise im Sensor und erzeugt dabei mehrere 1000 Elektron-Loch-Paare². Diese entstehen, indem Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband angeregt werden. Da in

¹Engl. „application specific integrated circuit“.

²Aufgrund der großen Anzahl werden die erzeugten Ladungsträger auch als Ladungswolke bezeichnet.

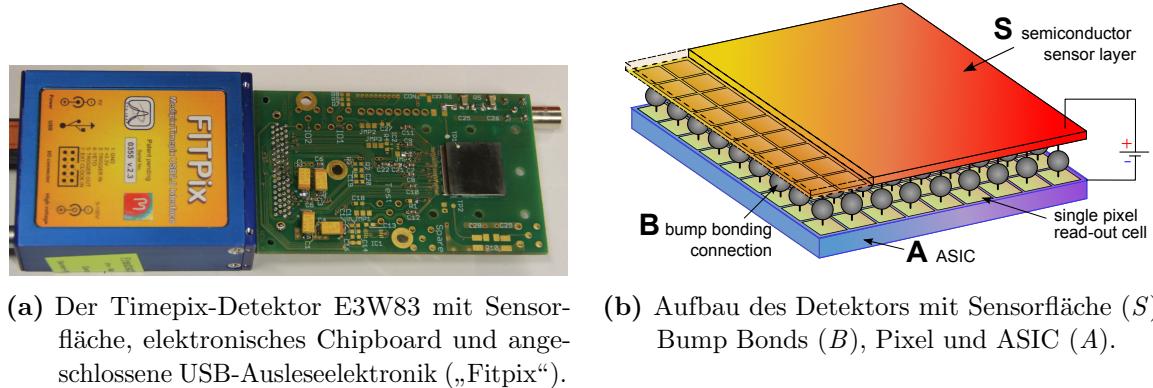


Abbildung 1.1: Foto des Timepix-Detektors E3W83 und Aufbau eines Timepix-Detektors.

dieser Arbeit ausschließlich Photonen als Signalquelle verwendet werden, wird nur auf deren Detektion im Detail eingegangen. Photonen geben ihre komplette Energie an ein Elektron des Sensormaterials ab. Dieser Prozess wird als innerer Photoeffekt bezeichnet [4]. Das entstehende Elektron deponiert dann durch Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren schrittweise seine Energie im Sensor. Des Weiteren können Photonen ihre Energie auch über den Comptoneffekt im Sensor deponieren. Bei den auftretenden Energien in dieser Arbeit³ spielt der Comptoneffekt aber nur eine untergeordnete Rolle. Für weiterführende Literatur sei auf [5] verwiesen.

Die Energie W , die notwendig ist um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen, ist abhängig vom Sensormaterial. Sie berechnet sich wie folgt [6]:

$$W = E_i + fE_x + \bar{\epsilon} \quad (1.1)$$

Dabei bezeichnet E_i die Ionisierungsenergie und E_x die benötigte Energie um ein Exziton anzuregen. f ist die mittlere Anzahl der angeregten Exzitonen pro erzeugtem Elektron-Loch-Paar. Die mittlere kinetische Energie eines Elektron-Loch-Paares wird mit $\bar{\epsilon}$ bezeichnet. Im Mittel sind Energien von $W = 3,62$ eV bei Si bzw. $W = 4,43$ eV bei CdTe nötig um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen. Somit gibt die Anzahl der entstehenden Elektron-Loch-Paare $N = \frac{E}{W}$ Auskunft über die deponierte Energie E des eintreffenden, ionisierenden Teilchens. Da die kinetische Energie der Elektron-Loch-Paare nur einen Mittelwert darstellt und f statistischen Schwankungen unterliegt, folgt die tatsächliche Anzahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare einer Fano-Verteilung. Dies führt zu einer physikalischen Obergrenze der Energieauflösung eines Timepix-Detektors [7].

Wie in Abbildung 1.2 am Beispiel eines eintreffenden Myons (μ^-) dargestellt, werden die entstehenden Elektronen und Löcher durch eine angelegte Spannung (engl. „Bias“) in Richtung der entsprechenden Elektroden „gedriftet“⁴. Dadurch wird eine Rekombination der Ladungsträger verhindert. In den Elektroden wird ein Strom influenziert, welcher von der Elektronik über eine vorgegebene Zeitdauer (engl. „acquisition time“) integriert, verstärkt und in einen Spannungspuls umgewandelt wird. Die Länge des Pulses ist dabei näherungsweise proportional zu der deponierten Energie des ionisierenden Teilchens.

Sowohl die angelegte Spannung als auch die Acquisition Time sind externe Parameter. Eine Messung über diese Zeitdauer wird „Frame“ genannt. Des Weiteren lassen sich die Parameter des eingebauten Digital-Analog-Wandlers (DAC) extern einstellen, um das Verhalten des Timepix-Detektors einzustellen. Ein wichtiger DAC-Wert ist der Schwellenwert (engl. „Threshold“, THL). Er wird benötigt, um mithilfe eines Diskriminators Rauschen, verursacht durch Leckströme der Bias-Spannung, unterdrücken zu können. Dadurch können jedoch reale Signale, die unterhalb dieser Schwelle liegen, nicht mehr gemessen werden. Im Folgenden wird die kleinste messbare Energie als Energieschwelle bezeichnet.

Der Timepix-Detektor verfügt über drei unterschiedliche Messmodi, in denen aus Spannungspulsen, die eine festgelegte Schwelle überschreiten, unterschiedliche Informationen gewonnen werden. Die Funktionsweise der Modi ist anhand eines Spannungspulses in Abbildung 1.3 gezeigt

³Die auftretenden Energien betragen zwischen 4 keV und 60 keV.

⁴Die Polarität ist dabei so eingestellt, dass bei Sensoren aus CdTe die Elektronen und bei Sensoren aus Si die Löcher in Richtung der Pixelelektronik beschleunigt werden.

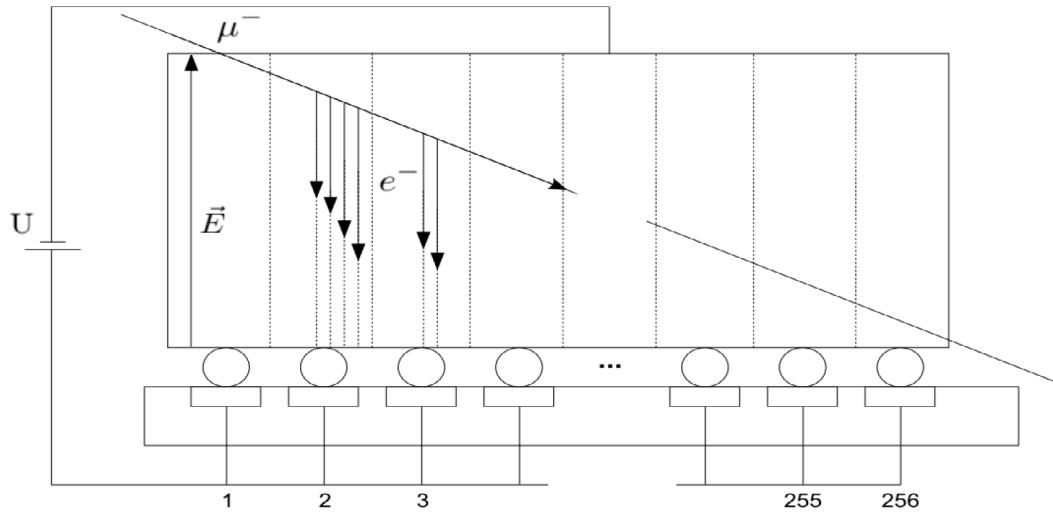


Abbildung 1.2: Schematischer Ablauf der Detektion eines Myons nach [8]. Die entstehenden Elektronen driften entlang der elektrischen Feldlinien in die Pixelelektroden und werden dort registriert.

Time-over-Threshold (ToT): Dieser Modus misst die Zeit, während der der Spannungspuls höher als der Threshold ist. Diese Zeit wird kurz als ToT bezeichnet. Die Zeit wird mit Hilfe einer Abtastrate, auch Clock-Frequenz genannt, berechnet. In dieser Arbeit wurden die Clock-Frequenzen $f_{clock} = 9,6 \text{ MHz}$ bzw. $f_{clock} = 24 \text{ MHz}$ verwendet. Aus der berechneten Zeit lassen sich Informationen über die im Detektor deponierte Energie gewinnen.

Time-of-Arrival (ToA): In diesem Modus wird die Zeit ab dem Zeitpunkt der ersten Überschreitung des Thresholds bis zum Ende des Frames gemessen. Somit erhält man die Zeitinformation des eintreffenden Teilchens.

Medipix: Hierbei wird ein Zähler bei jeder Überschreitung des Thresholds um eins erhöht, wodurch die Information gewonnen wird, wie viele Teilchen während des Frames Energie in einem Pixel deponieren. Dieser Modus ist auch mit einem Medipix2-Detektor möglich.

Soweit nicht anderweitig gekennzeichnet, beziehen sich folgende Betrachtungen und Aussagen auf den ToT-Modus.

Die im ASIC gewonnenen Informationen werden über das Chipboard an die Ausleseelektronik weiter gegeben und können mit Hilfe einer geeigneten Software ausgelesen werden. Als Ausleseelektronik wurde ein *Fitpix*-Readout [9] und als Software *Pixelman* [10] in der Version 2.2.3 vom 23. August 2013 verwendet. Einstellungen und Abläufe in Pixelman werden jeweils an geeigneter Stelle erklärt.

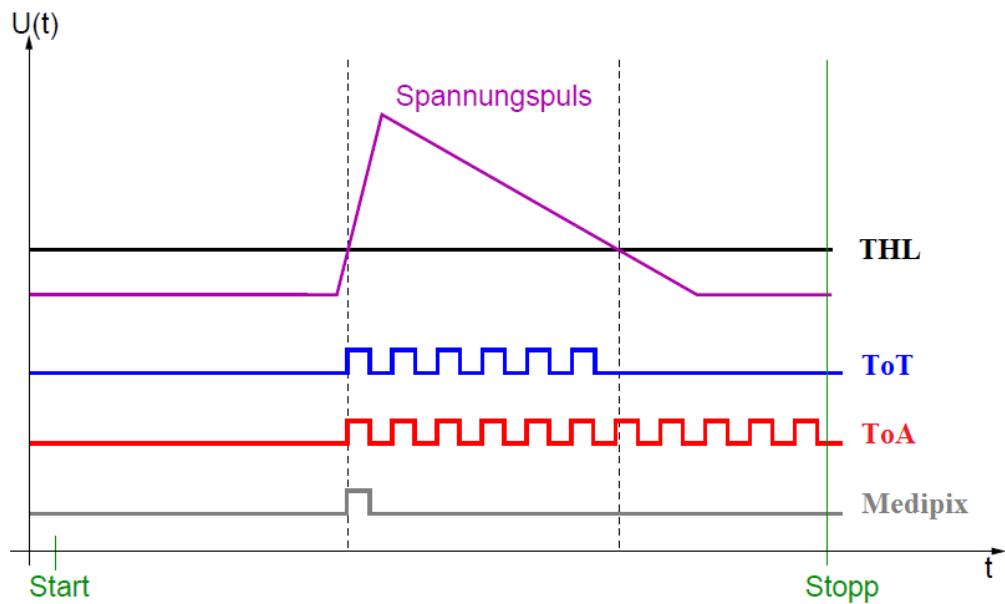


Abbildung 1.3: Spannungspuls (lila) eines Ereignisses nach Vorverstärkung. Der ToT-Modus (blau) misst die Energie des Ereignisses. Der ToA-Modus (rot) misst den Zeitpunkt der Detektion des Ereignisses und der Medipix-Modus (grau) die Anzahl der Ereignisse. Der Schwellenwert (schwarz) arbeitet als Diskriminator. Frei nach [11].

1.1.3 ToT-Modus

Dieser Modus wird verwendet, um die deponierte Energie eines ionisierenden Teilchens zu messen. Wie erwähnt, lässt sich diese Information aus der Länge des Spannungspulses extrahieren. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 1.3 ein typischer Spannungspuls, nach Integration und Vorverstärkung, schematisch gezeigt. Die schwarz eingezeichnete Linie kennzeichnet die Energieschwellen. In blau ist die Clock-Frequenz im ToT-Modus zu sehen. Die Anzahl der Clock-Pulse wird gezählt, während das Signal über dem THL liegt. Daraus lässt sich die ToT berechnen [11]:

$$ToT = \frac{\text{Anzahl der Clock-Pulse}}{f_{clock}} \quad (1.2)$$

Neben dem THL und der Clock haben zwei weitere DAC-Werte großen Einfluss auf die Form des Spannungspulses:

PreAmp: Dieser DAC-Wert beschreibt die Vorverstärkung des Spannungspulses. Ein großer Wert führt zu einem hohen Peak des Pulses.

IKrum: Der IKrum definiert den Entladestrom, mit dem der Spannungspuls abgebaut wird. Er hat somit direkten Einfluss auf die auslaufende Flanke des Spannungspulses. Beispielsweise macht ein hoher IKrum die Flanke steiler und damit den Spannungspuls kürzer.

Eine Auflistung der verwendeten DAC-Werte in dieser Arbeit findet sich in Tabelle A.2 im Anhang. Nähere Informationen zu möglichen Einstellungsmöglichkeiten mit Hilfe der DAC-Werte finden sich in [3]. Bei festem PreAmp und IKrum hängen Höhe und vor allem Länge eines Spannungspulses vom induzierten Strom und somit von der deponierten Energie ab.

Da der Zusammenhang zwischen ToT und Energie E abhängig von Sensormaterial und eingestellten DAC-Werten ist, muss die Energiekalibration $ToT(E)$ für jeden einzelnen Timepix-Detektor bei Veränderung der DAC-Werte neu durchgeführt werden. Zusätzlich verhalten sich alle Pixel eines Timepix-Detektors produktionsbedingt leicht unterschiedlich. Um eine optimale Energieauflösung zu gewährleisten, sollte die Energiekalibration $ToT(E)$ zudem pixelweise durchgeführt werden. Der praktische Ablauf der Kalibration wird in Abschnitt 1.2 erläutert.

1.1.4 Wichtige Effekte innerhalb des Detektors

In diesem Abschnitt werden einige wichtige Effekte bezüglich der Detektion und der Signalqualität kurz erläutert. Für weiterführende Details und andere Effekte, die für diese Arbeit keine primäre Rolle spielen, sei auf [12] verwiesen.

„charge sharing“: Auf dem Driftweg der Ladungsträger zu den Pixelelektroden vergrößert sich der Durchmesser der Ladungswolke durch Diffusion, Repulsion und andere physikalische Prozesse. Dadurch kann es vorkommen, dass ein Teil der deponierten Energie nicht nur in diesem, sondern auch in benachbarten Pixeln gemessen wird. Falls die Energie, die in den Nachbarpixeln registriert wird, kleiner als die Energieschwellen ist, wird dort kein Signal erkannt und es kommt zu einem Verlust von Energieinformation. Das wird in Abbildung 1.4 veranschaulicht. Der mittlere Energieverlust durch Charge Sharing kann durch Simulationen berechnet werden. Durch größere Pixel-Abmessungen und höhere Bias-Spannungen kann Charge Sharing reduziert werden.

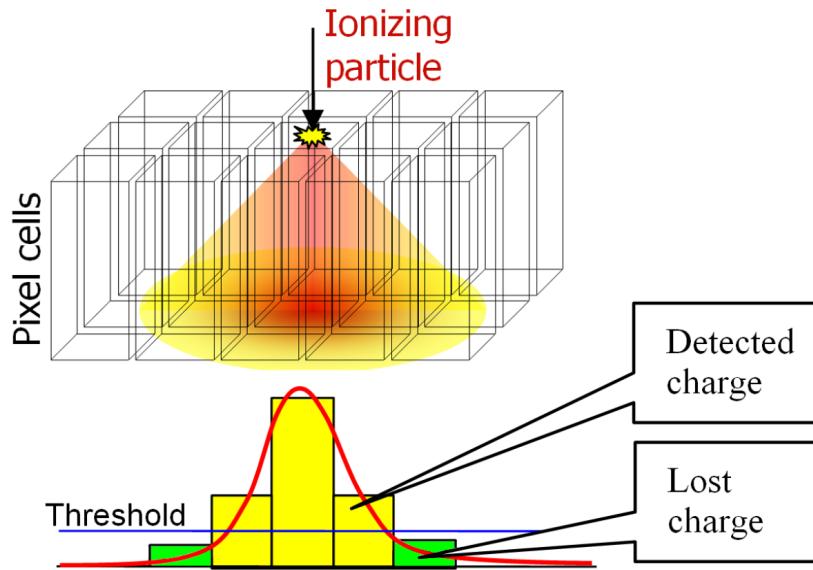


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung von Charge Sharing und Clustering nach [13]. Das ionisierende Teilchen erzeugt eine Ladungswolke, welche durch Charge Sharing verbreitert wird. Das resultierende Signal ist der gelb gekennzeichnete Cluster bestehend aus drei Pixeln. In den beiden grün gekennzeichneten Pixeln ist verlorene Ladungsinfomation gezeigt, da das Signal in diesen Pixeln kleiner als der Schwellenwert ist.

„cluster“: Als Cluster werden Signalstrukturen bezeichnet, bei denen in mehreren benachbarten Pixeln während eines Frames Signale registriert werden. Vor allem stark ionisierende Teilchen, wie α -Teilchen oder schnelle Elektronen, verursachen solche Cluster. In Abbildung 1.4 ist im unteren Bereich beispielsweise ein Cluster aus drei Pixeln zu sehen.

„single cluster“: In dieser Arbeit werden Cluster, die nur aus einem aktiven Pixel bestehen als Single Cluster bezeichnet. Dazu müssen während eines Frames alle direkt benachbarten Pixel inaktiv sein. Aus Gründen, die an passender Stelle näher erläutert werden, werden in dieser Arbeit nur Single Cluster für die Energiekalibration verwendet und größere Cluster verworfen.

1.2 Kalibrationsablauf

Um eine Kalibration, also einen Zusammenhang zwischen deponierter Energie und ToT-Wert, zu erhalten, bedarf es eines mehrstufigen Prozesses. Der Ablauf wird in den folgenden Kapiteln sukzessive präzisiert. In diesem Abschnitt wird nur auf den grundsätzlichen Prozess eingegangen, welcher in Abbildung 1.5 schematisch gezeigt ist. Zur Erzeugung von Spektren bekannter Energien bieten sich die folgenden zwei Möglichkeiten an:

mit radioaktiven Präparaten: Bei dieser Variante werden γ -Strahler bekannter Energie eingesetzt und vor dem Detektor angebracht. Um genügend Ereignisse zu detektieren, müssen Präparate mit hoher Aktivität verwendet werden oder entsprechend lange Messreihen aufgenommen werden.

mit Fluoreszenzfolien: Eine andere Möglichkeit bietet der Einsatz von Fluoreszenzfolien. Hierbei wird eine Metallfolie in dem Strahlgang einer Röntgenröhre angebracht und die bei passenden Folien und Röhreneinstellungen entstehenden K- und L-Fluoreszenzen detektiert. Diese Fluoreszenzen entstehen, wenn hochenergetische Photonen, in diesem Fall aus der Röntgenröhre, gebundene Elektronen aus den inneren Schalen (K,L,M,...) der Atome der Folie herausschlagen. Die entstehenden Lücken werden durch gebundene Elektronen aus äußeren Schalen besetzt, wobei die Energiedifferenz jeweils in Form von Strahlung emittiert wird. Dieser Vorgang wird als Fluoreszenz bezeichnet. Die Wiederbesetzung einer Lücke der

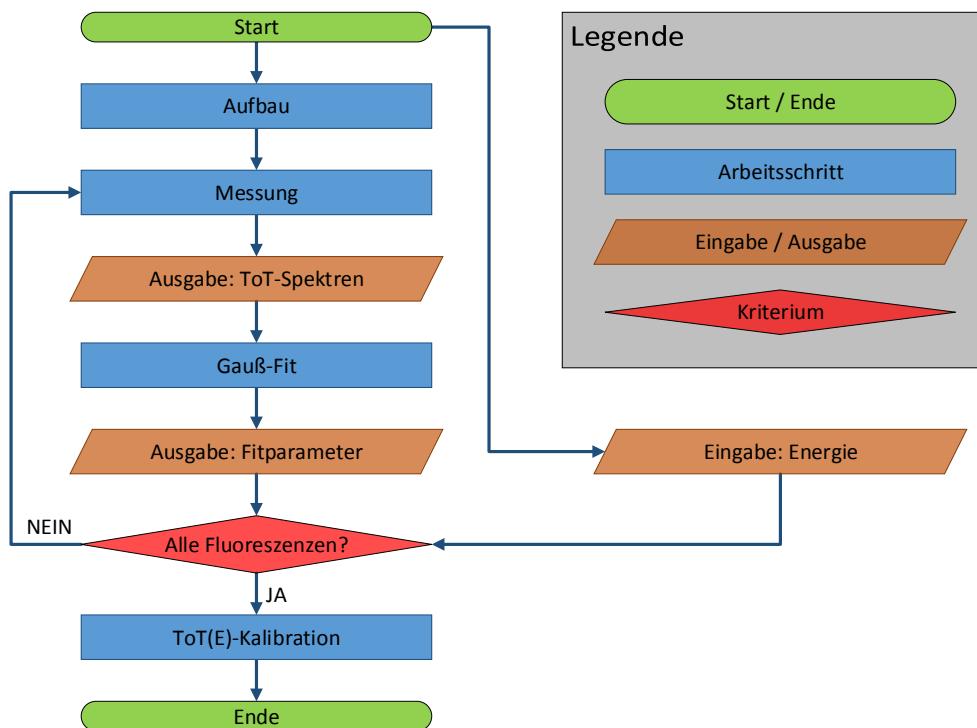


Abbildung 1.5: Grundsätzlicher Ablauf einer Energiekalibration von Timepix-Detektoren. Im oberen Bereich rechts ist eine Legende abgebildet.

K-Schale durch ein Elektron der L-Schale wird als K_α bezeichnet. Die Besetzung durch ein Elektron der M-Schale wird K_β bezeichnet, usw.. Da die Fluoreszenzen von K_α bzw. L_α und K_β bzw. L_β mit einem Timepix-Detektor in der Regel nicht aufgelöst werden können, wird im Folgenden nur von K- bzw. L-Fluoreszenz gesprochen. Informationen über die verwendeten Fluoreszenzfolien und die Röntgenröhre finden sich in Abschnitt 2.1.

Da bei letzterer Methode eine höhere Anzahl an Ereignissen bei gleicher Messdauer erreicht werden kann, wurde die Kalibration ausschließlich mit Folien und den entstehenden Röntgenfluoreszenzen (engl. „X-ray fluorescence analysis“ (XRF)) durchgeführt. Dazu wird ein ToT-Spektrum der Folie aufgenommen. Bei der Wahl der Acquisition Time muss ein Kompromiss zwischen zu wenigen Ereignissen und zu vielen Ereignissen pro Frame gefunden werden⁵. Bei den Messungen in dieser Arbeit waren pro Frame etwa 10 % der Pixel aktiv. Es ist darauf zu achten, hinreichend viele Messdaten zu haben, um eine Verfälschung der Ergebnisse durch statistische Schwankungen zu vermeiden.

Nun müssen die im Spektrum auftretenden Peaks identifiziert werden. Häufig kommen neben dem gewünschten Peak auch solche vor, die durch Metallfluoreszenzen aus dem Aufbau entstehen. Anhand der Positionen der Peaks zueinander wird der gesuchte Peak identifiziert und mit Hilfe des Fits einer Normalverteilung $G(ToT)$ wird die genaue Position des Peaks bestimmt:

$$G(ToT, A_i, \mu_i, \sigma_i) = A_i \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{ToT - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right) \quad (1.3)$$

Die Peakposition in ToT zusammen mit der bekannten Energie der Fluoreszenz bildet einen Datenpunkt für die angestrebte Kalibration. Um genügend solcher Datenpunkte zu erhalten, muss dieser Prozess für verschiedene Fluoreszenzen wiederholt werden. In dieser Arbeit werden je nach Detektor zwischen 7 und 9 verschiedene Fluoreszenzen für die Kalibration verwendet.

Solche Datenpunkte für verschiedene Fluoreszenzmaterialien sind an einem Beispiel in Abbildung 1.6 dargestellt. Ziel der Kalibration ist die Interpolation der gemessenen Datenpunkte. Dazu wird eine Interpolierende $f(E)$ benötigt, welche die Datenpunkte im betrachteten Bereich gut wiedergibt. Nach [14] kann dazu die empirische Gleichung (1.4) verwendet werden. Die resultierende Interpolation ist in Abbildung 1.6 in rot und die Energieschwelle in schwarz eingezeichnet.

$$f(E) = aE + b - \frac{c}{E - t} \quad (1.4)$$

Anzumerken ist noch, dass bei einer Messung die Energieverteilung gaußförmig ist. Das liegt unter anderem an der beschränkten Energieauflösung von Detektoren. Da jedoch nach Gleichung (1.4) der Zusammenhang zwischen ToT und Energie nicht linear ist, folgt daraus eine Verteilung im ToT-Spektrum, die nicht mehr gaußförmig ist (siehe Abbildung 1.7a). Daher ist die Angleichung einer Normalverteilung nach Gleichung (1.3) an das ToT-Spektrum streng genommen nicht korrekt. Mathematisch korrekt ist die Faltung einer Normalverteilung mit der Kalibrationsfunktion der Form [15]:

$$M(ToT) = G(f^{-1}(ToT)) \quad (1.5)$$

⁵Bei vielen Ereignissen werden auch viele Cluster registriert, welche aber nicht für die Energiekalibration verwendet werden.

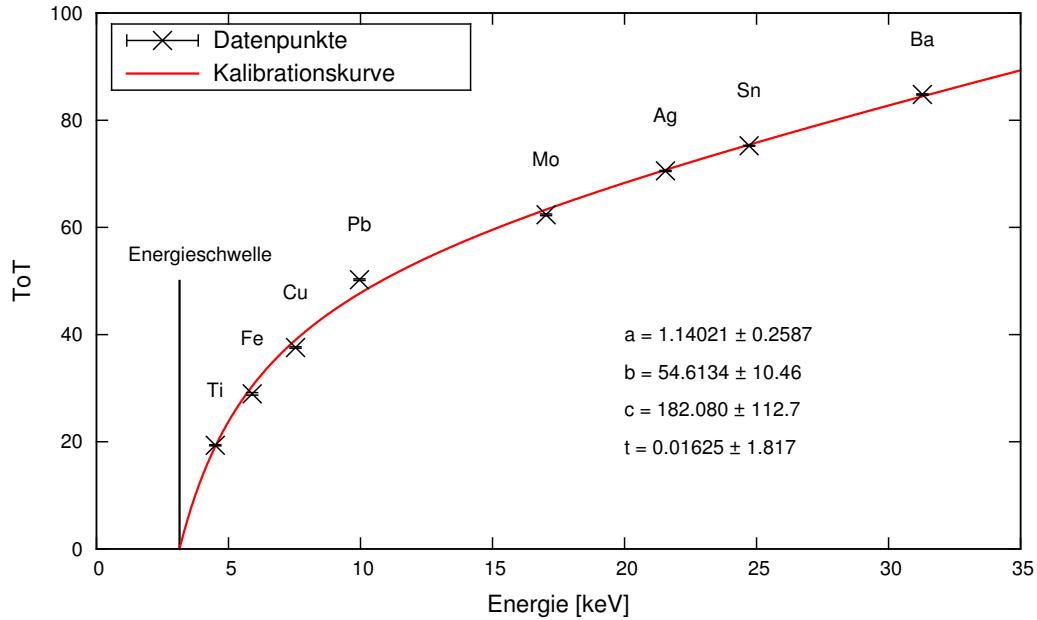
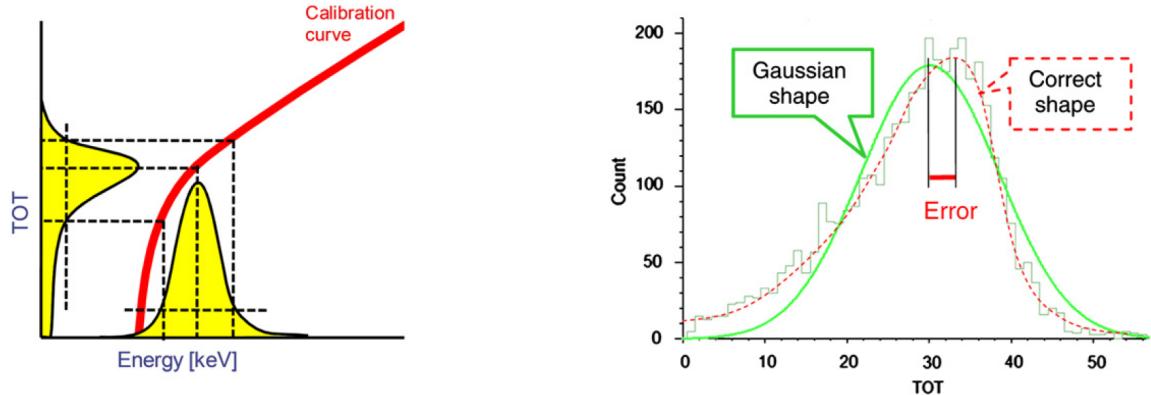


Abbildung 1.6: Beispiel einer ToT(E)-Kalibrationskurve für den Timepix-Detektor F4W255.

Die eingezeichneten Fehlerbalken sind sehr klein und daher kaum sichtbar. Die rechnerisch kleinste messbare Energie, hier Energieschwelle genannt, ist zusätzlich eingezeichnet.



(a) Nichtlineare Projektion der Energieverbreiterung auf die ToT-Skala.

(b) Entstehender systematischer Fehler bei Anpassung durch Normalverteilung.

Abbildung 1.7: Projektion der Energieverbreiterung und entstehender systematischer Fehler bei Vernachlässigung des nicht-linearen Verhaltens [15].

Der durch die Näherung entstehende systematische Fehler (siehe Abbildung 1.7b) ist jedoch vernachlässigbar, da sich der Großteil der Datenpunkte im linearen Bereich der Kalibrationskurve befindet. Deshalb wird in dieser Arbeit nichtsdestotrotz eine Normalverteilung an die ToT-Spektren angeglichen. Dass auch mit dieser Näherung eine Kalibration gelingen kann, wurde in [16] gezeigt.

Kapitel 2

Experiment

Kapitelübersicht

| | | |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 2.1 | Aufbau | 14 |
| 2.1.1 | Versuchsaufbau | 14 |
| 2.1.2 | Verwendete Timepix-Detektoren | 14 |
| 2.2 | Messung | 17 |
| 2.2.1 | Einstellungen | 17 |
| 2.2.2 | Angleichen der Energieschwelle | 18 |
| 2.2.3 | Datennahme | 18 |

Dieses Kapitel enthält alle nötigen Informationen, um Messungen für eine Energiekalibration durchführen zu können. Neben der Gestaltung eines geeigneten Versuchsaufbaus wird auch der genaue Ablauf der Messung erläutert.

In Abschnitt 2.1 wird auf die einzelnen Bestandteile des Aufbaus eingegangen und deren Zweck erklärt. Zusätzlich werden die im Rahmen dieser Arbeit kalibrierten Timepix-Detektoren kurz vorgestellt und etwaige Besonderheiten aufgezeigt.

Abschnitt 2.2 befasst sich mit Vorbereitung und Ablauf der Messung. Es werden alle wichtigen Einstellungen für die durchgeführten Messungen genannt. Die Option, vor einer Messung die Energieschwellen der Pixel anzulegen, wird eingehend vorgestellt, da sie zu deutlich besseren Ergebnissen führt.

2.1 Aufbau

2.1.1 Versuchsaufbau

Ziel des Aufbaus ist es, die K- und L-Fluoreszenzen der eingesetzten Folien mit einem Timepix-Detektor zu messen. Die Folien werden mit einer Röntgenröhre bestrahlt, wodurch bei ausreichender Energie Röntgenfluoreszenzen von der Folie ausgehen. Diese Fluoreszenzen bekannter Energie werden von dem Timepix-Detektor gemessen.

Verwendet wird eine Röntgenröhre vom Typ *Polydoros 100* der Firma Siemens, deren Strahl durch einen Kollimator mit Radius 1,5 cm verengt wird und dann auf die Fluoreszenzfolie trifft. Die entstehenden Fluoreszenzen werden vom Timepix-Detektor gemessen, der so positioniert wird, dass die Pixelmatrix homogen bestrahlt wird. Um eine gute Datenausbeute zu erhalten, müssen sowohl die Folie mittig in den Strahl als auch der Timepix-Detektor genau auf die Folie gerichtet werden.

Beim Aufbau ist es wichtig zu gewährleisten, dass möglichst wenig unerwünschte Strahlung den Detektor erreicht. Dazu gehört sowohl Strahlung von außerhalb des Aufbaus, wie zum Beispiel Untergrundstrahlung und kosmische Strahlung, als auch Strahlung, die innerhalb des Aufbaus entsteht. Erstere wird, wie in Abbildung 2.1 gut sichtbar ist, durch eine vollständige Bleummantelung größtenteils abgeschirmt. Diese Ummantelung hat auch zur Folge, dass in den gemessenen Spektren immer Bleifluoreszenzen auftreten. Diese kann als Referenz zur Identifikation von Peaks der eingesetzten Folien verwendet werden. Problematisch ist das Auftreten der Bleifluoreszenz bei Folien, deren Fluoreszenzenergien denen von Blei ähnlich sind, sodass beide Peaks nicht mehr getrennt aufgelöst werden können. Durch die im Aufbau gewählte Positionierung der Bleiabschirmung und des Detektors wird verhindert, dass direkte Strahlung der Röntgenröhre den Detektor erreicht.

Zum weiteren Aufbau gehört eine Spannungsquelle, welche mit dem Chipboard über ein LEMO-Kabel verbunden ist. Ein Computer mit USB-Schnittstelle, an welchen die Messdaten über das Fitpix zur Speicherung und Visualisierung geschickt werden, wird zur Verarbeitung der Daten verwendet.

2.1.2 Verwendete Timepix-Detektoren

Insgesamt werden für diese Arbeit sieben unterschiedliche Timepix-Detektoren kalibriert. Eine Übersicht über deren Sensormaterial und die Dicke der Sensorschicht ist in Tabelle 2.1 zu finden, wo auch besondere Merkmale der Timepix-Detektoren genannt werden.

D7W78 und E3W83: Der Timepix-Detektor D7W78 besitzt einen CdTe-Sensor mit einer Sensordicke von 2 mm. Der Sensor des Timepix-Detektors E3W83 weist eine Dicke von 1 mm auf und besteht ebenfalls aus CdTe. Ein Foto dieses Detektors ist in Abbildung 1.1a zu sehen. Bei beiden Timepix-Detektoren ist nur jeder zweite Pixel mit dem Sensor gebondet. Die Pixelmatrix besteht somit aus 128×128 Pixeln, mit einer Kantenlänge von jeweils 110 μm .

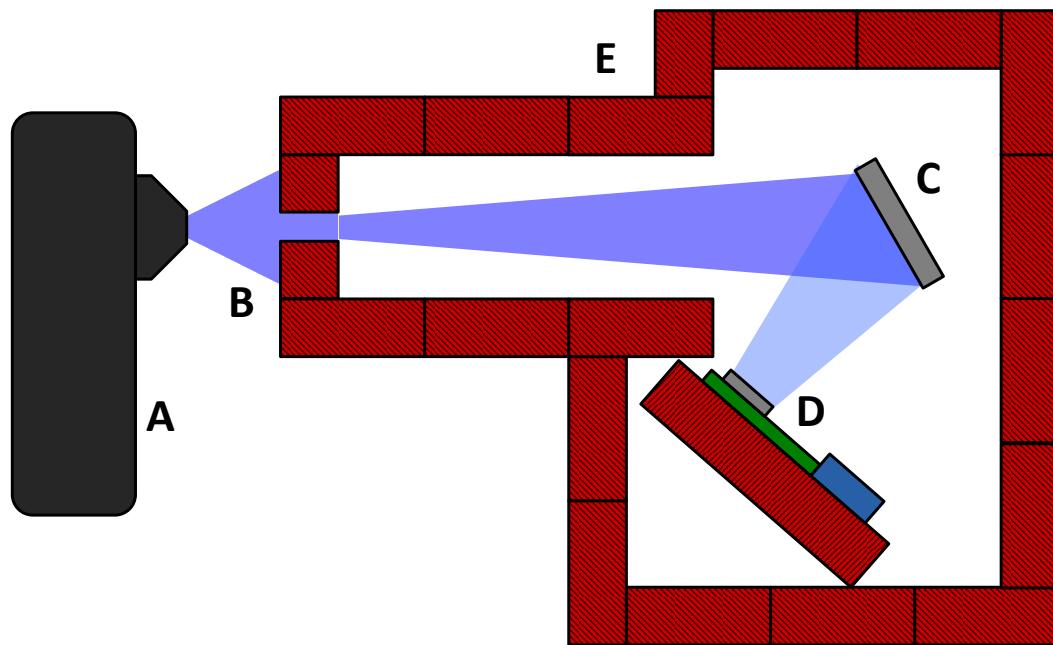
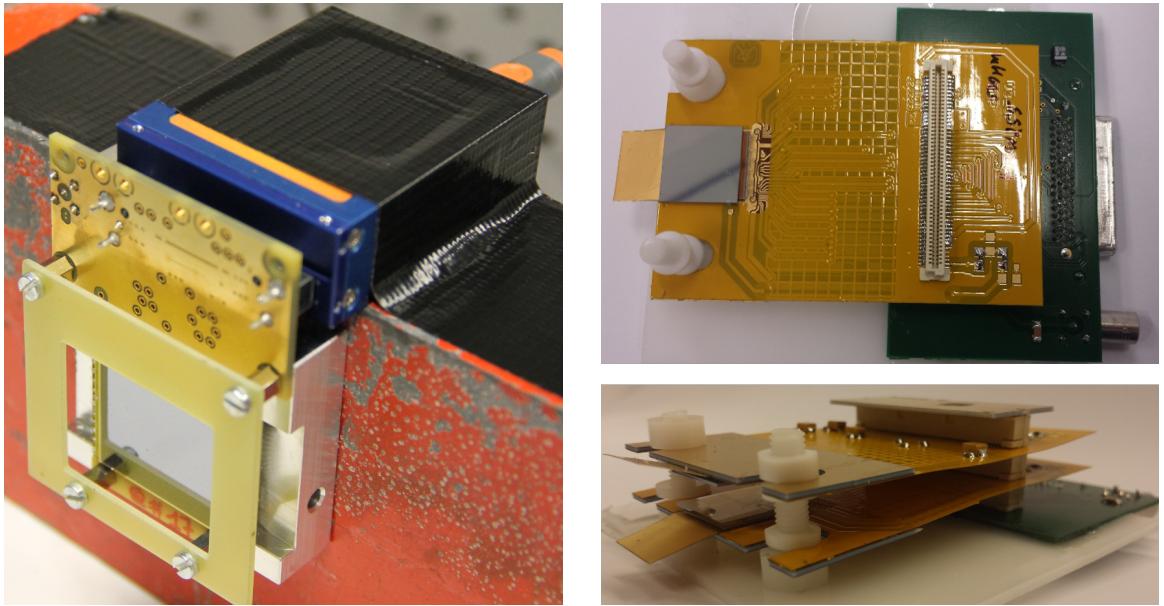


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. *A* stellt die Röntgenröhre dar. *B* kennzeichnet den Kollimator mit 1,5 cm Öffnungsradius. An Stelle *C* wird eine Fluoreszenzfolie positioniert, deren Fluoreszenzen mit dem Timepix-Detektor (*D*) gemessen werden. *E* markiert die Bleiabschirmung.

Tabelle 2.1: Übersicht über alle verwendeten Timepix-Detektoren mit zugehörigen Sensoreigenschaften und besonderen Merkmalen. Dabei bezeichnet „up“ den Timepix-Detektor, der nach oben orientiert ist und „down“ den nach unten orientierten Detektor.

| Bezeichnung | Sensormaterial | Sensordicke | Pixelgröße | Besonderheit |
|------------------|----------------|-------------|------------|---------------------|
| E3W83 | CdTe | 1 mm | 110 µm | |
| D7W78 | CdTe | 2 mm | 110 µm | |
| D6W15 | Si | 300 µm | 55 µm | Quad |
| F4W255 J4W255 | Si | 500 µm | 55 µm | Stack up down |
| K8W89 K3W89 | Si | 300 µm | 55 µm | Stack up down |



- (a) Foto des Timepixquads D6W15 mit Fitpix, der an einem Bleistein befestigt ist. Der graue Alu-Körper dient dabei als Passivkühler und die gelbe Platte aus PVC ist aus Schutzgründen vor dem Sensor angebracht.
- (b) Oben ist der Timepix-Detektor F4W255 des Stacks F4W255/J4W255 gezeigt. Im unteren Foto sind beide Detektoren des Stacks zu sehen, bei dem die Sensoren deckungsgleich übereinander befestigt sind.

Abbildung 2.2: Foto des Timepixquads D6W15 und des Stacks F4W255/J4W255.

D6W15: Der Timepix-Detektor D6W15 besteht aus vier ASICs. Diese Art von Timepix-Detektoren wird als Timepixquad bezeichnet. Die ASICs werden mit sehr kleinem Abstand in einem 2×2 -Raster angeordnet und mit einer durchgehenden Sensorfläche aus Si gebondet. Dadurch entsteht ein Timepix-Detektor mit einer effektiven Sensorfläche von $2,8 \times 2,8 \text{ cm}^2$ und einer Matrix aus 512×512 Pixeln. Ein Foto des verwendeten Timepixquads ist in Abbildung 2.2a zu sehen. Darin ist die gelbe Abschirmung zum Schutz des Sensors, sowie ein Passivkühler aus Aluminium zu erkennen. Dieser ist notwendig, da beim Betrieb von vier Timepix-Detektoren viel Abwärme entsteht, welche zum Schutz der ASICs abgeführt werden muss.

F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89: Die Detektoren F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89 bestehen aus jeweils zwei Timepix-Detektoren mit Si-Sensor, die als ein Stack betrieben werden. In Abbildung 2.2b ist zu sehen, dass dabei zwei Timepix-Detektoren deckungsgleich übereinander angebracht sind und zusammen von einem Fitpix ausgelesen werden. Bei den Stacks wurde für die Platinen mit Kupfer galvanisiertes Teflon (*CuFlon*) verwendet um die natürliche Aktivität der Platinen zu reduzieren [17]. Der Abstand der Sensoren lässt sich mit Hilfe von Muttern stufenlos variieren. Beide Stacks unterscheiden sich nur durch die unterschiedlichen Sensordicken.

2.2 Messung

2.2.1 Einstellungen

Röhreneinstellungen Um Fluoreszenzen der Folien anregen zu können, muss die Energie der anregenden Photonen groß genug sein. Dazu wird eine Röntgenröhre mit variierbarer Anodenspannung und Stromstärke verwendet. Das Maximum des Bremsspektrums der Röntgenröhre befindet sich in guter Näherung bei der Hälfte der angelegten Anodenspannung in keV [11]. Für Messungen dient deshalb die doppelte Fluoreszenzenergie als Anodenspannung U in kV zur Orientierung. Baubedingt ist jedoch eine Mindestspannung von 40 kV erforderlich. Damit die Intensität möglichst hoch ist, wird die Stromstärke I so eingestellt, dass die Leistung $P_{el} = U \cdot I$ der Röntgenröhre nahe an ihrer Maximalleistung ist. Die für die verschiedenen Folien verwendeten Anodenspannungen und Stromstärken sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

DAC-Werte Wie in Abschnitt 1.1.3 erwähnt, haben die gewählten DAC-Werte großen Einfluss auf die Energieantwort des Detektors. Die optimalen DAC-Werte ergeben sich aus den Anforderungen des Experiments und müssen für die Kalibration beibehalten werden. In Tabelle A.2 im Anhang sind die DAC-Werte aller kalibrierten Timepix-Detektoren aufgelistet. Die DAC-Werte der einzelnen ASICs des Quads lassen sich individuell einstellen, wobei jedoch, abgesehen von THL und THS (engl. „threshold shift“), die gleichen Einstellungen verwendet werden.

Weitere Einstellungen Zusätzliche Einstellungen wie die angelegte Bias-Spannung und die verwendete Clock-Frequenz sind auch in Tabelle A.2 im Anhang aufgeführt. Auch diese Parameter hängen von den Anforderungen des jeweiligen Experiments ab und müssen für dieses optimal eingestellt werden. Beim Anlegen der Spannung muss auf die richtige Polarität geachtet werden, da ansonsten der Timepix-Detektor beschädigt werden kann. Darüber hinaus muss der Leckstrom beobachtet werden. Dieser steigt während des Anlegens der Spannung an, und sinkt bei konstanter Spannung wieder auf einen konstanten Wert von etwa 1 μ A bis 10 μ A. Der Wert ist detektor- und temperaturabhängig und kann bei Bestrahlung des Timepix-Detektors ansteigen. Die Clock-Frequenz wird in Pixelman eingestellt¹, während die verwendete Polarität in Pixelman nur angegeben wird und an der Spannungsquelle eingestellt wird.

¹Device Control → Options → Device Settings... → Interface Specific Info → Timepix Clock

Tabelle 2.2: Verwendete Anodenspannung und Stromstärke der Röntgenröhre bei den eingesetzten Fluoreszenzfolien.

| Material | Ti | Fe | Cu | Mo | Ag | Ba | Gd | W | Pb |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Anodenspannung [kV] | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 70 | 90 | 90 | 50 |
| Stromstärke [mA] | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 30 | 20 | 20 | 40 |

2.2.2 Angleichen der Energieschwelle

Alle Pixel eines Timepix-Detektors besitzen auf Grund kleiner baubedingter Unterschiede eine unterschiedlich hohe Energieschwelle. Um eine möglichst homogene Energieschwelle aller Pixel zu erreichen, müssen diese Unterschiede kompensiert werden. Dieser Ausgleich wird auch engl. „threshold equalization“ genannt. Das Verfahren ist in Pixelman implementiert und kann über das in Abbildung 2.3 gezeigte Fenster² ausgeführt werden.

Die Energieschwelle kann global durch den THS DAC-Wert und jeder Pixel in 16 Stufen (4 bits) feinjustiert werden. Für den Ausgleich wird der THL solange inkrementiert bis der Pixel die Rauschgrenze überschreitet. Diese Grenze bezeichnet denjenigen THL, ab der das Rauschen durch den Vorverstärker (PreAmp) als physikalisches Signal gewertet wird [18]. Dieser THL wird in einem Histogramm aufgetragen, wobei idealerweise alle Pixel normalverteilt sind. In Abbildung 2.3 ist in blau das zur Korrekturstufe 0 und in rot das zur Korrekturstufe 15 zugehörige Histogramm gezeigt. Dieses Verfahren wird für alle Korrekturstufen durchgeführt. Im nächsten Schritt wird jedem Pixel diejenige Korrekturstufe zugewiesen, die zu einer Energieschwelle führt, die dem globalen Durchschnitt am nächsten kommt [3]. Beispielsweise konnte für den Timepix-Detektor K8W89 dadurch eine um den Faktor 4 schmalere Verteilung der effektiven Energieschwellen erreicht werden. Die Qualität und Dauer des Ausgleichs der Energieschwellen kann durch folgende Parameter beeinflusst werden:

Spacing: Mit diesem Parameter wird festgelegt, wie groß der Abstand zwischen den Pixeln ist, die gleichzeitig ausgeglichen werden. Bei einem spacing von 2 wird beispielsweise nur jeder zweite Pixel simultan angesteuert. Dadurch kann eine etwaige Beeinflussung benachbarter Pixel vermieden werden.

Acquisition count und time: Diese beiden Parameter legen die Zeitdauer und Anzahl an Wiederholungen für ein Inkrement des THL fest. Höhere Werte führen zu besseren Ergebnissen.

Optimize THS: Wenn diese Option ausgewählt ist, wird beim Angleichen des THL der optimale THS DAC-Wert eingestellt und nicht der manuell vorgegebene. Für ein gutes Ergebnis sollte von dieser Funktion Gebrauch gemacht werden.

Die entstehende Anpassung der Energieschwelle aller Pixel wird als Maske bezeichnet. Darin sind neben den Korrekturwerten der einzelnen Pixel auch maskierte Pixel vermerkt, die ein nicht regelmäßiges Verhalten zeigen und daher nicht verwendet werden können. Diese Maske kann gespeichert³ und zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen werden⁴, um jede Messreihe eines Experiments mit den gleichen Einstellungen durchführen zu können.

2.2.3 Datennahme

Nach der Einstellung der Detektoren kann mit der Datennahme begonnen werden. Dazu müssen die gespeicherte Maske der Threshold-Angleichung und die DAC-Werte⁵ geladen werden. Es

²Device Control → Tools → Threshold Equalization

³Device Control → File → Save Binary Pixels Cfg...

⁴Device Control → File → Load Binary Pixels Cfg...

⁵Device Control → Tools → DAC Control Panel

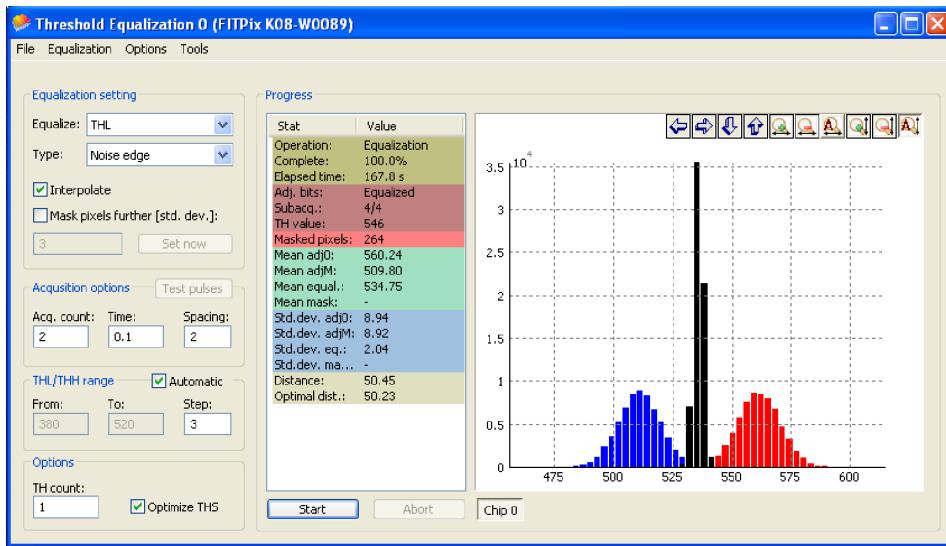


Abbildung 2.3: Fenster in Pixelman zur Angleichung der Energieschwelle. Auf die wichtigsten Einstellmöglichkeiten wird im Text näher eingegangen.

sollte überprüft werden, ob der Modus ToT eingestellt ist⁶. Dann kann die Datennahme der verschiedenen Fluoreszenzfolien durchgeführt werden. Tabelle A.3 im Anhang zeigt, welche Detektoren mit Hilfe welcher Folien kalibriert werden. Die Messung kann in Echtzeit beobachtet werden. Es ist nötig, die Acquisition Time und die Anzahl der Frames für jede Messreihe individuell einzustellen. Die angewandten Richtlinien hierfür werden in Abschnitt 1.2 erklärt. Die Messreihen bestehen jeweils aus 80000 bis 200000 Frames – abhängig von Timepix-Detektor und Fluoreszenzfolie. Für jede Messreihe wird eine zusätzliche Datei angelegt, die die verwendeten Parameter und DAC-Werte enthält.

Bei den Folien aus Gadolinium (Gd), Wolfram (W) und Blei (Pb) sind grundsätzlich sowohl die K- als auch die L-Fluoreszenz detektierbar. Die Sammeleffizienz der Sensoren nimmt bei hohen Energien ab. Dieser Effekt wird bei Sensoren aus Si, im Vergleich zu CdTe, schon bei kleineren Energien signifikant. Auf Grund der schlechten Sammeleffizienz ist die erreichbare Statistik bei der K-Fluoreszenz von Pb mit beiden Sensormaterialien in praktikabler Messzeit zu gering. Daher wird die Pb-Folie bei einer Röhrenspannung von nur 50 kV bestrahlt. Aus dem gleichen Grund können bei Si-Sensoren die K-Fluoreszenzen von Gd und W nicht zur Kalibration verwendet werden, während dies für CdTe-Sensoren noch möglich ist. Die für die Kalibration eines Detektors verwendeten Folien sind in Tabelle A.3 aufgeführt.

Die Messdauer variiert zwischen 20 min bei großen Folien und niedriger Fluoreszenzenergie (z. B. bei Kupfer (Cu)) und 3 h bei kleineren Folien und hohen Fluoreszenzenergien, wie es beispielsweise bei Gd der Fall ist⁷. Dabei wird darauf geachtet, eine Mindestanzahl von etwa 100 Ereignissen im Fluoreszenzpeak zu erhalten, um Auswirkungen statistischer Schwankungen im Spektrum für die folgende Auswertung der Daten zu reduzieren.

⁶Device Control → File → Set Mode → Time over Threshold

⁷Größere Fluoreszenzfolien führen zu einer höheren Trefferrate und eine niedrige Fluoreszenzenergie wird auf Grund der höheren Sammeleffizienz besser detektiert als eine hohe Fluoreszenzenergie.

Kapitel 3

Datenauswertung

Kapitelübersicht

| | | |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 3.1 | Globale Kalibration | 22 |
| 3.2 | Pixelweise Kalibration | 26 |
| 3.2.1 | Angleichen der Spektren | 26 |
| 3.2.2 | Angleichen der Kalibrationskurve | 30 |
| 3.2.3 | Schematischer Ablauf | 31 |

Auf Grundlage des vorherigen Kapitels werden in diesem Kapitel Kalibrationsmethoden für Timepix-Detektoren vorgestellt. Zum einen ist das die globale Kalibration und zum andern die pixelweise Kalibration der kompletten Pixelmatrix. Aufgetretene Probleme werden genannt und Lösungsansätze vorgestellt.

In Abschnitt 3.1 wird die globale Kalibration am Beispiel des Timepix-Detektors E3W83 im Detail durchgeführt. Ausgehend von Spektren unterschiedlicher Fluoreszenzfolien wird jeder Schritt der Datenreduktion zur Kalibration eines Timepix-Detektors erklärt. Dabei wird unter anderem auf unterschiedliche Methoden der quantitativen Auswertung der Daten eingegangen.

Abschnitt 3.2 befasst sich mit der Erklärung des automatisierten Algorithmus zur pixelweisen Kalibration eines Timepix-Detektors. Der Algorithmus wird am Beispiel des Timepix-Detektors F4W255 erläutert. Es werden Kriterien vorgestellt, die die Kalibration eines Pixels bewerten, wodurch sich fehlerhafte Angleichungen an Spektren identifizieren und gegebenenfalls korrigieren lassen. Als Kriterium werden insbesondere starke Abweichungen der Fitparameter von den mittleren Werten der Fitparameter aller Pixel verwendet.

3.1 Globale Kalibration

In einem ToT-Spektrum geht der jeweilige ToT-Eintrag eines aktiven Pixels in ein Histogramm ein. Wie in Abbildung 3.1a zu erkennen ist, sind in diesem Spektrum noch keine Peaks sichtbar. Das liegt daran, dass lediglich die ToT-Werte einzelner aktiver Pixel eingehen. Dabei wird vernachlässigt, dass stark ionisierende Teilchen ihre Energie in mehreren Pixeln deponieren können und so Cluster entstehen. Um ein physikalisch sinnvolles Spektrum zu erhalten, werden die ToT-Einträge aller Pixel eines Cluster addiert (siehe Abbildung 3.1b), sodass nun der ToT-Wert des gesamten Clusters in das Histogramm eingehen. Damit sind fünf Peaks erkennbar. Die Qualität des Spektrums lässt sich verbessern, indem nur Single Cluster, also Pixel betrachtet werden, deren direkt benachbarte Pixel während des Frames nicht aktiv sind. Alle größeren Cluster werden für die Datenreduktion ignoriert. Danach verbleiben im Spektrum nur noch $m = 4$ Peaks. Der verschwundene Peak beruht demnach größtenteils auf unabhängigen Events in benachbarten Pixeln, die zu einem Cluster, also einem zusammenhängenden Event zusammengefasst wurden. Durch die ausschließliche Berücksichtigung von Single Cluster lassen sich solche scheinbaren Peaks gut filtern.

Im nächsten Schritt werden alle erkennbaren Peaks identifiziert:

Peak A: Der Peak ist keiner Röntgenfluoreszenz zuzuordnen, sondern ist ein niederenergetisches Artefakt. Er kann nicht zur Kalibration verwendet werden.

Peak 1: Dieser Peak tritt bei allen Spektren des Timepix-Detektors E3W83 an der gleichen Stelle auf. Es handelt sich dabei um die L-Fluoreszenz von Pb. Er könnte für die Kalibration direkt verwendet werden. Jedoch werden in dieser Arbeit für Pb separate Messreihen durchgeführt und deren Peaks verwendet.

Peak 2: Analog zu vorherigem Peak tritt auch dieser Peak bei allen Messreihen des E3W83 an der gleichen Stelle auf. Auf Grund der relativen Lage zu Peak 1 kann Peak 2 als eine Überlagerung der K-Fluoreszenzen aus Cd und Te identifiziert werden. Die zwei überlagerten Peaks können nicht aufgelöst werden, sodass Peak 2 nicht für die Kalibration verwendet werden kann.

Peak 3: Bei diesem Peak handelt es sich um die Fluoreszenz von Gd. Sie wird durch die relative Lage der Peaks von Pb und Cd/Te identifiziert und wird für die Kalibration verwendet.

Um quantitative Informationen über die Position der Peaks zu erhalten wird an die Peaks eine Normalverteilung nach Gleichung (1.3) angeglichen¹. Bei Spektren mit mehreren erkennbaren Peaks, wie es in Abbildung 3.2a der Fall ist, kann eine Summe von Normalverteilungen angeglichen werden:

$$G(ToT, \vec{A}, \vec{\mu}, \vec{\sigma}) = \sum_{i=1}^m A_i \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{ToT - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right) \quad (3.1)$$

¹Diese Näherung führt zu vernachlässigbaren systematischen Fehlern, wie in Abschnitt 1.2 motiviert wurde.

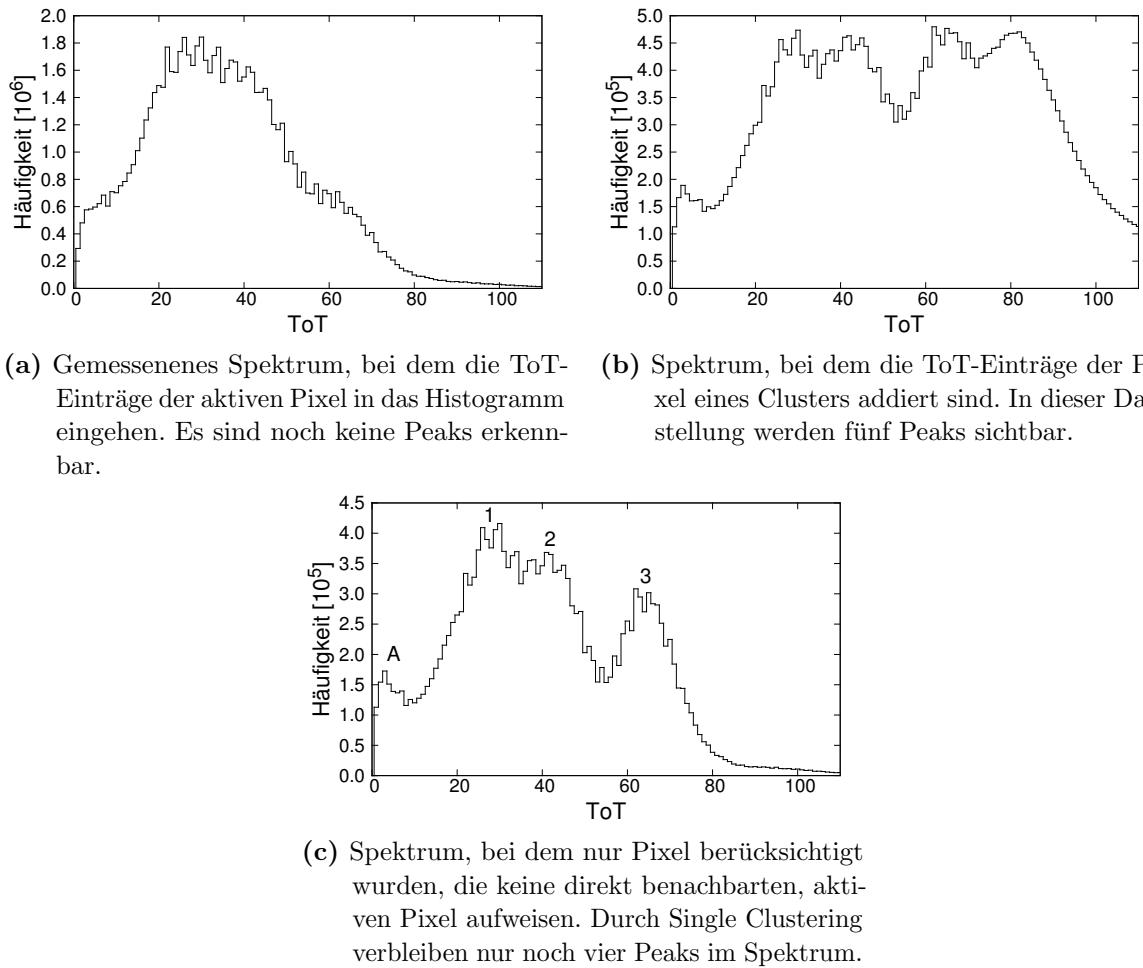


Abbildung 3.1: Vergleich verschiedener Darstellungen der Messdaten am Beispiel des Spektrums von Gd.

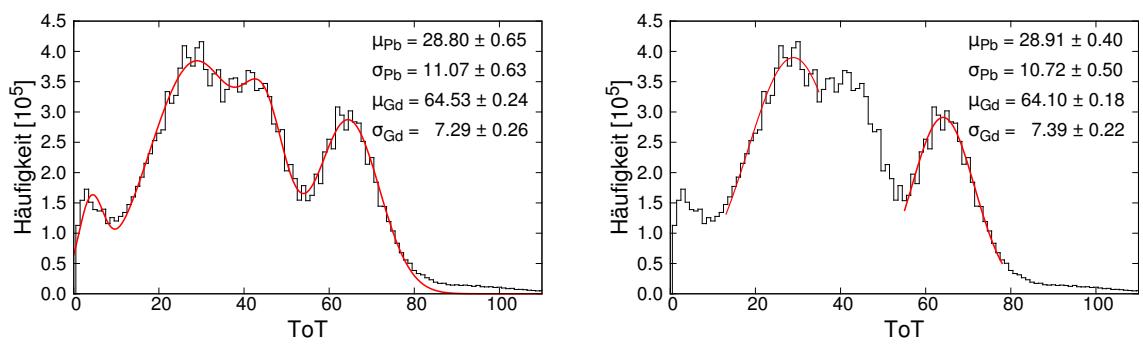


Abbildung 3.2: Unterschiedliche Methoden der Näherung durch Normalverteilungen an die Fluoreszenz-Peaks in einem globalen Spektrum am Beispiel von Gd. Die gefundenen Parameter unterscheiden sich nur geringfügig.

Eine andere Möglichkeit ist, die Peaks durch einzelne Normalverteilungen lokal anzugeleichen. Das Resultat ist in Abbildung 3.2b zu sehen. Dass der dadurch entstehende systematische Fehler vernachlässigbar ist, zeigt der Vergleich der gefundenen Parameter in Abbildung 3.2. Da der Fit einer Summe von Normalverteilungen viele freie Parameter besitzt, ist er anfällig für statistische Schwankungen, weshalb die Technik mit einzelnen Normalverteilungen angewendet wird. Der nächste Schritt ist das Auftragen der Peakpositionen mit ihren Energien in einem $ToT(E)$ -Graphen. Dazu eine kurze Vorüberlegung:

In einem Pixel wird nicht die tatsächliche Photonenenergie, sondern eine etwas kleinere Energie gemessen. Das liegt daran, dass ein Teil der Energie durch Charge Sharing (siehe Abschnitt 1.1.4) und weitere Effekte verloren geht. Um die Auswirkungen aller physikalischen Faktoren, inklusive der Überlagerung der K_α , K_β , ..., bzw. L_α , L_β , ... berücksichtigen zu können, kann die Energiedeposition mit ROSI simuliert werden [19]. Die deponierten Energien, die die Simulation ergeben hat, sind in Tabelle A.1 nachzulesen und liegen im Bereich von 0,5 keV bis 1 keV. Obwohl die Energiedeposition prinzipiell von Sensormaterial und -dicke abhängig ist, werden in dieser Arbeit nur die Ergebnisse der Simulation eines CdTe-Sensors mit 1 mm Dicke verwendet. Die erwarteten Abweichungen von diesen Ergebnissen bei anderen Sensoren sind vernachlässigbar. Für nähere Informationen bezüglich der Simulation sei auf [12] und [20] verwiesen.

Da nun sowohl die deponierte Energie aus der Simulation als auch der zugehörige ToT-Wert gefunden sind, können diese Datenpunkte (siehe Tabelle 3.1) in einen $ToT(E)$ -Graphen eingetragen werden. An diese Punkte wird die Kalibrationsfunktion nach Gleichung (1.4) angeglichen. Als Fehler der Peakposition μ_i wird dessen Unsicherheit $\Delta\mu_i$ aus der Angleichung an die ToT-Spektren verwendet. Bei dem Fit werden Datenpunkte auf Grund ihrer Unsicherheit $\Delta\mu_i$ unterschiedlich gewichtet. Es wird eine Gewichtung von $\Delta\mu_i^{-2}$ verwendet, sodass Datenpunkte mit größerer Unsicherheit in der Kalibration weniger gewichtet werden. Das Ergebnis mit den resultierenden Kalibrationsparametern ist in Abbildung 3.3 abgebildet.

Mit Hilfe der Kalibrationskurve können nun ToT-Spektren in Energie-Spektren umgerechnet werden. Da bei der vorgestellten Methode jedoch nicht die unterschiedlichen Energieantworten der einzelnen Pixel (siehe Abschnitt 2.2.2) berücksichtigt werden, wird im nächsten Abschnitt die pixelweise Kalibration erläutert, die zu einer besseren Energieauflösung des Detektors führt.

Tabelle 3.1: Verwendete Datenpunkte für die globale Kalibration des Timepix-Detektors E3W83.

| Material | Energie [keV] | μ_i | $\Delta\mu_i$ |
|----------|---------------|---------|---------------|
| Fe | 5.90 | 18.80 | 0.2054 |
| Cu | 7.54 | 22.65 | 0.1830 |
| W | 7.77 | 23.14 | 0.1570 |
| Pb | 9.96 | 28.11 | 0.1542 |
| Mo | 17.03 | 35.45 | 0.2537 |
| Ag | 21.55 | 44.13 | 0.1423 |
| Ba | 31.28 | 49.86 | 0.2288 |
| Gd | 41.88 | 63.27 | 0.2952 |
| W | 57.99 | 78.84 | 0.3557 |

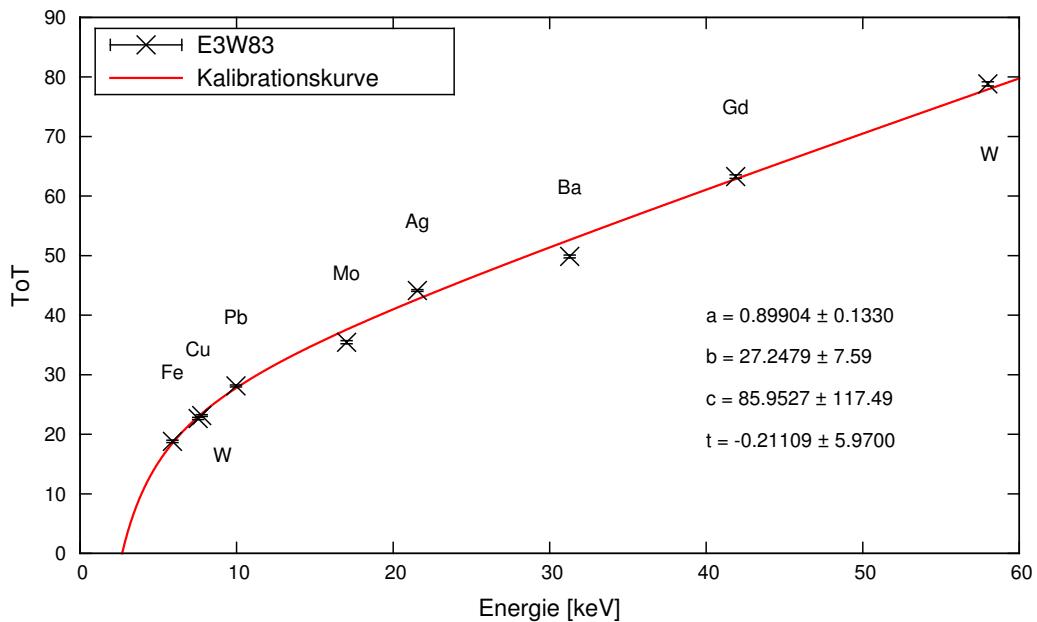


Abbildung 3.3: Kalibrationskurve der globalen Kalibration des Timepix-Detektors E3W83. Die resultierenden Parameter der Kalibrationsfunktion mit ihren Unsicherheiten sind aufgelistet.

3.2 Pixelweise Kalibration

Prinzipiell ist bei einer pixelweisen Kalibration der Ablauf in der Datenverarbeitung bei jedem Pixel der gleiche wie bei der globalen Kalibration. Da es sich dabei jedoch um $256 \times 256 = 65536$ ähnliche Spektren handelt², können die vielen Spektren nicht einzeln ausgewertet werden. Sie werden stattdessen von einem Programm verarbeitet, welches im Folgenden am Beispiel des Timepix-Detektors F4W255 erklärt wird.

3.2.1 Angleichen der Spektren

Bei der pixelweisen Kalibration werden nur Spektren mit Single Clustering betrachtet. Es werden also nur Events in Pixeln berücksichtigt, deren benachbarte Pixel während des Frames nicht aktiv sind. Das ist von großem Vorteil, da bei größeren Clustern nicht mehr die genaue deponierte Energie pro Pixel bekannt ist. Zusätzlich werden so Ungenauigkeiten durch Charge Sharing und weitere Effekte reduziert.

In Abbildung 3.4 sind die Spektren zweier zentraler Pixel abgebildet, die bei der Messung der Fluoreszenzen einer Blei-Zinn-Legierung (PbSn) entstanden sind. Es sind deutliche Unterschiede zwischen beiden Pixeln erkennbar, welche in der weiteren Auswertung beachtet werden müssen. Damit die automatisierte Angleichung einer Normalverteilung für möglichst viele Pixel erfolgreich durchgeführt werden kann, wird das Spektrum vorher auf einen bestimmten Ausschnitt reduziert. Dabei wird anhand mehrerer Spektren die ungefähre Peakposition abgeschätzt. Alle Messwerte außerhalb eines festgelegten ToT-Intervalls werden verworfen. Dieses Intervall wird so festgelegt, dass sich darin nicht mehrere Peaks unterschiedlicher Fluoreszenzen befinden und trotzdem der gewünschte Peak nicht verworfen wird. So wird gewährleistet, dass die Angleichung mit globalen Startparametern durchgeführt werden kann, und dabei trotzdem der richtige Fluoreszenzpeak gefunden wird. Dieser Prozess ist in Abbildung 3.4 für die Peaks von Pb und Zinn (Sn) gezeigt. Für den Fit mit Gleichung (1.3) werden dem Programm die abgeschätzten Startparameter $A_{i,n}$, $\mu_{i,n}$ und $\sigma_{i,n}$ übergeben. Dabei bezeichnet der Index i die verschiedenen Fluoreszenzen und der Index n die Pixel. Die gefundenen Angleichungen sind in der Abbildung zu sehen. Die meisten Angleichungen (97,22 %) funktionieren mit diesem Prozess reibungslos. Bei einigen Pixeln (2,78 %) kommt es jedoch zu fehlerhaften Angleichungen. Dabei kann es sich um prinzipiell funktionierende Pixel oder beschädigte Pixel handeln. Letztere müssen identifiziert werden und komplett von der Kalibration ausgeschlossen werden, da sie keine verwertbaren Messwerte liefern. Bei dem Timepix-Detektor F4W255 sind beispielsweise 31 Pixel beschädigt

Zwei mögliche Szenarien, warum die Angleichung bei prinzipiell intakten Pixeln nicht funktioniert, sind in Abbildung 3.5 gezeigt. Meist kommt es bei der Fit-Routine zu Problemen, wenn eine der beiden Flanken des Peaks oder sogar das Maximum außerhalb des festgelegten Bereichs liegen (schwarz eingezeichnet in Abbildung 3.5) und somit keine sinnvolle Angleichung möglich ist. Die intakten Pixel, bei denen die Angleichung nicht richtig funktioniert hat, können prinzipiell richtig kalibriert werden. Dazu müssen sie identifiziert und die fehlerhaften Angleichungen verbessert werden.

²Bzw. $128 \times 128 = 16384$ oder $512 \times 512 = 262144$ Pixel.

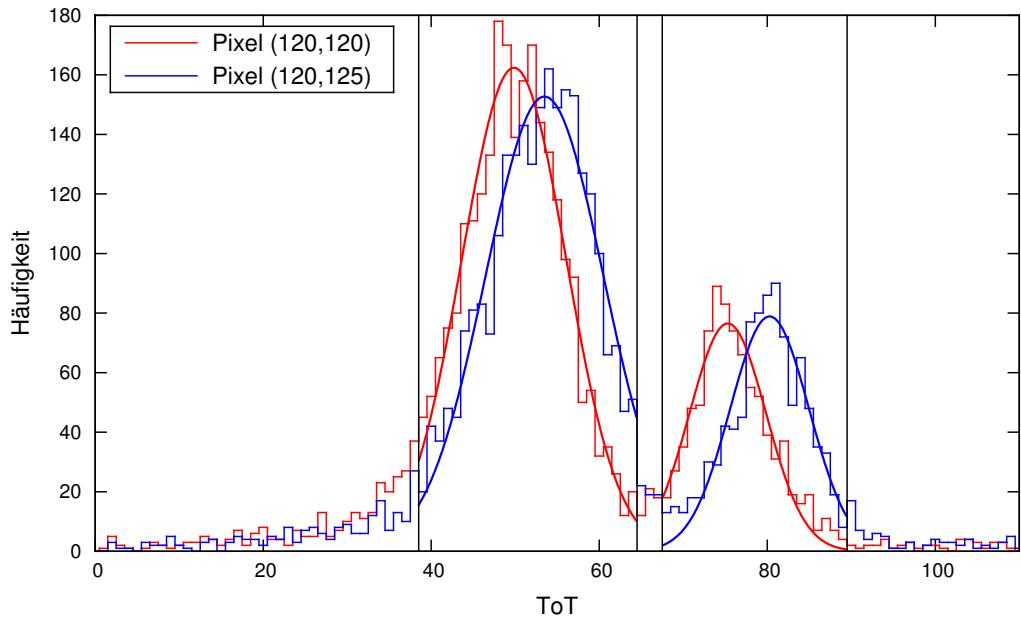
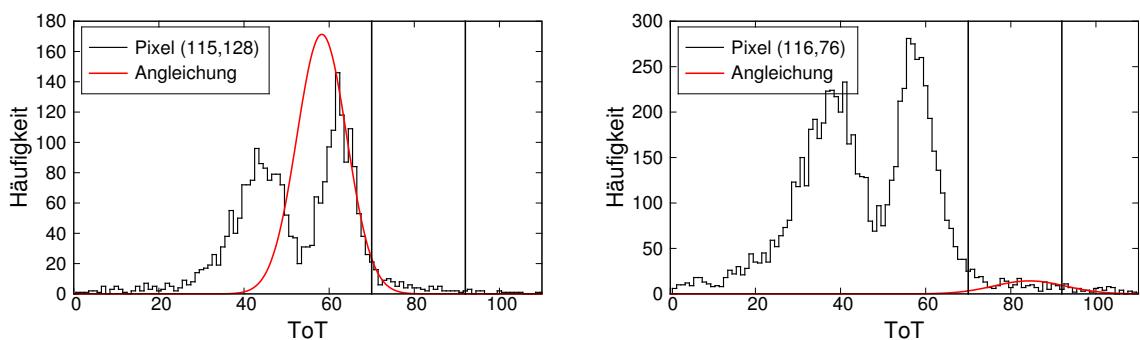


Abbildung 3.4: Präparation der Spektren mit Single Clustering am Beispiel von Sn und Pb mit schwarz gekennzeichneten Fit-Bereichen und resultierenden Angleichungen an die Peaks zweier Pixel.



(a) Fehlerhafte Angleichung bei Pixel (115,128), da nur eine Flanke des Peaks im Fitbereich liegt.

(b) Fehlerhafte Angleichung bei Pixel (116,76), da der Peak durch den Algorithmus nicht richtig identifiziert wurde.

Abbildung 3.5: Beispiele fehlerhafter Angleichungen durch ungünstige Startparameter und eines unpassenden Fit-Intervales.

Identifikation fehlerhafter Angleichungen Fehlerhafte Angleichungen entstehen vor allem bei Pixeln, deren Fluoreszenzpeak im Vergleich zu der mittleren Peakposition aller Pixel stark verschoben ist. Dann kann es vorkommen, dass der Peak nicht mehr im gesetzten Intervall enthalten ist, sodass keine sinnvolle Angleichung möglich ist.

Um herauszufinden, welche intakten Pixel nicht richtig angeglichen wurden, werden die Peakpositionen aller Angleichungen der Pixel in einem Histogramm aufgetragen. Diese Peakpositionen $\mu_{i,n}$ sind normalverteilt³ um eine mittlere Peakposition μ_i^μ . Die Histogramme der Peakpositionen aller verwendeten Fluoreszenzen sind in Abbildung 3.6 zu sehen. Je schmäler diese Histogramme sind, desto einheitlicher ist das Verhalten der Pixel. Indem die Verteilung der Peakpositionen durch Gleichung (3.2) quantitativ beschrieben wird, können alle Peakpositionen $\mu_{i,n}$, die maßgeblich von der mittleren Peakposition abweichen, identifiziert werden. Beispielsweise konnten dadurch die fehlerhaften Angleichungen in Abbildung 3.5 identifiziert werden.

$$G(\mu_{i,n}, A_i^\mu, \mu_i^\mu, \sigma_i^\mu) = A_i^\mu \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu_{i,n} - \mu_i^\mu}{\sigma_i^\mu} \right)^2 \right) \quad (3.2)$$

Zusätzlich zu den Peakpositionen $\mu_{i,n}$ sind auch deren Standardabweichungen $\sigma_{i,n}$ der Peaks normalverteilt um eine mittlere Standardabweichung μ_i^σ . Somit können, nach einem Fit mit Gleichung (3.3) an die Verteilung der Standardabweichungen $\sigma_{i,n}$, auch fehlerhafte Angleichungen an Fluoreszenzpeaks mit Hilfe deren Standardabweichung $\sigma_{i,n}$ identifiziert werden.

³Unter der Voraussetzung, dass der Timepix-Detektor keine Schäden aufweist und sich das Verhalten der Pixel nicht zu sehr unterscheidet.

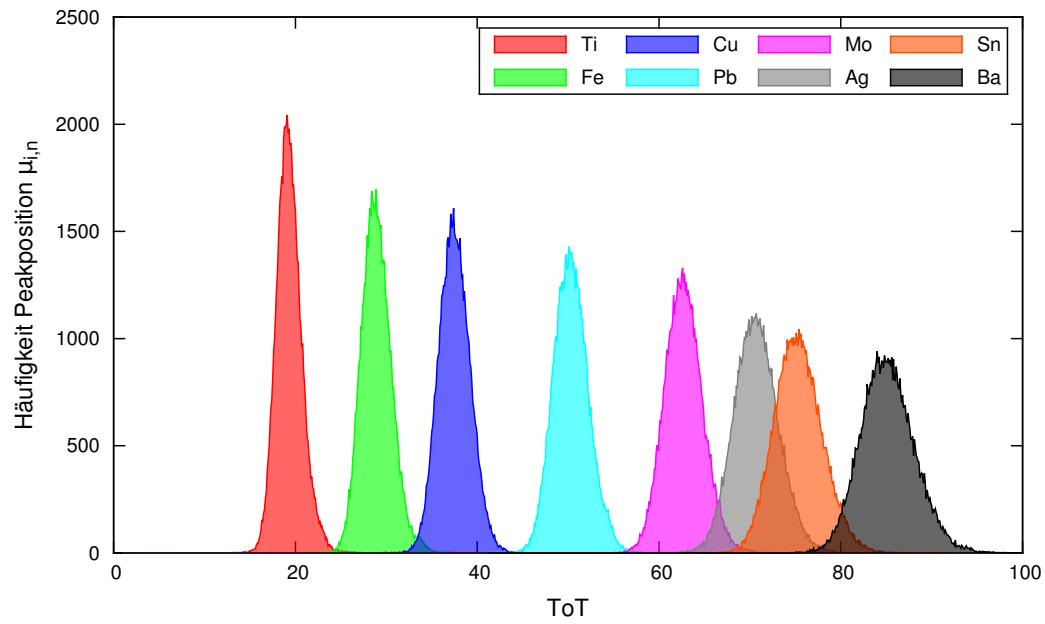


Abbildung 3.6: Histogramme der Peakpositionen $\mu_{i,n}$ aller verwendeten Fluoreszenzen i aller Pixel n des Timepix-Detektors F4W255. Es wird deutlich, dass die Peakpositionen $\mu_{i,n}$ normalverteilt um eine mittlere Peakposition μ_i^μ sind.

Es werden alle Angleichungen mit einer Standardabweichung $\sigma_{i,n}$, die maßgeblich von der mittleren Standardabweichung μ_i^σ abweichen, als fehlerhaft betrachtet.

$$G(\sigma_{i,n}, A_i^\sigma, \mu_i^\sigma, \sigma_i^\sigma) = A_i^\sigma \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{i,n} - \mu_i^\sigma}{\sigma_i^\sigma}\right)^2\right) \quad (3.3)$$

Das Kriterium, ab welcher Abweichung von der mittleren Peakposition μ_i^μ , bzw. von der mittleren Standardabweichung μ_i^σ eine Angleichung als fehlerhaft betrachtet wird, wurde wie folgt festgelegt:

$$\begin{aligned} |\mu_{i,n}| &> \mu_i^\mu + M\sigma_i^\mu \\ |\sigma_{i,n}| &> \mu_i^\sigma + M\sigma_i^\sigma \end{aligned}$$

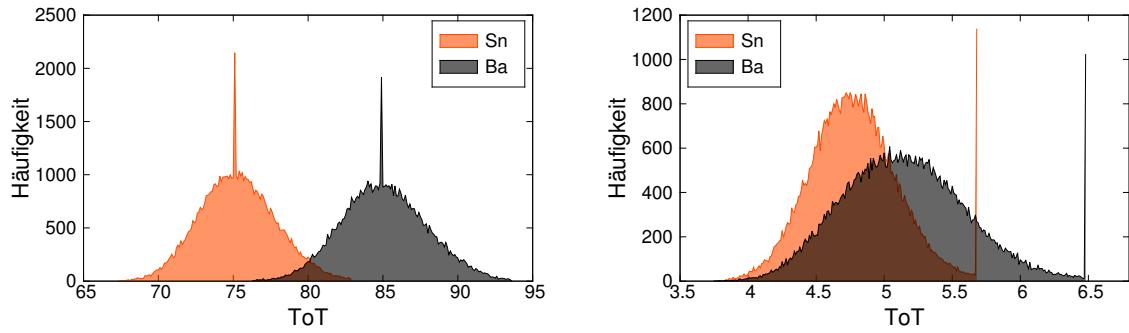
Über den Faktor M lässt sich die maximale Abweichung einer als nicht fehlerhaft klassifizierten Angleichung von dem mittleren Wert festlegen. In dieser Arbeit wird $M = 3$ verwendet, was erfahrungsgemäß zu einer sinnvollen Klassifikation der Angleichungen führt. Der Hintergedanke bei dieser Wahl ist, dass in einem Intervall von $\pm 3\sigma$ um den Mittelwert μ bei einer idealen Normalverteilung über 99,5 % der Messwerte zu finden sind. Ein kleinerer Wert von M spiegelt sich in einem strengeren Kriterium für richtige Angleichungen wieder, sodass mehrere Pixel als fehlerhaft klassifiziert werden.

Korrektur fehlerhafter Angleichungen Nach der Klassifikation der Angleichungen wird jede Peakposition $\mu_{i,n}$ und deren Unsicherheit $\Delta\mu_{i,n}$ einer fehlerhaften Angleichung nach folgendem Schema korrigiert:

$$\begin{aligned} \mu_{i,n} &= \mu_i^\mu \\ \Delta\mu_{i,n} &= \mu_i^\sigma + 3\sigma_i^\sigma \end{aligned}$$

Das bedeutet, dass die Peakposition $\mu_{i,n}$ einer fehlerhaften Angleichung auf die mittlere Peakposition μ_i^μ der Fluoreszenz korrigiert wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei einer korrigierten Peakposition $\mu_{i,n}$ nicht um die wahre Peakposition handelt. Somit wird die gemessene Information verfälscht. Um dieser Tatsache für die folgende Kalibration Rechnung zu tragen, wird auch die Unsicherheit $\Delta\mu_{i,n}$ korrigiert. Sie wird auf den Wert $\mu_i^\sigma + 3\sigma_i^\sigma$ korrigiert, welcher etwa um einen Faktor 20 größer als der ursprüngliche Wert von $\Delta\mu_{i,n}$ ist. Dieser Fluoreszenzpeak geht dadurch auf Grund der großen Unsicherheit im Vergleich zu den Peaks der anderen Fluoreszenzen mit einer kleineren Gewichtung in die Kalibration ein – vorausgesetzt diese wurden nicht auch korrigiert. Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, berechnet sich die Gewichtung über $\Delta\mu_{i,n}^{-2}$.

Die resultierenden Verteilungen von Peakposition $\mu_{i,n}$ und Standardabweichung $\sigma_{i,n}$ nach der Korrektur sind am Beispiel der Fluoreszenzen von Sn und Barium (Ba) in Abbildung 3.7 gezeigt. Die erkennbaren „Spitzen“ in den Verteilungen entsprechen den Korrekturen. Nach dieser Korrektur können nun auch Pixel sinnvoll kalibriert werden, bei denen die Angleichung an einzelne Peaks nicht funktioniert hat. Angleichungen bei Pixeln, deren Verhalten stark von dem der anderen Pixeln abweicht, werden mit dieser Methode bei jedem Fluoreszenzpeak als fehlerhaft klassifiziert. Entsprechend verwenden diese Pixel alle die gleichen Datenpunkte zur Kalibration, welche ähnlich zu denen aus der globalen Kalibration sind.



(a) Histogramme der Peakpositionen $\mu_{\text{Sn},n}$ und $\mu_{\text{Ba},n}$. (b) Histogramme der Standardabweichungen $\sigma_{\text{Sn},n}$ und $\sigma_{\text{Ba},n}$.

Abbildung 3.7: Histogramme nach Korrektur fehlerhafter Angleichungen bei den Fluoreszenzen von Sn und Ba. Die „Spitzen“ in den Verteilungen resultieren aus den Korrekturen der fehlerhaften Angleichungen.

3.2.2 Angleichen der Kalibrationskurve

Nachdem die Spektren für alle Pixel angeglichen und fehlerhafte Angleichungen automatisiert korrigiert wurden, kann jeder Pixel mit Hilfe der Gleichung (1.4) kalibriert werden. In Abbildung 3.8 ist am Beispiel von Pixel (101, 37) die Kalibration vor und nach der Korrektur einzelner Datenpunkte zu sehen. Dabei wird deutlich, dass die Korrektur fehlerhafter Angleichungen die Kalibration deutlich verbessert. Die Qualität einer einzelnen Kalibration wird über die Summe der relativen Fehler der Fit-Parameter überwacht:

$$\Delta_{\Sigma} = \left| \frac{\Delta a}{a} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| + \left| \frac{\Delta c}{c} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right| \quad (3.4)$$

Vergleichsweise große relative Fehler werden vom Programm identifiziert und die zugehörigen Datenpunkte dann mitsamt Kalibrationskurve zur manuellen Überprüfung ausgegeben. Bei offensichtlichen Fehlern der Kalibration kann so noch manuell nachgebessert werden.

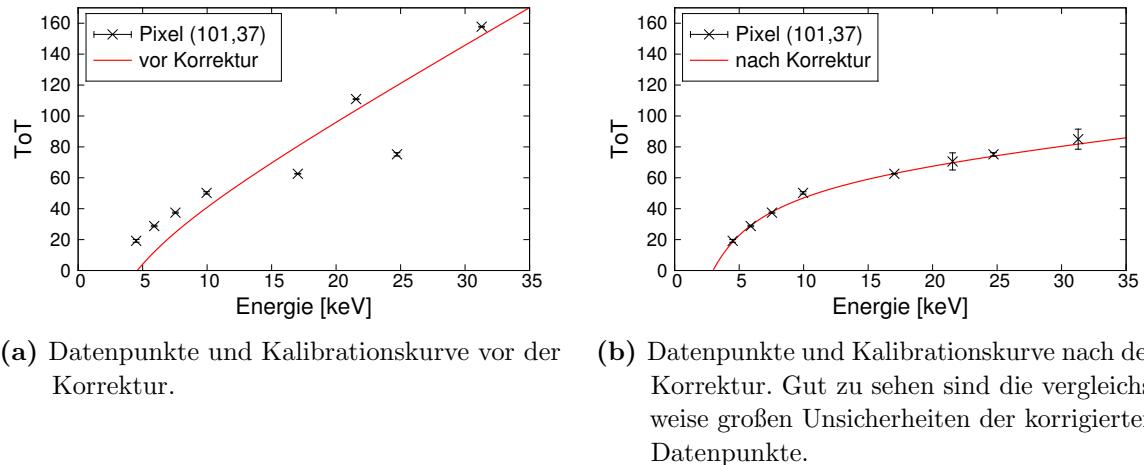


Abbildung 3.8: Vergleich der Datenpunkte und der Kalibrationskurve vor und nach der Korrektur einzelner Datenpunkte am Beispiel von Pixel (101,37) des Timepix-Detektors F4W255. Es wird deutlich, dass die Korrektur einzelner Datenpunkte die Kalibration deutlich verbessert.

3.2.3 Schematischer Ablauf

Der komplette Prozess einer pixelweisen Kalibration wird in einem Programm realisiert, dessen einzelne Arbeitsschritte in Abbildung 3.9 dargestellt werden.

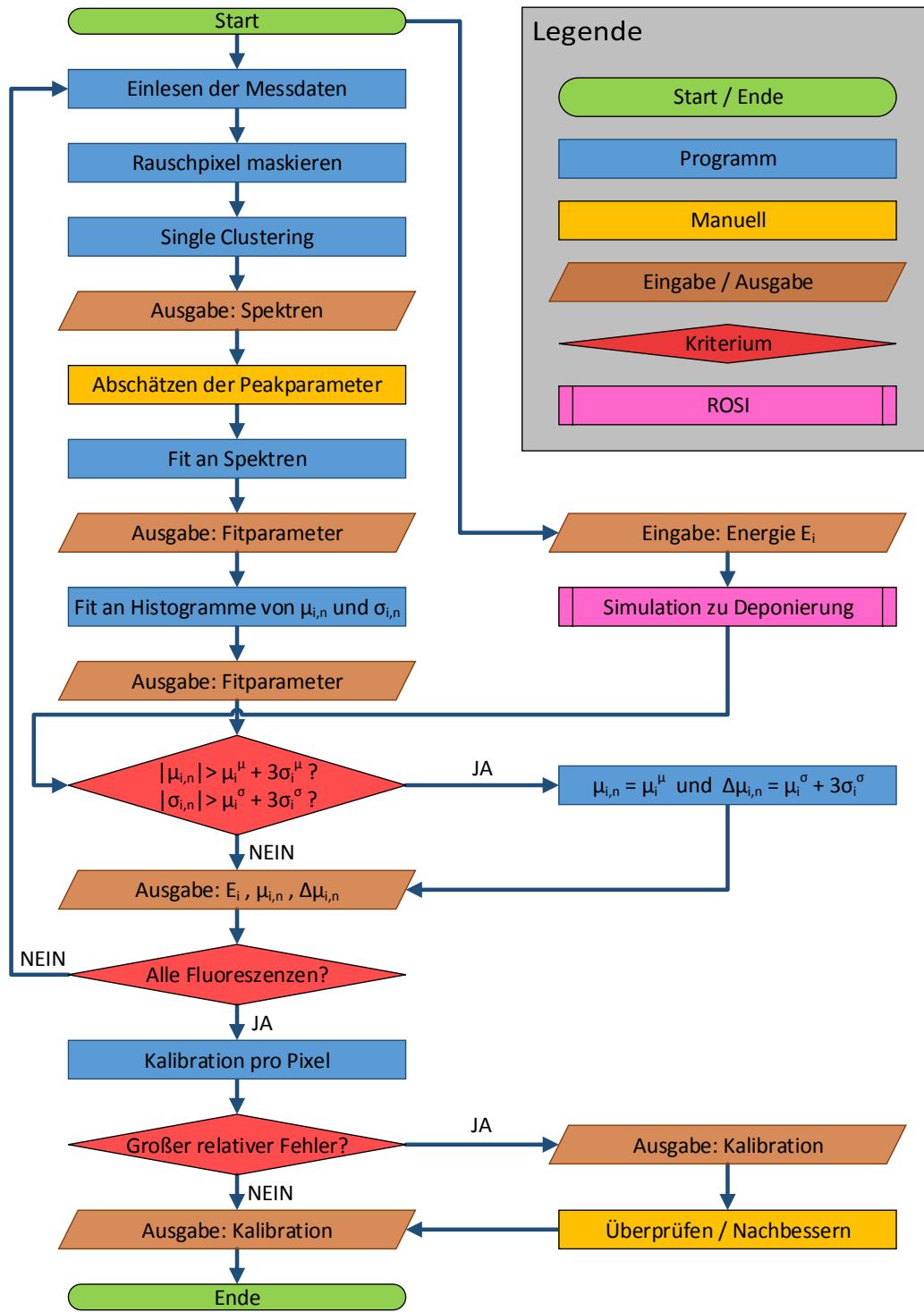


Abbildung 3.9: Programmablaufplan der automatisierten pixelweisen Kalibration von Timepix-Detektoren. Im oberen Bereich ist eine Legende abgebildet.

Kapitel 4

Ergebnisse und Anmerkungen

Kapitelübersicht

| | | |
|-----|-------------------------------------|----|
| 4.1 | Energieauflösung | 34 |
| 4.2 | Timepix-Detektor E3W83 | 36 |
| 4.3 | Timepix-Detektor D7W78 | 40 |
| 4.4 | Timepixquad D6W15 | 43 |
| 4.5 | Stack F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89 | 47 |

Dieses Kapitel beinhaltet die Ergebnisse des Kalibrationsablaufes aller im Rahmen dieser Arbeit kalibrierten Timepix-Detektoren. Es werden auffällige Eigenschaften der Detektoren gezeigt und deren Auswirkungen auf den Kalibrationsvorgang erläutert.

Der Parameter Energieauflösung wird eingeführt, um die Qualität der Timepix-Detektoren und der durchgeführten Kalibrationen charakterisieren und vergleichen zu können. Dabei wird ein theoretisches Modell angenommen, was auf einer Signalverbreiterung nur durch Fano-Rauschen beruht. Zusätzliche Faktoren werden näherungsweise als nicht energieabhängig angenommen.

4.1 Energieauflösung

Um zu charakterisieren, wie gut ein Timepix-Detektor die Energie zweier Photonen unterscheiden kann, wird die relative Energieauflösung verwendet. Über diese kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie nah zwei Linien in einem Spektrum benachbart sein dürfen, damit diese mit dem Detektor noch unterschieden werden können. Die relative Energieauflösung ist definiert als die Breite eines Signals ΔE bei halber Höhe (FWHM), normiert auf die mittlere Energie des Signals E . Im Folgenden wird die relative Energieauflösung nur mit Energieauflösung bezeichnet.

Prinzipiell müsste jedes gemessene ToT-Spektrum mit Hilfe der Kalibration in ein Energie-Spektrum umgerechnet werden und das entsprechende Spektrum verwendet werden. Da die Abhängigkeit von ToT und Energie in einem weiten Bereich linear ist, kann die Energieauflösung auch über die ToT-Auflösung ΔToT normiert auf ToT bestimmt werden. Diese Näherung ist für asymptotisch große Energien richtig und spiegelt im linearen Teil der Kalibration (vgl. Abbildung 3.3 ab etwa 10 keV) die wahre Energieauflösung wieder. Für den nichtlinearen, niederenergetischen Bereich hingegen ist diese Näherung nicht optimal. Nichtsdestotrotz lassen sich damit die verwendeten Timepix-Detektoren und Kalibrationsmethoden gut miteinander vergleichen. Mit dieser Näherung wird die globale Energieauflösung R_i eines Detektors wie folgt angegeben:

$$R_i = \left(\frac{\Delta E_i}{E_i} \right) \simeq \left(\frac{\Delta ToT_i}{ToT_i} \right) = 2\sqrt{2 \ln(2)} \cdot \frac{\sigma_i}{\mu_i}$$

$$\Delta R_i = \Delta \left(\frac{\Delta E_i}{E_i} \right) = 2\sqrt{2 \ln(2)} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \sigma_i}{\mu_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_i \cdot \Delta \mu_i}{\mu_i^2} \right)^2} \quad (4.1)$$

Die Parameter σ_i und μ_i und ihre entsprechenden Unsicherheiten, wobei der Index i die Fluoreszenzen beschreibt, werden durch das Fitten einer Normalverteilung nach Gleichung (1.3) an die globalen Spektren gefunden. Dieser Prozess läuft analog zu dem in Abschnitt 3.1 erklärten Prozess ab. Der Faktor $2\sqrt{2 \ln(2)}$ entspricht der Umrechnung von σ_i zu FWHM_i .

Um die mittlere Energieauflösung der pixelweisen Kalibration zu erhalten, wird sie für jeden Pixel einzeln mit Gleichung (4.1) berechnet und die Häufigkeiten der daraus resultierenden Energieauflösungen werden in einem Histogramm aufgetragen. An Stelle der globalen Parameter mit Index i treten die pixelweisen Parameter mit Indizes i und n , wobei i weiterhin die Fluoreszenzen beschreibt und n die Pixel kennzeichnet. Die Energieauflösungen $R_{i,n}$ der einzelnen Pixel sind mit einer Breite von σ_i^R normalverteilt um μ_i^R .

$$G(R_{i,n}, A_i^R, \mu_i^R, \sigma_i^R) = A_i^R \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{R_{i,n} - \mu_i^R}{\sigma_i^R} \right)^2 \right) \quad (4.2)$$

Mit Hilfe der Parameter aus Gleichung (4.2) lassen sich die mittlere Energieauflösung R_i^R aller Pixel und deren Fehler wie folgt angeben:

$$\begin{aligned} R_i^R &= \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_i^R = \mu_i^R \\ \Delta R_i^R &= \Delta \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_i^R = \frac{\sigma_i^R}{\sqrt{N}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dabei bezeichnet N die Anzahl aller verwendeter Pixel. Diese Zahl weicht auf Grund der maskierten Pixel leicht von der Gesamtanzahl der Pixel auf der Pixelmatrix ab. Der Umrechnungsfaktor $2\sqrt{2 \ln(2)}$ wird in diesem Ablauf bei der Berechnung der Energieauflösung jedes Pixels berücksichtigt.

Interpolation der Energieauflösung Nachdem die Energieauflösung für alle Fluoreszenz-peaks sowohl global als auch pixelweise berechnet wurde, werden die resultierenden Daten über die Energie in einem Graphen aufgetragen. Nach [21] kann folgende Abhängigkeit zwischen Energieauflösung und Energie näherungsweise angenommen werden:

$$R^{(R)}(E) = \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^{(R)}(E) = \alpha + \frac{\beta}{(E - \gamma)^\delta} \quad (4.4)$$

Diese Beziehung gilt sowohl für die Energieauflösung bei globaler als auch bei pixelweiser Berechnung. Im Fall der pixelweisen Energieauflösung wird der Index R verwendet. Die Beziehung lässt sich durch folgende Überlegungen motivieren:

Parameter α : Die untere Schranke der Energieauflösung kann aufgrund physikalischer Grenzen nicht unbegrenzt sinken. Aus diesem Grund muss es eine positive, asymptotische Energieauflösung α geben, die diesen Aspekt wiederspiegelt. Bei Annahme einer Signalverbreiterung nur durch Fano-Rauschen entspricht α allen anderen Beiträgen zur Signalverbreiterung, deren etwaige Energieabhängigkeiten aber nicht berücksichtigt werden.

Parameter β : Nach den genannten Einschränkungen entspricht $\beta = \sqrt{F \cdot W}$. Dabei bezeichnet F den Fano-Faktor¹, der mit $F = 0.1$ angenommen werden kann. W bezeichnet die durchschnittliche Energie pro erzeugtem Elektron-Loch-Paar, deren Berechnung in Gleichung (1.1) erläutert wurde.

Parameter γ : Da Detektoren keine beliebig kleinen Energien messen können, wird ein weiterer Parameter γ verwendet, um diesen Aspekt zu berücksichtigen.

Parameter δ : Wäre ΔE nicht abhängig von der Energie E , würde $\delta = 1$ erwartet werden. Bei Annahme einer Fano-Statistik ist jedoch $\Delta E \propto E^{0.5}$, sodass damit $\delta = 0.5$ erwartet wird.

Einschränkung: Zum einen berücksichtigt die angenommene Abhängigkeit auf Grund von Fano-Rauschen keine zusätzlichen Beiträge, z.B. durch Elektronik-Rauschen, welche sicherlich auch eine Energieabhängigkeit $\alpha(E)$ zeigen. Des Weiteren wird die Energieauflösung nur als ToT-Auflösung berechnet. Aus diesem Grund werden die Parameter nicht durch die theoretischen Werte festgelegt, sondern durch einen Fit gefunden.

¹Für nähere Informationen in Bezug auf den Fano-Faktor F sei auf [7] verwiesen.

4.2 Timepix-Detektor E3W83

Kalibration Wie in Abschnitt 3.2.1 erklärt, ist die Voraussetzung für eine automatische Korrektur fehlerhafter Angleichungen eine Normalverteilung der Mittelwerte $\mu_{i,n}$ und der Standardabweichungen $\sigma_{i,n}$. Diese ist bei dem Timepix-Detektor E3W83 mit CdTe-Sensor nicht erfüllt, wie in Abbildung 4.1 deutlich sichtbar ist. Anstatt der erwarteten Normalverteilung gibt es bei diesem Detektor zwei getrennte Bereiche mit unterschiedlichen Verteilungen der Mittelwerte. Aus diesem Grund kann die vorgestellte Korrektur fehlerhafter Angleichungen bei diesem Timepix-Detektor nicht durchgeführt werden.

Untersuchung der elektronischen Unterteilung Die unterschiedliche Energieantwort des Timepix-Detektors ist lokal getrennt. Wie in Abbildung 4.2 am Beispiel von Gd zu sehen ist, existiert eine starke Korrelation zwischen Peakposition und Pixelspalte. Die Peakposition ist bis etwa Spalte 29 konstant und sinkt dann bis etwa Spalte 90 gleichmäßig ab. Danach steigt sie wieder leicht an. Qualitativ ist dieses Verhalten an der farblich kodierten Darstellung erkennbar. Die Auftragung über die Pixelreihen lässt erkennen, dass Peakposition und Pixelreihe kaum korreliert sind. Die Messdaten lassen keine endgültige Klärung der Ursache dieses Phänomens zu.

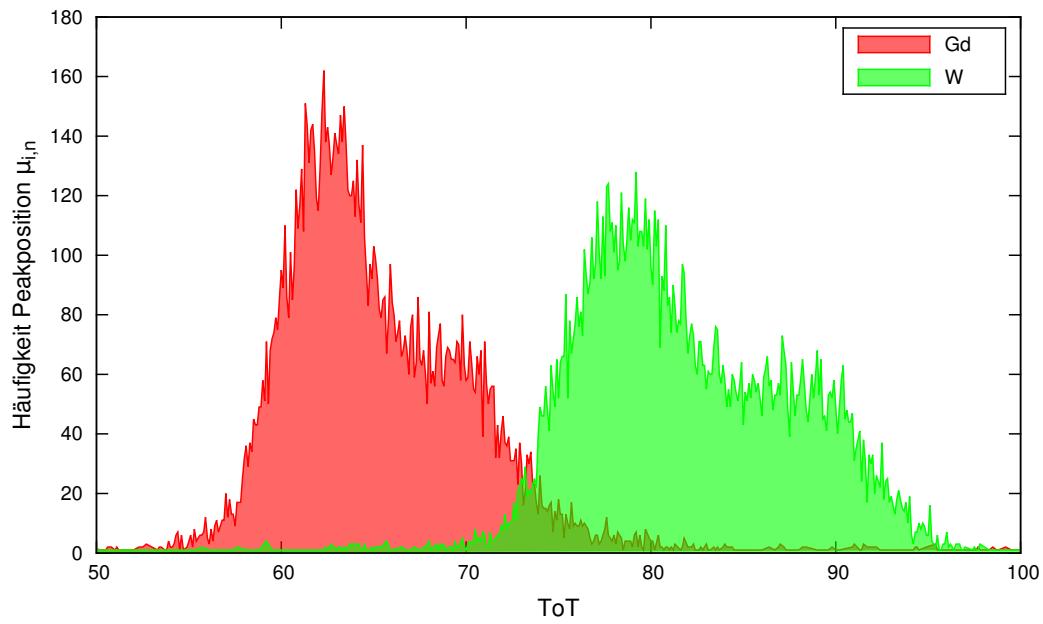


Abbildung 4.1: Histogramme der Peakpositionen $\mu_{Gd,n}$ und $\mu_{W,n}$ des Timepix-Detektors E3W83, bei denen jeweils keine Normalverteilung zu erkennen ist. Stattdessen werden zwei getrennte Bereiche in der Verteilung der Peakpositionen deutlich.

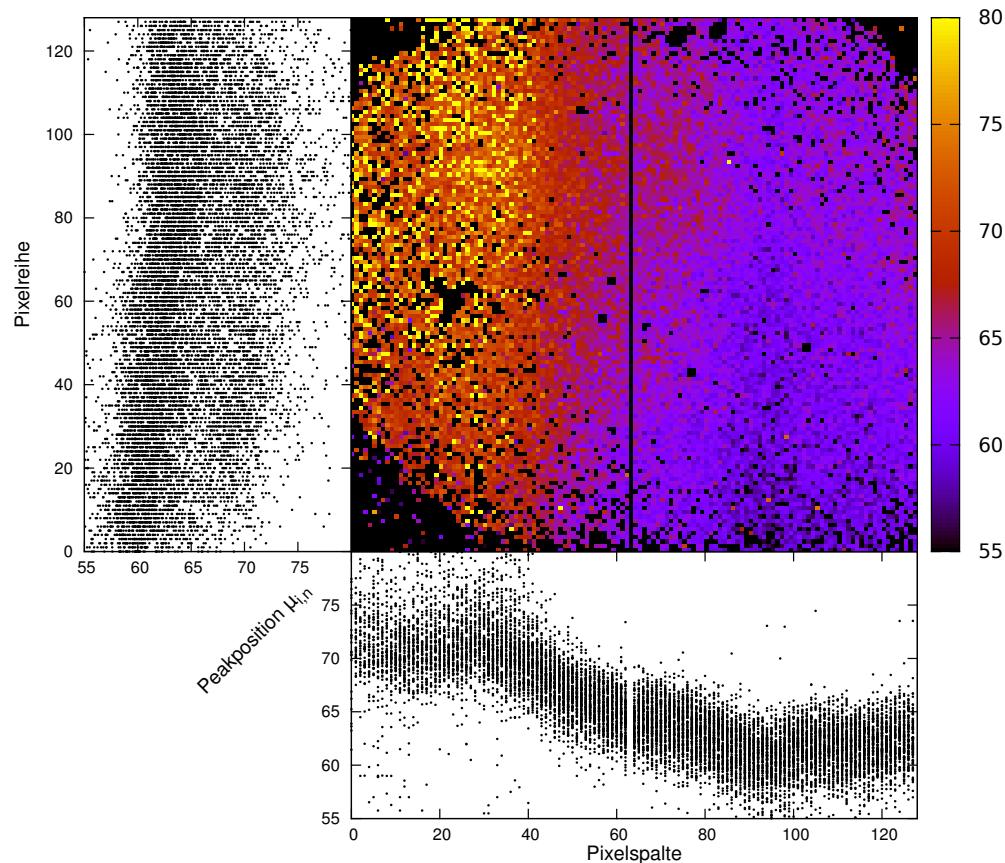


Abbildung 4.2: Abhängigkeit der Peakposition $\mu_{\text{Gd},n}$ von Pixelspalte und Pixelreihe bei dem Timepix-Detektor E3W83. Die Farbe kodiert die Peakposition in ToT. Schwarz gekennzeichnete Pixel sind maskierte Pixel, die nicht verwendet werden können. Die Peakposition ist stark mit der Pixelspalte korreliert, wohingegen die Peakposition kaum Korrelation mit der Pixelreihe zeigt.

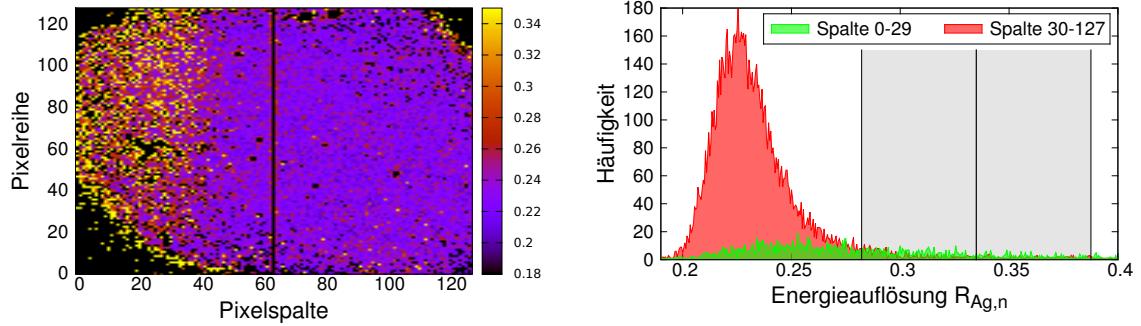
Energieauflösung In Abbildung 4.3a sind die Energieauflösungen für jeden Pixel bei der Fluoreszenz von Silber (Ag) farblich kodiert gezeigt. In schwarz sind alle beschädigten Pixel² zu erkennen, die nicht verwendet werden können und daher für Experimente maskiert werden. In Abbildung 4.3b ist das Histogramm der Energieauflösungen aller Pixel bei Ag gezeigt. Die Pixel ab etwa Spalte 30 zeigen ein gleichmäßiges Verhalten. Die Pixel in Pixelspalte 0 bis 29 zeigen hingegen ein sehr uneinheitliches Verhalten. Die mittlere Energieauflösung ergibt sich bei Ag zu 22,6 %. Der zugehörige Fehler, der sich mit Gleichung (4.3) berechnet, ist vergleichsweise sehr klein. Die globale Energieauflösung ergibt sich bei dieser Energie zu $33 \pm 6 \%$. Somit lässt sich beispielsweise durch die pixelweise Betrachtung des Detektors eine Verbesserung der Energieauflösung³ um 32 % erreichen.

In Abbildung 4.4 ist der resultierende Verlauf der Energieauflösung nach globaler und pixelweiser Berechnung gezeigt. Durch einen Fit mit Gleichung (4.4) an die globalen Energieauflösungen ergibt sich durch Extrapolation eine asymptotische Energieauflösung von $\alpha = 29,6 \%$. Die asymptotische Auflösung bei pixelweiser Betrachtung beträgt $\alpha = 0,0256 \%$. Beide Werte sind jedoch wenig aussagekräftig, was an der großen Streuung der Daten im niederenergetischen Bereich und der angenommenen Näherung – Berechnung der Energieauflösung über die Auflösung in ToT – liegt. Trotzdem wird deutlich sichtbar, dass die pixelweise Auswertung der Messdaten zu einer besseren Energieauflösung führt. So konnte beispielsweise bei der K-Fluoreszenz von Wolfram die Energieauflösung um einen Faktor 2,3 verbessert werden.

Offensichtlich weichen die Energieauflösungen deutlich von der entsprechenden Kurve ab. Das liegt unter anderem daran, dass die gemessenen Fluoreszenzen eine Überlagerung der K_{α^-} , K_{β^-} , ..., bzw. der L_{α^-} , L_{β^-} , ...-Fluoreszenzen sind, die nicht aufgelöst werden können. Sie führen zu einer scheinbar schlechteren Energieauflösung. Ein weiterer Grund ist die Näherung der Energieauflösung durch die Auflösung in ToT, deren Schwächen im niederenergetischen Bereich deutlich werden.

²Bei diesem Timepix-Detektor handelt es sich dabei um 28,0 % aller Pixel.

³Diese Werte beziehen sich ausschließlich auf Resultate bei der simulierten Energie der K-Fluoreszenz von Ag, die 21,55 keV entspricht.



- (a) Farblich kodierte Energieauflösung $R_{Ag,n}$ der einzelnen Pixel der Pixelmatrix. Es wird eine deutlich schlechtere Energieauflösung der Pixel in Spalte 0 bis etwa 29 sichtbar.
- (b) Histogramm der pixelweisen Energieauflösung $R_{Ag,n}$. Die grau gekennzeichnete, globale Energieauflösung liegt bei $R_{Ag} = 33 \pm 6\%$ und ist damit deutlich schlechter als die mittlere pixelweisen Energieauflösung R_{Ag}^R .

Abbildung 4.3: Energieauflösung des Timepix-Detektors E3W83 bei der Ag-Fluoreszenz.

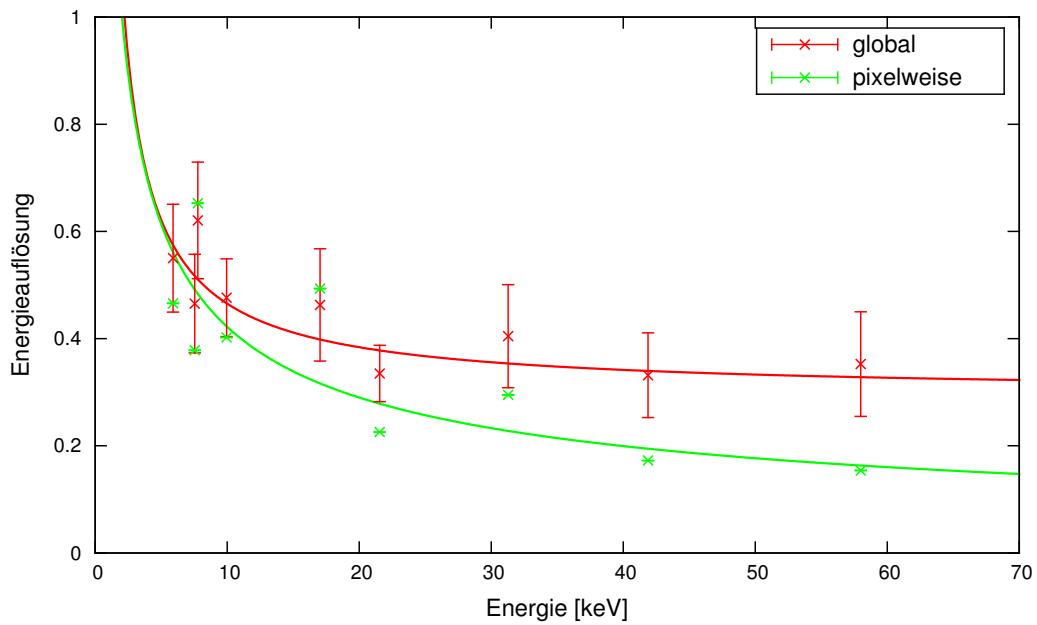


Abbildung 4.4: Abhängigkeit der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ von der Energie E bei dem Timepix-Detektor E3W83.

4.3 Timepix-Detektor D7W78

Kalibration Das Experiment, für das der Timepix-Detektor D7W78 mit CdTe-Sensor kalibriert wird, behandelt die Identifikation von α -Teilchen anhand ihrer Spur auf der Pixelmatrix⁴ (siehe Abbildung 4.5a). Zur Identifikation wird das Mengenverhältnis der Pixel im Cluster mit $E > 20 \text{ keV}$ zu denen mit $E < 20 \text{ keV}$ betrachtet. Der genaue Wert der Energie ist bei dieser Charakterisierung nicht ausschlaggebend. Aus dem berechneten Verhältnis lassen sich α -Teilchen von anderen Teilchen, wie z.B. Elektronen oder Myonen, unterscheiden. Näheres dazu kann in [22] nachgelesen werden.

Die Signale durch α -Teilchen im geplanten Experiment sollten nicht zu übermäßig großen ToT-Werten führen, da im Bereich sehr großer ToT-Werte das Verhalten des Detektors nicht linear und nicht vollkommen verstanden ist. Aufgrund dieser Anforderung sind die DAC-Werte des Timepix-Detektors so eingestellt, dass die ToT-Werte der gemessenen Fluoreszenzen vergleichsweise sehr klein sind⁵. Eine Konsequenz der verwendeten DAC-Werte ist, dass die Fluoreszenz von Eisen (Fe) nicht gemessen werden konnte. Dadurch liegen nur wenige Datenpunkte im nicht-linearen Teil der Kalibrationskurve, sodass eine Angleichung mit Gleichung (1.4) nicht funktioniert. Stattdessen wird dieser Timepix-Detektor mit einer linearen Funktion nach Gleichung (4.5) kalibriert:

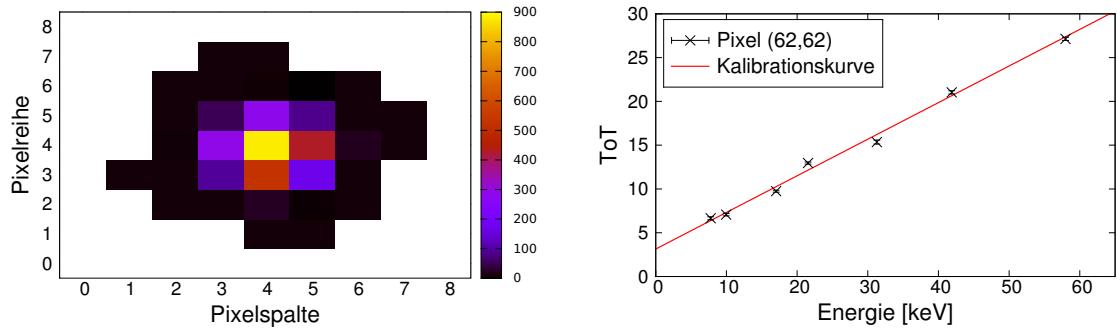
$$f_{D7}(E) = aE + b \quad (4.5)$$

Obwohl die Fluoreszenz von Kupfer (Cu) gemessen werden konnte, wird sie nicht zur Kalibration verwendet, da dieser Fluoreszenz-Peak deutlich im nicht-linearen Teil der Kalibrationskurve liegt und so die lineare Kalibration verfälschen würde. Die resultierende Kalibration ist am Beispiel von Pixel (62, 62) in Abbildung 4.5b gezeigt.

Die α -Teilchen deponieren Energien von mehreren MeV im Detektor, sodass sich Ungenauigkeiten in der Kalibration im Bereich von wenigen keV nicht signifikant auf die Energiebestimmung der α -Teilchen auswirken. Obwohl für das geplante Experiment nur eine Kalibration ab einer Energie von 20 keV notwendig ist, lassen sich mit der durchgeführten Kalibration schon genaue Aussagen über Energien ab ca. 10 keV machen, wie in Abbildung 4.5b deutlich wird.

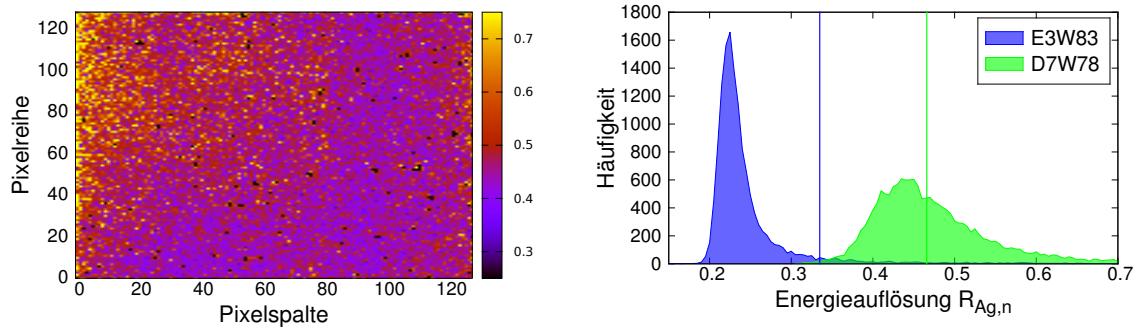
⁴ α -Teilchen erzeugen Cluster mit einer gesamten Energie von mehreren MeV. Der Großteil der Energie wird im Zentrum des Clusters deponiert.

⁵Sehr klein bedeutet in diesem Fall den Bereich von $ToT = 5$ bis $ToT = 35$.



- (a) Typisches Signal eines α -Teilchens nach [22]. Die Farbe kodiert die deponierte Energie in keV.
 (b) Pixelweise lineare Kalibration am Beispiel von Pixel (62, 62).

Abbildung 4.5: Lineare Kalibration des Timepix-Detektors D7W78, die wegen der Anforderungen des geplanten Experiments zur Identifikation von α -Teilchen notwendig ist.

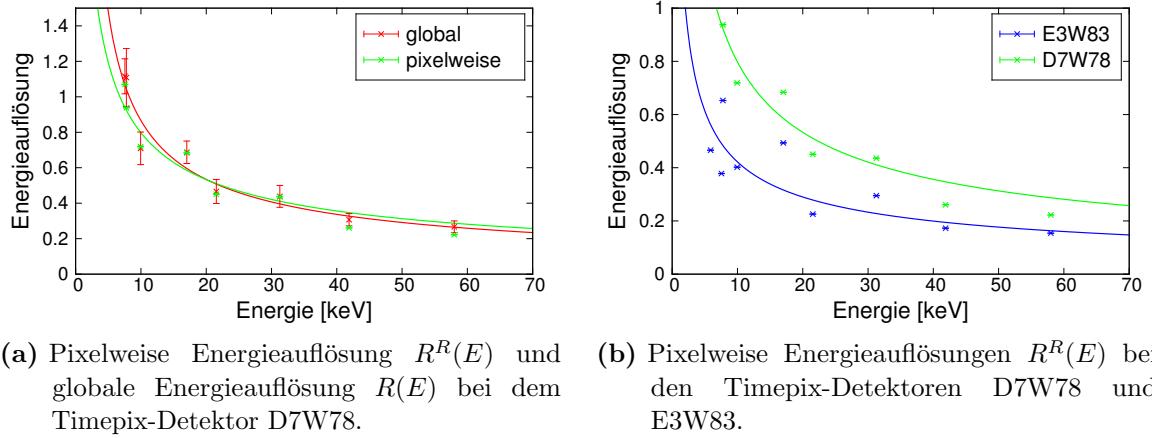


- (a) Farblich kodierte Energieauflösung $R_{Ag,n}$ der einzelnen Pixel der Pixelmatrix.
 (b) Histogramme der pixelweisen Energieauflösung $R_{Ag,n}$ bei den Timepix-Detektoren E3W83 und D7W78. Die globalen Energieauflösungen R_{Ag} sind als Striche eingezeichnet.

Abbildung 4.6: Energieauflösung des Timepix-Detektors D7W78 bei der Ag-Fluoreszenz in farblich kodierter Darstellung und als Histogramm.

Energieauflösung Die Energieauflösung ist in Abbildung 4.6a am Beispiel der Ag-Fluoreszenz farblich kodiert gezeigt. Das zugehörige Histogramm ist in Abbildung 4.6b zu sehen. Die Abbildung beinhaltet auch das entsprechende Histogramm des Timepix-Detektors E3W83. Im direkten Vergleich wird die schlechtere mittlere Energieauflösung und die breitere Verteilung der Energieauflösungen deutlich. Der Vergleich der globalen Kurve $R(E)$ und der pixelweisen Kurve $R^R(E)$ der Energieauflösung zeigt keine signifikante Verbesserung durch die pixelweise Kalibration. Wird jeder Datenpunkt einzeln betrachtet⁶, wird eine kleine Verbesserung durch die pixelweise Kalibration sichtbar.

⁶Für die Berechnung der Energieauflösung wird zusätzlich die Fluoreszenz von Cu verwendet.



(a) Pixelweise Energieauflösung $R^R(E)$ und globale Energieauflösung $R(E)$ bei dem Timepix-Detektor D7W78.

(b) Pixelweise Energieauflösungen $R^R(E)$ bei den Timepix-Detektoren D7W78 und E3W83.

Abbildung 4.7: Vergleich der Kurven der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ bei dem Timepix-Detektor D7W78. Dabei zeigt sich nur eine kleine Verbesserung durch die pixelweise Betrachtung. Im Vergleich der pixelweisen Energieauflösungen $R^R(E)$ mit dem Timepix-Detektor E3W83 wird eine schlechtere Energieauflösung des Timepix-Detektor D7W78 deutlich. Diese lässt sich durch die Bias-Spannung erklären.

Im Vergleich zu der Energieauflösung des Timepix-Detektors E3W83 hat der Timepix-Detektor D7W78 eine schlechtere Energieauflösung, wie in Abbildung 4.7b zu sehen ist. Ein Grund dafür ist die verwendete Bias-Spannung. Wie [21] zeigen konnte, führt eine höhere Bias-Spannung zu einer besseren Energieauflösung. Da der Sensor des Timepix-Detektors D7W78 doppelt so dick wie der des Timepix-Detektors E3W83 ist, die Bias-Spannung beider Timepix-Detektoren jedoch -300 V beträgt, wird verständlich, warum die Energieauflösung des Timepix-Detektors D7W78 schlechter als die des Timepix-Detektors E3W83 ist. Durch den niedrigeren Potentialgradienten beim Timepix-Detektor D7W78 kommt es auf Grund der längeren Driftzeit zu einer stärkeren Diffusion der Ladungswolke und resultierend zu erhöhtem Charge Sharing. Daraus folgt die schlechtere Energieauflösung bei niedrigerer Bias-Spannung. [21] konnte zeigen, dass sich durch Verdopplung der Bias-Spannung die Energieauflösung um etwa 10 % verbessern lässt.

4.4 Timepixquad D6W15

Kalibration Zusätzlich zu den leicht unterschiedlichen Energieantworten aller Pixel, unterscheiden sich auch die vier ASICS des Timepixquads D6W15 mit Si-Sensor trotz gleicher DAC-Werte⁷. Diese Variationen sind insgesamt so signifikant, siehe Abbildung 4.8, dass es nicht möglich ist globale Startparameter für eine gute Angleichung an die Spektren aller Pixel vorzugeben. Aus diesem Grund wird sowohl die Angleichung der Spektren als auch die Korrektur fehlerhafter Angleichungen für jeden ASIC separat durchgeführt (siehe Abbildung 4.9). Mit dieser Maßnahme ist eine genauere Kalibration möglich. Ein weiterer praktischer Grund ist die Handhabung der Messdaten. Diese sind auf Grund der großen Pixelmatrix aus $512 \times 512 = 262144$ Pixeln bis zu 48GB pro Messreihe groß. Durch die einzelne Auswertung der ASICS wird so nicht übermäßig Rechenleistung gleichzeitig in Anspruch genommen. Die Kalibration konnte bei dem Timepixquad für 98,5 % aller Pixel erfolgreich durchgeführt werden. Die Bezeichnung der ASICS wird in Tabelle 4.1 erläutert.

⁷Abgesehen von den DAC-Werten THL und THS, die für jeden ASIC unterschiedlich sind.

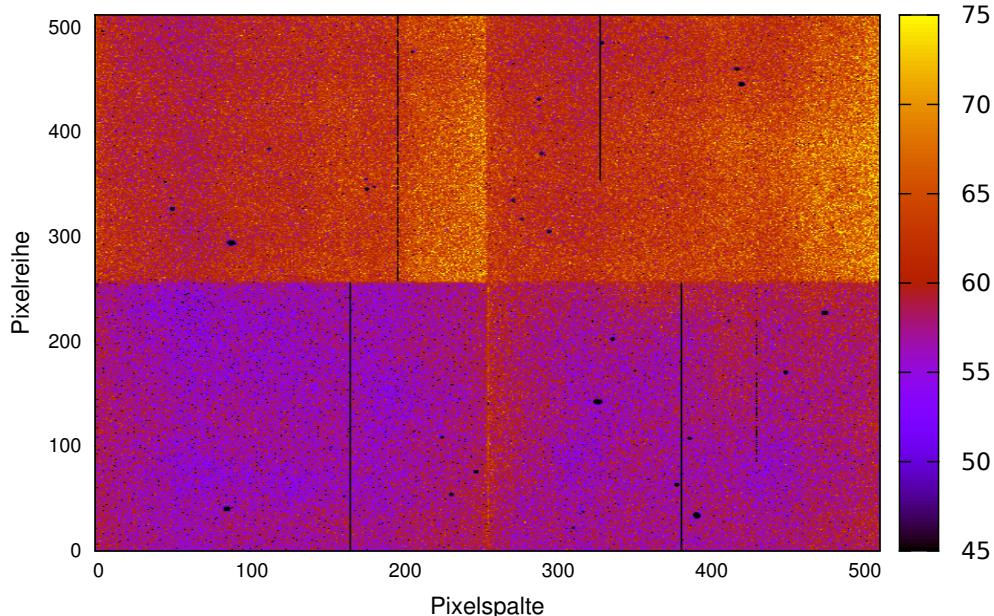
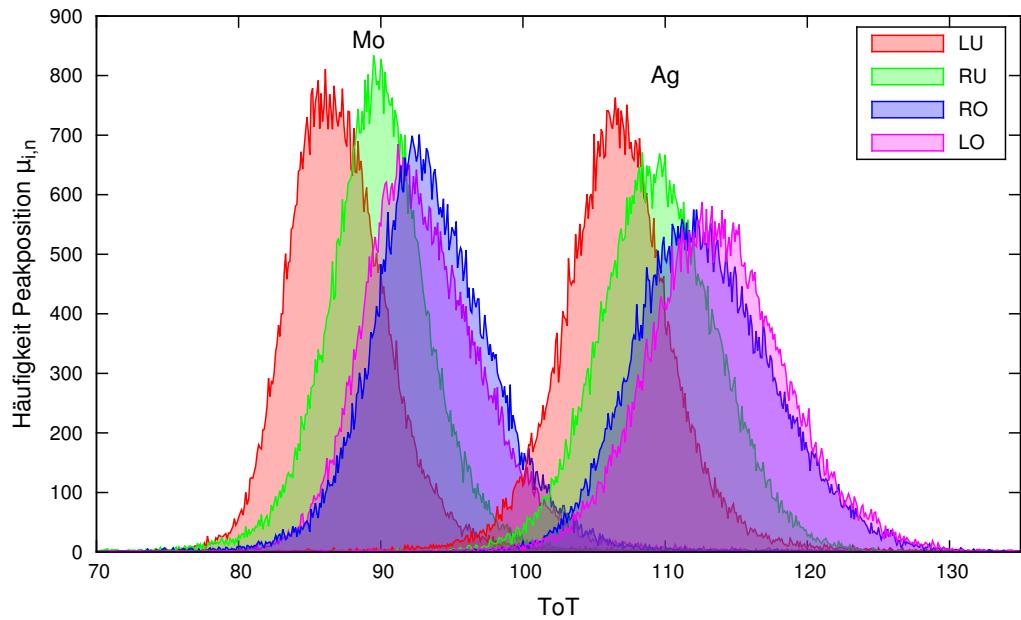


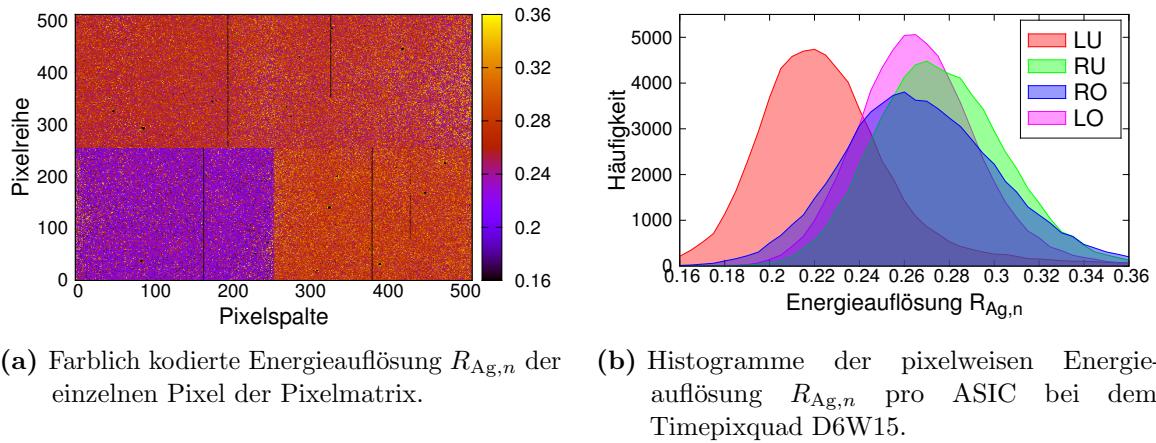
Abbildung 4.8: Farblich kodierte Peakpositionen der L-Fluoreszenz $\mu_{\text{Pb},n}$ bei dem Timepixquad D6W15. Die leichten Unterschiede der Energieantwort der ASICS werden deutlich.

Tabelle 4.1: Verwendete Bezeichnungen der vier ASICs des Timepixquads.

| Bezeichnung | LU | RU | RO | LO |
|-------------------|-------|---------|---------|---------|
| Pixelpalte | 0–255 | 256–511 | 256–511 | 0–255 |
| Pixelreihe | 0–255 | 0–255 | 256–511 | 256–511 |

**Abbildung 4.9:** Histogramme aller Peakpositionen $\mu_{\text{Mo},n}$ und $\mu_{\text{Ag},n}$ bei dem Timepixquad D6W15. Die Unterschiede motivieren eine gesonderte Betrachtung der einzelnen ASICs.

Energieauflösung Die Energieauflösung der Pixel ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Sie wird, am Beispiel der Ag-Fluoreszenz farblich kodiert und mit zugehörigen Histogrammen für jeden ASIC einzeln, gezeigt. Darin wird zum einen eine sehr homogene Verteilung deutlich und zum anderen ein sehr ähnliches Verhalten der ASICs. Nur der ASIC „LU“ zeigt bei dieser Fluoreszenz eine deutlich bessere Energieauflösung. Betrachtet man jedoch die Energieauflösungen aller verwendeten Fluoreszenzen, relativiert sich diese Differenz. Es wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen allen ASICs des Timepixquads nur sehr gering sind, wie in Abbildung 4.11e-f deutlich wird. Diese Aussage wird sowohl durch die Kurven der globalen Energieauflösung $R(E)$ als auch durch die der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ gestützt. Wie in Abbildung 4.11a-d zu erkennen ist, wird durch die pixelweise Kalibration die Energieauflösung des Detektors im Rahmen der Fehler nicht signifikant verbessert.



(a) Farblich kodierte Energieauflösung $R_{Ag,n}$ der einzelnen Pixel der Pixelmatrix.

(b) Histogramme der pixelweisen Energieauflösung $R_{Ag,n}$ pro ASIC bei dem Timepixquad D6W15.

Abbildung 4.10: Energieauflösung des Timepixquads D6W15 bei der Ag-Fluoreszenz als farblich kodierte Darstellung und als einzelne Histogramme pro ASIC.

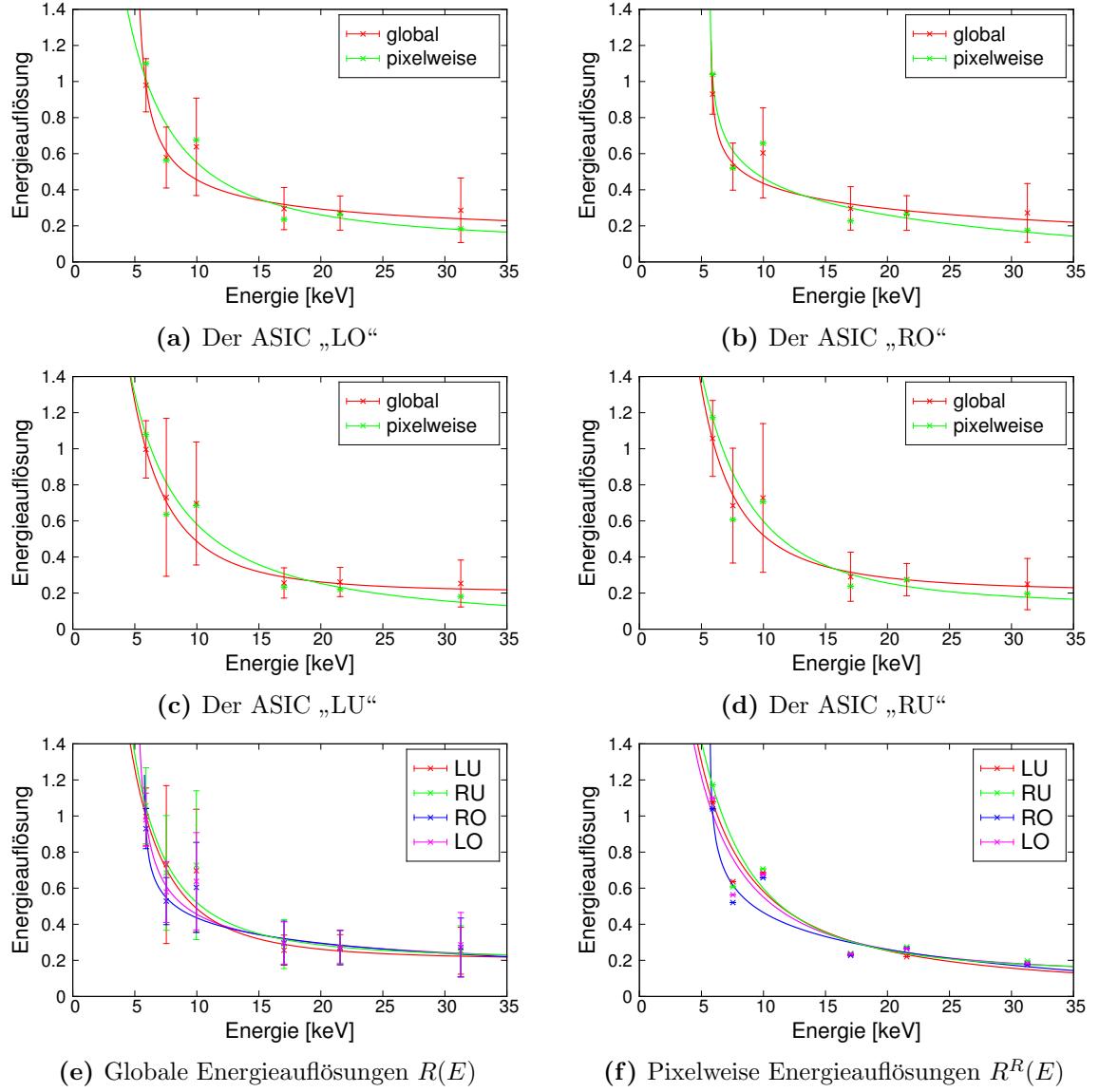


Abbildung 4.11: Vergleich der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ bei den einzelnen ASICs. Zusätzlich werden die Kurven der pixelweisen Energieauflösungen $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösungen $R(E)$ der ASICs bei dem Timepixquad D6W15 verglichen. Die Werte mit $R(E) > 1$, bzw. $R^R(E) > 1$ beruhen vermutlich auf der Näherung der Energieauflösung durch die ToT-Auflösung. Im Rahmen der Fehler zeigt sich keine signifikante Verbesserung der Energieauflösung durch eine pixelweise Betrachtung.

4.5 Stack F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89

Besonderheit bei K8W89/K3W89 Da der Timepix-Detektor K8W89 bei einer Bias-Spannung von +45 V einen stark erhöhten Leckstrom von etwa $90\text{ }\mu\text{A}$ aufweist⁸, wurde dieser Stack nur bei dieser geringen Spannung betrieben, um die Detektoren nicht zu beschädigen. Alle anderen Einstellungen waren identisch zu denen des Stacks F4W255/J4W255⁹.

Kalibration Die Energieschwelle, also die kleinste messbare Energie eines Timepix-Detektors, liegt unterhalb der kleinsten gemessenen Fluoreszenz. Diese war bei jedem kalibrierten Timepix-Detektor die K-Fluoreszenz von Fe bei 5,9 keV. Nur der Timepix-Detektor F4W255 konnte auch noch die K-Fluoreszenz von Titan (Ti) bei 4,5 keV detektieren. Somit lassen sich mit diesem Timepix-Detektor die kleinsten Energien in dieser Arbeit detektieren.

Die Bestrahlung mit Fluoreszenzen bei den Timepix-Detektoren J4W255 und K3W89 musste aufgrund der Bauweise der Stacks (siehe Abbildung 2.2b) durch die weiße Schicht aus PVC durchgeführt werden. Bei höheren Fluoreszenzenergien wurde dadurch kein Unterschied deutlich. Bei niedrigeren Energien hingegen, v.a. bei Fe, machte sich eine starke Reduktion der Trefferrate bemerkbar. Die Vermutung ist, dass das PVC einen Großteil der Strahlung absorbiert. Dieses Phänomen könnte auch erklären, warum mit den beiden Timepix-Detektoren keine Fluoreszenzen von Ti detektiert werden konnten, da diese Fluoreszenzenergie noch stärker unterdrückt würde. Dass die Fluoreszenz von Ti mit dem Timepix-Detektor K8W89 nicht detektiert werden konnte, liegt höchstwahrscheinlich an dem hohen Leckstrom, der eine hohe Energieschwelle durch den THL DAC-Wert erforderlich macht.

Energieauflösung Die Energieauflösungen beider Stacks F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89 mit Si-Sensor bei der Ag-Fluoreszenz sind in Abbildung 4.12a-d farblich kodiert gezeigt. Durch die gleiche Farbskala wird deutlich, dass der Timepix-Detektor F4W255 die beste Energieauflösung hat. Im Vergleich dazu hat der Timepix-Detektor K8W89 eine um 48,7 % schlechtere mittlere Energieauflösung bei gleicher Energie, was durch den sehr hohen Leckstrom erklärt werden kann. Dieses Verhalten wird quantitativ in Abbildung 4.12e noch deutlicher.

In Abbildung 4.13 sind die Histogramme der Energieauflösungen $R_{i,n}$ aller Fluoreszenzen i am Beispiel des Timepix-Detektors F4W255 dargestellt. Zum Vergleich dazu sind auch die Energieauflösungen der globalen Berechnung R_i eingezeichnet. Gut erkennbar ist dabei, dass die mittleren pixelweisen Energieauflösungen R_i^R immer besser als die globalen Werte R_i sind. Dadurch wird auch deutlich, dass durch eine pixelweise Kalibration die Energieauflösung des Detektors verbessert werden kann.

⁸Der Leckstrom liegt normalerweise im Bereich von $1\text{ }\mu\text{A}$ bis $10\text{ }\mu\text{A}$. Für Details siehe Abschnitt 2.2.1.

⁹Mit Ausnahme der DAC-Werte THL und THS.

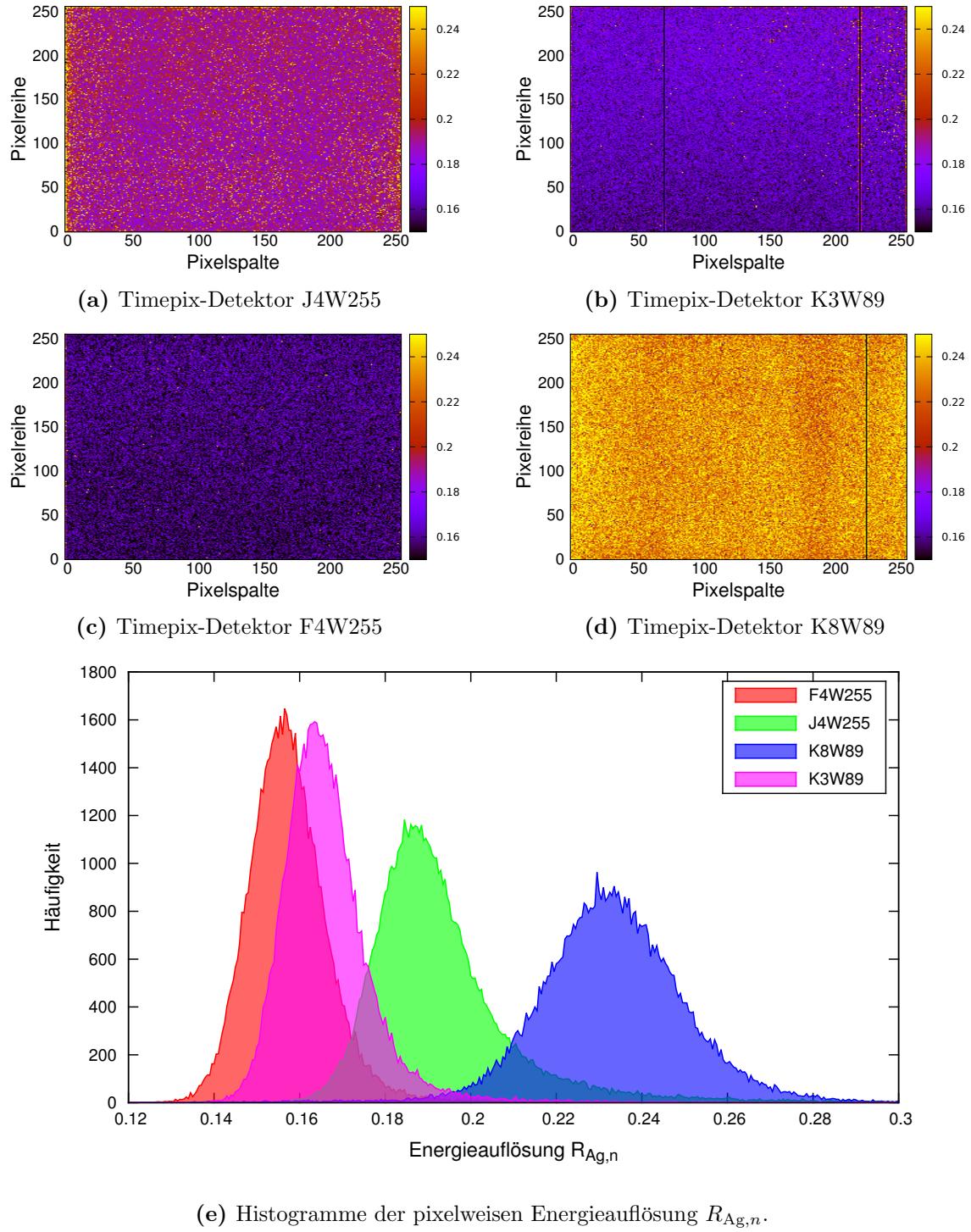


Abbildung 4.12: Farblich kodierte Energieauflösungen der beiden Stacks F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89 am Beispiel der Fluoreszenz von Ag. Zusätzlich sind die zugehörigen Histogramme gezeigt.

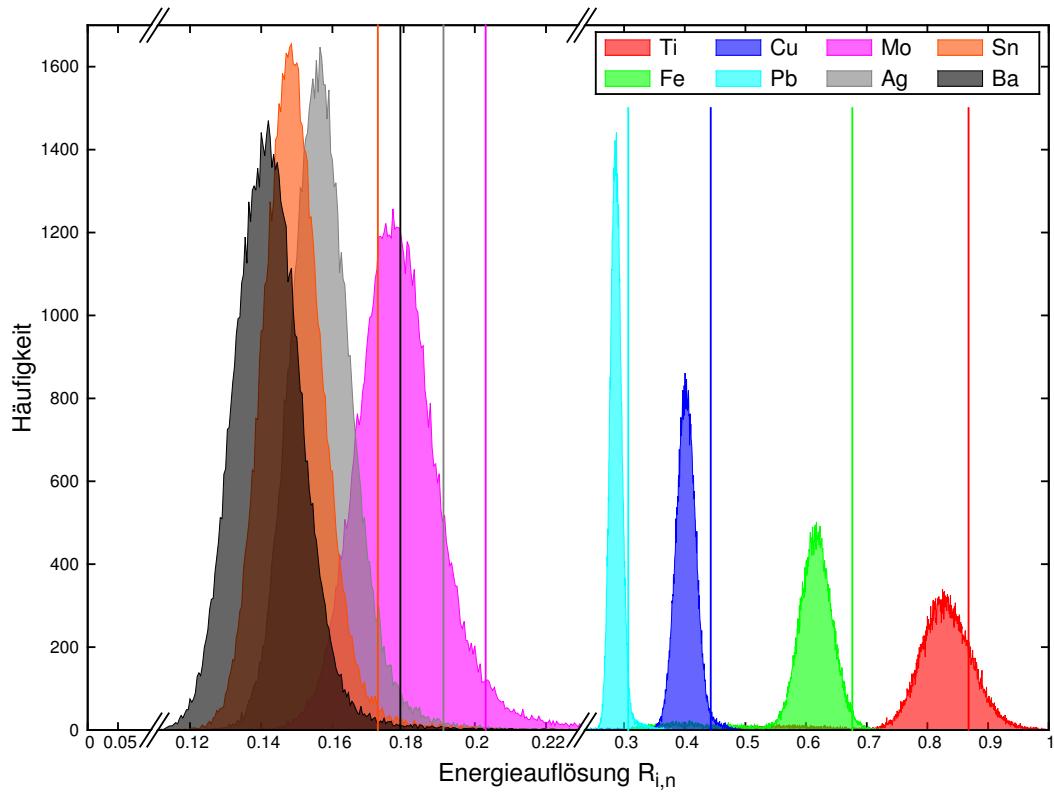


Abbildung 4.13: Histogramme der Energieauflösungen $R_{i,n}$ aller verwendeten Fluoreszenzen i am Beispiel des Timepix-Detektors F4W255. Die farbigen Striche markieren die Werte der globalen Energieauflösung R_i der entsprechenden Fluoreszenz. Es ist auf die Reskalierung der x-Achse zu achten. Es wird deutlich, dass die mittleren pixelweisen Energieauflösungen R_i^R immer besser als die globalen Werte R_i sind.

Die Kurven der Energieauflösung $R(E)$ und $R^R(E)$ sind in Abbildung 4.14a-d für alle Timepix-Detektoren der beiden Stacks zu sehen. Neben der Tatsache, dass die pixelweise Betrachtung zu einer besseren Energieauflösung führt, wird hierbei vor allem deutlich, dass das angenommene Modell, welches zur Abhängigkeit $R^{(R)}(E)$ führt, gut mit den Daten übereinstimmt. Abgesehen von dem Timepix-Detektor K8W89 führt die pixelweise Betrachtung zu einer signifikant besseren Energieauflösung. Diese drei Timepix-Detektoren zeigen zudem ein sehr ähnliches Verhalten, was den Verlauf der Energieauflösung $R(E)$, bzw. $R^R(E)$ betrifft. Dies ist in Abbildung 4.14e-f zu sehen. Die schlechtere Energieauflösung des Timepix-Detektors K8W89 beruht auf dem stark erhöhten Leckstrom.

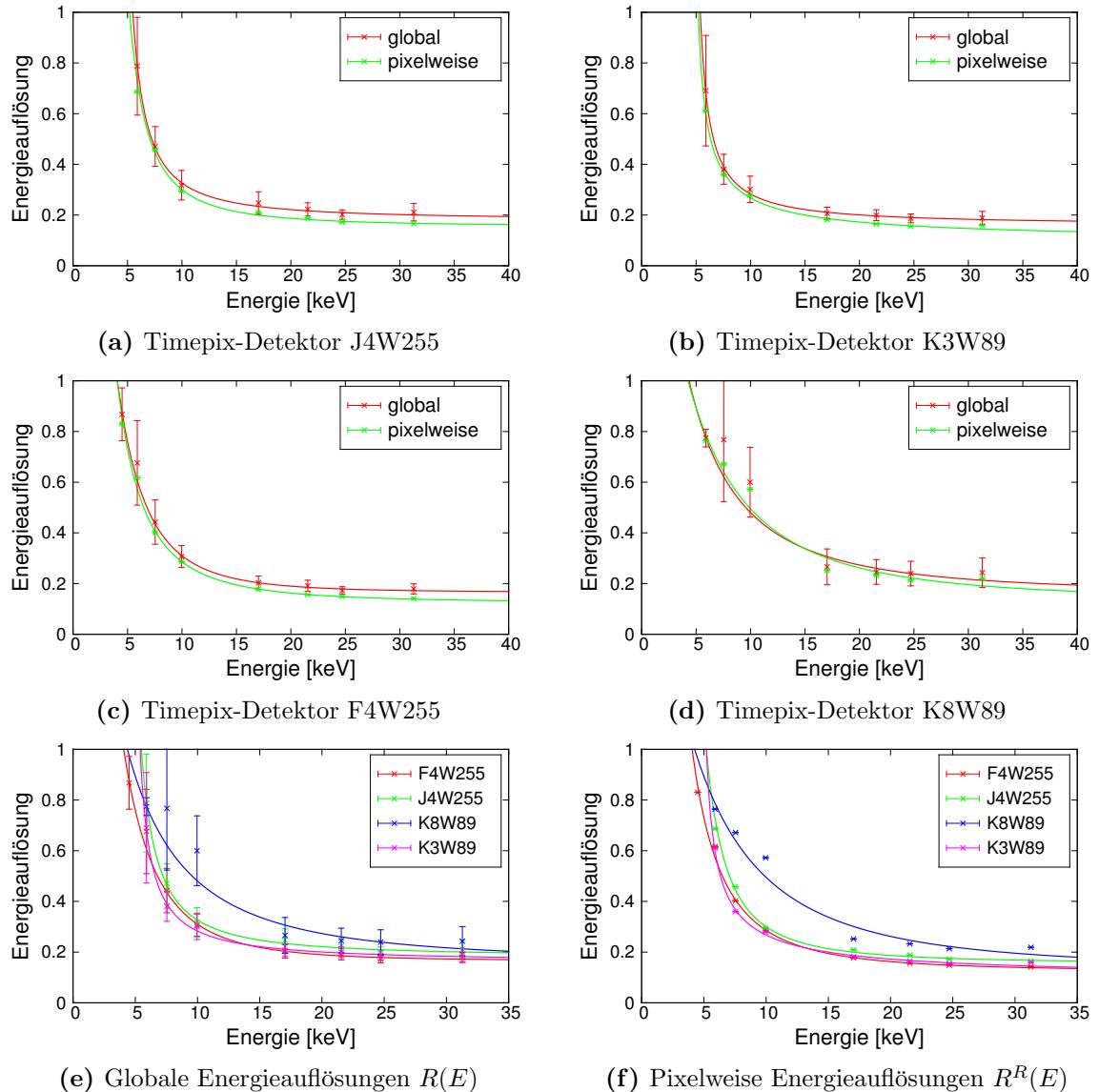


Abbildung 4.14: Vergleich der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ bei den einzelnen Timepix-Detektoren der beiden Stacks. Zusätzlich werden die Kurven der pixelweisen Energieauflösungen $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösungen $R(E)$ der einzelnen Timepix-Detektoren der beiden kalibrierten Stacks verglichen. Abgesehen von dem Timepix-Detektor K8W89 konnte eine signifikante Verbesserung der Energieauflösung durch eine pixelweise Betrachtung erreicht werden. Zudem zeigen diese drei Timepix-Detektoren einen sehr ähnlichen Verlauf der Energieauflösungen. Die deutlich schlechtere Energieauflösung des Timepix-Detektors K8W89 lässt sich durch den stark erhöhten Leckstrom erklären.

Fazit und Ausblick

Das Ziel, eine Energiekalibration für Timepix-Detektoren durchzuführen, wurde erreicht. Die Kalibration wurde sowohl global für die komplette Pixelmatrix als auch pixelweise durchgeführt. Es konnte ein stabiler automatisierter Kalibrationsablauf etabliert werden, der für einen Großteil der Pixel erfolgreich ist. Die Kalibration wurde für Energien zwischen 5,9 keV und 31 keV bei Detektoren mit Si-Sensoren¹ und zwischen 5,9 keV und 58 keV bei Detektoren mit CdTe-Sensoren durchgeführt. Dazu wurden Fluoreszenzen bekannter Energien verwendet.

Eine globale Kalibration liefert in vergleichsweise sehr kurzer Zeit einen guten Überblick über den Zusammenhang zwischen ToT-Wert und deponierter Energie. Es lassen sich zudem Aussagen über die Energieauflösung des Detektors treffen.

Die pixelweise Kalibration hingegen benötigt bei gleicher Anzahl von Kalibrationspunkten eine wesentlich längere Messdauer von etwa 12 h pro Timepix-Detektor, während für eine globale Kalibration 15 min ausreichend sind². Der zeitliche Aufwand einer pixelweisen Kalibration vergrößert sich noch durch das pixelweise Angleichen an die Fluoreszenz-Peaks, mit etwa 2 h pro verwendetem Fluoreszenz-Peak, und durch die pixelweise Interpolation der Datenpunkte, mit etwa 1 h für einen kompletten Timepix-Detektor. Trotzdem lohnt sich dieser große Aufwand, da durch eine pixelweise Kalibration eine bessere Energieauflösung des Detektors erreicht werden kann.

In das vorgestellte Kalibrationsprogramm wurden Optionen implementiert um auf Besonderheiten bei Timepix-Detektoren reagieren zu können. Dazu gehört beispielsweise die Interpolation der Datenpunkte durch eine lineare Funktion (D7W78) oder auch die separate Behandlung der ASICs bei Timepixquads (D6W15). Zudem gibt es die Möglichkeit fehlerhafte Angleichungen in den Spektren zu identifizieren und zu korrigieren. Mit diesen zusätzlichen Einstellungsmöglichkeiten hat sich das verwendete Programm als sehr robust und zuverlässig für die pixelweise Kalibration erwiesen.

Um die Energieauflösung in einem gewissen Energieintervall zu verbessern, ist es hilfreich die DAC-Werte so einzustellen, dass diesen Energien möglichst große ToT-Werte zugeordnet werden. Dies war bei den Einstellungen des Timepix-Detektors D7W78 nicht der Fall, was dessen schlechte Energieauflösung erklärt. Oft sind jedoch die auftretenden Energien eines Experiments wesentlich höher als die Energien bei der Kalibration. Hochenergetische Ereignisse

¹Bei dem Timepix-Detektor F4W255 waren 4,5 keV noch detektierbar.

²Die Zeiten beziehen sich auf einen Timepix-Detektor mit 256×256 Pixeln.

in Experimenten können nur durch Extrapolation der Kalibration umgerechnet werden. Durch diese Extrapolation wird die Energieauflösung eines Timepix-Detektors limitiert.

Um die Kalibration effizienter zu machen, könnten in folgenden Arbeiten die Parameter aus Gleichung (1.4) auf einen physikalisch sinnvollen Bereich eingeschränkt werden. Dazu gehört das Beschränken der Singularität bei t auf einen Wert, der kleiner ist als die kleinste verwendete Fluoreszenzenergie. Des Weiteren kann die Steigung der linearen Asymptote a auf positive Werte begrenzt werden, da höhere deponierte Energien immer zu höheren ToT-Werten führen. Außerdem ist es wichtig, den Parameter c , der die Krümmung beschreibt, auf positive Werte festzulegen. Ansonsten kann es vorkommen, dass die Kalibration im niederenergetischen Bereich sinkenden Energien steigende ToT-Werte zuordnet [8].

Ein weiterer Verbesserungsvorschlag ist, die Kalibration zusätzlich mit höheren Energien durchzuführen. Dazu bieten sich vor allem radioaktive Präparate an. So wird es möglich, eine verlässliche Kalibration bis zu einer Energie von beispielsweise 160 keV bei Verwendung von Cobalt (^{57}Co), Barium (^{133}Ba) und Americium (^{241}Am) durchzuführen. Zusätzliche Messreihen mit Fluoreszenzen nahe der Energieschwelle sind sicherlich hilfreich um den nicht-linearen Teil der Kalibration genauer und mit kleinerem Einfluss statistischer Schwankungen zu beschreiben. Hierfür wird der Einsatz von Fluoreszenzfolien aus Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Zink (Zn) empfohlen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Energiekalibration bei allen in dieser Arbeit verwendeten Timepix-Detektoren zuverlässig durchgeführt werden konnte. Für eine genauere Energiekalibration sind jedoch weiterführende Arbeiten an der Software sowie zusätzliche Messreihen notwendig. Dadurch werden sich die Auswirkungen statistischer Schwankungen reduzieren lassen und es kann eine bessere Energieauflösung der Detektoren erreicht werden.

Anhang A

Tabellen

Tabelle A.1: Vergleich der K_{α} - und L_{α} -Energien von Theorie- und Simulationswert der verwendeten Fluoreszenzen.

| Material | K_{α} [keV] | | L_{α} [keV] | |
|----------|--------------------|------------|--------------------|------------|
| | Theorie | Simulation | Theorie | Simulation |
| Ti | 4.949 | 4.50 | — | — |
| Fe | 6.398 | 5.90 | — | — |
| Cu | 8.040 | 7.54 | — | — |
| Mo | 17.441 | 17.03 | — | — |
| Ag | 22.101 | 21.55 | — | — |
| Sn | 25.191 | 24.72 | — | — |
| Ba | 32.062 | 31.28 | — | — |
| Gd | 42.757 | 41.88 | 6.056 | 6.43 |
| W | 58.656 | 57.99 | 8.396 | 7.77 |
| Pb | 74.221 | 73.03 | 10.550 | 9.96 |

Tabelle A.2: DAC-Werte und weitere Einstellungen aller kalibrierter Timepix-Detektoren.

| | E3W83 | D7W78 | D6W15 | | | Stack | | Stack | | |
|-------------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|--------|--------|-------|-------|
| | | | LU | RU | RO | LO | F4W255 | J4W255 | K8W89 | K3W89 |
| IKrum | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Disc | 100 | 100 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 |
| PreAmp | 240 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| BuffAnalogA | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 |
| BuffAnalogB | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 |
| Hist | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| THL | 423 | 407 | 825 | 805 | 820 | 800 | 850 | 822 | 489 | 475 |
| THLC coarse | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Vcas | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 |
| FBK | 128 | 128 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| GND | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| THS | 60 | 59 | 74 | 74 | 72 | 71 | 74 | 74 | 67 | 68 |
| BiasLVDS | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 |
| RefLVDS | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 |
| Ext DAC | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bias [V] | -300 | -300 | +120 | | | +100 | | +45 | | |
| Clock [MHz] | 24 | 9.6 | 24 | | | 9.6 | | 9.6 | | |

Tabelle A.3: Verwendete K_{α} - und L_{α} -Energien bei den kalibrierten Timepix-Detektoren. „✓“ steht für verwendete und „✗“ für nicht verwendete Fluoreszenzen. Bei zwei Zeichen bezeichnet das linke die K_{α} - und das rechte die L_{α} -Fluoreszenz.

| Material | K_{α} [keV] | L_{α} [keV] | E3W83 | D7W78 | D6W15 | F4W255 | J4W255 | K8W89 | K3W89 |
|----------|--------------------|--------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Ti | 4.949 | — | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Fe | 6.398 | — | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Cu | 8.040 | — | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Mo | 17.441 | — | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Ag | 22.101 | — | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Sn | 25.191 | — | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Ba | 32.062 | — | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Gd | 42.757 | 6.056 | ✓✗ | ✓✗ | ✗✗ | ✗✗ | ✗✗ | ✗✗ | ✗✗ |
| W | 58.656 | 8.396 | ✓✓ | ✓✓ | ✗✗ | ✗✗ | ✗✗ | ✗✗ | ✗✗ |
| Pb | 74.221 | 10.550 | ✗✓ | ✗✓ | ✗✓ | ✗✓ | ✗✓ | ✗✓ | ✗✓ |

Anhang B

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Foto des Timepix-Detektors E3W83 und Aufbau eines Timepix-Detektors. | 4 |
| 1.2 | Schematischer Ablauf der Detektion eines Myons nach [8]. Die entstehenden Elektronen driften entlang der elektrischen Feldlinien in die Pixelelektroden und werden dort registriert. | 6 |
| 1.3 | Spannungspuls (lila) eines Ereignisses nach Vorverstärkung. Der ToT-Modus (blau) misst die Energie des Ereignisses. Der ToA-Modus (rot) misst den Zeitpunkt der Detektion des Ereignisses und der Medipix-Modus (grau) die Anzahl der Ereignisse. Der Schwellenwert (schwarz) arbeitet als Diskriminat. Frei nach [11]. | 7 |
| 1.4 | Schematische Darstellung von Charge Sharing und Clustering nach [13] | 9 |
| 1.5 | Grundsätzlicher Ablauf einer Energiekalibration von Timepix-Detektoren. Im oberen Bereich rechts ist eine Legende abgebildet. | 10 |
| 1.6 | Beispiel einer ToT(E)-Kalibrationskurve für den Timepix-Detektor F4W255. Die eingezeichneten Fehlerbalken sind sehr klein und daher kaum sichtbar. Die rechnerisch kleinste messbare Energie, hier Energieschwelle genannt, ist zusätzlich eingezeichnet. | 12 |
| 1.7 | Projektion der Energieverbreiterung und entstehender systematischer Fehler bei Vernachlässigung des nicht-linearen Verhaltens [15]. | 12 |
| 2.1 | Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. <i>A</i> stellt die Röntgenröhre dar. <i>B</i> kennzeichnet den Kollimator mit 1,5 cm Öffnungsradius. An Stelle <i>C</i> wird eine Fluoreszenzfolie positioniert, deren Fluoreszenzen mit dem Timepix-Detektor (<i>D</i>) gemessen werden. <i>E</i> markiert die Bleiabschirmung. | 15 |
| 2.2 | Foto des Timepixquads D6W15 und des Stacks F4W255/J4W255. | 16 |
| 2.3 | Fenster in Pixelman zur Angleichung der Energieschwelle. Auf die wichtigsten Einstellmöglichkeiten wird im Text näher eingegangen. | 19 |
| 3.1 | Vergleich verschiedener Darstellungen der Messdaten am Beispiel des Spektrums von Gd. | 23 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.2 | Unterschiedliche Methoden der Näherung durch Normalverteilungen an die Fluoreszenz-Peaks in einem globalen Spektrum am Beispiel von Gd. Die gefundenen Parameter unterscheiden sich nur geringfügig. | 23 |
| 3.3 | Kalibrationskurve der globalen Kalibration des Timepix-Detektors E3W83. Die resultierenden Parameter der Kalibrationsfunktion mit ihren Unsicherheiten sind aufgelistet. | 25 |
| 3.4 | Präparation der Spektren mit Single Clustering am Beispiel von Sn und Pb mit schwarz gekennzeichneten Fit-Bereichen und resultierenden Angleichungen an die Peaks zweier Pixel. | 27 |
| 3.5 | Beispiele fehlerhafter Angleichungen durch ungünstige Startparameter und eines unpassenden Fit-Intervalles. | 27 |
| 3.6 | Histogramme der Peakpositionen $\mu_{i,n}$ aller verwendeten Fluoreszenzen i aller Pixel n des Timepix-Detektors F4W255. Es wird deutlich, dass die Peakpositionen $\mu_{i,n}$ normalverteilt um eine mittlere Peakposition μ_i^μ sind. | 28 |
| 3.7 | Histogramme nach Korrektur fehlerhafter Angleichungen bei den Fluoreszenzen von Sn und Ba. Die „Spitzen“ in den Verteilungen resultieren aus den Korrekturen der fehlerhaften Angleichungen. | 30 |
| 3.8 | Vergleich der Datenpunkte und der Kalibrationskurve vor und nach der Korrektur einzelner Datenpunkte am Beispiel von Pixel (101, 37) des Timepix-Detektors F4W255. Es wird deutlich, dass die Korrektur einzelner Datenpunkte die Kalibration deutlich verbessert. | 31 |
| 3.9 | Programmablaufplan der automatisierten pixelweisen Kalibration von Timepix-Detektoren. Im oberen Bereich ist eine Legende abgebildet. | 32 |
| 4.1 | Histogramme der Peakpositionen $\mu_{Gd,n}$ und $\mu_{W,n}$ des Timepix-Detektors E3W83, bei denen jeweils keine Normalverteilung zu erkennen ist. Stattdessen werden zwei getrennte Bereiche in der Verteilung der Peakpositionen deutlich. | 36 |
| 4.2 | Abhängigkeit der Peakposition $\mu_{Gd,n}$ von Pixelspalte und Pixelreihe bei dem Timepix-Detektor E3W83. Die Farbe kodiert die Peakposition in ToT. Schwarz gekennzeichnete Pixel sind maskierte Pixel, die nicht verwendet werden können. Die Peakposition ist stark mit der Pixelspalte korreliert, wohingegen die Peakposition kaum Korrelation mit der Pixelreihe zeigt. | 37 |
| 4.3 | Energieauflösung des Timepix-Detektors E3W83 bei der Ag-Fluoreszenz. | 39 |
| 4.4 | Abhängigkeit der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ von der Energie E bei dem Timepix-Detektor E3W83. | 39 |
| 4.5 | Lineare Kalibration des Timepix-Detektors D7W78, die wegen der Anforderungen des geplanten Experiments zur Identifikation von α -Teilchen notwendig ist. | 41 |
| 4.6 | Energieauflösung des Timepix-Detektors D7W78 bei der Ag-Fluoreszenz in farblich kodierter Darstellung und als Histogramm. | 41 |

| | |
|--|----|
| 4.7 Vergleich der Kurven der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ bei dem Timepix-Detektor D7W78. Dabei zeigt sich nur eine kleine Verbesserung durch die pixelweise Betrachtung. Im Vergleich der pixelweisen Energieauflösungen $R^R(E)$ mit dem Timepix-Detektor E3W83 wird eine schlechtere Energieauflösung des Timepix-Detektor D7W78 deutlich. Diese lässt sich durch die Bias-Spannung erklären. | 42 |
| 4.8 Farblich kodierte Peakpositionen der L-Fluoreszenz $\mu_{\text{Pb},n}$ bei dem Timepixquad D6W15. Die leichten Unterschiede der Energieantwort der ASICs werden deutlich. | 43 |
| 4.9 Histogramme aller Peakpositionen $\mu_{\text{Mo},n}$ und $\mu_{\text{Ag},n}$ bei dem Timepixquad D6W15. Die Unterschiede motivieren eine gesonderte Betrachtung der einzelnen ASICs. | 44 |
| 4.10 Energieauflösung des Timepixquads D6W15 bei der Ag-Fluoreszenz als farblich kodierte Darstellung und als einzelne Histogramme pro ASIC. | 45 |
| 4.11 Vergleich der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ bei den einzelnen ASICs. Zusätzlich werden die Kurven der pixelweisen Energieauflösungen $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösungen $R(E)$ der ASICs bei dem Timepixquad D6W15 verglichen. Die Werte mit $R(E) > 1$, bzw. $R^R(E) > 1$ beruhen vermutlich auf der Näherung der Energieauflösung durch die ToT-Auflösung. Im Rahmen der Fehler zeigt sich keine signifikante Verbesserung der Energieauflösung durch eine pixelweise Betrachtung. | 46 |
| 4.12 Farblich kodierte Energieauflösungen der beiden Stacks F4W255/J4W255 und K8W89/K3W89 am Beispiel der Fluoreszenz von Ag. Zusätzlich sind die zugehörigen Histogramme gezeigt. | 48 |
| 4.13 Histogramme der Energieauflösungen $R_{i,n}$ aller verwendeten Fluoreszenzen i am Beispiel des Timepix-Detektors F4W255. Die farbigen Striche markieren die Werte der globalen Energieauflösung R_i der entsprechenden Fluoreszenz. Es ist auf die Reskalierung der x-Achse zu achten. Es wird deutlich, dass die mittleren pixelweisen Energieauflösungen R_i^R immer besser als die globalen Werte R_i sind. | 49 |
| 4.14 Vergleich der pixelweisen Energieauflösung $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösung $R(E)$ bei den einzelnen Timepix-Detektoren der beiden Stacks. Zusätzlich werden die Kurven der pixelweisen Energieauflösungen $R^R(E)$ und der globalen Energieauflösungen $R(E)$ der einzelnen Timepix-Detektoren der beiden kalibrierten Stacks verglichen. Abgesehen von dem Timepix-Detektor K8W89 konnte eine signifikante Verbesserung der Energieauflösung durch eine pixelweise Betrachtung erreicht werden. Zudem zeigen diese drei Timepix-Detektoren einen sehr ähnlichen Verlauf der Energieauflösungen. Die deutlich schlechtere Energieauflösung des Timepix-Detektors K8W89 lässt sich durch den stark erhöhten Leckstrom erklären. | 50 |

Anhang C

Literatur

- [1] Medipix. *Homepage der Medipix Kollaboration*. 2014. URL: <http://medipix.web.cern.ch/MEDIPIX/>.
- [2] CERN. *Homepage*. 2014. URL: <http://home.web.cern.ch/>.
- [3] X. Llopart u. a. „Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 581.1-2 (2007). Proceedings of the 11th International Vienna Conference on Instrumentation, S. 485–494. ISSN: 0168-9002.
- [4] Tilman K. Rügheimer. „Konzept und Eigenschaften eines Hybriden Photonendetektors auf Basis des Timepix-Detektors“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität, 2009.
- [5] Daniel Niederlöhner. „Untersuchungen zur Energiewichtung in der medizinischen Röntgenbildgebung mit dem Medipix2-Detektor“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität, 2006.
- [6] E. M. Gullikson und B. L. Henke. „X-ray-induced secondary-electron emission from solid xenon“. In: *Phys. Rev. B* 39 (1 Jan. 1989), S. 1–9.
- [7] U. Fano. „Ionization Yield of Radiations. 2. The Fluctuations of the Number of Ions“. In: *Physical Review* 72 (1947), S. 26–29.
- [8] Mykhaylo Filipenko. „Experimental Investigation of Pixelated Semiconductor Photodetectors with CdTe Sensor Material for the Search for the Neutrinoless Double Beta Decay“. Friedrich-Alexander-Universität, 2011.
- [9] V. Kraus u. a. „FITPix — fast interface for Timepix pixel detectors“. In: *Journal of Instrumentation* 6.01 (2011), S. C01079.
- [10] T. Holy u. a. „Data acquisition and processing software package for Medipix2“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 563.1 (2006). Proceedings of the 7th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, S. 254–258. ISSN: 0168-9002.
- [11] Ulrike Gebert. „Untersuchung von Eigenschaften photonenzählender pixelierter Halbleiterdetektoren der Medipix-Familie“. Friedrich-Alexander-Universität, 2007.

- [12] Jürgen Durst. „Modellierung und Simulation physikalischer Eigenschaften photonenzählender Röntgenpixeldetektoren für die Bildgebung“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität, 2008.
- [13] J Jakubek. „Semiconductor Pixel detectors and their applications in life sciences“. In: *Journal of Instrumentation* 4.03 (2009), P03013.
- [14] Jan Jakubek u. a. „Pixel detectors for imaging with heavy charged particles“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 591.1 (2008), S. 155–158. ISSN: 0168-9002.
- [15] Jan Jakubek. „Precise energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold mode“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 633, Supplement 1 (2011), S262–S266. ISSN: 0168-9002.
- [16] M. Filipenko u. a. „Characterization of the energy resolution and the tracking capabilities of a hybrid pixel detector with CdTe-sensor layer for a possible use in a neutrinoless double beta decay experiment“. In: *The European Physical Journal C* 73.4, 2374 (2013). ISSN: 1434-6044.
- [17] J. M. Jose und TGV collaboration. „Progress in the use of pixel detectors in double beta decay experiment TGV“. In: *AIP Conference Proceedings* 1572.1 (2013), S. 77–80.
- [18] Frank Nachtrab. „Untersuchungen zu Computertomographie und Energiewichtung mit dem Medipix2-Detektor“. Friedrich-Alexander-Universität, 2006.
- [19] Jürgen Giersch, Andreas Weidemann und Gisela Anton. „ROSI—an object-oriented and parallel-computing Monte Carlo simulation for X-ray imaging“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 509.1–3 (2003). Proceedings of the 4th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, S. 151–156. ISSN: 0168-9002.
- [20] Jan Jakubek. „Energy-sensitive X-ray radiography and charge sharing effect in pixelated detector“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 607.1 (2009), S. 192–195. ISSN: 0168-9002.
- [21] Mykhaylo Filipenko u. a. „Characterization of the energy resolution and the tracking capabilities of a hybrid pixel detector with CdTe-sensor layer for a possible use in a neutrinoless double beta decay experiment“. In: *The European Physical Journal C* 73.4, 2374 (2013). ISSN: 1434-6044.
- [22] T. Gleixner u. a. „Rejection of α -particle background for neutrinoless double beta decay search with pixel detectors“. In: *Journal of Instrumentation* (2014). akzeptiert 09.2014.

Danksagung

An dieser Stelle möchte mich bei einigen Personen bedanken, die mir im Rahmen dieser Arbeit zur Seite standen. Mein herzlicher Dank geht an:

- Frau Prof. Dr. Gisela Anton für die Überlassung des spannenden Themas der Arbeit und für die kompetente Betreuung während dieser. Sie hat mir einen Einblick in die spannende Welt der Detektorphysik ermöglicht.
- Dr. Thilo Michel für die fachlichen Diskussionen, die immer zu einer Klärung offener Fragen geführt haben.
- Thomas Gleixner, der mir während der gesamten Arbeit mit viel Geduld geholfen hat. Es gab nichts, das er mir nicht erklären oder dessen (Programmier-)Fehler er nicht finden konnte. Ein besonderes Dankeschön an ihn.
- Mykhaylo Filipenko und Michael Wagenpfeil für die intensiven fachlichen und außerfachlichen Diskussionen.
- Meine Kollegen in Raum 108 für die vielen fachlichen Diskussionen, persönlichen Gespräche und für die gegenseitige Unterstützung bei vielerlei Problemen.
- Meine Familie. Sie hat in jeder Hinsicht den Grundstein für das Erreichen meiner bisherigen Ziele gelegt. Ich hatte immer ihre volle Unterstützung, wofür ich sehr dankbar bin.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Erlangen, den 05.11.2014

Tobias Ziegler