

Bachelorarbeit

# **Optimierung des Versuchsaufbaus zum Nachweis der Paritätsverletzung im $\beta^-$ -Zerfall**

**Optimization of the Setup for Detection of Parity Violation in  $\beta^-$   
Decays**

Chris Sterthues

Mai 2012

Westfälische Wilhelms-Universität Münster  
Institut für Kernphysik



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1. Die Parität . . . . .	3
2.2. Paritätsverletzung beim $\beta^-$ -Zerfall . . . . .	3
2.3. Mott-Streuung . . . . .	4
<b>3. Experimentelle Realisierung</b>	<b>7</b>
3.1. Die radioaktive Quelle . . . . .	7
3.2. Der Versuchsaufbau . . . . .	8
3.3. Funktionsweise der Detektoren . . . . .	10
3.4. Die Elektronik . . . . .	11
<b>4. Messungen und Ergebnisse</b>	<b>13</b>
4.1. Verbesserung des erreichbaren Vakuums . . . . .	13
4.2. Untersuchung der Zählratenstabilität . . . . .	14
4.3. Systematische Untersuchung aller Elektronikbauteile . . . . .	21
4.4. Echtzeitmessung der Zählraten . . . . .	26
4.4.1. Steuerung des USB-Zählers mit Labview . . . . .	27
4.4.2. Ergebnisse der Echtzeitdatenaufnahme in Messung 16 .	30
4.4.3. Ergebnisse der Echtzeitdatenaufnahme in Messung 17 .	36
4.4.4. Ergebnisse der Echtzeitdatenaufnahme in Messung 18 .	41
4.4.5. Bewertung der Zählratenschwankungen . . . . .	45
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>47</b>
<b>A. Konfiguration der Elektronikkomponenten</b>	<b>49</b>
<b>B. Countverlauf in Messung 10 und Zählratenverläufe der Echtzeitmes-</b>	
<b>          sungen</b>	<b>51</b>
<b>C. Ergänzung zur Abgabeverision</b>	<b>57</b>
C.1. Messung 23 . . . . .	57
C.2. Messung 29 . . . . .	57
C.3. Messung 30 . . . . .	60

## *Inhaltsverzeichnis*

C.4. Messung 31 . . . . .	63
C.5. Messung 32 . . . . .	64
C.6. Messung Signale 2 . . . . .	64
C.7. Messung 35 . . . . .	66
C.8. Messung 38 . . . . .	67
C.9. Messung 39 . . . . .	67

# 1. Einleitung

Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik lassen sich alle Prozesse in der Natur durch die vier Grundkräfte Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung beschreiben. Bei diesen Grundkräften werden Symmetrien beobachtet, die nach Emmy Noether mit der Existenz einer Erhaltungsgröße verknüpft sind [Dem09]. Beispielsweise ist die Symmetrie einer physikalischen Größe unter Raumspiegelung mit der Erhaltung der sogenannten Parität verbunden. In der schwachen Wechselwirkung, die zum Beispiel den radioaktiven  $\beta$ -Zerfall beschreibt, ist die Parität keine Erhaltungsgröße, worauf T. D. Lee und C. N. Yang 1956 erstmals hinwiesen [LY56]. Schon 1957 wurde die Paritätsverletzung im  $\beta^-$ -Zerfall durch C. S. Wu et al. experimentell nachgewiesen [WAH<sup>+</sup>57].

Im Jahr 2007 wurde von Katharina Büscher am Institut für Kernphysik der WWU Münster ein Versuchsaufbau entwickelt, der den Studenten den Nachweis der Paritätsverletzung experimentell zugänglich macht [Büs07]. Dabei wird an Hand der Streuung von Elektronen an schweren Kernen nachgewiesen, dass sie eine longitudinale Polarisierung aufweisen. Diese Polarisierung ist eine direkte Folge der Paritätsverletzung. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Optimierung des Versuchsaufbaus, im deren Rahmen eine neue Messmethode realisiert wurde, bei der direkt die zeitliche Entwicklung von Zählraten gemessen und in einem Logfile gespeichert wird. Dadurch kann die Zählratenentwicklung graphisch dargestellt und untersucht werden.

Im Verlauf der Arbeit werden zunächst kurz die notwendigen theoretischen Grundlagen zum Verständnis der Parität und der Nachweismethode des Versuchs gegeben. Anschließend wird in Kapitel 3 die experimentelle Realisierung der Nachweismethode beschrieben und die, für die späteren Änderungen relevanten, Details des Versuchsaufbaus. In Kapitel 4 werden die durchgeführten Messungen und die erhaltenen Ergebnisse vorgestellt.



## 2. Theoretische Grundlagen

Um die Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung nachzuweisen, bietet sich der  $\beta^-$ -Zerfall an, da die dabei entstehenden Elektronen eine sogenannte longitudinale Polarisation aufweisen. Dabei handelt es sich um eine bevorzugte Ausrichtung des Spins bezüglich des Impulses der Elektronen. Ihre Existenz ist eine Folge der Paritätsverletzung im  $\beta^-$ -Zerfall.

### 2.1. Die Parität

Um den Begriff der Parität zu erläutern, kann man sich das Verhalten einer physikalischen Größe unter Raumspiegelung anschauen. Diese Spiegelung wird durch den Paritätsoperator  $P$  bewirkt, der auf einen Vektor  $\vec{v}$  in folgender Weise wirkt:

$$P\vec{v} = \vec{v}'. \quad (2.1)$$

Dabei ist  $\vec{v}'$  der gespiegelte Vektor. Man muss unterscheiden zwischen polaren Vektoren  $\vec{v}_{pol}$ , die bei Anwendung des Paritätsoperators ihr Vorzeichen ändern und axialen Vektoren  $\vec{v}_{ax}$ , die dies als Produkt zweier polarer Vektoren nicht tun:

$$P\vec{v}_{pol} = -\vec{v}_{pol}, \quad (2.2)$$

$$P\vec{v}_{ax} = P(\vec{v}_1 \times \vec{v}_2) = (-\vec{v}_1) \times (-\vec{v}_2) = \vec{v}_{ax}. \quad (2.3)$$

Beispiele für polare und axiale Größen sind der Ort  $\vec{r}$  und der Drehimpuls  $\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$  [Dem09].

Bildet man das Skalarprodukt aus einem axialen und einem polaren Vektor, erhält man eine skalare Größe, die bei Raumspiegelung ihr Vorzeichen ändert, einen Pseudoskalar  $s$ :

$$Ps = P(\vec{v}_{pol} \cdot \vec{v}_{ax}) = -\vec{v}_{pol} \cdot \vec{v}_{ax} = -s. \quad (2.4)$$

### 2.2. Paritätsverletzung beim $\beta^-$ -Zerfall

Der  $\beta$ -Zerfall, der durch die schwache Wechselwirkung beschrieben wird, tritt in drei Varianten auf:

- $\beta^-$ -Zerfall:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

## 2. Theoretische Grundlagen

- $\beta^+$ -Zerfall:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- Elektroneneinfang:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ .

Zum experimentellen Nachweis der Paritätsverletzung eignet sich der  $\beta^-$ -Zerfall, da die dabei entstehenden Elektronen stabile und geladene Teilchen sind, mit denen man Streuversuche im Coulombpotential von Atomkernen durchführen kann. Als Folge der Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung weisen die Elektronen eine longitudinale Polarisierung auf. Der Begriff bezeichnet hier die bevorzugte Ausrichtung des Elektronenspins  $\vec{s}$  bezüglich des Impulses  $\vec{p}$ , bei der beide Größen gemeinsame parallele Komponenten haben, das heißt es gilt  $\langle \vec{s} \cdot \vec{p} \rangle \neq 0$ . Das Produkt aus Spin und Impuls bildet einen Pseudoskalar, der unter Raumspiegelung sein Vorzeichen ändert. Über die Messung der Polarisierung kann die Paritätsverletzung nachgewiesen werden.

### 2.3. Mott-Streuung

Die Streuung von Teilchen der Ladung  $z$  am Coulombpotential eines Kerns der Ladung  $Z$  wird beschrieben durch den Rutherford'schen Wirkungsquerschnitt

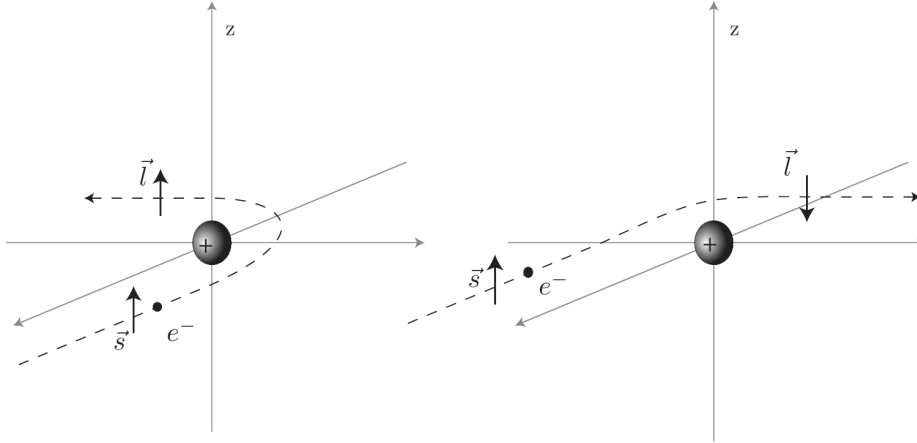
$$\left( \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \right)_{Ruth} = \left( \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 E_{kin}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad (2.5)$$

der vom Streuwinkel  $\theta$  abhängt [PRSZ09]. Bei der Mott-Streuung tritt zusätzlich noch eine Abhängigkeit vom Spin der gestreuten Teilchen auf. Um die Spinabhängigkeit der Streuung zu veranschaulichen, kann beispielsweise die Streuung eines relativistischen Elektrons mit Spin up an einem schweren Kern (s. Abb. 2.1) betrachtet werden. Im Fall der Linksstreuung stehen Bahndrehimpuls  $\vec{l}$  und Spin  $\vec{s}$  parallel, wohingegen sie im Fall der Rechtsstreuung antiparallel stehen. Die Rechtsstreuung wird bevorzugt, da in diesem Fall die Wechselwirkungsenergie  $W$  zwischen dem Elektron und dem Streukern minimal ist<sup>1</sup>. Für die Wechselwirkung gilt die Proportionalität  $W \propto \vec{s} \cdot \vec{l}$ , weswegen Spin und Drehimpuls parallele Komponenten haben müssen, damit sich der Mott-Wirkungsquerschnitt vom Rutherford-Wirkungsquerschnitt unterscheidet. Daher muss die longitudinale Polarisierung der Elektronen aus dem  $\beta^-$ -Zerfall in eine transversale umwandelt werden, bei der der Spin senkrecht zum Impuls steht und parallel zum Drehimpuls. Da in einem Strahl aus unpolarisierten Elektronen die Spinausrichtungen statistisch verteilt sind, kommen gleich viele Links- und Rechtsstreuungen vor. Der Wirkungsquerschnitt für

---

<sup>1</sup>Vgl. dazu [CTDL97].





**Abbildung 2.1.:** Links- und Rechts-Streuung eines Elektrons an einem Kern [Büs07].

Elektronen lautet nach Mott<sup>2</sup>:

$$\left( \frac{d\sigma_0(\theta)}{d\Omega} \right)_{Mott} = \left( \frac{d\sigma_0(\theta)}{d\Omega} \right)_{Ruth} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \right). \quad (2.6)$$

Das heißt, der Mott-Wirkungsquerschnitt stellt eine Modifizierung des Rutherford'schen Wirkungsquerschnitts für relativistische Spin  $\frac{1}{2}$ -Teilchen dar. Um die Mott-Streuung für polarisierte Elektronen herzuleiten, kann man zunächst annehmen, dass die Polarisationsrichtung durch die z-Achse gegeben ist (s. Abb. 2.2). Das bedeutet, dass mehr Elektronen mit Spin up vorhanden sind und dass es eine Streuratenasymmetrie  $A$  bezüglich des Azimutwinkels  $\varphi$  gibt. Dieser wird durch die Polarisationsrichtung definiert, für die  $\varphi = 0^\circ$  gilt. Entsprechend ergibt sich für „links“  $\varphi = 90^\circ$  und für „rechts“  $\varphi = 270^\circ$ . Der Wirkungsquerschnitt muss um eine  $\varphi$ -Abhängigkeit erweitert werden,

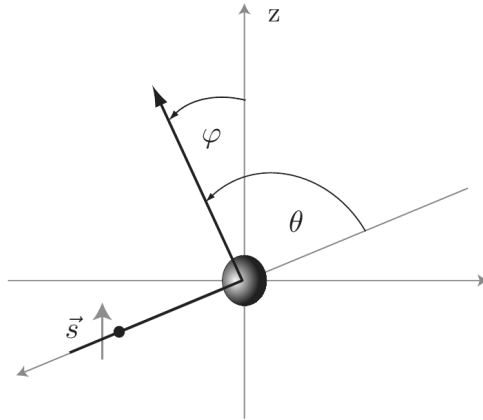
$$\left( \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega} \right) = \left( \frac{d\sigma_0(\theta)}{d\Omega} \right)_{Mott} (1 - P_t \cdot S(\theta) \sin(\varphi)), \quad (2.7)$$

wobei  $S(\theta)$  die sogenannte Sherman-Funktion ist, die unter anderem von der Energie der Elektronen und der Ladung des Streukerns abhängt<sup>3</sup>. Auf Grund der Abhängigkeit von  $\sin(\varphi)$  unterscheiden sich die Streuraten für die Richtungen „rechts“ und „links“ am stärksten voneinander. Für die Richtungen oben und unten ergeben sich gleiche Raten, da  $\sin(0^\circ) = 0 = \sin(180^\circ)$  gilt. Daher bietet sich als Messgröße die Rechts-Links-Asymmetrie der Streuraten  $N(re)$

<sup>2</sup>Vgl. [Mot29].

<sup>3</sup>Benannt nach Noah Sherman. Für genauere Informationen wird auf [She56] verwiesen.

## 2. Theoretische Grundlagen



**Abbildung 2.2.:** Definition des Azimutwinkels  $\varphi$  in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung [Büs07].

und  $N(li)$  an:

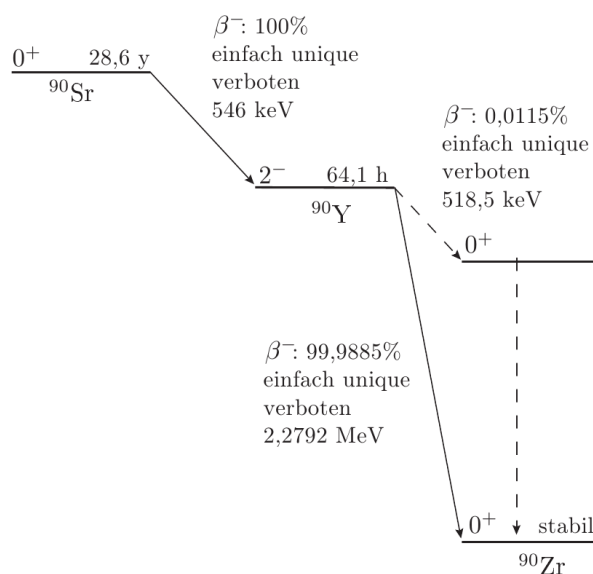
$$A = \frac{N(re) - N(li)}{N(re) + N(li)}. \quad (2.8)$$

Die Asymmetrie ist Folge der Polarisation der Elektronen, durch deren Messung die Paritätsverletzung im  $\beta^-$ -Zerfall nachgewiesen wird.

## 3. Experimentelle Realisierung

### 3.1. Die radioaktive Quelle

Als Quelle für die  $\beta^-$ -Strahlung wird das radioaktive Isotop Strontium-90 verwendet, bei dem es sich um einen reinen  $\beta^-$ -Strahler handelt (s. Abb. 3.1). Der Tochterkern Yttrium-90 zerfällt hauptsächlich unter Aussendung von  $\beta^-$ -



**Abbildung 3.1.:** Zerfallsschema von  $^{90}\text{Sr}$  [Han83].

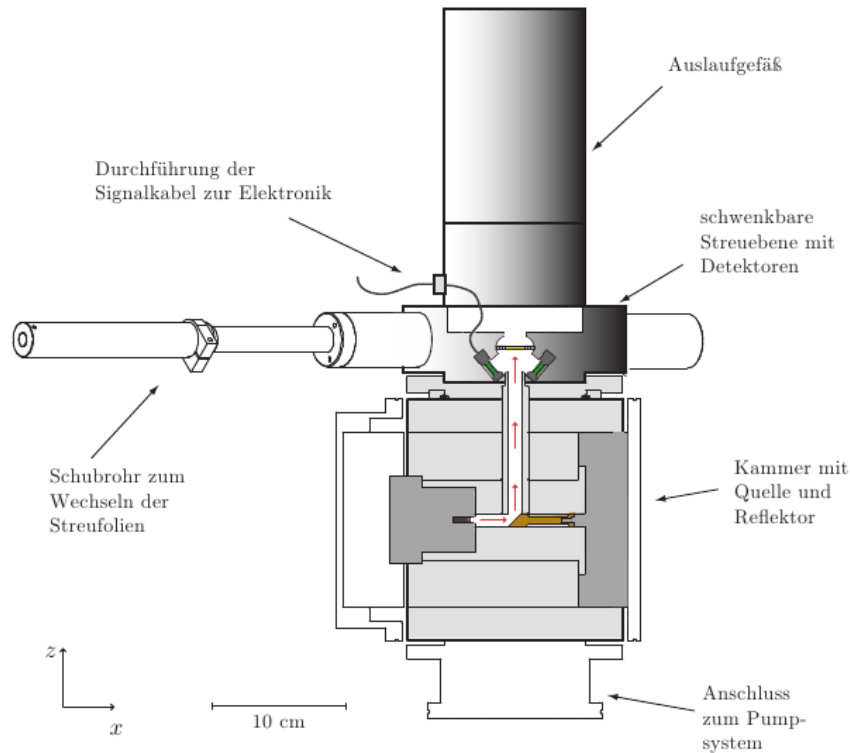
Strahlung in das stabile Isotop Zirkonium-90 und mit einer geringen Wahrscheinlichkeit von 0,0115 % in ein angeregtes Niveau des  $^{90}\text{Zr}$ , dass sich unter Aussendung eines  $\gamma$ -Quants abregt. Beim radioaktiven Zerfall entsteht kaum  $\gamma$ -Strahlung, die abgeschirmt werden müsste oder Rauschen verursachen würde. Mit einer Aktivität der Quelle von 230 MBq<sup>1</sup> sind Zählraten zu erwarten, die kurze Messzeiten ermöglichen, sodass die Quelle sich für den Einsatz im Praktikum eignet.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gemessen im November 2011.

<sup>2</sup>Übliche Messzeiten liegen bei acht Stunden [Hei11]

### 3.2. Der Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Vakuumkammer (Abb. 3.2), an deren untere Öffnung das Vakuumpumpsystem angeschlossen ist. Das System be-



**Abbildung 3.2.:** Maßstabsgetreuer Schnitt durch den Versuchsaufbau [Büs07].

steht aus einer Vorpumpe, die bei Inbetriebnahme den Aufbau zunächst auf einen Druck von  $10^{-1}$  mbar evakuiert. Anschließend wird eine Turbopumpe gestartet, die den Druck auf  $10^{-6}$  mbar verringern soll. An der Seite der Kammer befindet sich eine Öffnung, in die die radioaktive Quelle eingesetzt wird. Dadurch bewegen sich die Elektronen waagrecht auf den Reflektor zu, der sie nach oben umlenkt und die longitudinale in eine transversale Polarisation umwandelt. Die Kammer ist mit Blei ausgekleidet, das den Experimentator unter anderem vor Bremsstrahlung schützt.

Nach oben schließt sich an die Kammer über ein Kugellager die Streuebene an, die aus Kunststoff besteht. Zu diesem Bauteil gehört das Schubrohr, mit dem verschiedene Streufolien in die Flugbahn der Elektronen gebracht werden können. Die Folien bestehen aus dem Kunststoff Kapton, auf das Gold in verschiedenen Dicken  $d$  aufgedampft wurde (s. Tab. 3.1). Es wird Gold verwendet,

Position	Folie
1	unbedampfte Kaptonfolie
2	Gold, $d = 0.43 \mu\text{m}$
3	Gold, $d = 1.78 \mu\text{m}$
4	Gold, $d = 2.23 \mu\text{m}$
5	Gold, $d = 3.5 \mu\text{m}$
6	Aluminium, $d = 1 \text{ mm}$

**Tabelle 3.1.:** Im Versuch verwendbare Folien und ihre Positionen im Schubrohr. Die unbedampfte Folie dient zur Messung der Untergrundzählrate, die durch das Kapton verursacht wird. Mit der Aluminiumfolie wird die apparative Asymmetrie bestimmt, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen wird.

da es mit einer Kernladungszahl von  $Z = 79$  nach Gl. 2.6 eine ausgeprägte Mott-Streuung zeigt. Seitlich unterhalb der Streufolie wurden vier Halbleiterdetektoren so positioniert, dass Elektronen unter einem Streuwinkel  $\theta$  von  $130^\circ$  nachgewiesen werden.<sup>3</sup>

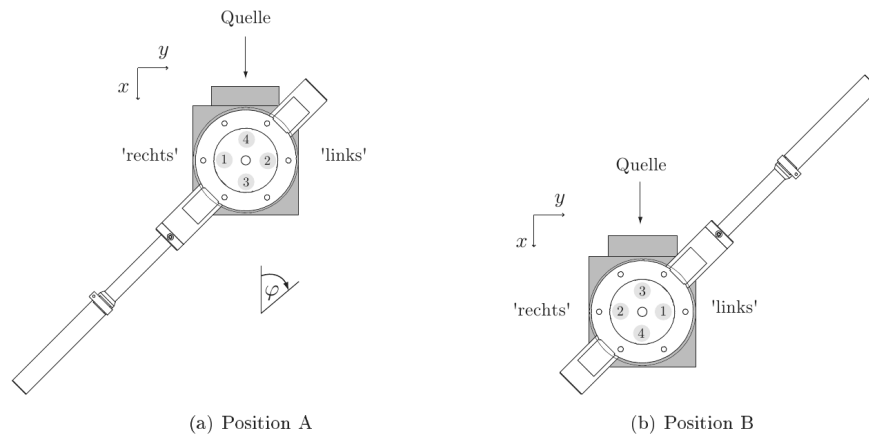
Das Bauteil, in dem sich die Streufolie befindet, kann gedreht werden, so dass für die Detektoren verschiedene Azimutwinkel eingestellt werden können. Befinden sich zwei gegenüberliegende Detektoren in der Zeichenebene, dann liegen die anderen beiden auf einer Geraden in y-Richtung (s. Abb. 3.2). Durch diese wird die Mott-Asymmetrie nachgewiesen. Oberhalb der Streuebene befindet sich ein Auslaufzylinder aus Kunststoff, der eine Rückstreuung der durchgelassenen Elektronen verhindert.

Zur visuellen Darstellung der Ebene, in der der Azimutwinkel liegt, und der Richtung der Asymmetrie kann die Draufsicht auf die Streuebene betrachtet werden (s. Abb. 3.3). Der Azimutwinkel wird in der x-y-Ebene gemessen, in der auch die Streuratenasymmetrie auftritt. Wie in Kap. 2.3 erläutert, tritt die maximale Asymmetrie in y-Richtung auf, d. h. in diesem Fall zwischen Detektor 1 und Detektor 2. In x-Richtung, d. h. zwischen Detektor 3 und Detektor 4 tritt sie gar nicht auf. Zur Messung der Asymmetrie wird die Streuebene in die Positionen A und B gebracht, bei der das Bauteil um  $180^\circ$  gedreht wird. So werden nicht nur geometrisch bedingte Asymmetrien des Aufbaus ausgeglichen, sondern auch die unterschiedliche Nachweiswahrscheinlichkeit der Detektoren berücksichtigt.

---

<sup>3</sup>Bei diesem Winkel ist der Betrag der Sherman-Funktion  $S(\theta)$  am größten (vgl. [Büs07], Kap. 3.3).

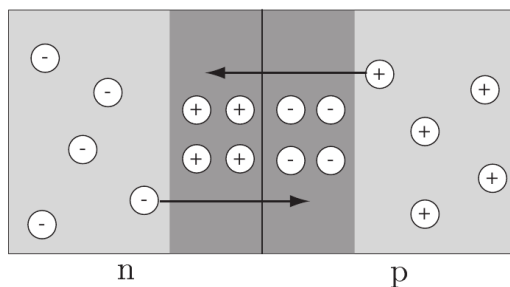
### 3. Experimentelle Realisierung



**Abbildung 3.3.:** Draufsicht auf die schwenkbare Streuebene [Büs07]. Die Asymmetrie wird zwischen den Detektoren 1 und 2 gemessen. Durch Drehung der Streuebene in die Positionen A und B werden detektorabhängige Nachweiseffizienzen berücksichtigt.

### 3.3. Funktionsweise der Detektoren

Bei den im Versuch eingesetzten Detektoren handelt es sich um Halbleiterzähler der Firma Ortec. Deren wesentliches Merkmal ist ein p-n-Übergang, der aus einem p-dotierten Halbleiter und einem n-dotierten Halbleiter besteht. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass in ihnen frei bewegliche positive bzw. negative Ladungsträger überwiegen. Am Übergang zwischen beiden Halbleitern diffundieren positive Ladungen in den n-Halbleiter und negative Ladungen in den p-Leiter, wodurch sich zwischen den getrennten Ladungen ein elektrisches Feld bildet (s. Abb. 3.4). Dieser Prozess hält so lange an, bis das elektrische



**Abbildung 3.4.:** Ladungsträgerdiffusion an einem p-n-Übergang [Büs07].

Feld groß genug geworden ist, um die Diffusion zu stoppen. Auf Grund des

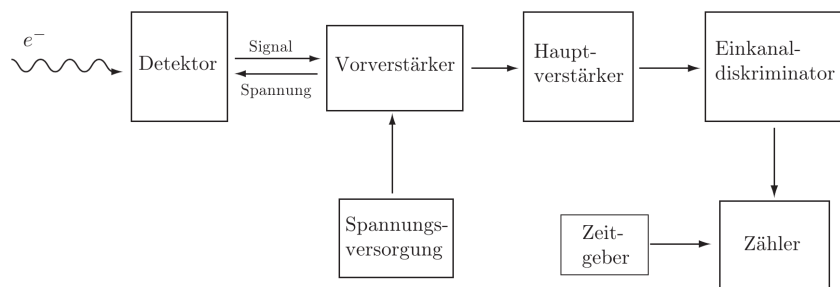
vorhandenen Feldes spricht man von einer Raumladungszone, in der kaum freie Ladungsträger vorhanden sind. Sie ist verarmt an Ladungsträgern und heißt deshalb auch Verarmungszone. Das elektrische Feld behindert die Bewegung von Ladungsträgern durch diese Zone, sperrt den Stromfluss in einer Richtung. Wenn man eine Spannung in Sperrrichtung anlegt, also den Pluspol mit dem n-Halbleiter verbindet und den Minuspol mit dem p-Halbleiter, dann vergrößert sich die Sperrschicht.

Der Nachweis radioaktiver Strahlung passiert nun in der Sperrzone. Beim Durchflug erzeugen ionisierende Teilchen Elektron-Loch-Paare, die vom E-Feld zu den entsprechenden Elektroden beschleunigt werden. Dadurch wird ein Abfall der Sperrspannung verursacht, der gemessen werden kann. Wenn die Verarmungszone, also der Bereich, in dem ionisierende Strahlung nachgewiesen werden kann, groß genug ist, dann werden die Teilchen vollkommen abgebremst und ihre kinetische Energie ist bestimmbar. Denn sie hängt linear mit der Anzahl an erzeugten Ladungsträgerpaaren zusammen, von denen wiederum die Höhe des Spannungspulses abhängt.

Für genauere Informationen wird auf [Kno76] verwiesen.

### 3.4. Die Elektronik

Der Aufbau der Elektronik ist in Abb. 3.5 schematisch dargestellt. Es wird ex-



**Abbildung 3.5.:** Schematischer Aufbau der Elektronik [Büs07].

emplarisch der Signalweg für einen Detektor betrachtet. Zuerst wird das Signal auf den Vorverstärker Canberra Model 2004 (engl. Pre Amplifier, PA) gegeben, der es auf einige Millivolt verstärkt. Wie oben erläutert, ist die Signalamplitude am Vorverstärkerausgang proportional zur Energie des detektierten Teilchens. Der Vorverstärker liefert gleichzeitig die Sperrspannung für die Detektoren (s. Tab. 3.2), die von der Ortec Detector Control Unit Model 210 (DCU) auf 1 V bis 1000 V eingestellt werden kann. Dort wird auch der Leckstrom des Sperrschichtdetektors angezeigt. Der Hauptverstärker (engl. Main Amplifier,

### 3. Experimentelle Realisierung

Detektor	alte Bez.	$U$ [V]
1	20a	650
2	26a	450
3	9a	350
4	49a	250
5	46a	230

**Tabelle 3.2.:** Bezeichnungen der Detektoren und zulässige Sperrspannungen  $U$ . Detektor 5 ist der verwendete Ersatzdetektor, auf den später eingegangen wird.

MA) I. N. Intertechnique Quad Amplifier 7175 verstärkt das Signal weiter auf etwa 1 V und gibt es auf einen Einkanaldiskriminator (engl. Single Channel Analyzer, SCA), der nur Pulse über einer gewissen Schwellenergie durchlässt und sie digitalisiert. Dies hat den Vorteil, dass Rauschen herausgefiltert wird, das im Detektor entsteht. Außerdem gilt dann auf allen Kanälen dieselbe untere Energiegrenze für die zu zählenden Pulse. Die Schwellenergie des SCA wird mit einer  $^{57}\text{Co}$ -Quelle kalibriert, die  $\gamma$ -Strahlung mit einer Energie von 136 keV emittiert. Schließlich gibt der Diskriminator das Signal in Form eines Rechteckpulses der Höhe 2 V bis 4 V auf den Vierfachzähler C.A.E.N. N1145 Quad Scaler and Preset Counter Timer.



## 4. Messungen und Ergebnisse

In den letzten Jahren gelang es im Praktikum nicht, die Paritätsverletzung nachzuweisen, wobei der Grund dafür unklar ist. [Hei11]. Im Jahr 2011 wurde auf Kanal 2 bei der Untergrundmessung an der unbedampften Kaptonfolie eine höhere Zählrate gemessen als bei der Streuung an einer der mit Gold bedampften Kaptonfolien, was bei einem stabilen Versuchsaufbau nicht vorkommen dürfte. Dies war der Anlass, in einer Langzeitmessung die Stabilität der Zählraten auf allen Kanälen zu untersuchen und dabei Kanal 2 besonders zu beachten (s. Kap. 4.2).

Ein wichtiger Faktor für die Stabilität des Versuchs ist die erreichbare Qualität des Vakuums. Denn nur in einem hohen Vakuum arbeiten die Detektoren zuverlässig und nehmen keinen Schaden<sup>1</sup>. In Messungen aus dem Jahr 2011 (z. B. Messung 3) wurde allerdings nur ein Druck erreicht, der zwei Größenordnungen über dem minimalen Druck liegt. Daher wurde untersucht, wie das Vakuum verbessert werden könnte.

### 4.1. Verbesserung des erreichbaren Vakuums

Laut [Büs07] kann mit dem Versuchsaufbau ein Druck von  $2 \cdot 10^{-6}$  mbar erreicht werden. In Messung 3 liegt der Druck allerdings nur im Bereich  $1 \cdot 10^{-4}$  mbar bis  $2 \cdot 10^{-4}$  mbar und schwankt um etwa  $5 \cdot 10^{-5}$  mbar, was 25% bis 50% entspricht<sup>2</sup>. Als mögliche Ursachen kommen der Auslaufzylinder und der niedrige Zylinder mit den BNC-Verbindungen in Frage, da diese Teile Verschleissspuren aufweisen.

Daher wurde die Anfertigung zweier neuer Kunststoffteile in der feinmechanischen Werkstatt in Auftrag gegeben.<sup>3</sup> In der Zwischenzeit wurde eine weitere Schwachstelle ausgemacht: die schwenkbare Streuebene. Die Aluminiumrohre, die das Schubrohr zum Wechseln der Streufohlen aufnehmen (s. Abb. 3.2), sind mit jeweils drei Edelstahlschrauben über Kunststoffgewinde mit der Streuebene verbunden. Bei einem der Rohre ist eines dieser Gewinde ausgerissen und Nachziehen der übrigen zwei Schrauben verursachte eine sofortige Reaktion auf der Druckanzeige. Der Druck fiel anschließend auf einen deutlich

---

<sup>1</sup>Der Druck soll  $10^{-6}$  mm Hg  $\approx 1,33322 \cdot 10^{-6}$  mbar betragen [Ort]

<sup>2</sup>Auswertung von Messung 3 folgt in Kap. 4.2.

<sup>3</sup>Die bis zu deren Lieferung durchgeführten Zählratenmessungen werden in Kap. 4.2 beschrieben.

#### 4. Messungen und Ergebnisse

geringeren Wert. Auf Grund der begrenzten Zeit und Ressourcen, die für eine Bachelorarbeit zur Verfügung stehen, und der Komplexität des Bauteils wurde vorerst auf eine Neuanfertigung verzichtet.

Die Messungen 1 und 2 zeigen die Unterschiede des erreichbaren Vakuums bzgl. der neuen und alten Kunststoffzylinder.<sup>4</sup> In Abb. 4.1 ist der Druckverlauf in Abhängigkeit von der Zeit mit den alten Kunststoffteilen und nach Anziehen der erwähnten Schrauben gezeigt. In Abb. 4.2 ist der Druckverlauf mit den neuen Kunststoffteilen dargestellt. Dabei war zu Beginn der Messung 1 die Turbopumpe bereits eingeschaltet, sodass der Druck schon auf  $1,9 \cdot 10^{-4}$  mbar gefallen war. Beim Beginn von Messung 2 betrug der Druck 1 mbar, was dem Wert entspricht, den die Vorpumpe vor Einschalten der Turbopumpe erreicht. Trotz der unterschiedlichen Situationen zu Beginn der Messungen können wesentliche Schlüsse gezogen werden. Man erkennt, dass nach Austauschen der Kunststoffteile nach etwas weniger als 1 h der Bereich von  $10^{-5}$  mbar erreicht wird. Der Bereich von  $10^{-6}$  mbar wird nach 70 h bis 80 h erreicht. Bei Messung 1 betragen die entsprechenden Zeiträume weniger als 0,5 h bzw. etwa 20 h. Der erste Wert ist dabei nicht aussagekräftig wegen der unterschiedlichen Drücke zu Beginn der Messungen.

Die Messungen zeigen, dass durch die Anfertigung neuer Kunststoffteile keine Verbesserung des Vakuums erreicht wurde. Die Verschlechterung des Vakuums seit der Fertigstellung des Aufbaus muss andere Ursachen haben, die unter anderem in der schon genannten Streuebene liegen können.

Auf Grund eines Defektes im weiteren Fortgang der Messungen wurde die Vorpumpe gegen ein leistungsfähigeres Modell ersetzt, das einen Druck von  $10^{-2}$  mbar ohne die Turbopumpe erreicht. Insgesamt wird innerhalb einer halben Stunde ein Druck von  $10^{-5}$  mbar erreicht, ein Druck von  $10^{-6}$  mbar innerhalb von 24 Stunden (s. Abb. 4.31, Kap. 4.4.3).

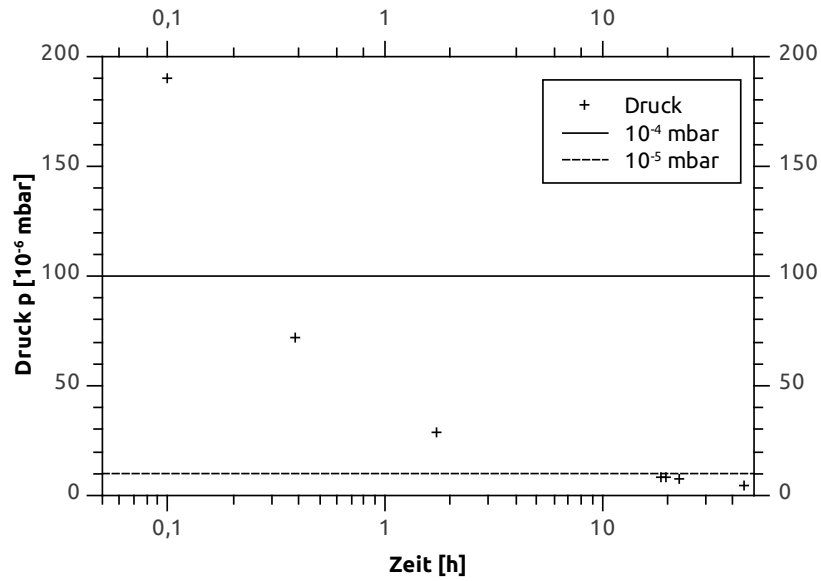
#### 4.2. Untersuchung der Zählratenstabilität

Bei der Untersuchung der Stabilität der Zählraten und bei allen folgenden Messungen wird an der dicksten Goldfolie mit der Dicke  $3,5 \mu\text{m}$  gestreut, da so die höchsten Zählraten und kürzesten Messzeiten zu erwarten sind. Die erste Langzeitmessung mit der Elektronikkonfiguration aus Tab. 4.1 dauerte mehr als elf Tage (s. Abb. 4.3) und zeigt, dass die Anzahl der Counts auf den Kanälen 1, 3 und 4 linear mit der Zeit ansteigt. Dieser Verlauf entspricht den Erwartungen, da von einer über die Messzeit konstanten Aktivität der Quelle auszugehen ist. Auf Kanal 2 ist der lineare Verlauf unterbrochen, wobei die Steigung vor und nach dem Sprung gleich ist. Es können keine

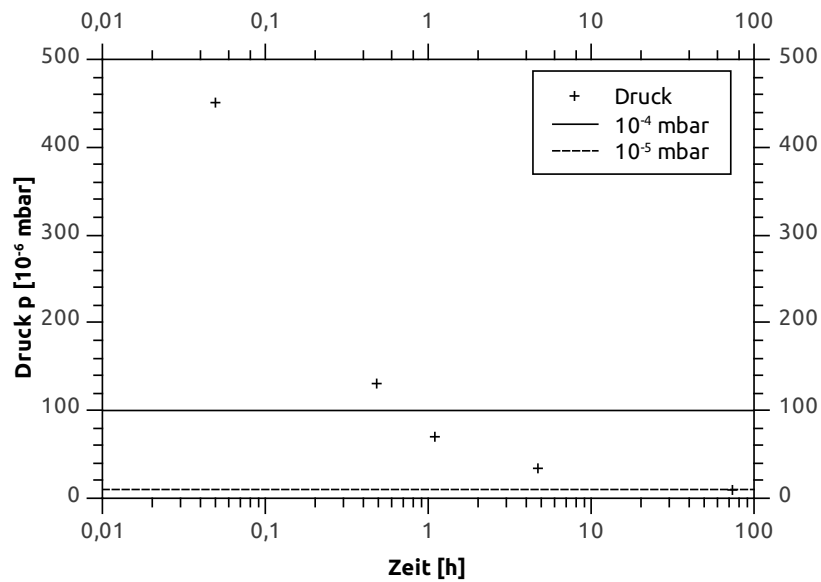
---

<sup>4</sup>Der Countverlauf in Abhängigkeit von der Zeit aus Messung 1 wird in Kap. 4.2 ausgewertet.

## 4.2. Untersuchung der Zählratenstabilität



**Abbildung 4.1.:** Messung 1: Druckverlauf in Abhängigkeit von der Zeit mit den alten Kunststoffteilen. (Der Wert  $p_0 = 1,9 \cdot 10^{-4}$  mbar wurde bei der Zeit  $t_0 = 0$  h gemessen, die auf der logarithmischen Achse nicht darstellbar ist. Damit die Skalierung der Zeitachse anschaulicher ist, wurde für den Wert  $p_0$   $t = 0,1$  h angenommen, was den Verlauf nicht wesentlich verändert.)

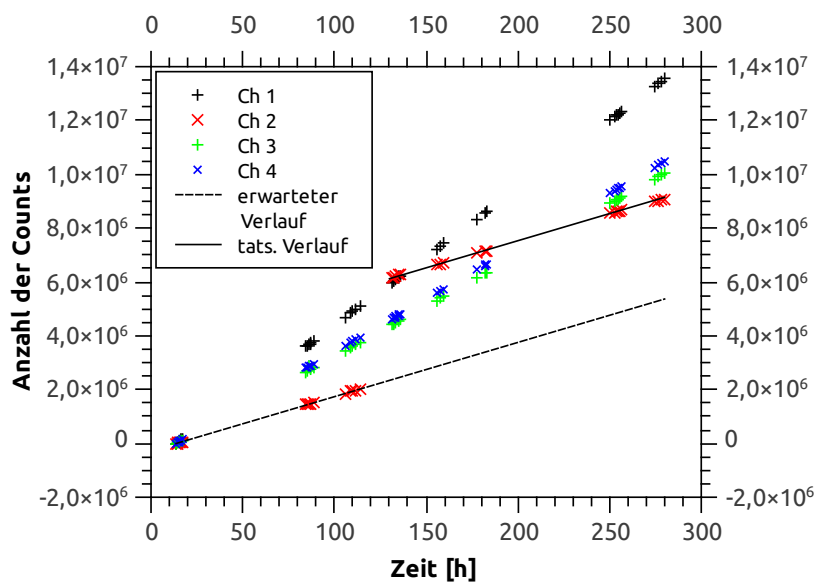


**Abbildung 4.2.:** Messung 2: Druckverlauf in Abhängigkeit von der Zeit mit den neuen Kunststoffteilen.

#### 4. Messungen und Ergebnisse

Messung	E	K <sub>pa</sub>	D
3	1	1	1
3	2	2	2
3	3	3	3
3	4	4	4

**Tabelle 4.1.:** Konfiguration der Elektronik E bei Messung 3. Die Zahlen bezeichnen die jeweiligen Kanäle. D: Detektor, K<sub>pa</sub>: Kabel zwischen BNC-Kupplung und Vorverstärker.



**Abbildung 4.3.:** Verlauf der Counts in Messung 3. Für Kanal 2 ist der tatsächliche und der erwartete lineare Verlauf eingezeichnet. Dabei wurde angenommen, dass die Steigung vor und nach dem Sprung gleich ist. Ch: Kanal (engl. Channel).

## 4.2. Untersuchung der Zählratenstabilität

Aussagen gemacht werden, wie die Kurve zwischen den linearen Bereichen genau verläuft. Möglicherweise steigt die Zählrate, also die Zahl der Counts pro Zeit, über einen gewissen Zeitraum an und sinkt anschließend langsam wieder ab. Dabei ist offen, wie schmal oder breit ein solcher Zählratenpeak ist. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass der Zähler zu einem Zeitpunkt um einen bestimmten Wert springt, beispielsweise auf Grund eines Defektes. Es ist anzunehmen, dass die Ursache des Zählratenverlaufs auf Kanal 2 nicht im radioaktiven Zerfall liegt, da die Aktivität der Quelle während der Messzeit als konstant angenommen werden kann.

Als nach einer Messzeit von fünf Tagen die Anomalie auf Kanal 2 festzustellen war, wurde noch einige Zeit weitergemessen, um herauszufinden, ob sie noch einmal auftritt und ob der Sprung dann gleich groß wäre. In Messung 3 ist jedoch keine weitere Anomalie festzustellen.

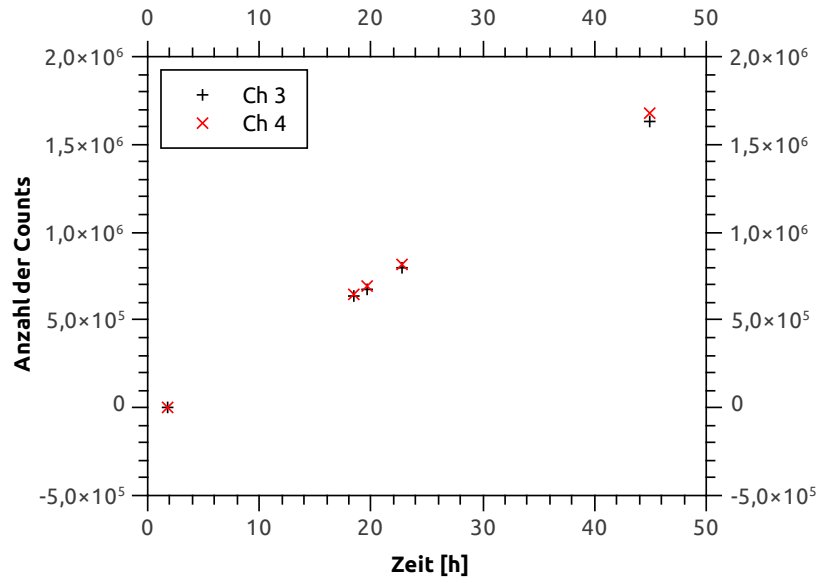
Als Ursache für den Sprung kommt einerseits der Detektor selbst in Frage, der auf Kanal 2 eingesetzt war. Andererseits könnte es sich um ein defektes Kabel  $K_d$  zwischen dem Detektor und der BNC-Kupplung handeln, die in den flachen Kunststoffzylinder geschraubt ist. Denn aus mehreren Versuchsdurchführungen im Praktikum ist bekannt, dass diese Kabel empfindlich sind und bei Umbauarbeiten am Aufbau leicht abknicken [Hei11]. Daher wurde in der Elektronikwerkstatt ein neues Kabel  $K_d 2$  in Auftrag gegeben. Eine weitere mögliche Ursache, die man in einer neuen Messung gleichzeitig überprüfen kann, ist das Kabel  $K_{pa} 2$ , das die BNC-Kupplung mit dem Vorverstärker verbindet. Dazu kann man das Kabel auf Kanal 3 einsetzen. Messung 1 wurde mit der Konfiguration der Elektronik aus Tab. 4.2 durchgeführt.

Messung	E	$K_{pa}$	D
1	1	1	2
1	3	2	3
1	4	4	4

**Tabelle 4.2.:** Konfiguration der Elektronik E bei Messung 1.

Das Ergebnis ist eine Zählrate auf Kanal 1, die die verfügbaren Stellen des Counters übersteigt. Für Kanal 3 und 4 sind die Verläufe der Counts in Abb. 4.4 dargestellt, aus denen man auf eine zu erwartende Zählrate schließen kann. Die Ergebnisse deuten auf einen Defekt von Detektor 2 hin, wobei die Anzahl der Counts auf eine unerwartet hohe Zählrate hinweist. Die Unregelmäßigkeit in der Zählrate scheint sich hier von der zu unterscheiden, die in Messung 3 aufgetreten ist. Das kann durch ein defektes Kabel  $K_{pa} 1$  verursacht werden, da die Zählrate auf Kanal 1 auf Null sinkt, wenn das Kabel bewegt wird. Es ist nicht eindeutig, ob die anormale Zählrate auf Kanal 1 durch Detektor 2 verursacht wurde oder durch das Kabel  $K_{pa} 1$ .

#### 4. Messungen und Ergebnisse



**Abbildung 4.4.:** Verlauf der Counts in Messung 1.

Um den Detektor mit hoher Wahrscheinlichkeit als Ursache für den Sprung verifizieren zu können, wurde er in den folgenden Messungen in verschiedenen Kombinationen mit der Elektronik der anderen Kanäle betrieben (s. Tab. 4.3). Bei allen Messungen ist die unerwartete Zählrate auf dem Kanal feststellbar, auf dem jeweils Detektor 2 eingesetzt war, wodurch der Detektor als Ursache identifiziert werden kann.

Daher wurde Detektor 2 durch einen Reservedetektor ersetzt, der im Folgenden Detektor 5 genannt wird (s. Tab. 3.2). Mit diesem Detektor in der Elektronik-konfiguration aus Tab. 4.4 wurde Messung 7 durchgeführt, bei der der Sprung

Messung	E	K <sub>pa</sub>	D
4	1	3	2
5	1	4	2
6	3	3	2
6	4	4	4

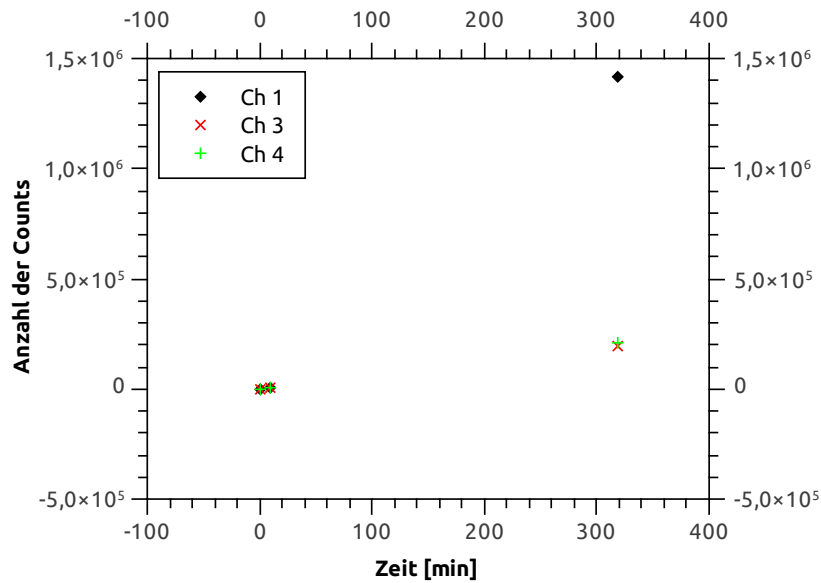
**Tabelle 4.3.:** Konfiguration der Elektronik E in den Messungen 4 bis 6, in denen Detektor 2 betrieben wurde. Bei Messung 6 wurde Kanal 4 als Referenz hinzugezogen, auf dem bisher ein normaler Verlauf der Counts zu erkennen war.

## 4.2. Untersuchung der Zählratenstabilität

im Countverlauf trotz Detektortauschs weiter auftritt (s. Abb. 4.5). Es ist zu

Messung	E	K <sub>pa</sub>	D
7	1	2	5
7	3	3	3
7	4	4	4

**Tabelle 4.4.:** Konfiguration der Elektronik bei Messung 7. Kanal 3 und 4 dienen als Referenz, da auf ihnen in vorherigen Messungen kein unerwartetes Verhalten zu beobachten war.



**Abbildung 4.5.:** Verlauf der Counts in Messung 7.

erkennen, dass der Verlauf auf den Kanälen anfangs ähnlich ist und sich später stark unterscheidet. Auf Kanal 1 wird eine Größenordnung mehr Counts registriert. Der Grund dafür könnte zum einen sein, dass der Ersatzdetektor 5 einen ähnlichen Defekt aufweist wie Detektor 2. Zum anderen könnte die Ursache beim Kabel K<sub>pa</sub> 2 liegen, wenn es im Widerspruch zu Messung 1 defekt wäre. Ein weiterer Hinweis auf letzteres ist Messung 3, bei der das Kabel ein Teil von Kanal 2 war, auf dem der Sprung zu erkennen ist (s. Abb. 4.3).

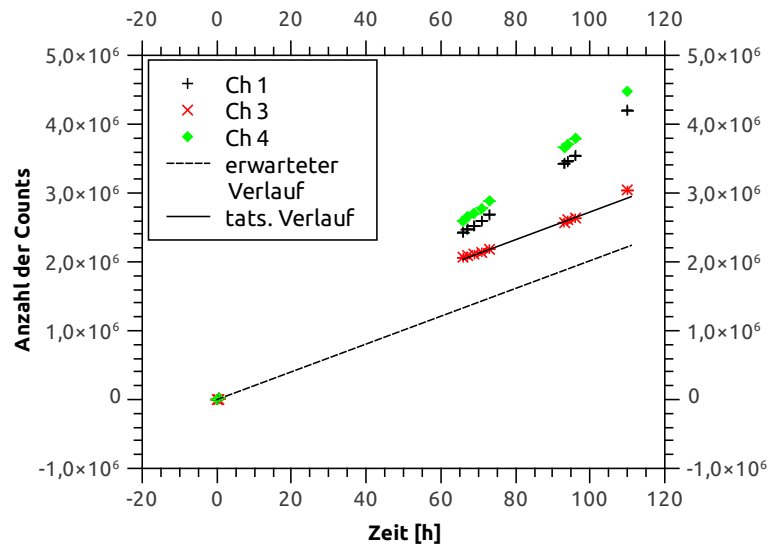
Zur Überprüfung der beiden Möglichkeiten wurde Detektor 5 mit einem, von der Elektronikwerkstatt neu hergestellten, Kabel K<sub>pa</sub> 1.1 an der Elektronik E 3 betrieben, um gleichzeitig noch einmal E 1 als Ursache für den Sprung auszuschließen (s. Tab. 4.5). Das Kabel K<sub>pa</sub> 2 wurde an E 1 und mit Detek-

#### 4. Messungen und Ergebnisse

Messung	E	K <sub>pa</sub>	D
8	3	1.1	5
8	1	2	3
8	4	4	4

**Tabelle 4.5.:** Konfiguration der Elektronik bei Messung 8.

tor 3 betrieben. Der Kanal 4 diente erneut als Referenz. Der Countverlauf (s. Abb. 4.6) zeigt, dass der Sprung auf Kanal 3 auftritt, was auf einen defekten Detektor 5 hinweist. Da es unwahrscheinlich ist, dass



**Abbildung 4.6.:** Verlauf der Counts in Messung 8. Für Kanal 3 ist der tatsächliche und der erwartete lineare Verlauf eingezeichnet. Dabei wurde angenommen, dass die Steigung vor und nach dem Sprung gleich ist.

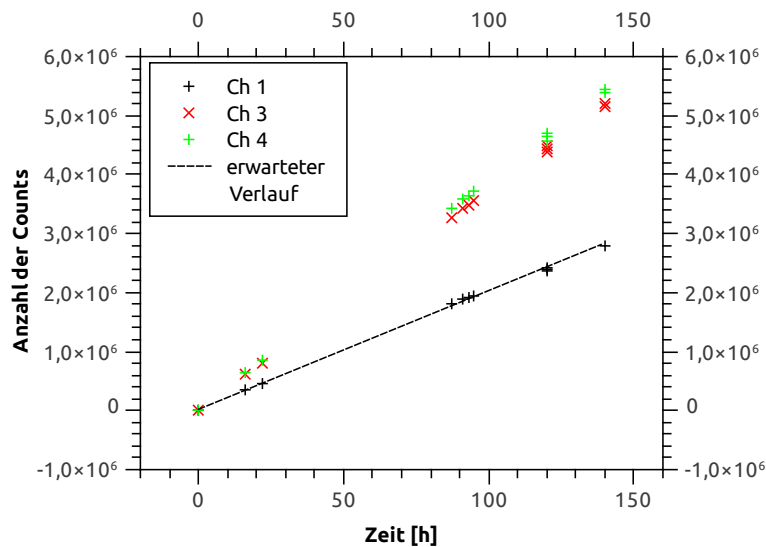
ein Ersatzdetektor denselben Defekt aufweist wie der zuvor eingesetzte Detektor, wurde versucht, das Ergebnis von Messung 7 zu reproduzieren. Das Kabel K<sub>pa</sub> 2, das nach Messung 7 als Ursache für den Sprung in Frage kommt, wurde vorher durch Bewegen des Kabels und der Steckverbindungen auf offensichtliche Wackelkontakte untersucht. Auch in verschiedenen Tests, die in der Elektronikwerkstatt durchgeführt wurden, konnte kein Defekt festgestellt werden.

Zur Reproduktion des Sprungs wurde in Messung 9 dieselbe Konfiguration wie in Messung 7 hergestellt, womit der Sprung auf Kanal 1 zu erwarten war. Der Countverlauf (Abb. 4.7) zeigt, dass sich das unerwartete Verhalten trotz einer



### 4.3. Systematische Untersuchung aller Elektronikbauteile

Messzeit von mehr als sechs Tagen nicht reproduzieren ließ. Der Grund dafür



**Abbildung 4.7.:** Verlauf der Counts in Messung 9. Auf Kanal 1 ist kein Sprung erkennbar, sodass der erwartete und der tatsächliche Verlauf übereinstimmen.

ist unbekannt, zumal der Sprung auf keinem der restlichen Kanäle auftritt. Da es keine weiteren konkreten Hinweise auf eine Ursache gab, wurde als nächstes der Vierfachzähler untersucht, da es sich dabei um ein Bauteil handelt, das allen vier Kanälen gemeinsam ist. Somit war der Zähler auch bei jedem Auftreten eines Sprungs im Countverlauf beteiligt. Dazu wurde der Zähler am Praktikumsversuch „Neutronendiffusion“ des Instituts für Kernphysik betrieben, bei dem ein Detektorsignal mit Hilfe eines Fan in/Fan out vervierfacht und auf die Eingänge des Zählers gegeben wurde. Die 17 Tage dauernde Messung 10 (s. Abb. B.1) belegt, dass der Zähler einwandfrei funktioniert. Damit ist dieses Bauteil als Ursache des Sprungs auszuschließen.

### 4.3. Systematische Untersuchung aller Elektronikbauteile

In Kap. 4.1 wurde beschrieben, dass zur Verbesserung des Vakuums zwei neue Kunststoffteile hergestellt wurden. Bei deren Einbau traten Vakuumlecks auf, deren Lokalisierung etwa eineinhalb Wochen in Anspruch nahm. Anschließend

#### 4. Messungen und Ergebnisse

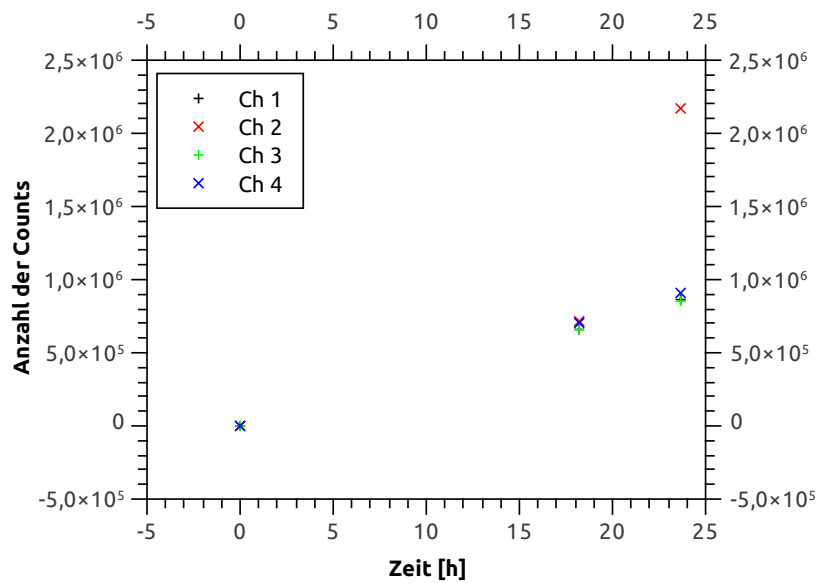
wurde erneut eine Messung zur Stabilität der Zählraten durchgeführt, um den Sprung im Countverlauf aus Messung 7 zu reproduzieren, nachdem dies in Messung 9 nicht gelungen war (s. Abb. 4.7). Es wurden erneut alle vier Detektoren eingesetzt, da mittlerweile wieder vier Kabel  $K_d$  verfügbar waren (s. Tab. 4.6). Außerdem hatte die Elektronikwerkstatt einen kompletten Satz von

Messung	E	$K_{pa}$	D
11	1	1	5
11	2	2	1
11	3	3	3
11	4	4	4

**Tabelle 4.6.:** Konfiguration der Elektronik bei Messung 11.

Kabeln  $K_{pa}$  1.1 bis 4.1 neu angefertigt, die im Folgenden mit den Zahlen 1 bis 4 bezeichnet werden. Diese Komponente kann also wahrscheinlich als Grund für das unerwartete Verhalten ausgeschlossen werden.

Bei der Konfiguration von Messung 11 zeigt sich ein Auftreten des Sprungs auf Kanal 2 mit der Elektronik E 2 und dem Detektor 1 (s. Abb. 4.8). Beim



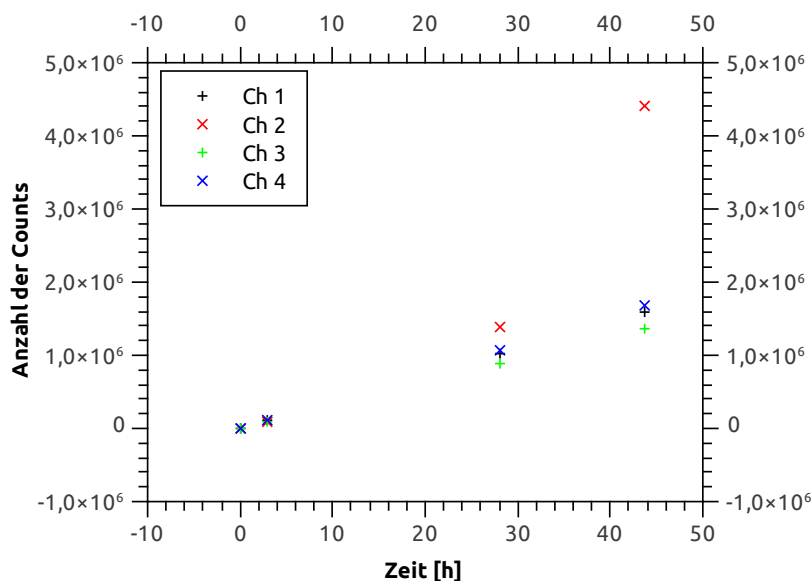
**Abbildung 4.8.:** Verlauf der Counts in Messung 11.

letzten Auftreten des Sprungs in Messung 7 war allerdings E 1 und Detektor 5 beteiligt. Damit kann weder einer der Detektoren noch eine Komponente der

### 4.3. Systematische Untersuchung aller Elektronikbauteile

Elektronik eindeutig als Ursache identifiziert werden.

Daher wurde begonnen, systematisch jede einzelne Komponente der Elektronik zu untersuchen. Dazu wurden Schritt für Schritt Komponenten des Kanals 2, auf dem der Sprung bisher am häufigsten aufgetreten war, mit Komponenten des Kanals 3 bzw. 4 getauscht, da diese bisher zuverlässig waren (s. Tab. A.2). Die Ergebnisse der Messungen sind in den Abb. 4.9 bis 4.12 dargestellt. In



**Abbildung 4.9.:** Verlauf der Counts in Messung 12.

den Messungen 12 bis 14 tritt der Sprung konstant auf Kanal 2 auf, wodurch die Komponenten von Kanal 2, die in den Messungen getauscht waren, als Ursachen ausgeschlossen werden können. Dabei handelt es sich um die Komponenten PA, DCU,  $K_{dcu}$ , MA, SCA und  $K_{ma/sca}$ .

In Messung 15 tritt der Sprung auf Kanal 3 auf, obwohl auf diesem Kanal keine der Komponenten von Kanal 2 eingesetzt war. Das heißt, dass der Sprung im Countverlauf keiner konkreten Elektronikkomponente zugeordnet werden kann. Er scheint sporadisch und auf unterschiedlichen Kanälen aufzutreten, weswegen der Grund für das unerwartete Verhalten nicht durch systematisches Vertauschen einzelner Komponenten lokalisiert werden kann. Das heißt, die Vorgehensweise sollte geändert werden, um die Ursache zu finden und eventuell zu beseitigen.

#### 4. Messungen und Ergebnisse

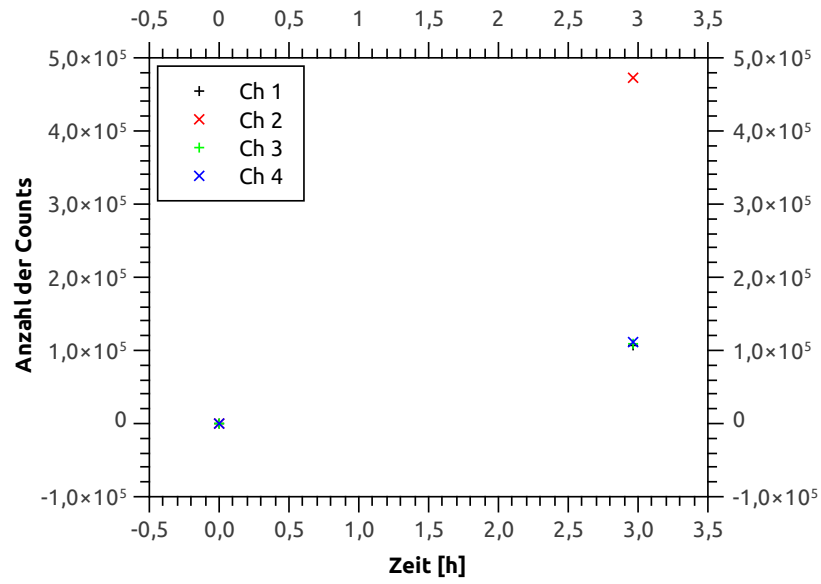


Abbildung 4.10.: Verlauf der Counts in Messung 13.

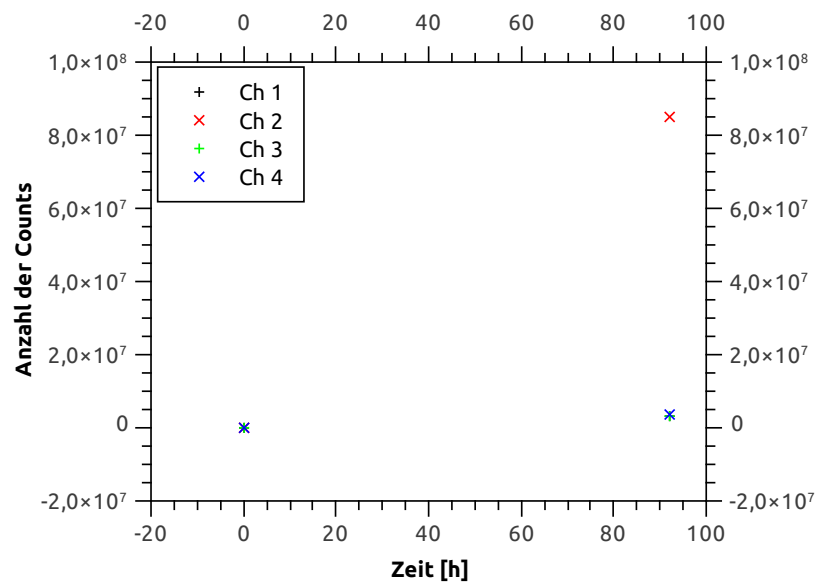
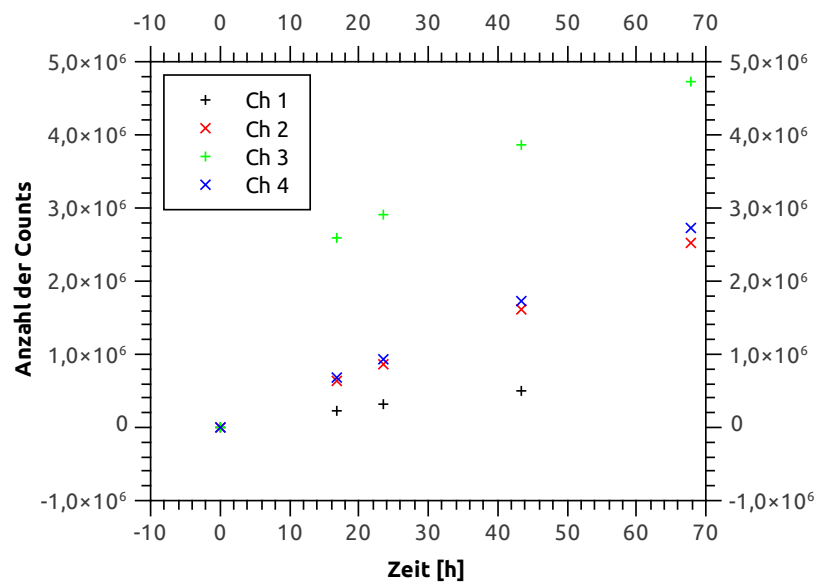


Abbildung 4.11.: Verlauf der Counts in Messung 14.

#### 4.3. Systematische Untersuchung aller Elektronikbauteile

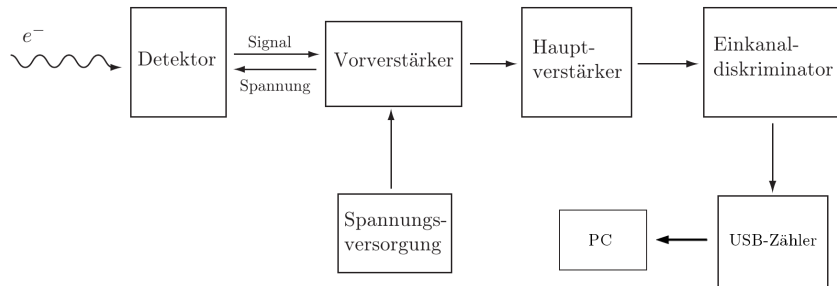


**Abbildung 4.12.:** Verlauf der Counts in Messung 15. (Auf Kanal 1 wurde ein Messwert weniger aufgenommen, da dort eine andere Messung begonnen wurde.)

#### 4.4. Echtzeitmessung der Zählraten

Bisher wurde beim Versuchsaufbau zum Nachweis der Paritätsverletzung die radioaktiven Zerfälle mit Hilfe eines Vierfachzählers gezählt. Dabei wurde die Anzahl der Counts summiert und es war nötig die Anzeige des Zählers zu verschiedenen Zeitpunkten abzulesen, um einen Countverlauf mit der Zeit zu erhalten. Daher konnte lediglich festgestellt werden, ob auf einem Kanal ein Sprung vorkam, aber nicht wann genau er auftrat. Auch gab es keine genaueren Informationen über den Zählratenverlauf im Bereich des Sprungs. Des Weiteren schien das unerwartete Verhalten regellos auf unterschiedlichen Kanälen vorzukommen, wodurch nicht auszuschließen ist, dass es auf allen Kanälen auftritt.

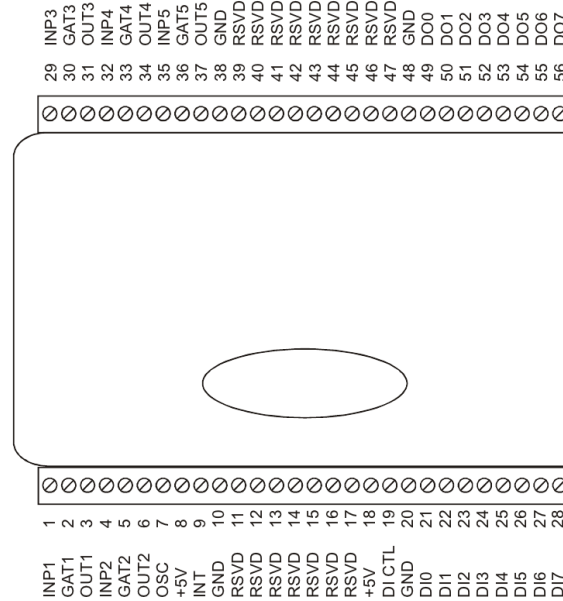
Um diese Situation zu verbessern, wurde eine Echtzeitdatenaufnahme realisiert mit Hilfe des USB-Zählers Redlab 4301 der Firma Meilhaus. Dabei handelt es sich um einen Fünffachzähler, mit dem auf allen vier Kanälen gleichzeitig gemessen werden kann. Es wurde sichergestellt, dass das Gerät für die Signalhöhen von 2,5 V bis 4 V und Signallängen von 450 ns bis 600 ns an den SCA-Ausgängen geeignet ist. Man verbindet den Zähler per USB-Kabel mit einem PC und gibt die Signale der Einkanaldiskriminatoren auf die Zählereingänge INP1 bis INP4 (s. Abb. 4.13 und 4.14)<sup>5</sup>. Das Messgerät



**Abbildung 4.13.:** Blockschaltbild mit Redlab USB-Zähler (angelehnt an Abb. 4.13 aus [Büs07]).

wird mit einem Labviewprogramm so gesteuert, dass auf allen vier Kanälen in unterschiedlichen Zeitintervallen die aktuelle Zählrate gemessen und in ein Logfile geschrieben wird. Die Zeitintervalle können sehr fein gewählt werden. Dadurch können nicht nur Sprünge in der Zählrate identifiziert, sondern auch genauer analysiert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass man mit Hilfe der Echtzeitdaten unbrauchbare Messwerte verwerfen kann. Angenommen man

<sup>5</sup>Dabei musste der SCA Ortec 406 durch den SCA Canberra 830 ersetzt werden, da der USB-Zähler aus unbekannten Gründen mit ersterem nicht kompatibel war.



**Abbildung 4.14.:** Anschlussbelegung des Redlab USB-Zähler [Ele08].

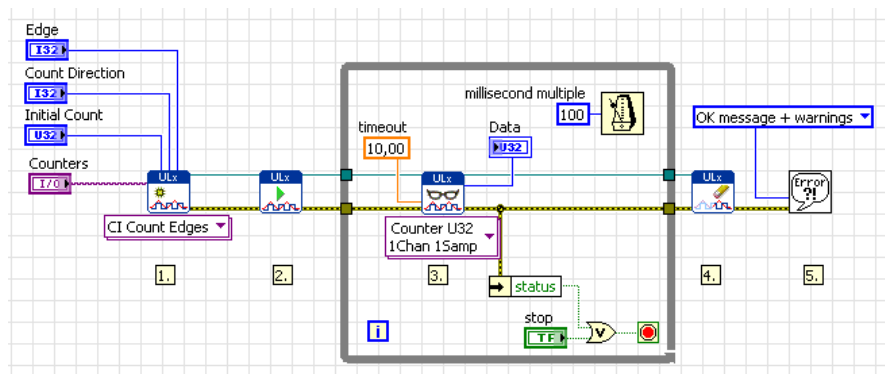
erkennt relativ schmale Peaks im Zählratenverlauf bei einer ansonsten konstanten Zählrate. Dann können die zu den Peaks gehörenden Messwerte im Logfile ausgeschnitten werden, sodass der Aufbau auch dann benutzbar ist, wenn der Grund für die Peaks nicht beseitigt werden kann. Dabei müssen bei einem beispielsweise auf Kanal 2 auftretenden Peak, der seine Ursache nicht im radioaktiven Zerfall haben kann, die Messwerte für alle anderen Kanäle auch gelöscht werden. Handelt es sich um scharfe Peaks, dann ist die dadurch verursachte Verkürzung der Messzeit vernachlässigbar bei einer typischen Messzeit von 8 h [Hei11].

##### 4.4.1. Steuerung des USB-Zählers mit Labview

Zum Auslesen des Zählers wurde ein von der Firma Meilhaus mitgeliefertes Labviewprogramm verwendet (s. Abb. 4.15). Mit dem Element 3, „ULx-Read“, das sich innerhalb der Schleife befindet und die Daten ausgibt, kann jeweils einer der vier Zähler des Redlab 4301 ausgelesen werden. Mit Hilfe des Elements 1 kann man beispielsweise einstellen, in welche Richtung gezählt werden soll („Count Direction“) oder welcher Startwert vorgegeben ist („Initial Count“).

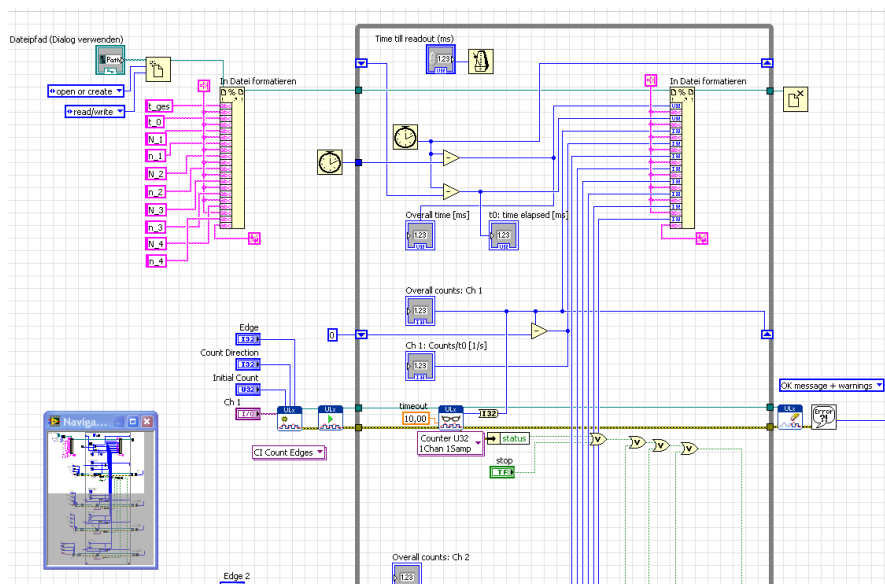
Um die Counts auf vier Kanälen zu zählen, werden vier Kopien dieses Unterprogramms in eine Schleife gebracht (s. Abb. 4.16), wobei jedes Unterpro-

#### 4. Messungen und Ergebnisse



**Abbildung 4.15.:** Labviewprogramm zum Auslesen des USB-Zählers.

gramm einen anderen Zähler ausliest. Die Ausgabe des ULx-Read-Elements



**Abbildung 4.16.:** Labviewprogramm zum simultanen Auslesen von vier Zählern des Redlab USB-Zählers.

wird zum einen auf das Element „In Datei formatieren“ gegeben, welches das Logfile mit den Messwerten erzeugt. Des Weiteren wird die Ausgabe direkt auf eine Subtraktions-Funktion gegeben und über ein Schieberegister in die nächste Schleife übertragen. Beim nächsten Durchlauf wird dann der alte Zählerstand auf den anderen Eingang der Subtraktion gegeben und von der aktuellen Zahl der Counts abgezogen, sodass man die Anzahl der Counts im letzten Zeitintervall erhält. Dieser Wert wird ebenfalls über das Formatierungs-

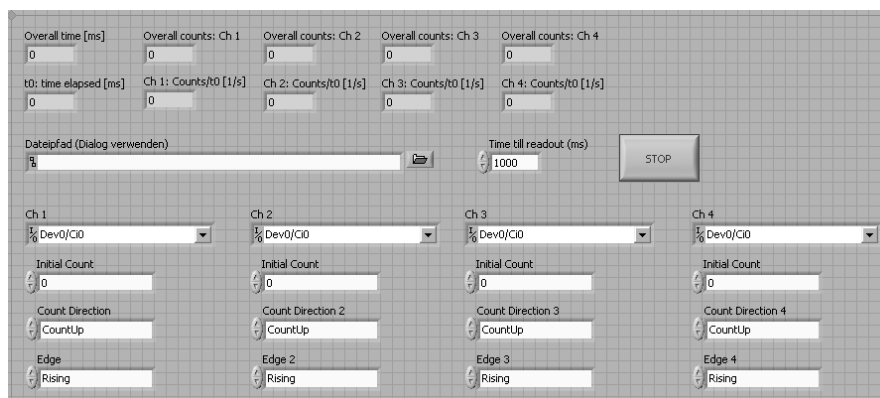


#### 4.4. Echtzeitmessung der Zählraten

Element in das Logfile geschrieben. Des Weiteren gibt es am Ausgang des ULx-Read und am Ausgang der Subtraktion Anzeige-Elemente, um die Gesamtzahl der Counts und die Anzahl der Counts pro Zeitintervall auf dem Frontpanel anzuzeigen (s. Abb. 4.17).

Die Dauer zwischen zwei Auslesevorgängen  $t_0$  wird über ein Timer-Element in Vielfachen von Millisekunden festgelegt. Die Ermittlung der Gesamtmessdauer und der Dauer der jeweiligen Schleife  $t_0$  wird mit Hilfe von zwei Timer-Elementen und zwei Subtraktionen realisiert. Der Ausgang des Timer-Werts innerhalb der Schleife ist mit einem Schieberegister und mit den Minuenden-Eingängen der beiden Subtraktionen verbunden. In der einen Subtraktion wird davon der Wert des Timers außerhalb der Schleife abgezogen, sodass am Ausgang die Gesamtzeit auf das Formatierungselement gegeben wird. Am Minuenden-Eingang der anderen Subtraktion liegt der Timer-Wert aus dem vorherigen Durchlauf an. Dadurch erhält man am Ausgang das Zeitintervall der letzten Schleife, das ebenfalls in das Logfile geschrieben wird. Mit den Ausgängen beider Subtraktionen sind Anzeigeelemente verbunden, um die Gesamtzeit und die Dauer des letzten Intervalls auf dem Frontpanel anzuzeigen. Das Formatierungselement besitzt für jeden Zähler zwei Eingänge, einen für die Gesamtzahl der Counts und einen für die Counts pro Zeitintervall. Es ist mit einem Element zum Schließen des Logfiles verbunden und mit einem Element zum Erstellen und Löschen des Files, wobei auch der Dateipfad angegeben werden kann. Das Formatierungselement außerhalb der Schleife hat für das Programm keine Bedeutung, sondern dient zur Dokumentation seines Pendants innerhalb der Schleife.

Zusätzlich zu den schon erwähnten Anzeigeelementen sind auf dem Frontpanel des Labviewprogramms (s. Abb. 4.17) Schaltelemente zur Zuordnung eines bestimmten Zählers zu einem bestimmten Kanal vorhanden. Man kann hier



**Abbildung 4.17.:** Bedienungsoberfläche des Labviewprogramms für den Vierfachzähler.

für jeden Zähler die schon erwähnten Parameter „Initial Count“ und „Count Direction“ festlegen, aber es kann auch gewählt werden, ob die fallende oder die steigende Flanke eines Signals einen Zählpuls auslöst. Weitere Bedienelemente dienen der Angabe des Dateipfades, unter dem das Logfile gespeichert werden soll, und der Angabe in welchen Zeitabständen die Zähler ausgelesen werden. Der Stopp-Knopf beendet die Messung. Schließlich gibt es noch Anzeigeelemente, an denen man für jeden Kanal die Counts, die Counts seit dem letzten Auslesen, die Gesamtmessdauer und die Dauer  $t_0$  der letzten Schleife ablesen kann.

##### 4.4.2. Ergebnisse der Echtzeitdatenaufnahme in Messung 16

Das vom Labviewprogramm erzeugte Logfile enthält für jeden Kanal die Anzahl der Counts und die Zahl der Counts pro Zeitintervall  $t_0$ . Außerdem wird die gesamte Messdauer gespeichert und für jede Schleife die Zeit  $t_0$ , die manchmal um wenige Millisekunden vom eingestellten Wert abweicht. Dieses Logfile wird mit einem C++-Programm ausgewertet, das die Daten in zwei Diagrammen darstellt. Zum einen werden die Counts, nach Kanälen getrennt, gegen die Messdauer aufgetragen (s. z. B. Abb. 4.22). Außerdem wird für jeden Kanal der Verlauf der Zählrate mit der Zeit dargestellt (z. B. Abb. 4.18). Um diese Darstellungen zu erhalten, muss das Binning der Daten festgelegt werden. Dabei wird die Länge der Zeitintervalle gewählt, für die die Counts summiert werden. Die Einteilung muss fein genug sein, um Strukturen im Verlauf zu erkennen und grob genug, um den Einfluss statistischer Schwankungen zu minimieren. Auf der x-Achse wird die Messzeit in Sekunden angegeben. Ein weiterer wählbarer Parameter ist die Anzahl der eingesetzten Detektoren und damit die Anzahl der Spalten im Logfile. Dies ist für Fälle vorgesehen, in denen nicht alle Detektoren oder sogar ein fünfter Detektor eingesetzt werden können.<sup>6</sup>

Zusätzlich zur Darstellung des Zählratenverlaufs gibt das Programm die minimale und maximale Zählrate an. Damit kann bewertet werden, inwieweit die Rate vom erwarteten konstanten Wert abweicht.<sup>7</sup>

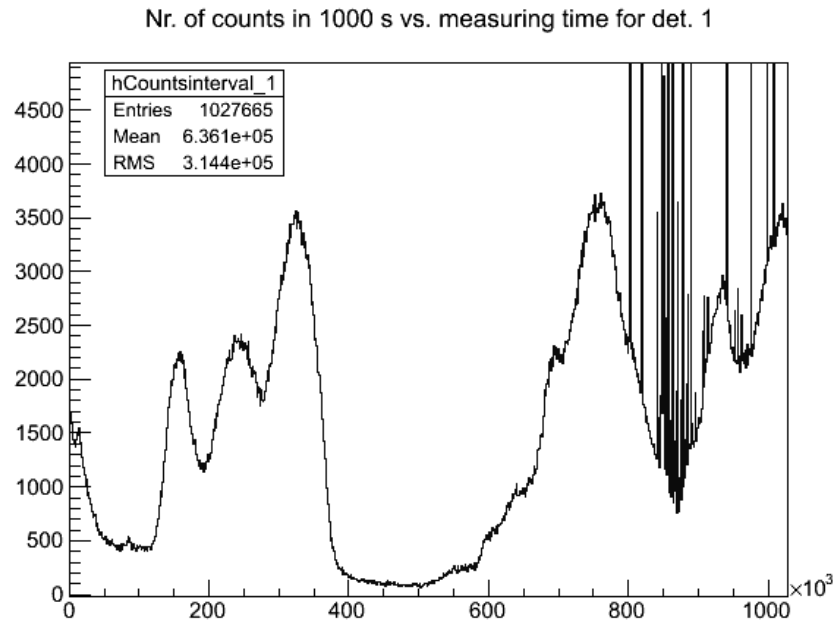
Messung 16 wurde mit der Elektronikkonfiguration aus Tab. 4.7 durchgeführt und dauerte mehr als elf Tage. In den Abb. 4.18 bis 4.21 ist die Entwicklung der Zählraten mit der Zeit graphisch dargestellt. Die Zählrate wurde alle 1000 ms gemessen und zur Auswertung in Bins von 1000 s zusammengefasst. Diese Wahl stellt den besten Kompromiss dar zwischen einer möglichst hohen Auflösung des Verlaufs und der Möglichkeit, größere Strukturen zu erkennen.

---

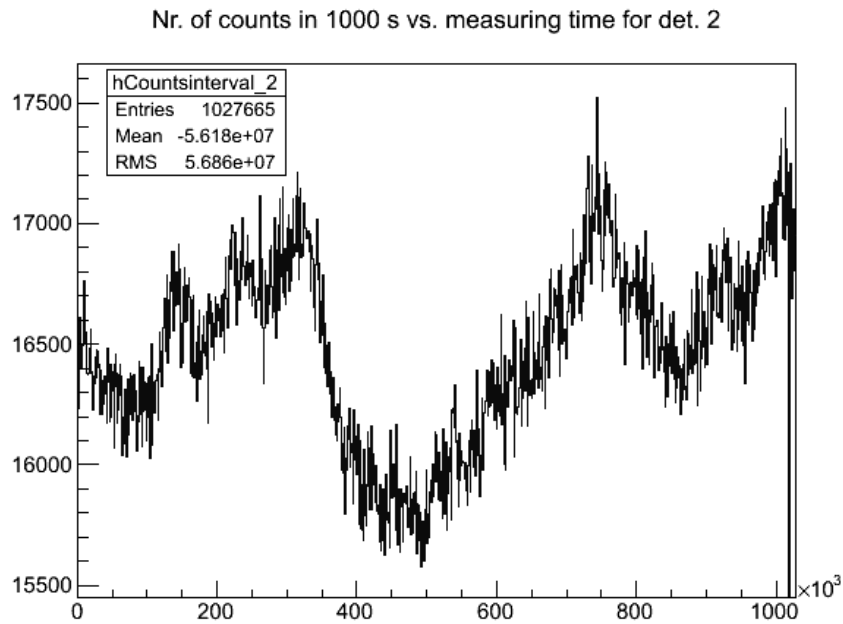
<sup>6</sup>Bei der Konzeption des Versuchs wurde der Einbau eines fünften Detektors vorgesehen, mit dem eine Energieverlustmessung durchgeführt werden kann. Damit könnte die Foliendicke bestimmt werden [Büs07].

<sup>7</sup>Vgl. Kap. 4.4.5.

#### 4.4. Echtzeitmessung der Zählraten

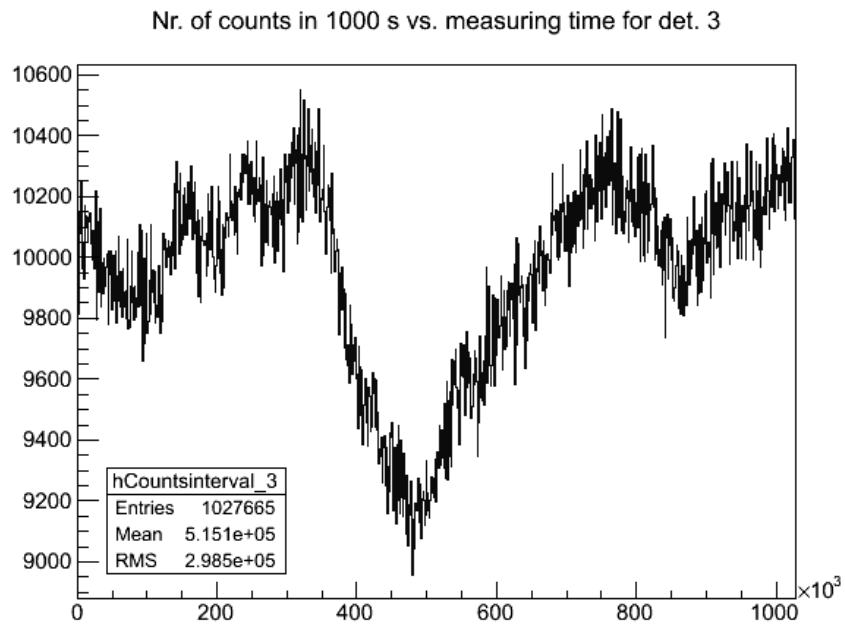


**Abbildung 4.18.:** Zählratenverlauf auf Kanal 1 bei Messung 16 (auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden aufgetragen).

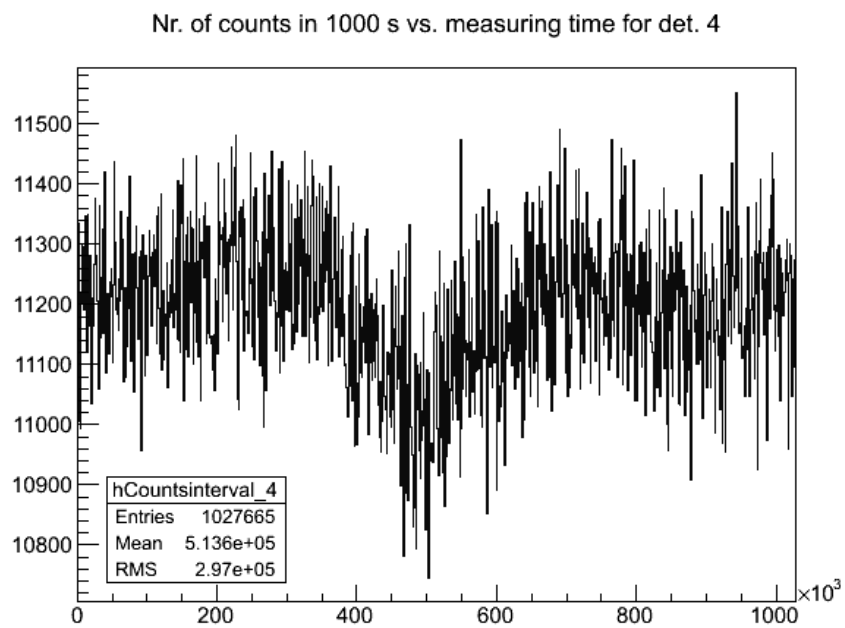


**Abbildung 4.19.:** Zählratenverlauf auf Kanal 2 bei Messung 16.

#### 4. Messungen und Ergebnisse



**Abbildung 4.20.:** Zählratenverlauf auf Kanal 3 bei Messung 16.



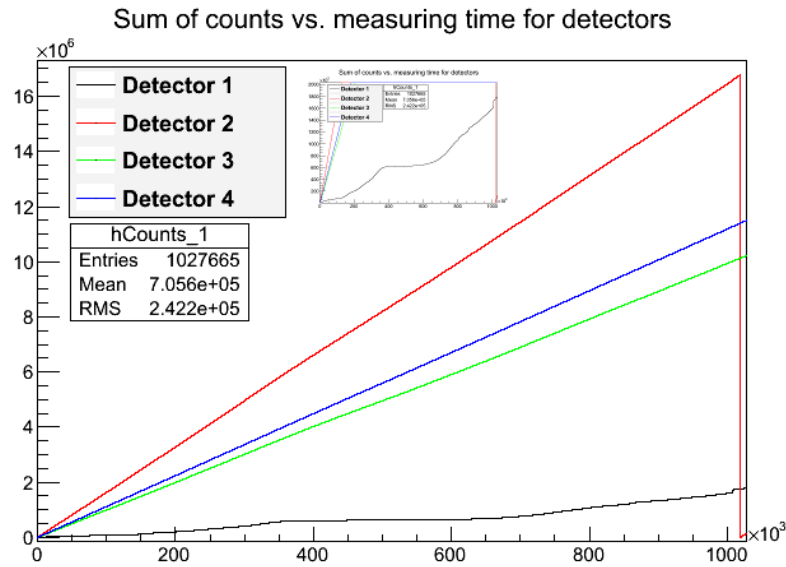
**Abbildung 4.21.:** Zählratenverlauf auf Kanal 4 bei Messung 16.

#### 4.4. Echtzeitmessung der Zählraten

Messung	E	D
16	1	5
16	2	1
16	3	3
16	4	4

**Tabelle 4.7.:** Konfiguration der Elektronik bei Messung 16.

Auf Kanal 1 sind für größere Zeiten Ausreißer zu erkennen, die ausgeblendet wurden und auf die später eingegangen wird. Bei allen vier Kanälen fällt auf, dass die Zählrate stark schwankt und nicht, wie zu erwarten, konstant ist. Es sind ähnliche Strukturen zu erkennen, die später genauer analysiert werden. Der negative Peak zum Ende der Messung auf Kanal 2 weist eine Zählrate von rund  $-16 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$  auf, wobei es sich nicht um einen, durch den  $\beta^-$ -Zerfall verursachten, Messwert handeln kann.<sup>8</sup> Vermutlich wurde in der vorhergehenden Schleife der größte speicherbare Wert überschritten, sodass die negative Zählrate zu Stande kommt. Dies wird durch die Entwicklung der Counts mit der Zeit bestätigt (s. Abb 4.22). Es ist zu erkennen, dass auf Kanal 2 die Kurve



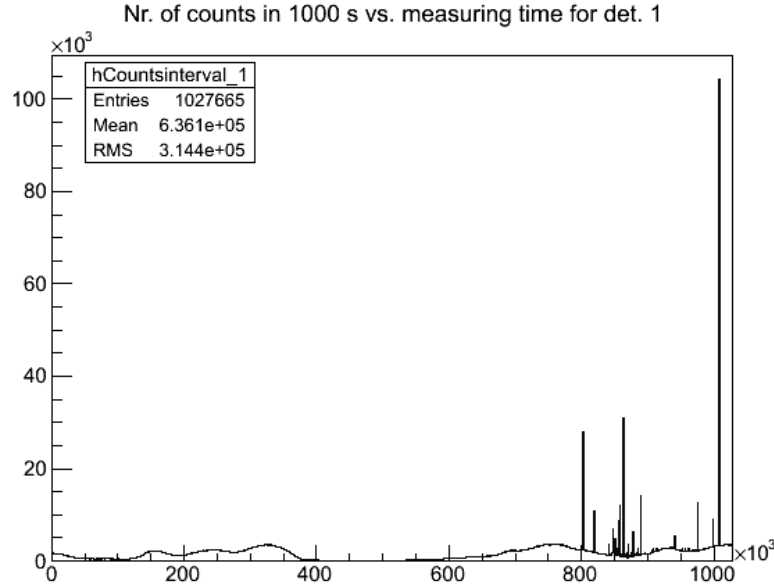
**Abbildung 4.22.:** Entwicklung der Counts bei Messung 16 (vergrößerter Verlauf für Kanal 1 im kleinen Fenster).

steil auf Null fällt und anschließend wieder normal ansteigt.

<sup>8</sup>Der genaue Wert beträgt  $-16,777193 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$  und ist etwas kleiner als  $-2^{24} \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$ .

#### 4. Messungen und Ergebnisse

Bei den auf Kanal 1 auftretenden Ausreißern handelt es sich um sehr hohe Peaks mit Zählraten zwischen  $10^3 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$  und  $10^5 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$  (s. Abb. 4.23). Sie zeigen



**Abbildung 4.23.:** Zählratenverlauf auf Kanal 1 mit Ausreißern.

in ihrem Auftreten kein Muster, zumal sie zu früheren Zeiten nicht zu beobachten sind. Die zugehörigen Messwerte können, wie am Anfang von Kap. 4.4 vorgeschlagen, aus dem Logfile gelöscht werden, wodurch sich Abb. B.2 ergibt.<sup>9</sup>

Betrachtet man die Zählratenverläufe genauer, erkennt man, dass die Schwankungen auf Kanal 1 am stärksten und auf Kanal 4 am schwächsten ausgeprägt sind. Ersteres ist auch im, für Kanal 1 vergrößerten, Ausschnitt des Countverlaufs zu erkennen (s. Abb. 4.22). Die Kurve weicht stark von einer Geraden ab, die bei einer konstanten Zählrate zu erwarten ist. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass die durchschnittliche Höhe der Zählrate deutlich geringer ausfällt als auf den anderen Kanälen.

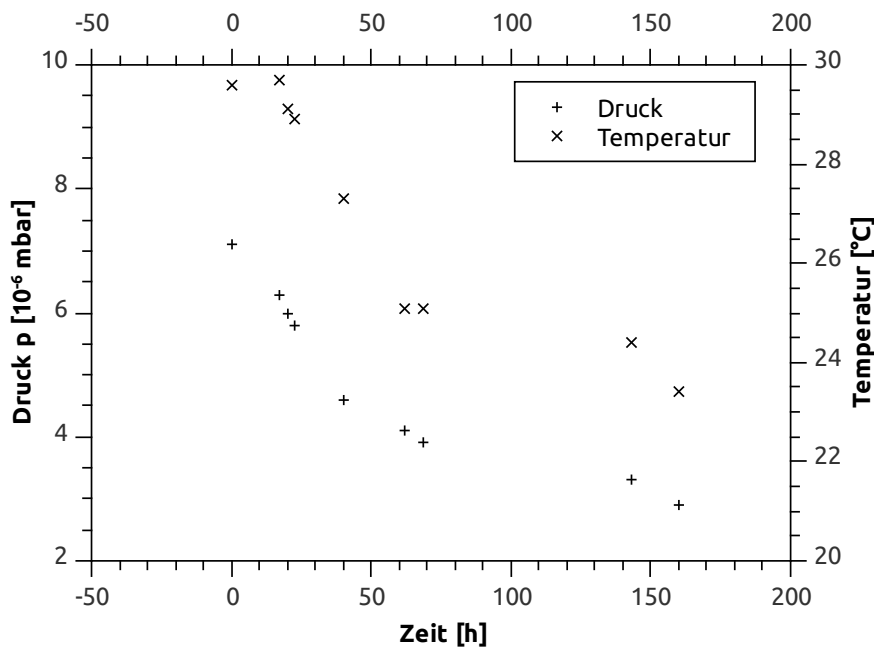
Es ist weiter zu erkennen, dass die Zählraten auf allen Kanälen ähnlich verlaufen, was auf eine gemeinsame Ursache hindeutet. Betrachtet man exemplarisch Kanal 1, erkennt man, dass die Zählrate zu Beginn der Messung fällt, bis sie ein relativ breites Minimum erreicht. Anschließend zeigt sich ein breiter Peak, auf dem sich als feinere Struktur drei Peaks befinden. Danach fällt die Zählrate

<sup>9</sup>Zur Analyse der Zählratenstruktur werden die unkorrigierten Plots betrachtet, auf denen die Strukturen ebenfalls zu erkennen sind.

wieder stark und bildet ein breites Minimum auf niedrigem Niveau aus. Bei größeren Zeiten zeigt sich wieder ein breiter und hoher Peak, auf dem ebenfalls eine feinere Struktur zu erkennen ist, die aber schwächer ausgeprägt ist.

Die Minima zwischen  $100 \cdot 10^3$  s und  $400 \cdot 10^3$  s haben einen gegenseitigen Abstand von etwa 27 h, wenn man davon ausgeht, dass die äußeren Minima an der Kante des breiten Peaks liegen. Die Verbreiterung der äußeren Minima könnte zum Beispiel aus der Überlagerung der kurzperiodischen durch eine langperiodische Änderung resultieren, wodurch die nächsten Maxima nicht auftreten. Es kann untersucht werden, ob der Verlauf durch eine physikalische Größe verursacht werden könnte, die eine 24 h-Periode durchläuft. Dafür kommen zum Beispiel die Lichtintensität oder die Temperatur in Frage, die außerhalb des Physikgebäudes beide vom Tag-Nacht-Rhythmus bestimmt werden. Dabei kann die Lichtintensität wahrscheinlich ausgeschlossen werden, da der Raum ab dem vierten Tag der Messung abgedunkelt war, die Schwankungen aber auch zu späteren Zeiten auftreten.

Um den Einfluss der Raumtemperatur zu untersuchen, wurde ab dem fünften Tag nach Messungsbeginn ihr Verlauf aufgenommen. Zusätzlich wurde der Druckverlauf in der Vakuumkammer gemessen, um Korrelationen mit den Schwankungen zu finden (s. Abb. 4.24). Es fällt auf, dass beide Größen lang-



**Abbildung 4.24.:** Druck- und Temperaturverlauf bei Messung 16.

#### 4. Messungen und Ergebnisse

sam mit der Zeit fallen, wobei die Steigung betragsmäßig kleiner wird. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da der Versuch zum Zeitpunkt der Messung schon einige Tage in Betrieb war. Der Druck ist dann dem optimalen Wert ziemlich nahe, der mit dem Aufbau und den Vakuumpumpen zu erreichen ist. Die Temperatur wird von der stark Wärme erzeugenden Vorpumpe bestimmt, die sich nach ein paar Tagen etwa im Gleichgewicht mit der Raumluft befindet. Es ist jedenfalls klar zu erkennen, dass Druck und Temperatur keine 24 h- bzw. 27 h-Periode durchlaufen, wodurch sie wahrscheinlich als Ursachen für die Zählratenschwankungen auszuschließen sind.

##### 4.4.3. Ergebnisse der Echtzeitdatenaufnahme in Messung 17

Ein Ergebnis von Messung 16 ist das Auftreten von Zählratenschwankungen auf allen Kanälen, deren Ursache kein bestimmter Detektor oder die Elektronikkomponente eines bestimmten Kanals ist. Daher wurde Detektor 5 wieder durch Detektor 2 ersetzt, der durch die Messungen 3 bis 6 als defekt identifiziert worden war.<sup>10</sup> Er wird in Messung 17 auf Kanal 2 betrieben und Detektor 1 wird auf Kanal 1 betrieben (s. Tab. 4.8). Des Weiteren wird unter-

Messung	E	D
17	1	1
17	2	2
17	3	3
17	4	4

**Tabelle 4.8.:** Konfiguration der Elektronik in Messung 17.

sucht, ob der Verlauf von Druck in der Vakuumkammer und Raumtemperatur kurz nach Inbetriebnahme einen größeren Einfluss haben als zu einem späteren Zeitpunkt, da sie sich am Anfang noch stärker ändern.

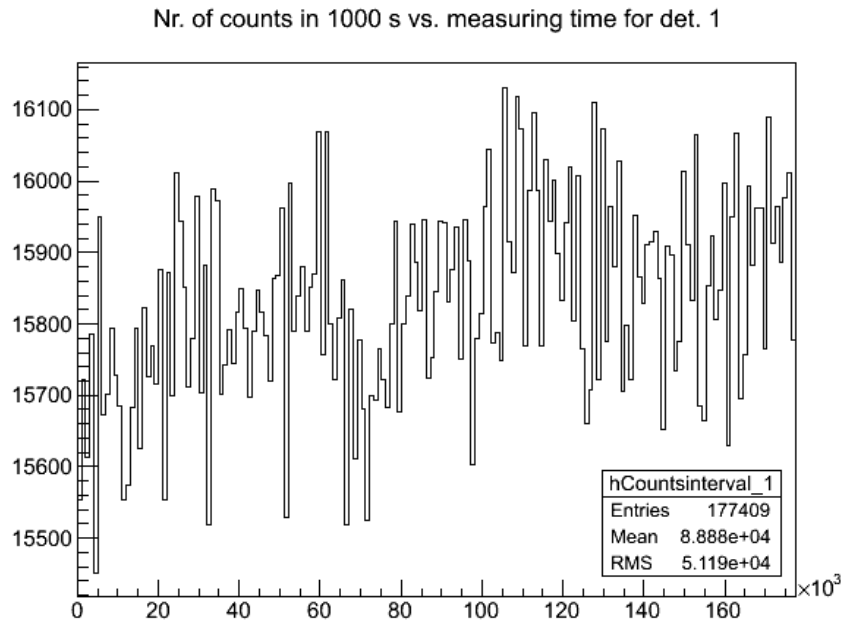
In den Abb. 4.25 bis 4.28 ist der Zählratenverlauf der einzelnen Kanäle dargestellt. Auf den Kanälen 1, 2 und 3 sind Minima und Maxima zu erkennen, die allerdings wesentlich schwächer ausgeprägt sind als bei Messung 16. Es ist weder eine 24 h- noch eine 27 h-Periode zu erkennen und die Kurven verlaufen nicht gleich. Analog zu Messung 16 zeigt Kanal 4 nach wie vor keine Ausprägung deutlicher Minima und Maxima.

Bei den beiden Ausreißern auf Kanal 2 liegt die Zählrate von etwa  $24.000 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$  um das zwei- bis dreifache höher als der Durchschnitt (s. Abb. 4.29). Diese Peaks drücken sich auch im Verlauf der Counts als kleine Sprünge bei  $t = 60.000\text{s}$  und  $t = 120.000\text{s}$  aus (s. Abb. 4.30). Diese Beobachtung bestätigt

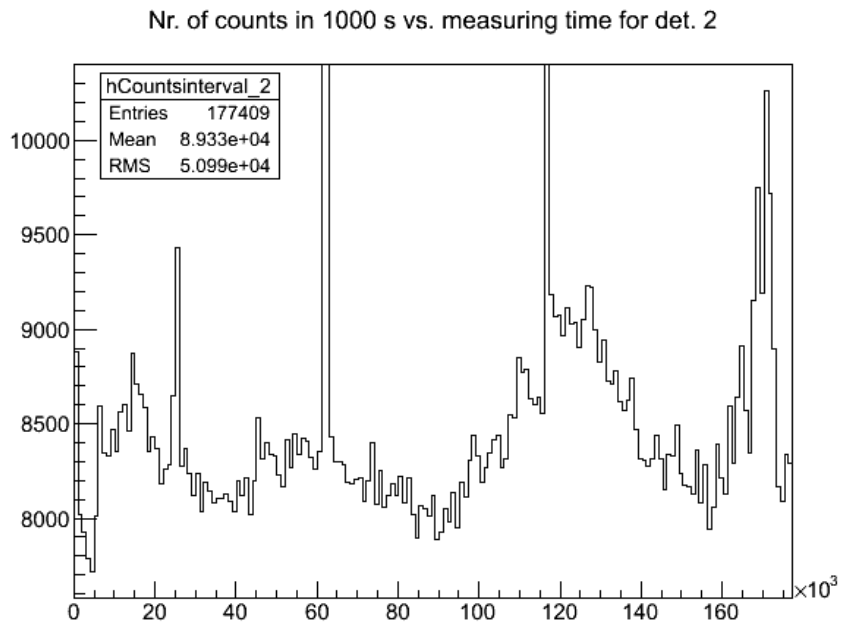
<sup>10</sup>Vgl. Kap. 4.2. Es wird vorerst kein weiterer Ersatzdetektor verwendet, da bei der Entwicklung des Versuchs die zuverlässigsten Detektoren mit der höchsten Nachweiswahr-



#### 4.4. Echtzeitmessung der Zählraten

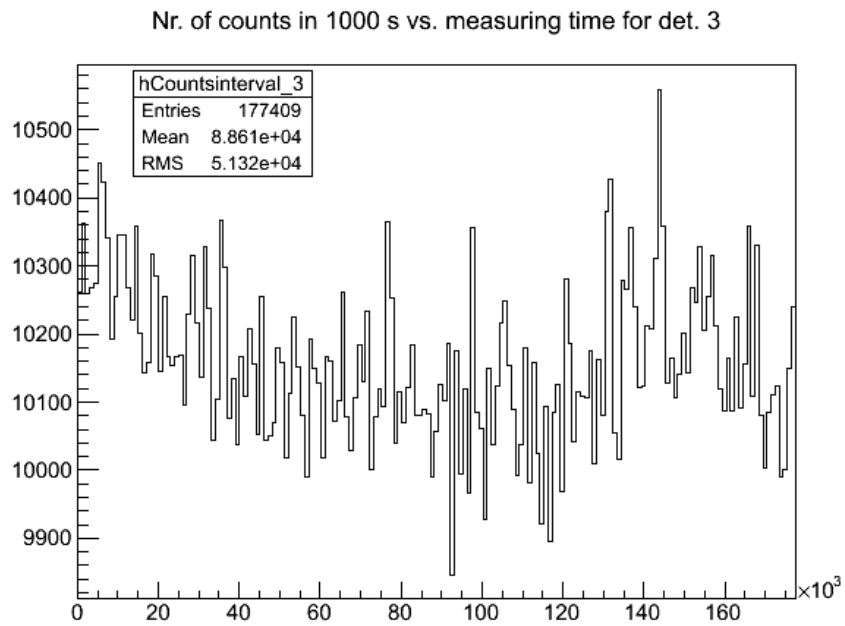


**Abbildung 4.25.:** Zählratenverlauf auf Kanal 1 bei Messung 17 (auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden aufgetragen).

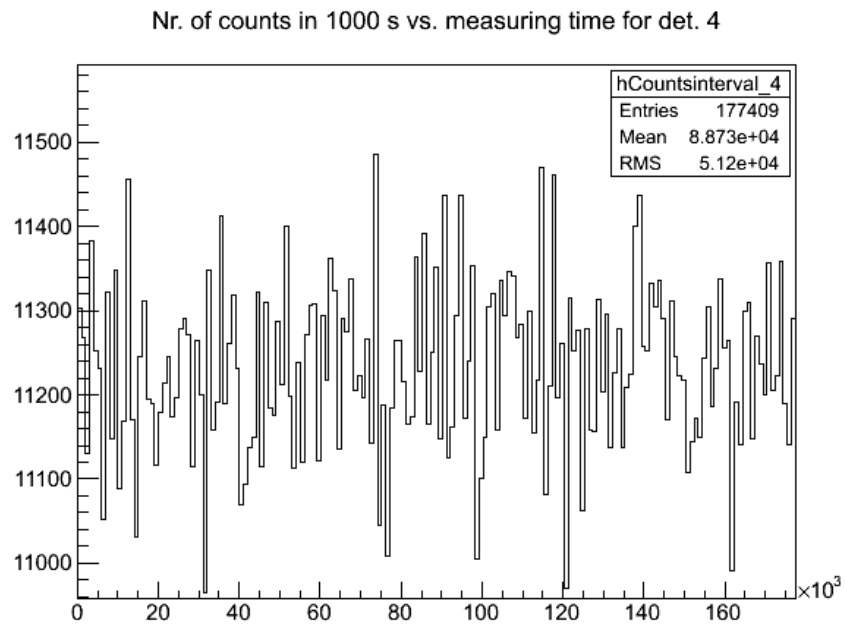


**Abbildung 4.26.:** Zählratenverlauf auf Kanal 2 bei Messung 17.

#### 4. Messungen und Ergebnisse



**Abbildung 4.27.:** Zählratenverlauf auf Kanal 3 bei Messung 17.



**Abbildung 4.28.:** Zählratenverlauf auf Kanal 4 bei Messung 17.

#### 4.4. Echtzeitmessung der Zählraten

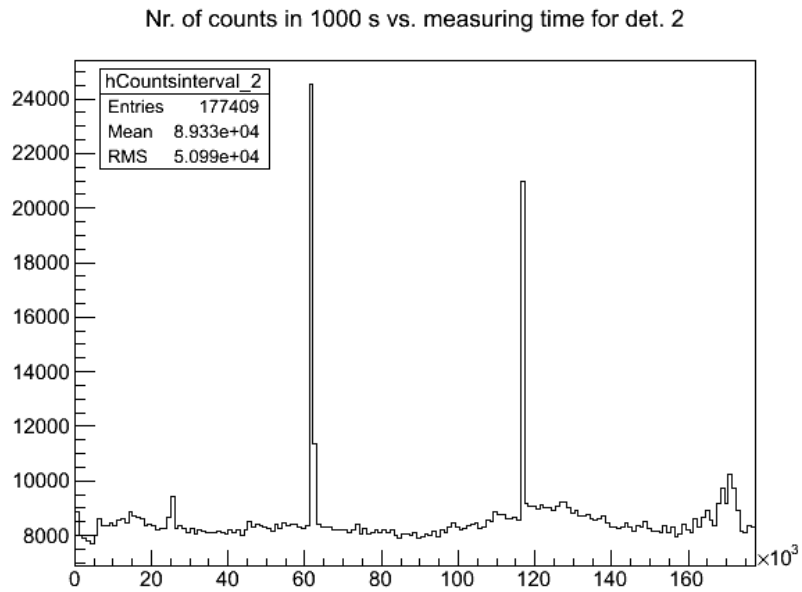


Abbildung 4.29.: Zählratenausreisser auf Kanal 2.

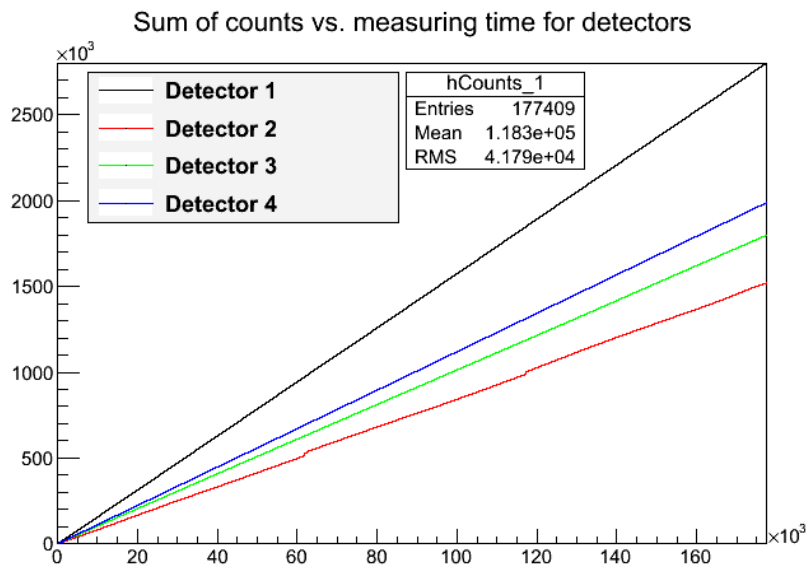


Abbildung 4.30.: Entwicklung der Counts bei Messung 17.

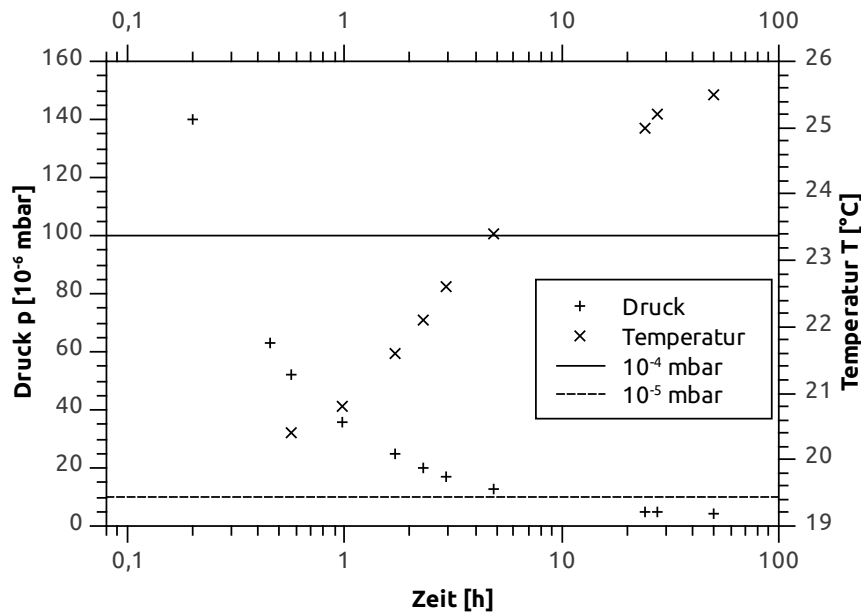
#### 4. Messungen und Ergebnisse

die Ergebnisse von Messung 3, bei der bei diesem Detektor ebenfalls Sprünge im Verlauf der Counts beobachtbar sind.<sup>11</sup> Man erkennt im Auftreten dieser Peaks kein Muster, welches auf eine Ursache hindeuten könnte. Wie in Messung 16 können die entsprechenden Messwerte aus dem Logfile gelöscht werden, wodurch man korrigierte Verläufe erhält (s. Abb. B.3).

Schaut man sich Kanal 2 noch einmal für kleinere Zählraten an (s. Abb. 4.26), erkennt man zwei weitere scharfe Peaks, deren zugehörige Messwerte man ebenfalls aus dem Logfile löschen kann. Weiterhin ist eine stärkere Ausprägung von Minima und Maxima erkennbar als auf den anderen Kanälen. Wenn man hier überhaupt von periodischem Verhalten sprechen kann, dann ist die Periodendauer deutlich kleiner als 27 h. Die in Messung 16 bestimmte Periodendauer bestätigt sich nicht.

Im Verlauf der Counts (s. Abb. 4.30) zeigen sich bis auf die, von den Peaks verursachten, kleinen Stufen auf Kanal 2 keine weiteren Auffälligkeiten.

Der Verlauf des Drucks in der Vakuumkammer und der Raumtemperatur ist in Abb. 4.31 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich beide Größen zu Beginn



**Abbildung 4.31.:** Druck- und Temperaturverlauf bei Messung 17.

am stärksten ändern - der Druck fällt und die Temperatur steigt - und dass

scheinlichkeit verwendet wurden [Hei11].

<sup>11</sup>Vgl. Kap. 4.2.

die Änderung im weiteren Verlauf abnimmt. Der Druck ist ab  $t = 50$  h nahezu konstant und liegt im Bereich  $10^{-6}$  mbar und die Temperatur liegt nach 50 h zwischen  $25^\circ\text{C}$  und  $26^\circ\text{C}$ . Auch hier wird der Temperaturverlauf wahrscheinlich durch die Vorpumpe bestimmt, die den Raum solange aufheizt, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Das heißt, es treten keine starken Schwankungen im Druck- und Temperaturverlauf auf, die den in Messung 16 festgestellten 27 h-Rhythmus der Zählrate erklären könnten.

#### 4.4.4. Ergebnisse der Echtzeitdatenaufnahme in Messung 18

Die Ergebnisse der Messungen 16 und 17 widersprechen sich dahingehend, dass bei der ersten Messung eine 27 h-Periode im Wechsel der Zählratenminima und -maxima festgestellt werden konnte, die durch die zweite Messung nicht bestätigt werden konnte. Obwohl die Ursache für eine mögliche Periodizität nicht bekannt ist, könnte eine periodische Struktur Hinweise auf die Ursachen geben. Daher soll in einer weiteren Langzeitmessung geklärt werden, ob die Zählratenschwankungen tatsächlich periodisch auftreten.

Der Verlauf der Zählraten in Messung 18 ist in den Abb. 4.32 bis 4.35 zu sehen.

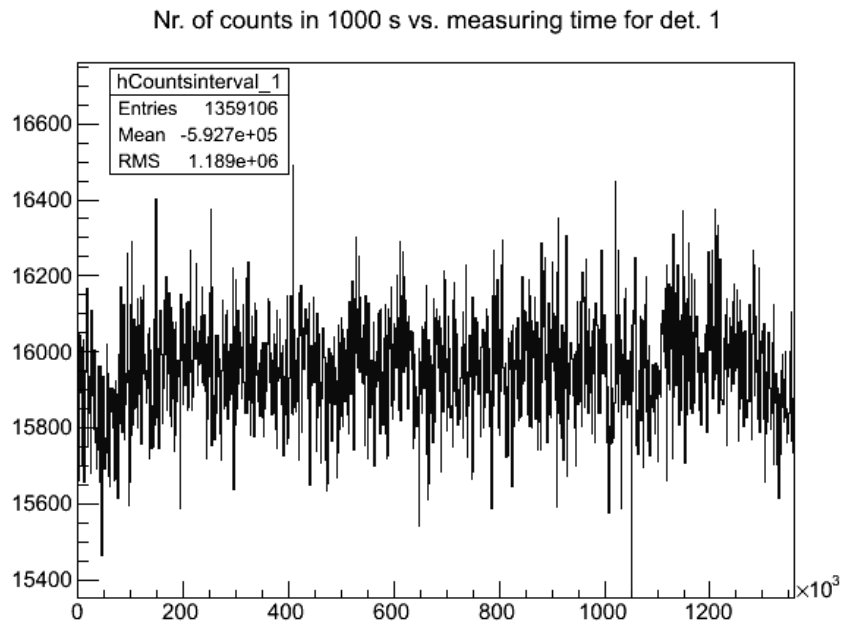
Auf Kanal 1 bei  $t \approx 1.050 \cdot 10^3$  s und auf Kanal 2 bei  $t \approx 1.250 \cdot 10^3$  s treten wie in Messung 16 negative Zählraten auf, da dort die maximal speicherbare Zahl der Counts überschritten wird. Auf Kanal 3 gibt es bei  $t \approx 1,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$  ebenfalls einen Ausreißer nach unten, da der entsprechende Einkanaldiskriminator für kurze Zeit nicht mit dem USB-Zähler verbunden war.

Auf Kanal 1 und 4 ist eine periodische Struktur schwach bzw. kaum erkennbar. Diese ist auf Kanal 3 deutlicher ausgeprägt und es ist wie in Messung 16 eine Feinstruktur zu erkennen. Das heißt, auf den Flanken der Maxima befinden sich schwach ausgeprägte Minima. Auf Kanal 2 finden sich wie in Messung 17 starke Ausreißer, die aber deutlich höhere Zählraten im Bereich  $10^5 \cdot \frac{1}{1000\text{s}}$  aufweisen (s. Abb. 4.36). Betrachtet man die Peaks genauer (s. Abb. 4.37) erkennt man, dass sie eine Breite von etwa einer Stunde haben. Diese Breite könnte für die Versuchsdurchführung im Praktikum kritisch sein, da dort üblicherweise Messzeiten von acht Stunden vorkommen [Hei11].

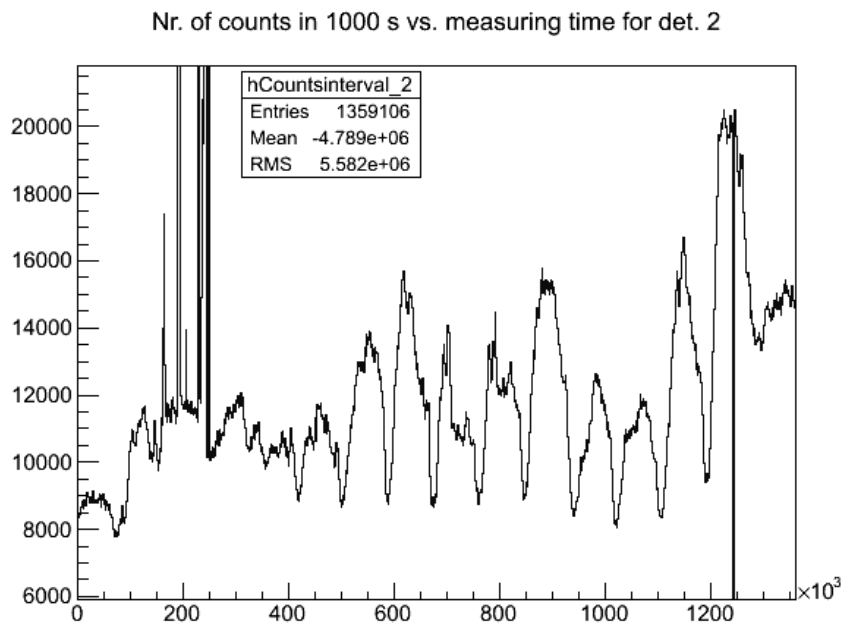
Auf Kanal 2 ist eine stark ausgeprägte Struktur erkennbar (s. Abb. 4.33). Man erkennt besonders gut im Bereich zwischen  $t \approx 4 \cdot 10^5$  s und  $t \approx 1,2 \cdot 10^6$  s die periodische Abfolge von Minima, die auch in Messung 16 auftritt. Für die zehn Minima im oben genannten Bereich berechnet sich eine mittlere Periode zu 24 h bis 25 h, die geringer als in Messung 16 ausfällt. Es handelt sich allerdings um einen weiteren Hinweis auf eine Ursache mit einer 24 h-Periode. Auf Grund der starken Schwankungen könnten sich solche Zählratenverläufe als ungeeignet für den Nachweis der Paritätsverletzung erweisen.<sup>12</sup>

<sup>12</sup>Diese Fragestellung wird genauer in Kap. 4.4.5 untersucht.

#### 4. Messungen und Ergebnisse

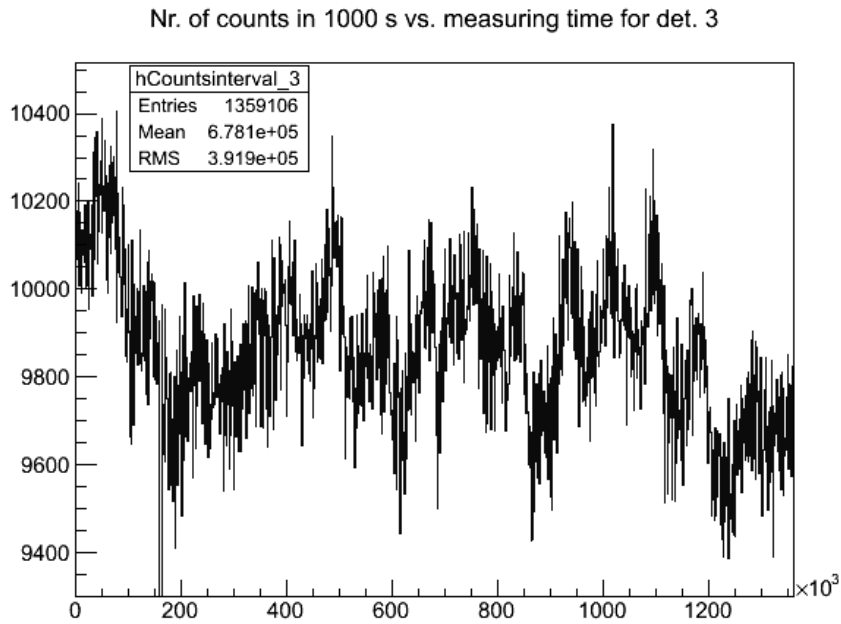


**Abbildung 4.32.:** Zählratenverlauf auf Kanal 1 bei Messung 18 (auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden aufgetragen).

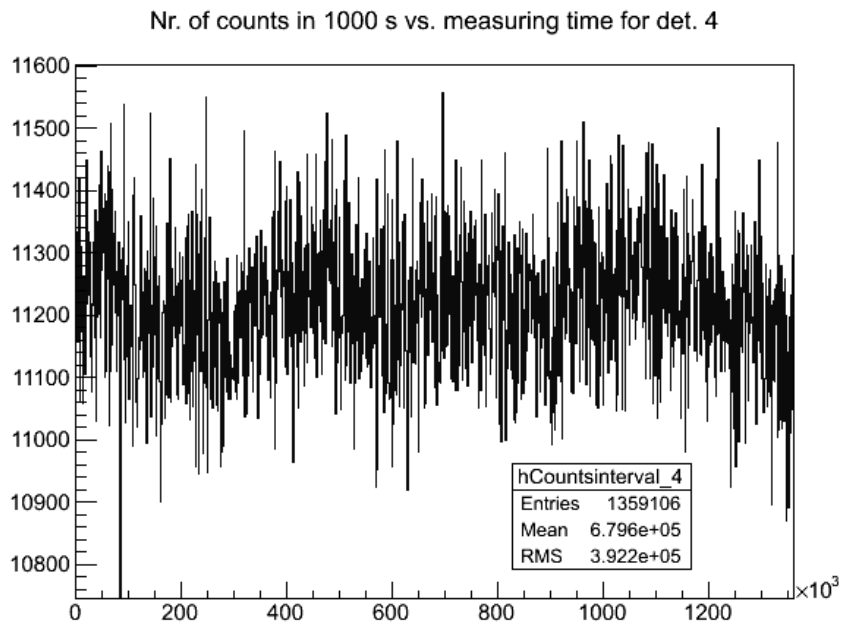


**Abbildung 4.33.:** Zählratenverlauf auf Kanal 2 bei Messung 18.

#### 4.4. Echtzeitmessung der Zählraten

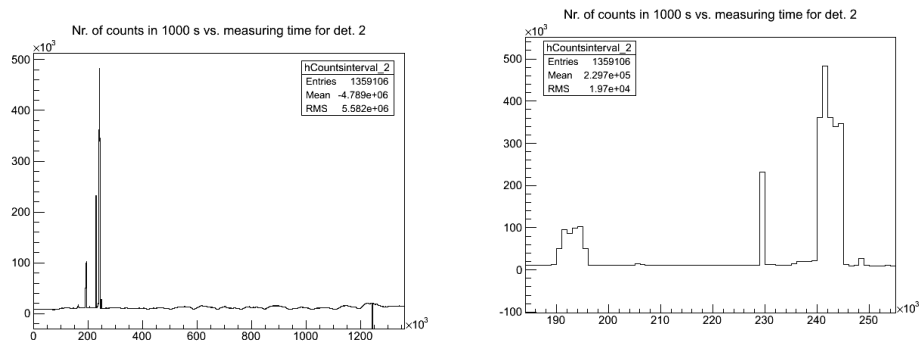


**Abbildung 4.34.:** Zählratenverlauf auf Kanal 3 bei Messung 18.



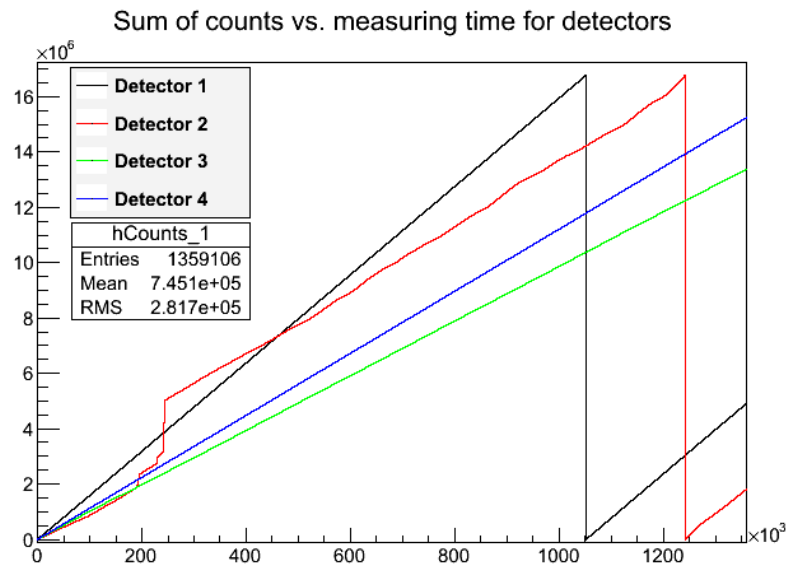
**Abbildung 4.35.:** Zählratenverlauf auf Kanal 4 bei Messung 18.

#### 4. Messungen und Ergebnisse



**Abbildung 4.36.:** Ausreißer auf Kanal 2. **Abbildung 4.37.:** Vergrößerte Ansicht der Peaks auf Kanal 2.

Der Verlauf der Counts (s. Abb. 4.38) bestätigt die Ergebnisse, die aus den Zählraten gewonnen wurden. Die senkrechten Flanken auf Kanal 1 und 2 bei



**Abbildung 4.38.:** Verlauf der Counts bei Messung 18.

etwa  $1,2 \cdot 10^6$  s rühren von der Überschreitung der maximalen Zahl an Counts her. Auf Kanal 2 erkennt man weitere steile Flanken, die von den Peaks in der Zählrate bei etwa  $2 \cdot 10^5$  s verursacht werden. Außerdem drücken sich die starken Zählratenschwankungen in der Welligkeit der Kurve aus. Wie in den Messungen 16 und 17 können die entsprechenden Messwerte aus dem Logfile gelöscht werden, wodurch man korrigierte Verläufe erhält (s. Abb. B.4).



#### 4.4.5. Bewertung der Zählratenschwankungen

In den Messungen 16 bis 18 wurde festgestellt, dass die Zählraten mit der Zeit schwanken. Um grob abzuschätzen, ob die Schwankungen kritisch sind bzgl. des Nachweises der Paritätsverletzung, können die minimalen und maximalen Zählraten betrachtet werden, die das Auswertungsprogramm ausgibt, und der relative Anstieg  $\Delta_{rel}$  zwischen ihnen berechnet werden (s. Tab. 4.9). Der Anstieg kann mit den in [Büs07] berechneten Asymmetrien verglichen werden. Damit die, in den Messungen 16 bis 18 festgestellten, starken Ausreißer keinen Einfluss auf die Abschätzung haben, wurden die entsprechenden Zeilen aus den Logfiles gelöscht. Zur Berechnung der Änderungen wurden die Daten

Messung	Ch	D	$\dot{N}_{min} [\frac{1}{8h}]$	$\dot{N}_{max} [\frac{1}{8h}]$	$\Delta_{rel}$	$\Delta'_{rel}$
16	1	5	2551	101012	3860%	3680%
	2	1	462130	500315	8%	8%
	3	3	267982	301102	12%	12%
	4	4	322672	330290	2%	2%
17	1	1	501061	503707	1%	
	2	2	196881	199819	1%	
	3	3	321688	324696	1%	
	4	4	356919	357642	0%	
18	1	1	461464	467997	1%	1%
	2	2	239069	543845	127%	117%
	3	3	278961	297542	7%	6%
	4	4	324640	329028	1%	1%

**Tabelle 4.9.:** Zählratenschwankungen der Messungen 16 bis 18.  $\Delta_{rel}$  ist der relative Anstieg von  $\dot{N}_{min}$  auf  $\dot{N}_{max}$ .  $\Delta'_{rel}$  ist der relative Anstieg, wenn beim Binnensummen die Counts über 13,7 h summiert werden. Bei Messung 17 kann  $\Delta'_{rel}$  nicht berechnet werden, da die Messzeit zu kurz ist. Ch: Kanal (engl. Channel).

so gebinnt, dass die Counts über 8 h-Intervalle summiert wurden, da es sich dabei um eine übliche Messzeit im Praktikum handelt [Hei11]. Zusätzlich wurde über Intervalle von 13,7 h summiert, da die Asymmetrie aus Abb. 4.39 aus einer 13,7 h dauernden Messung ermittelt wurde.<sup>13</sup>

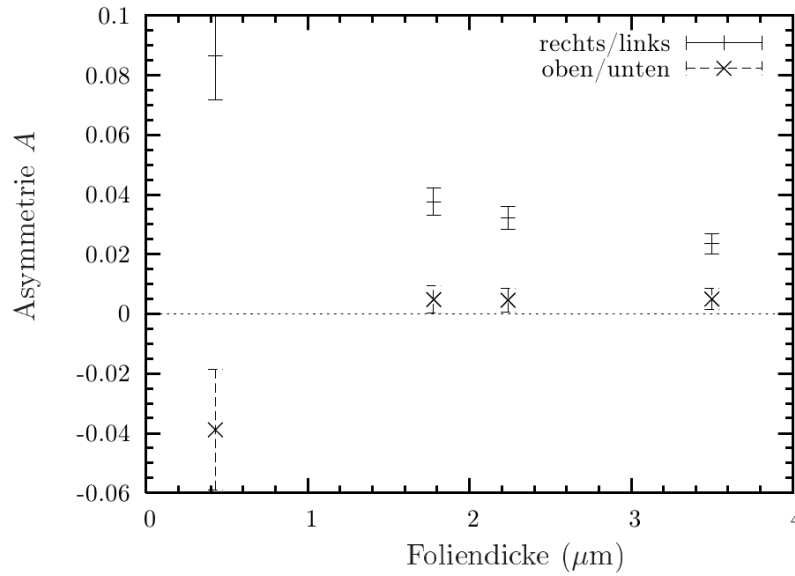
Betrachtet man die relativen Änderungen  $\Delta_{rel}$  und  $\Delta'_{rel}$ , deren Unterschied vernachlässigbar sind, erkennt man zwei sehr hohe Werte im drei- bzw. vierstelligen Bereich. Bei dem vierstelligen Wert kann ein Zusammenhang zum verwendeten Detektor 5 hergestellt werden, bei dem es sich um den, in Mes-

<sup>13</sup>S. auch die Abb. B.5 bis B.9. Bei Messung 17 war die Messzeit zu kurz, um über ein 13,7 h-Intervall zu summieren.

#### 4. Messungen und Ergebnisse

sung 7 erstmals verwendeten, Ersatzdetektor handelt<sup>14</sup>. Der dreistellige Wert aus Messung 18 kann Detektor 2 zugeordnet werden, bei dem schon in den Messungen 3 bis 6 ein Sprung im Countverlauf festgestellt wurde. Für Detektor 3 bewegt sich die Schwankung im hohen einstelligen bis niedrigen zweistelligen Bereich. Ähnlich sieht es bei Detektor 1 aus, bei dem die Änderung in Messung 16 8 % beträgt. Einzig Detektor 4 zeigt in allen drei Messungen Zählratenschwankungen im niedrigen einstelligen Bereich.

Um die Schwankungen grob bewerten zu können, bietet sich ein Vergleich mit den in [Büs07] gemessenen Asymmetrien an (s. Abb. 4.39). Die Asymmetrie



**Abbildung 4.39.:** Zählratenasymmetrie in Rechts-Links- bzw. Oben-Unten-Richtung gegen die Goldfoliendicke (Abb. 5.5 in [Büs07]).

liegt für eine Foliendicke von 3.5 μm zwischen 2 % und 3 % und ist damit teilweise sogar kleiner als der Anstieg der Zählraten. Für kleinere Foliendicken steigt die Asymmetrie auf etwa 9 % für die 0.43 μm-Goldschicht an und bleibt in derselben Größenordnung wie die Schwankungen. Es ist zu erkennen, dass die Detektoren 2 und 5 für den Nachweis der Paritätsverletzung ungeeignet sind und dass bei den Detektoren 1 und 3 die Schwankungen kritisch sein könnten. Einzig bei Detektor 4 liegen die Schwankungen in einem wahrscheinlich unkritischen Bereich.

<sup>14</sup>Bei der Entwicklung des Versuchs wurden aus verschiedenen Detektoren die vier zuverlässigsten mit der höchsten Nachweiswahrscheinlichkeit ausgewählt, sodass die starke relative Änderung durch den Detektor verursacht werden könnte und nicht durch eine Komponente der Elektronik.

## 5. Zusammenfassung

Im Jahr 2007 wurde von Katharina Büscher im Institut für Kernphysik der WWU Münster der Praktikumsversuch zum Nachweis der Paritätsverletzung im  $\beta^-$ -Zerfall entwickelt, der den Studenten den Nachweis der Paritätsverletzung experimentell zugänglich machen soll. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Optimierung des Versuchs. Dabei ist ein Aspekt die Güte des Vakuums, bei dem im Jahr 2011 nur noch ein Druck erreicht wurde, der mit  $10^{-4}$  mbar zwei Größenordnungen über dem empfohlenen Wert liegt [Ort]. Durch den Einsatz einer neuen Vorpumpe wird nun in weniger als einer halben Stunde der Bereich von  $10^{-5}$  mbar erreicht und in etwa 20 h der Bereich von  $10^{-6}$  mbar.

Des Weiteren wurden im Jahr 2011 auf einem von vier Kanälen signifikant mehr Counts gemessen als auf den anderen Kanälen [Hei11]. Dieses Verhalten wurde nicht nur bei Detektor 2 als einem der ursprünglichen Detektoren beobachtet, sondern auch bei dem Ersatzdetektor 5. Um die Ursache dafür herauszufinden, wurde eine neue Art der Datenaufnahme realisiert mit Hilfe des USB-Zählers Redlab 4301. Mit diesem kann die Echtzeitentwicklung der Zählraten auf allen vier Kanälen sichtbar gemacht werden. Dadurch wurde herausgefunden, dass die höhere Zahl von Counts auf einem Kanal durch eine temporär deutlich höhere Zählrate verursacht wird und das dieses Verhalten dem ursprünglichen und dem Ersatzdetektor zugeordnet werden kann. Durch die Echtzeitdatenaufnahme steht jetzt ein Logfile zur Verfügung, aus dem für solche Zeiträume die Messwerte aller Kanäle gelöscht werden können. Das verursacht zwar eine kürzere Messzeit, aber macht die Messungen auswertbar.

Eine weitere Erkenntnis aus der Echtzeitdatenaufnahme betrifft ebenfalls den Verlauf der Zählraten. Man beobachtet bei allen Detektoren ein Schwanken der Raten, das für die Detektoren 1, 2 und 3 teilweise größer als die in [Büs07] gemessenen Asymmetrien ist. Daher besteht der Verdacht, dass die Detektoren für den Nachweis der Paritätsverletzung ungeeignet sind. Die stärkste Ausprägung der Zählratenschwankungen zeigt sich bei den Detektoren 2 und 5, bei denen auch die hohen Zählratenpeaks gemessen wurden. Bei diesen Detektoren tritt für bestimmte Zeiträume eine Periode in den Schwankungen von 24 h bis 25 h auf, was auf eine periodisch auftretende Ursache hindeutet. Die naheliegenden Größen Druck, Temperatur und Lichtintensität konnten als Ursache ausgeschlossen werden.

In nachfolgenden Untersuchungen kann versucht werden, den Grund für die Schwankungen herauszufinden. Es wäre möglich, dass die Schwankungen nicht

## 5. Zusammenfassung

durch die Detektoren verursacht werden, sondern dass die Energieschwellen der Einkanaldiskriminatoren schwanken und so veränderliche Zählraten erzeugen. Um zu bewerten, ob der Versuchsaufbau zum Nachweis der Paritätsverletzung geeignet ist, muss geklärt werden, welchen Einfluss die Zählratenschwankungen auf die Bestimmung der Rechts-Links-Asymmetrie der Raten haben.

## A. Konfiguration der Elektronikkomponenten

Messung	E	K <sub>pa</sub>	D
1	1	1	2
1	3	2	3
1	4	4	4
3	1	1	1
3	2	2	2
3	3	3	3
3	4	4	4
4	1	3	2
5	1	4	2
6	3	3	2
6	4	4	4
7	1	2	5
7	3	3	3
7	4	4	4
8	3	1.1	5
8	1	2	3
8	4	4	4
9	1	2	5
9	3	3	3
9	4	4	4

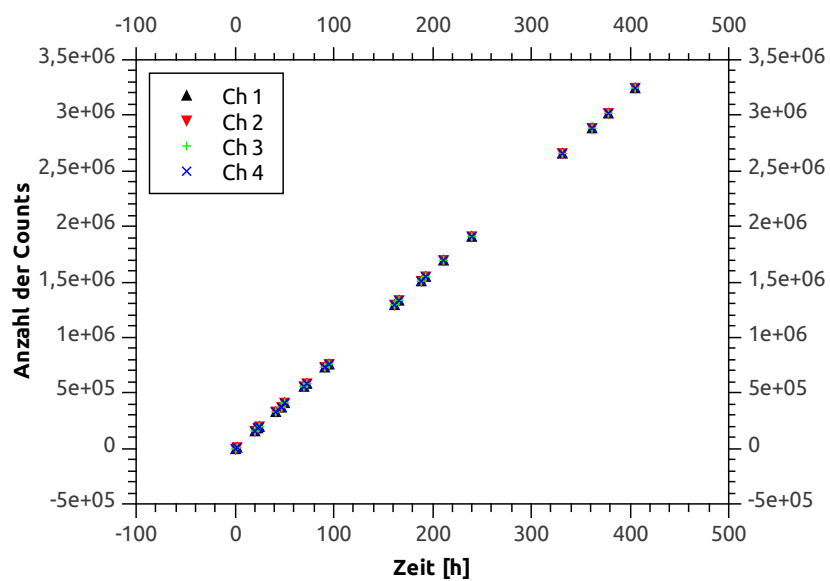
**Tabelle A.1.:** Konfigurationen der Elektronik für die Messungen 1 bis 9 zusammengefasst. In Messung 2 wurde nur der Druckverlauf gemessen.

## A. Konfiguration der Elektronikkomponenten

Messung	D	PA	MA	DCU	SCA	K <sub>dcu</sub>	K <sub>ma/pa</sub>	K <sub>ma/sca</sub>	K <sub>sca/c</sub>
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2	3	2	3	2	3	2	2	2
12	3	2	3	2	3	2	3	3	3
12	4	4	4	4	4	4	4	4	4
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	2	2	4	2	2	2	2	2	2
13	3	3	3	3	3	3	3	3	3
13	4	4	2	4	4	4	4	4	4
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	2	2	2	2	4	2	2	4	2
14	3	3	3	3	3	3	3	3	3
14	4	4	4	4	2	4	4	2	4
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	2	2	2	2	4	2	4	4	2
15	3	3	3	3	3	3	3	3	3
15	4	4	4	4	2	4	2	2	4

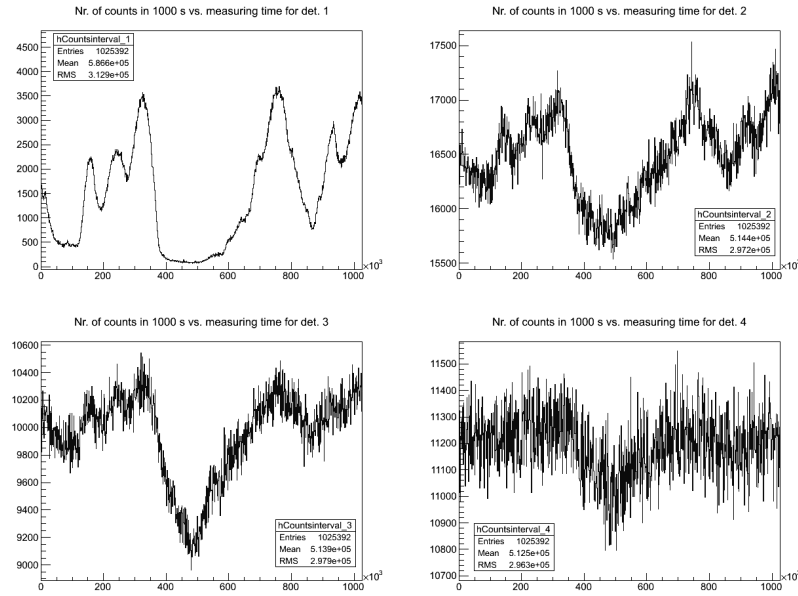
**Tabelle A.2.:** Konfiguration der Elektronik bei den Messungen 12 bis 15. Verwendete Abkürzungen: D: Detektor, PA: Pre Amplifier, MA: Main Amplifier, DCU: Detector Control Unit (versorgt die Detektoren mit Spannung), SCA: Single Channel Analyzer (Ein-Kanal-Diskriminator), K<sub>dcu</sub>: Kabel zwischen DCU und PA, K<sub>ma/pa</sub>: Kabel zwischen MA und PA, K<sub>ma/sca</sub>: Kabel zwischen MA und SCA, K<sub>sca/c</sub>: Kabel zwischen SCA und Counter.

## B. Countverlauf in Messung 10 und Zählratenverläufe der Echtzeitmessungen

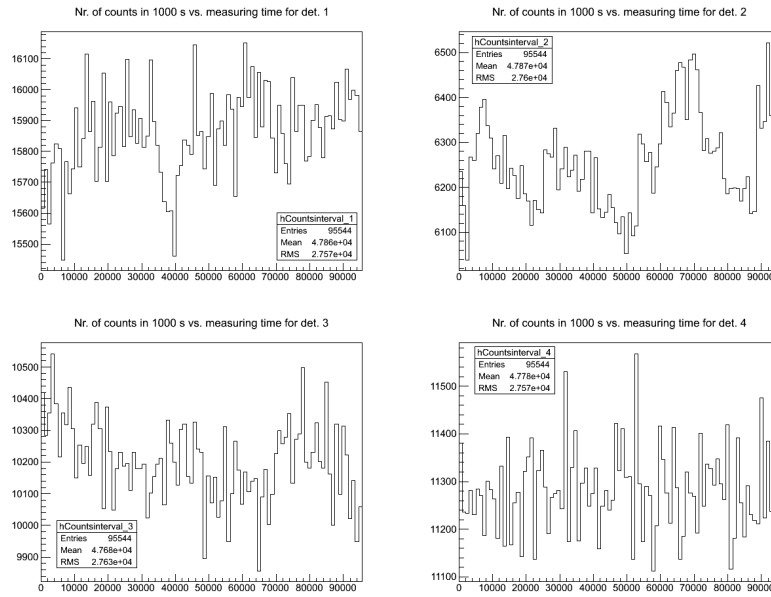


**Abbildung B.1.:** Countverlauf in Messung 9, bei der der Vierfachzähler am Praktikumsversuch „Neutronendiffusion“ betrieben wurde.

## B. Countverlauf in Messung 10 und Zählratenverläufe der Echtzeitmessungen

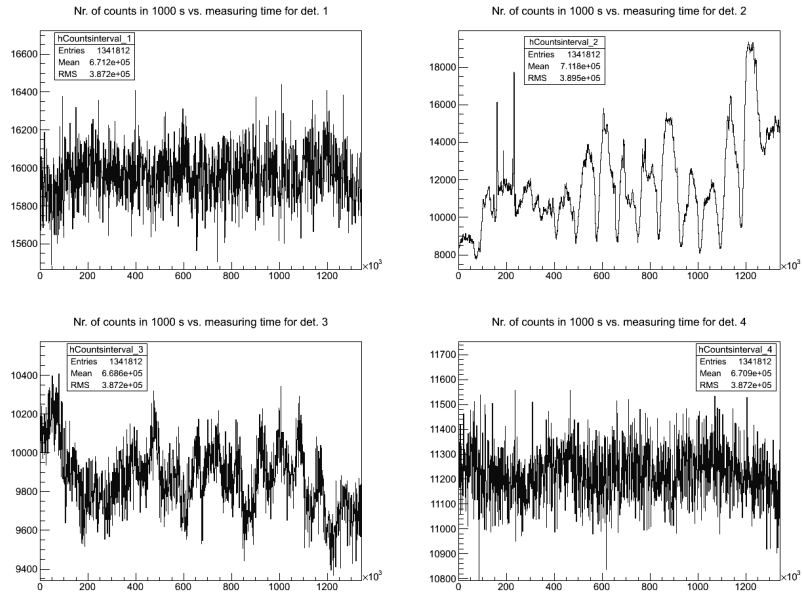


**Abbildung B.2.:** Zählratenverlauf in Messung 16. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von 1000 s summiert wurden.

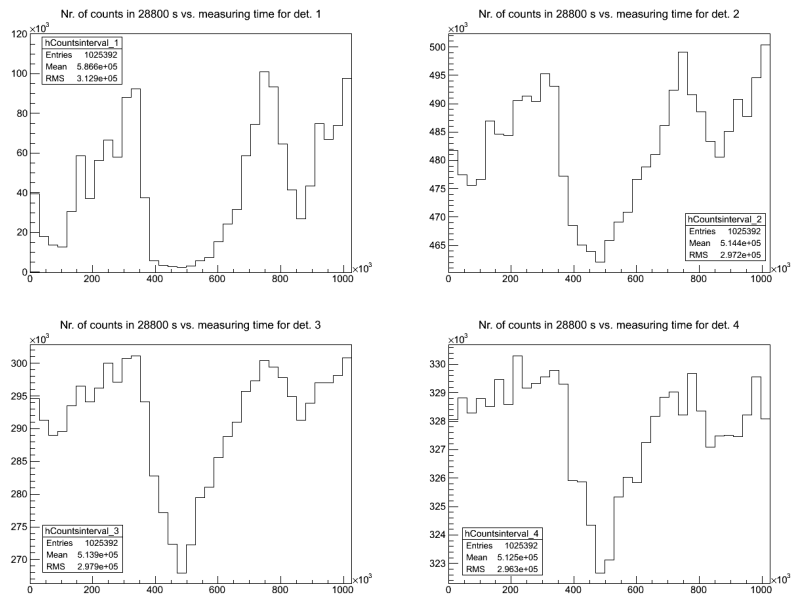


**Abbildung B.3.:** Zählratenverlauf in Messung 17. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von 1000 s summiert wurden.



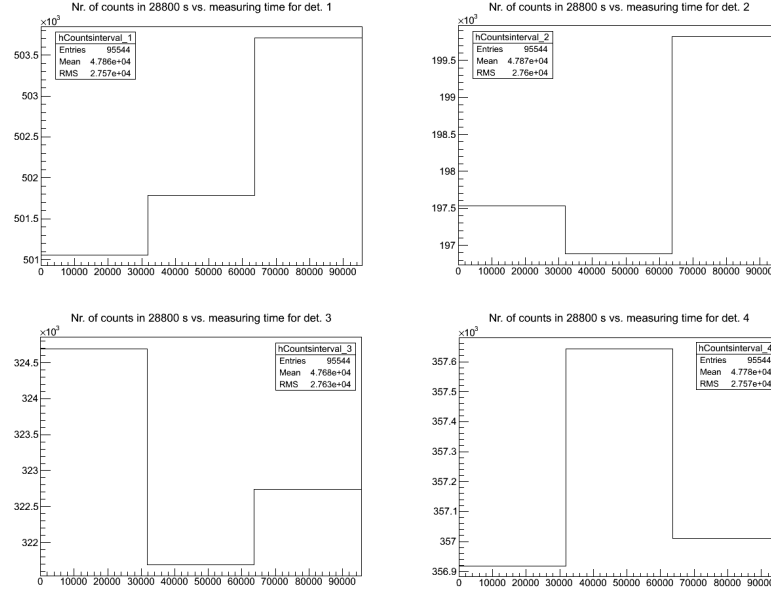


**Abbildung B.4.:** Zählratenverlauf in Messung 18. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von 1000 s summiert wurden.

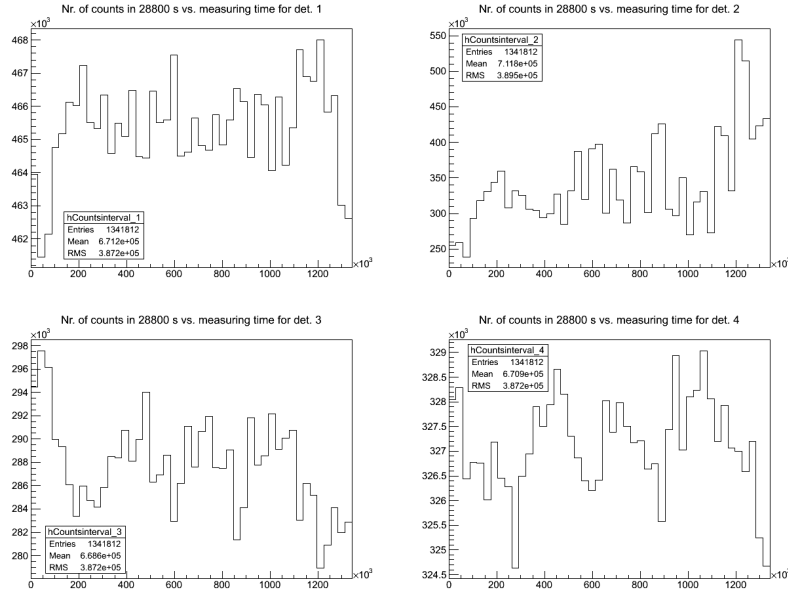


**Abbildung B.5.:** Zählratenverlauf in Messung 16. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von acht Stunden summiert wurden.

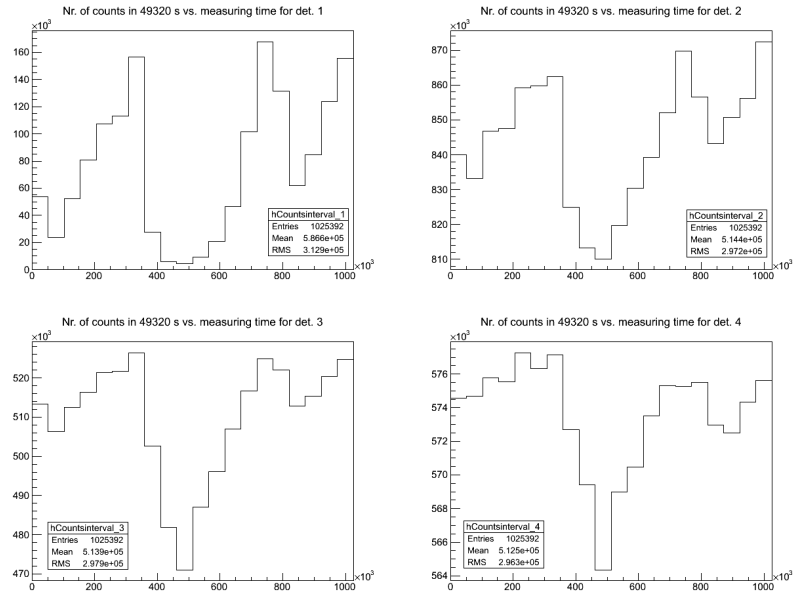
## B. Countverlauf in Messung 10 und Zählratenverläufe der Echtzeitmessungen



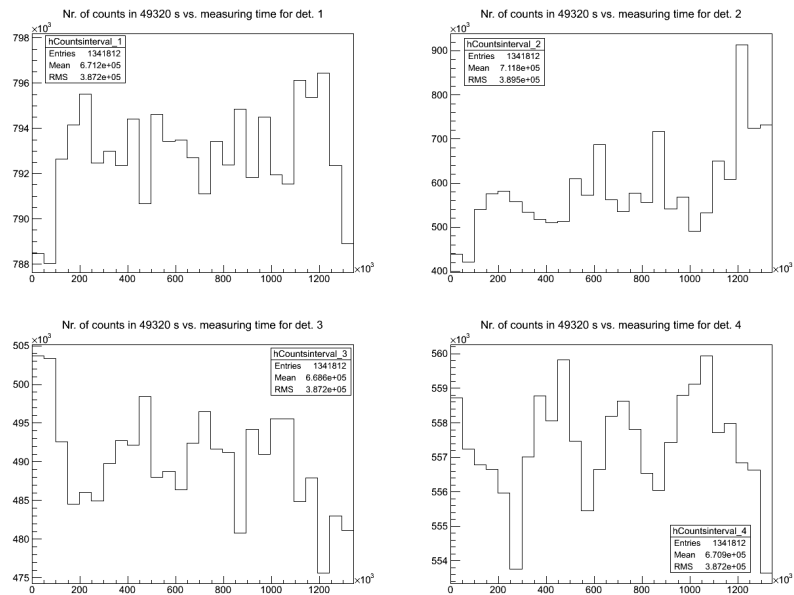
**Abbildung B.6.:** Zählratenverlauf in Messung 17. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von acht Stunden summiert wurden.



**Abbildung B.7.:** Zählratenverlauf in Messung 18. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von acht Stunden summiert wurden.



**Abbildung B.8.:** Zählratenverlauf in Messung 16. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von 13,7 h summiert wurden.



**Abbildung B.9.:** Zählratenverlauf in Messung 18. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über Intervalle von 13,7 h summiert wurden.



## C. Ergänzung zur Abgabeverision

### C.1. Messung 23

- Durchführung: 23.02.
- Signal eines Pulsengenerators auf die Eingänge der Einkanaldiskriminatoren

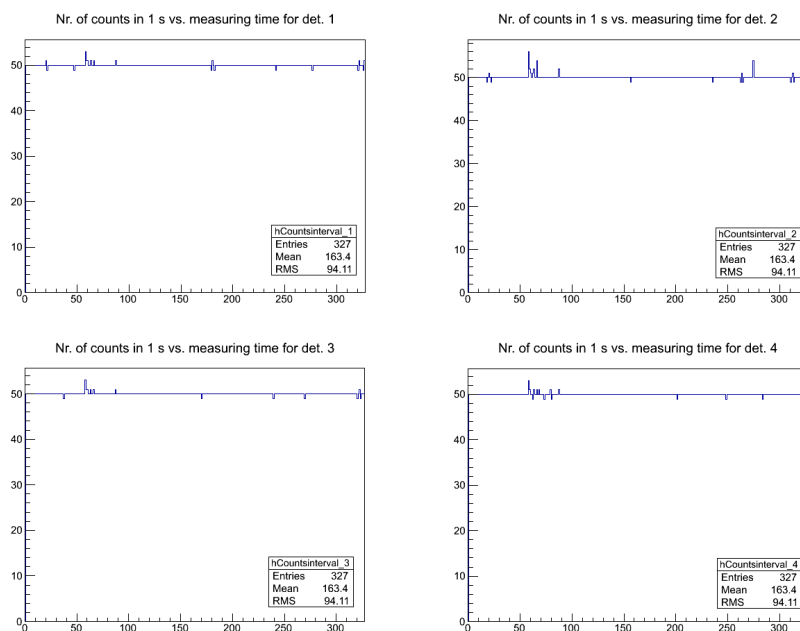


Abbildung C.1.: Zählratenverlauf in Messung 23.

### C.2. Messung 29

- Beginn: 14.06., 18:57. Ende: 29.06., 10:53.
- Messung ohne radioaktive Quelle

### C. Ergänzung zur Abgabeversion

- 22.06., 14:14: Betriebsspannung von Detektor 1 von 650 V auf 500 V reduziert, da der Sperrstrom so hoch war, dass er nicht mehr angezeigt werden konnte.

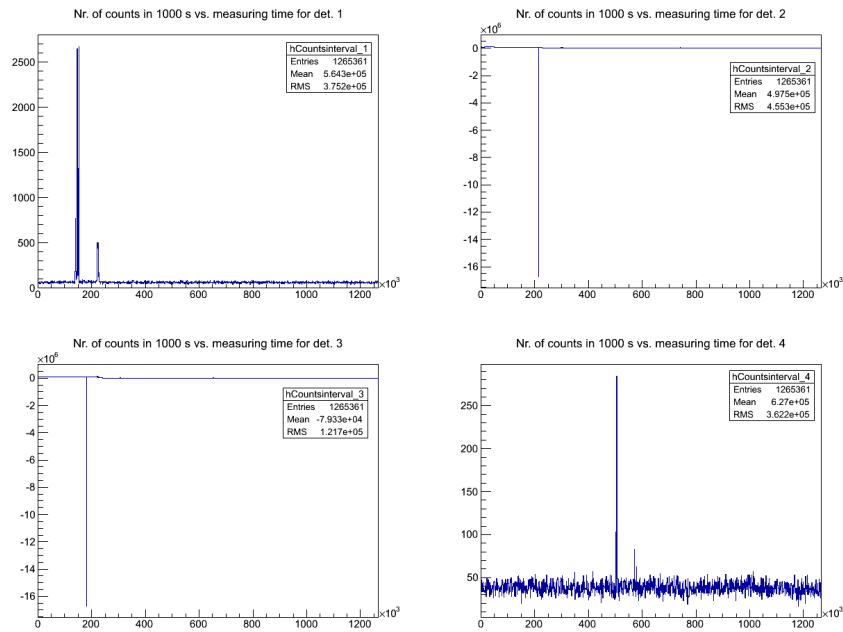


Abbildung C.2.: Zählratenverlauf in Messung 29.

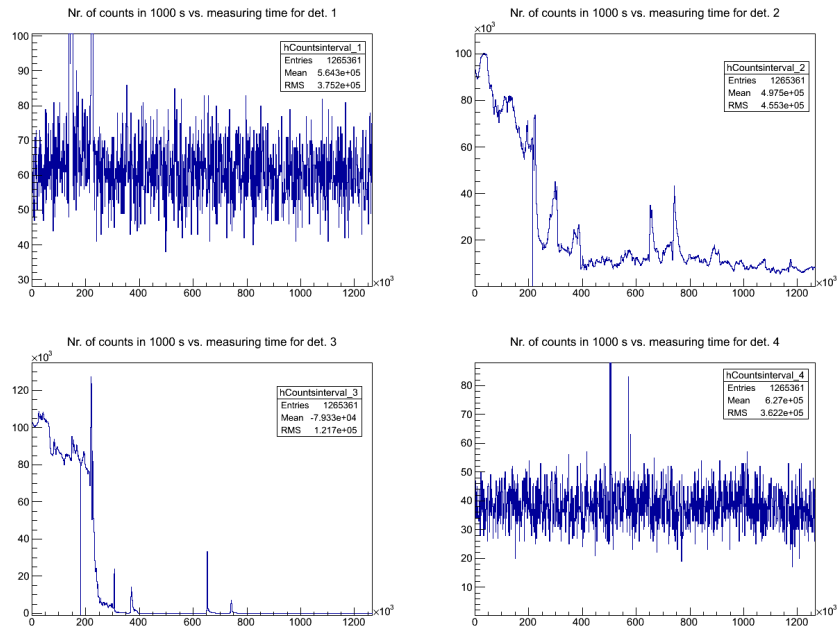


Abbildung C.3.: Zählratenverlauf in Messung 29.

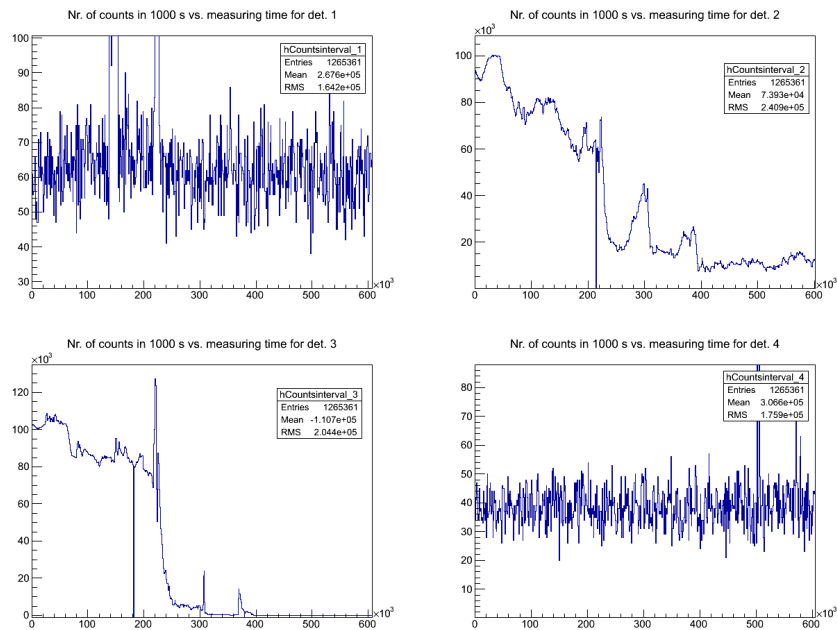


Abbildung C.4.: Zählratenverlauf in Messung 29.

### C. Ergänzung zur Abgabeversion

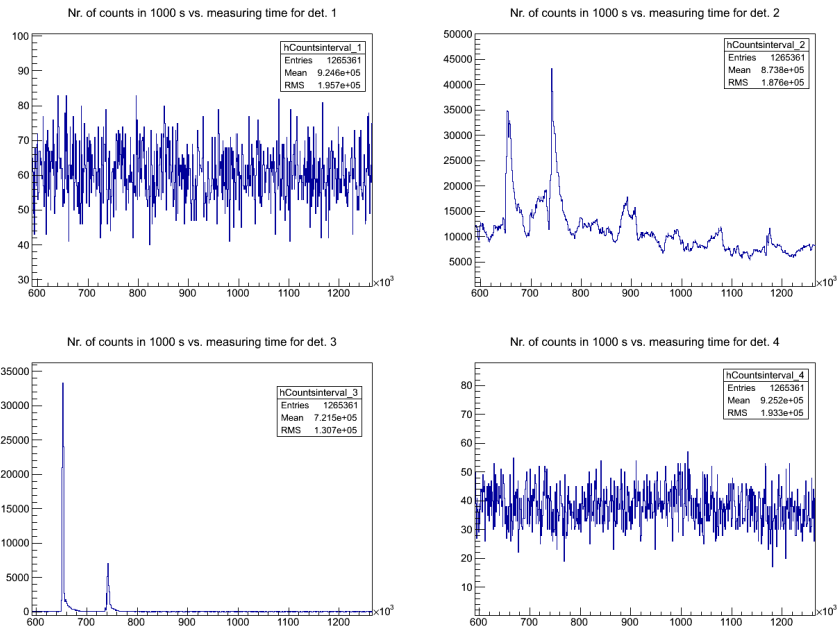


Abbildung C.5.: Zählratenverlauf in Messung 29.

### C.3. Messung 30

- Beginn: 29.06., 12:30. Ende: 04.07., 15:30.
- Messung ohne radioaktive Quelle
- Betriebsspannung aller vier Detektoren auf Null eingestellt, aber Spannungsversorgung eingeschaltet



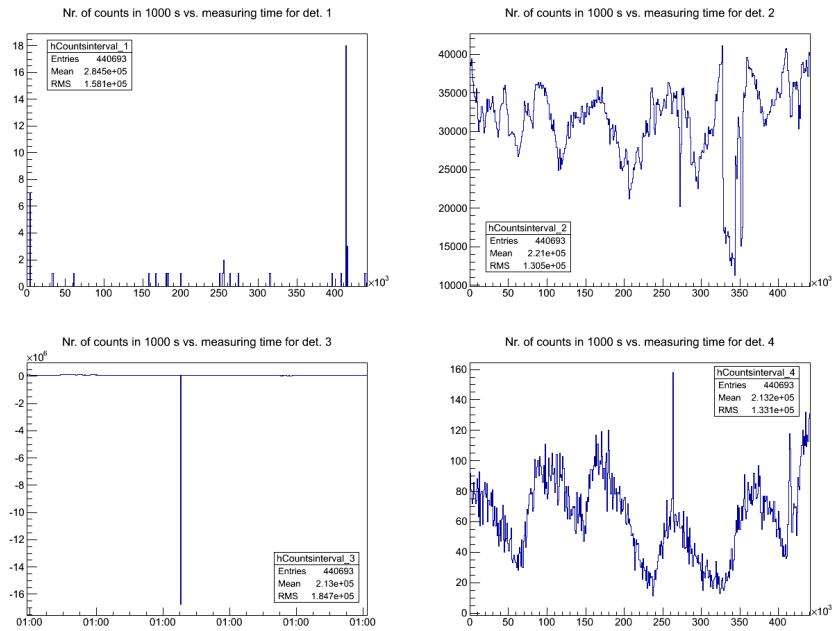


Abbildung C.6.: Zählratenverlauf in Messung 30.

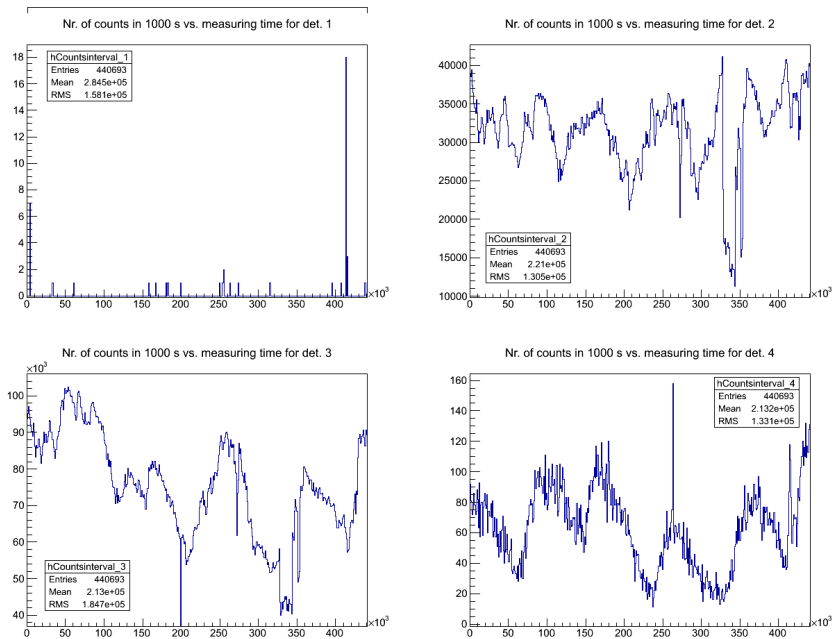


Abbildung C.7.: Zählratenverlauf in Messung 30.

### C. Ergänzung zur Abgabeversion

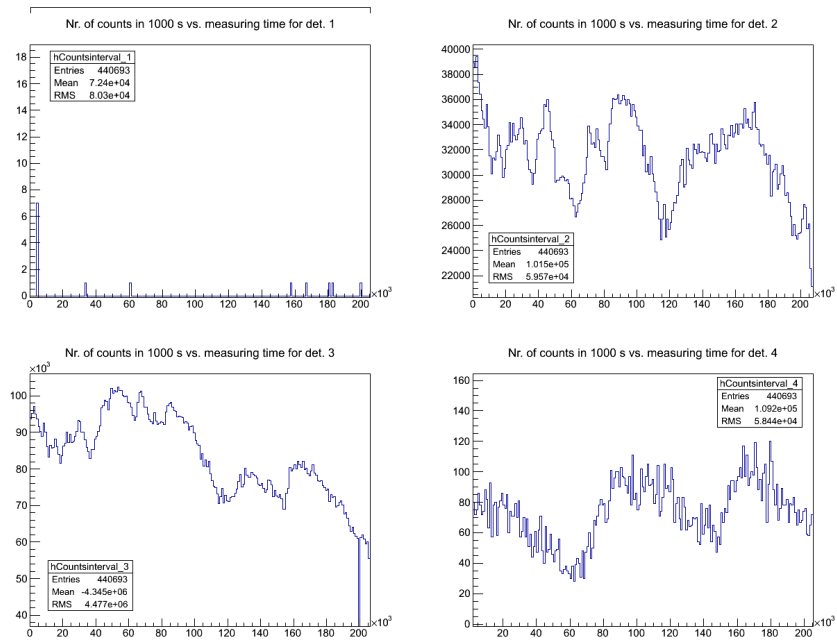


Abbildung C.8.: Zählratenverlauf in Messung 30.

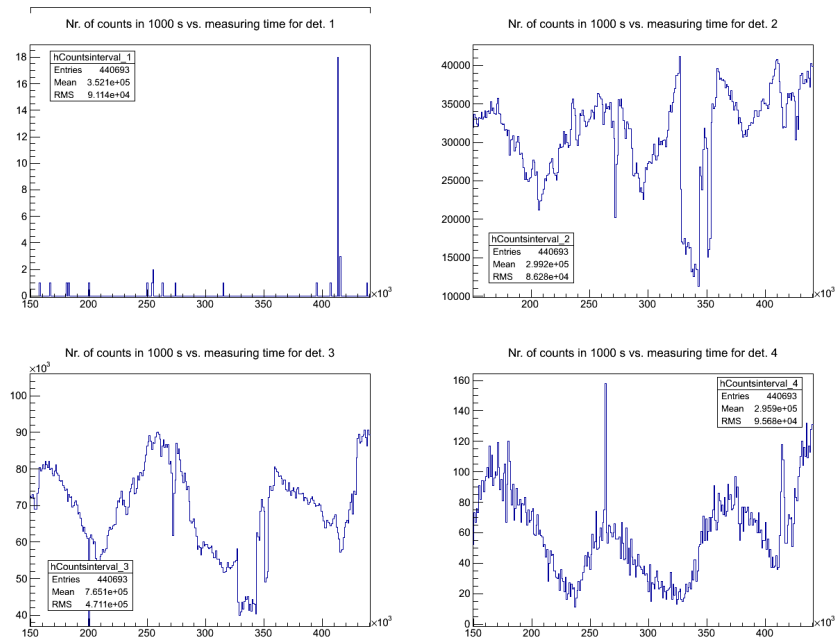


Abbildung C.9.: Zählratenverlauf in Messung 30.

## C.4. Messung 31

- Beginn: 04.07., 15:40. Ende: 05.07., 18:06.
- Messung ohne radioaktive Quelle
- Spannungsversorgung abgeschaltet

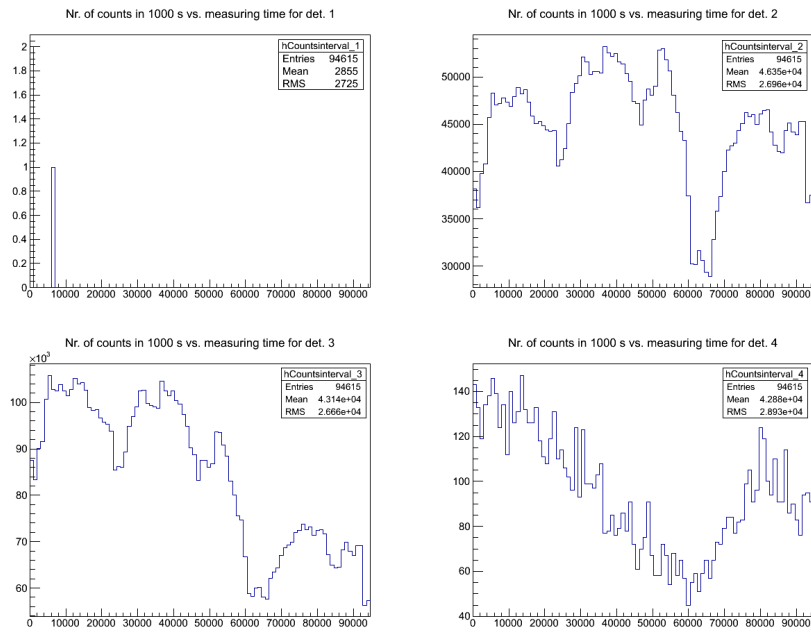


Abbildung C.10.: Zählratenverlauf in Messung 31.

## C.5. Messung 32

- Beginn: 05.07., 18:09. Ende: weniger als 24 h später
- Messung ohne radioaktive Quelle
- Spannungsversorgung abgeschaltet, Abschalten des Lüfters, der die Spannungsversorgung kühlt, Ziehen des Netzsteckers der Spannungsversorgung

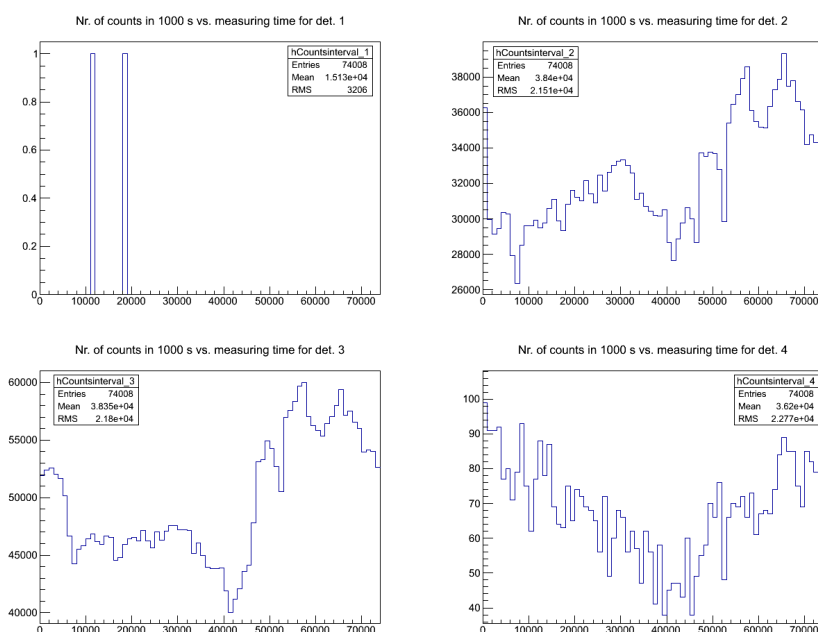


Abbildung C.11.: Zählratenverlauf in Messung 32.

## C.6. Messung Signale 2

- Spannungsversorgung abgeschaltet, Abschalten des Lüfters, der die Spannungsversorgung kühlt, Ziehen des Netzsteckers der Spannungsversorgung
- Auf allen Kanälen sind am Vorverstärkerausgang synchrone Signale zu erkennen (Abb. C.12). Diese erzeugen am Ausgang der SCAs Signale (Abb. C.13) die dazu führen, dass der Counter Ereignisse zählt.

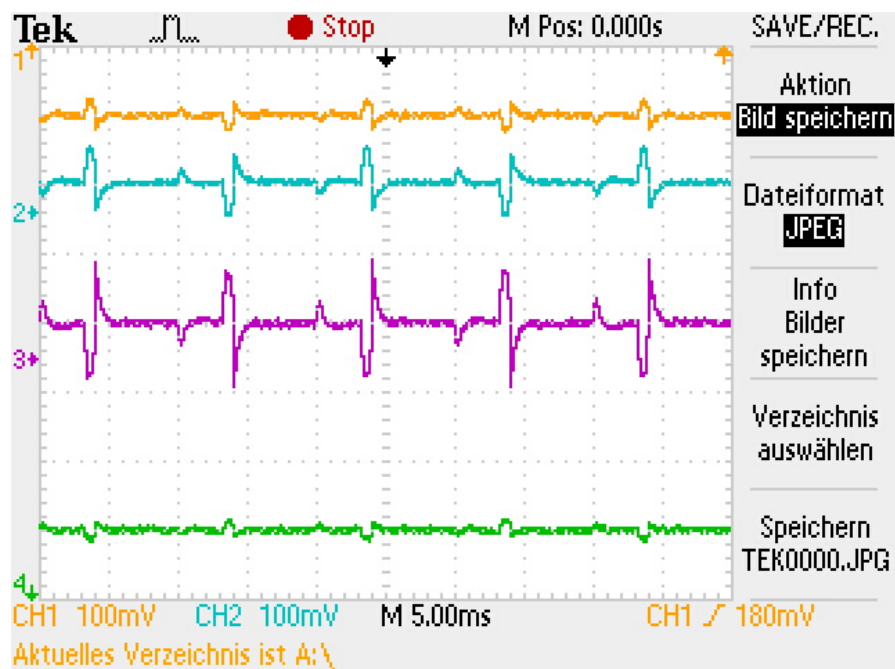


Abbildung C.12.: Signale der vier Vorverstärker bei Messung Signale 2.

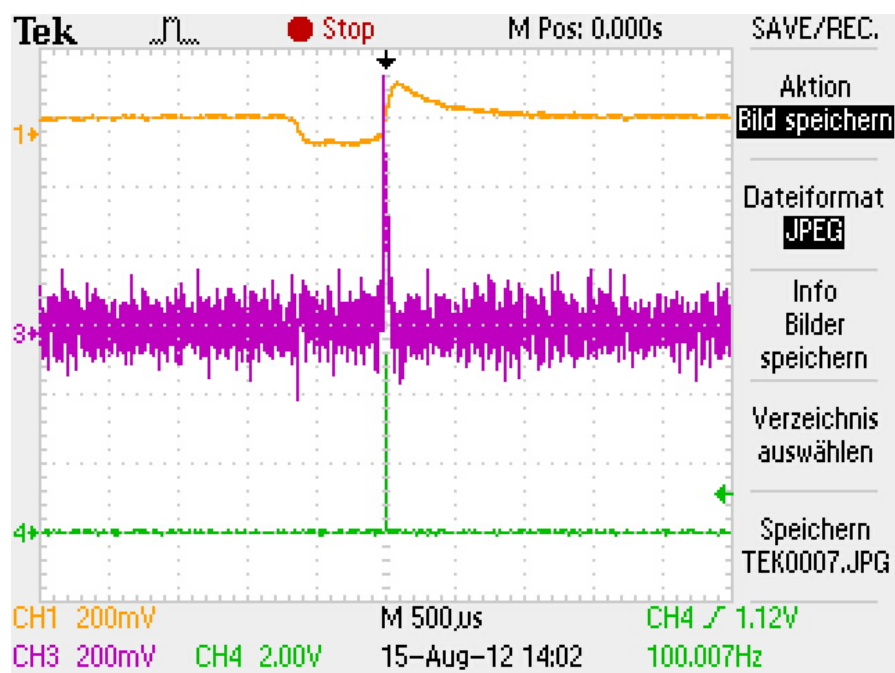


Abbildung C.13.: Von oben nach unten: Vorverstärkersignal, Hauptverstärkersignal, Signal am Ausgang des SCA bei Messung Signale 2.

- Beobachtung: Signale auf den Vorverstärkern sind höher, wenn die Kabel zwischen Spannungsversorgung und Vorverstärker auf den Bauteilen unterhalb aufliegen. Um dem entgegenzuwirken, wurde der Abstand zur Spannungsversorgung bzw. zu den Kabeln erhöht und es wurde ein Stück Blech zur Abschirmung verwendet. Die Signale wurden verringert, aber nicht genügend.

## C.7. Messung 35

- Messung 34 ergab mit abgeschalteter Spannungsversorgung eine vernachlässigbare Zählrate auf allen Kanälen abgesehen von Ch 2. Dort lag sie signifikant höher.
- Messung 35: baugleiches Netzgerät aus anderem Praktikumsversuch. Spannungsversorgung eingeschaltet.
- Nicht zu vernachlässigende Zählrate auf Ch 2 (Abb. C.14).

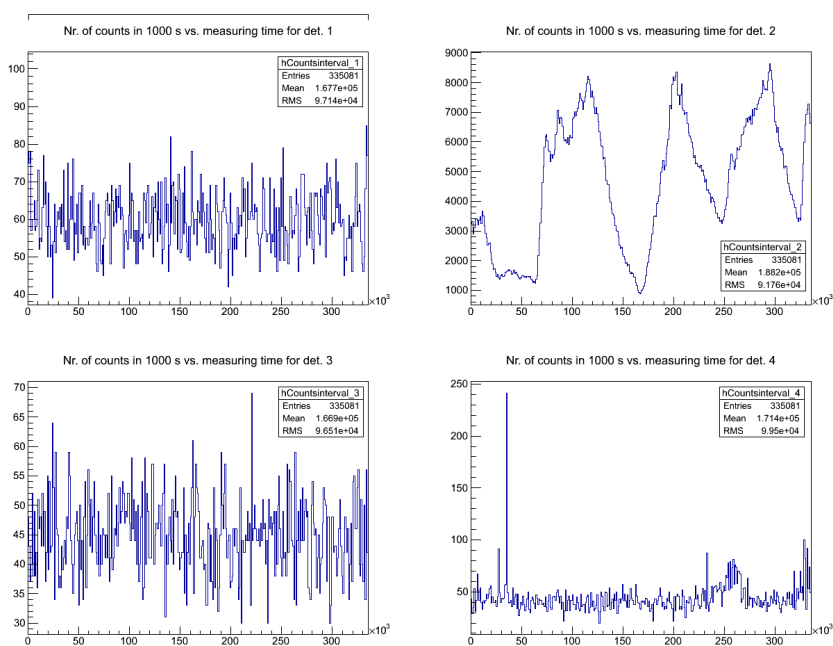


Abbildung C.14.: Zählratenverlauf bei Messung 35.

## C.8. Messung 38

- Kalibrierung der unteren SCA-Schwellen durch Messung des Co-57-Spektrums mit einem ADC.
- Schwellen nach Kalibrierung leicht höher, aber Zählraten nicht reduziert (Abb. C.15 bis C.17)

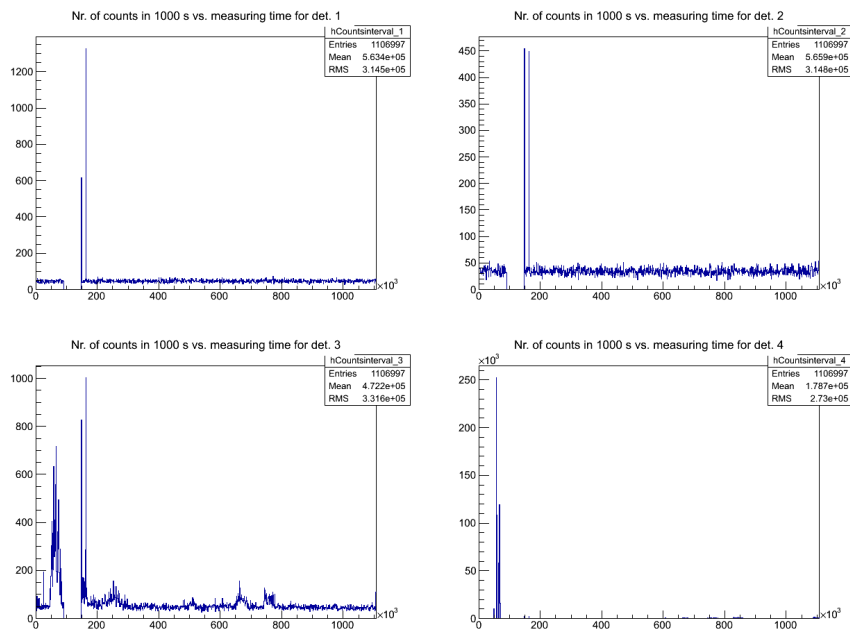


Abbildung C.15.: Zählratenverlauf bei Messung 38.

## C.9. Messung 39

- Einsatz des neuen Netzteils MHV-4 von Meytec. Die Zählratenverläufe sind ähnlich wie beim alten Netzteil (Abb. C.18 und C.19)
- Wie beim alten Netzteil liegen an den Vorverstärkerausgängen synchrone Signale an (Abb. C.20). Diese erzeugen am Ausgang der SCAs Signale (Abb. C.21) die dazu führen, dass der Counter Ereignisse zählt.

### C. Ergänzung zur Abgabeversion

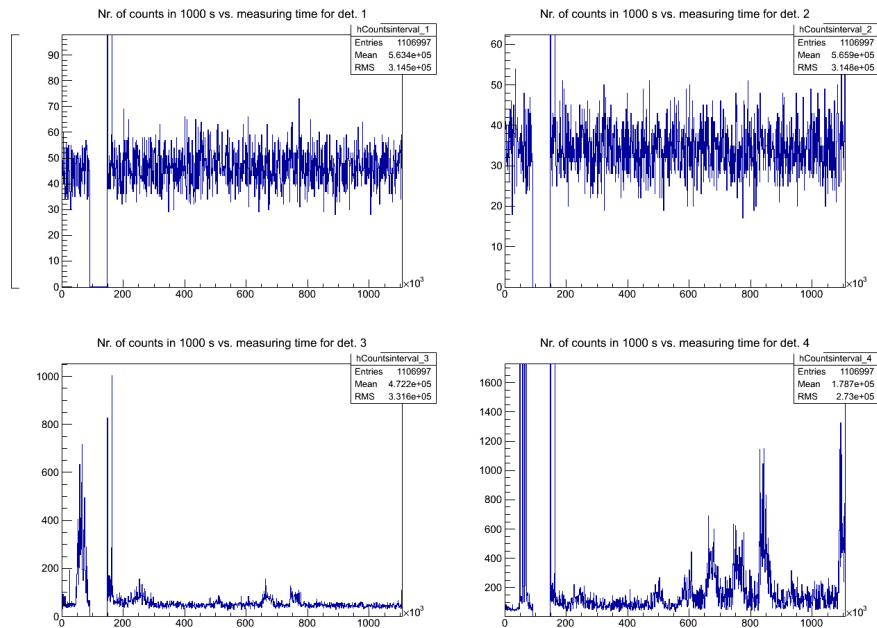


Abbildung C.16.: Zählratenverlauf bei Messung 38, vergrößerter Ausschnitt.

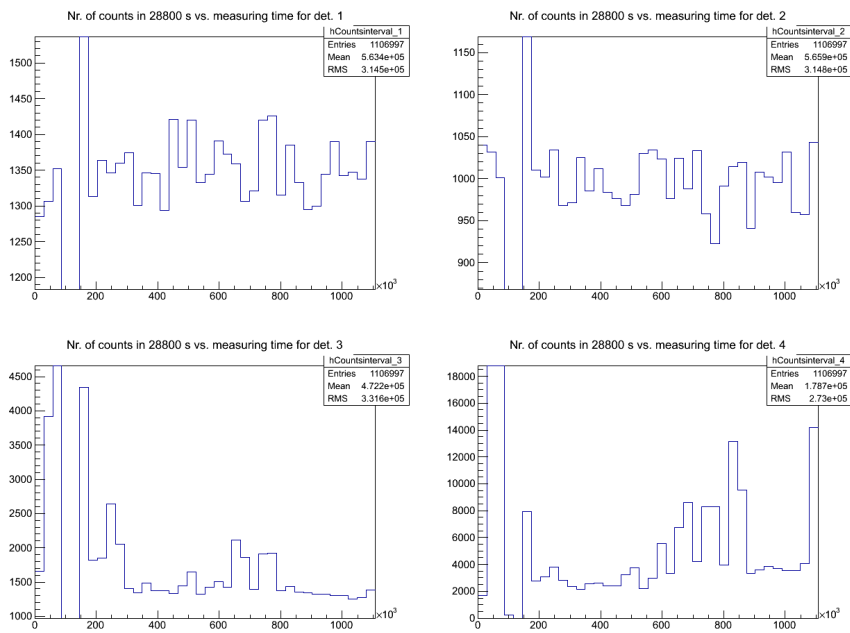


Abbildung C.17.: Zählratenverlauf bei Messung 38. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über einen Zeitraum von acht Stunden gebinnt wurden.



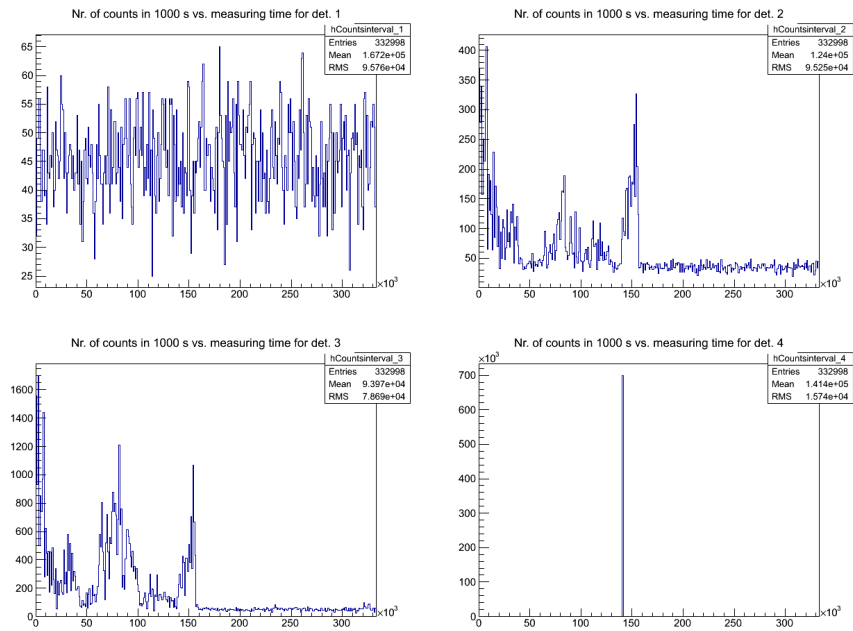


Abbildung C.18.: Zählratenverlauf bei Messung 39.

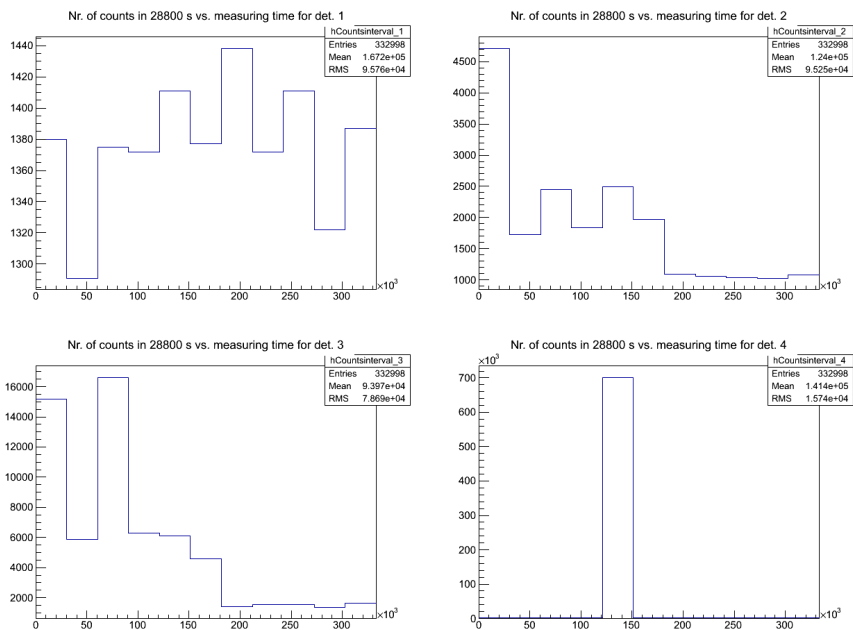


Abbildung C.19.: Zählratenverlauf bei Messung 39. Es wurde so gebinnt, dass die Counts über einen Zeitraum von acht Stunden gebinnt wurden.

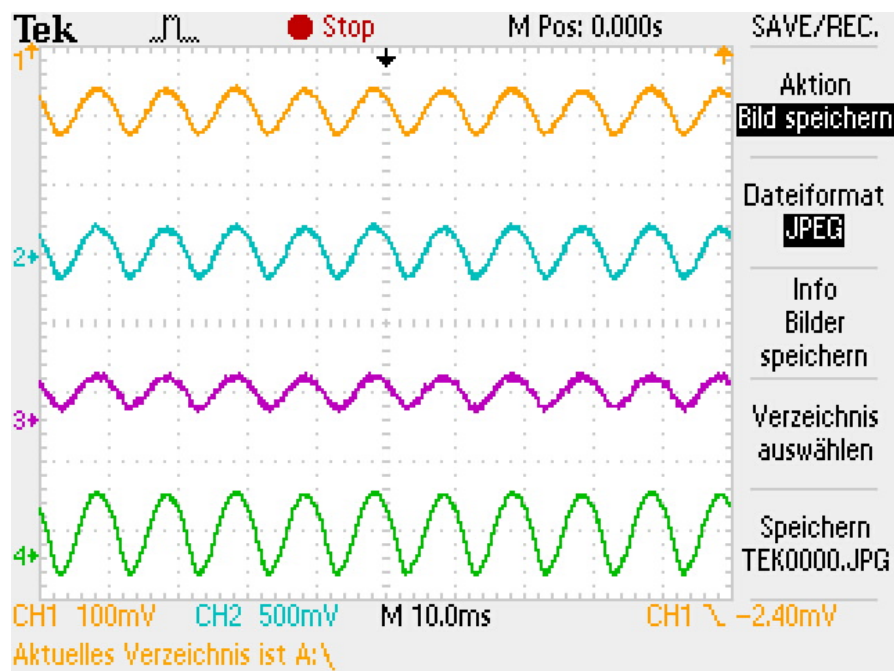


Abbildung C.20.: Signale der vier Vorverstärker bei Messung Signale 9.

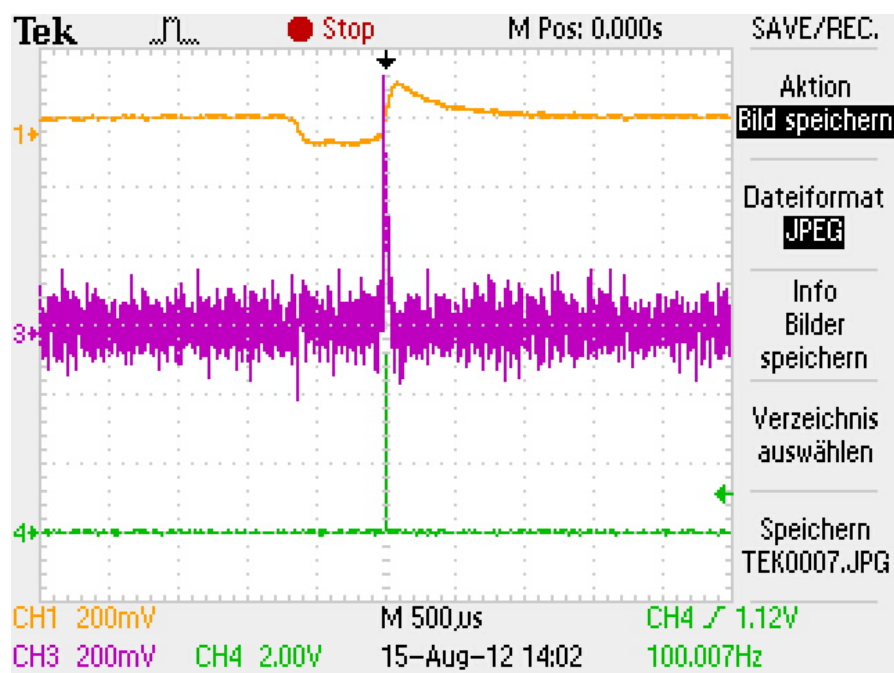


Abbildung C.21.: Von oben nach unten: Vorverstärkersignal, Hauptverstärkersignal, Signal am Ausgang des SCA bei Messung Signale 9.

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Links- und Rechts-Streuung eines Elektrons an einem Kern [Büs07]. . . . .	5
2.2. Definition des Azimutwinkels $\varphi$ . . . . .	6
3.1. Zerfallsschema von $^{90}\text{Sr}$ [Han83]. . . . .	7
3.2. Maßstabsgetreuer Schnitt durch den Versuchsaufbau [Büs07]. . . . .	8
3.3. Draufsicht auf die Streuebene. . . . .	10
3.4. Ladungsträgerdiffusion an einem p-n-Übergang [Büs07]. . . . .	10
3.5. Schematischer Aufbau der Elektronik [Büs07]. . . . .	11
4.1. Messung 1: Druckverlauf in Abhängigkeit von der Zeit mit den alten Kunststoffteilen. . . . .	15
4.2. Messung 2: Druckverlauf in Abhängigkeit von der Zeit mit den neuen Kunststoffteilen. . . . .	15
4.3. Verlauf der Counts in Messung 3. . . . .	16
4.4. Verlauf der Counts in Messung 1. . . . .	18
4.5. Verlauf der Counts in Messung 7. . . . .	19
4.6. Verlauf der Counts in Messung 8. . . . .	20
4.7. Verlauf der Counts in Messung 9. . . . .	21
4.8. Verlauf der Counts in Messung 11. . . . .	22
4.9. Verlauf der Counts in Messung 12. . . . .	23
4.10. Verlauf der Counts in Messung 13. . . . .	24
4.11. Verlauf der Counts in Messung 14. . . . .	24
4.12. Verlauf der Counts in Messung 15. . . . .	25
4.13. Blockschaltbild mit Redlab USB-Zähler. . . . .	26
4.14. Anschlussbelegung des Redlab USB-Zähler [Ele08]. . . . .	27
4.15. Labviewprogramm zum Auslesen des USB-Zählers. . . . .	28
4.16. Labviewprogramm zum simultanen Auslesen von vier Zählern des Redlab USB-Zählers. . . . .	28
4.17. Bedienungsoberfläche des Labviewprogramms für den Vierfachzähler. . . . .	29
4.18. Zählratenverlauf auf Kanal 1 bei Messung 16. . . . .	31
4.19. Zählratenverlauf auf Kanal 2 bei Messung 16. . . . .	31
4.20. Zählratenverlauf auf Kanal 3 bei Messung 16. . . . .	32
4.21. Zählratenverlauf auf Kanal 4 bei Messung 16. . . . .	32

## Abbildungsverzeichnis

4.22. Entwicklung der Counts bei Messung 16. . . . .	33
4.23. Zählratenverlauf auf Kanal 1 mit Ausreißern. . . . .	34
4.24. Druck- und Temperaturverlauf bei Messung 16. . . . .	35
4.25. Zählratenverlauf auf Kanal 1 bei Messung 17. . . . .	37
4.26. Zählratenverlauf auf Kanal 2 bei Messung 17. . . . .	37
4.27. Zählratenverlauf auf Kanal 3 bei Messung 17. . . . .	38
4.28. Zählratenverlauf auf Kanal 4 bei Messung 17. . . . .	38
4.29. Zählratenausreisser auf Kanal 2. . . . .	39
4.30. Entwicklung der Counts bei Messung 17. . . . .	39
4.31. Druck- und Temperaturverlauf bei Messung 17. . . . .	40
4.32. Zählratenverlauf auf Kanal 1 bei Messung 18. . . . .	42
4.33. Zählratenverlauf auf Kanal 2 bei Messung 18. . . . .	42
4.34. Zählratenverlauf auf Kanal 3 bei Messung 18. . . . .	43
4.35. Zählratenverlauf auf Kanal 4 bei Messung 18. . . . .	43
4.36. Ausreißer auf Kanal 2. . . . .	44
4.37. Vergrößerte Ansicht der Peaks auf Kanal 2. . . . .	44
4.38. Verlauf der Counts bei Messung 18. . . . .	44
4.39. Asymmetrie der Zählraten in Rechts-Links- bzw. Oben-Unten- Richtung. . . . .	46
B.1. Countverlauf in Messung 9. . . . .	51
B.2. Zählratenverlauf in Messung 16 bei Binning über 1000 s. . . . .	52
B.3. Zählratenverlauf in Messung 17 bei Binning über 1000 s. . . . .	52
B.4. Zählratenverlauf in Messung 18 bei Binning über 1000 s. . . . .	53
B.5. Zählratenverlauf in Messung 16 bei Binning über 8 h. . . . .	53
B.6. Zählratenverlauf in Messung 17 bei Binning über 8 h. . . . .	54
B.7. Zählratenverlauf in Messung 18 bei Binning über 8 h. . . . .	54
B.8. Zählratenverlauf in Messung 16 bei Binning über 13,7 h. . . . .	55
B.9. Zählratenverlauf in Messung 18 bei Binning über 13,7 h. . . . .	55

# Tabellenverzeichnis

3.1. Im Versuch verwendbare Folien. . . . .	9
3.2. Bezeichnungen der Detektoren und zulässige Sperrspannungen <i>U</i> . . . . .	12
4.1. Konfiguration der Elektronik E bei Messung 3. . . . .	16
4.2. Konfiguration der Elektronik E bei Messung 1. . . . .	17
4.3. Konfiguration der Elektronik E in den Messungen 4 bis 6. . . .	18
4.4. Konfiguration der Elektronik bei Messung 7. . . . .	19
4.5. Konfiguration der Elektronik bei Messung 8. . . . .	20
4.6. Konfiguration der Elektronik bei Messung 11. . . . .	22
4.7. Konfiguration der Elektronik bei Messung 16.. . . .	33
4.8. Konfiguration der Elektronik in Messung 17. . . . .	36
4.9. Zählratenschwankungen der Messungen 16 bis 18. . . . .	45
A.1. Konfigurationen der Elektronik für die Messungen 1 bis 9 zu- sammengefasst. . . . .	49
A.2. Konfiguration der Elektronik bei den Messungen 12 bis 15. . .	50



# Literaturverzeichnis

- [Büs07] K. Büscher. *Ein Praktikumsversuch zum Nachweis der Paritätsverletzung beim Beta-Zerfall*. Juni 2007.
- [CTDL97] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, and F. Laloe. *Quantenmechanik*. de Gruyter, 1997.
- [Dem09] W. Demtröder. *Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik. 3., überarbeitete Auflage*. Springer, Berlin, 2009.
- [Ele08] Meilhaus Electronic. *Bedienungsanleitung Redlab 4301 - 9513-basierter Zähler/Zeitgeber*. 2008.
- [Han83] H.H. Hansen. Measurement of the beta-ray spectra of sr-90 - y-90. *International Journal of Applied Raditation and Isotopes*, 34:1241–1247, 1983.
- [Hei11] M. Heide. Mündliche mitteilung, 2011.
- [Kno76] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*, volume 1. John Wiley & Sons, 1976.
- [LY56] TD Lee and CN Yang. Question of parity conservation in weak interactions. *Physical Review*, 104:254–258, 1956.
- [Mot29] N.F. Mott. The scattering of fast electrons by atomic nuclei. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 124(794):425–442, 1929.
- [Ort] EG&G Ortec. *Quality Assurance Data - Semiconductor Radiation Detectors*.
- [PRSZ09] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, and F. Zetsche. *Teilchen und Kerne*. Springer, Berlin, achte edition, 2009.
- [She56] N. Sherman. Coulomb scattering of relativistic electrons by point nuclei. *Phys. Rev.*, 103:1601–1607, Sep 1956.
- [WAH<sup>+</sup>57] CS Wu, E. Ambler, RW Hayward, DD Hoppes, and RP Hudson. Experimental test of parity conservation in beta decay. *Physical Review*, 105:1413–1415, 1957.





# Danksagung

Zu guter Letzt möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zuerst möchte ich Prof. Dr. J. P. Wessels und Dr. Ch. Klein-Bösing danken für die freundliche Aufnahme in der Arbeitsgruppe und für die Themenstellung.

Ganz besonderer Dank gilt Markus Heide für die Hilfsbereitschaft und immer engagierte Betreuung über ein halbes Jahr hinweg und speziell für das Schreiben des Auswertungsprogramms und die Hinweise beim Verfassen der Arbeit. Ganz besonders möchte ich auch Prof. Dr. A. Khoukaz danken, der mehrmals neue Denkanstöße gegeben hat, wenn wir mit unserem Latein am Ende waren, und der die Idee hatte, eine Echtzeitaufnahme der Zählraten zu realisieren. Auch war seine stets optimistische Art sehr motivierend.

Mein Dank gilt auch Raphael Jöhren für die Hilfe bei der Erstellung des Labview-Programms.

Ich danke Toni und David für die Durchsicht der Arbeit, wodurch ich noch einmal eine andere Perspektive auf die Arbeit erhalten habe. David danke ich im besonderen für die Hilfe bei der Bearbeitung der Logfiles und für die Unterstützung im Privaten, was die Freizeitgestaltung durch gemeinsame Koch- und Filmabende mit einschließt.

Ich danke Marcel sowohl für die Unterstützung im Privaten, als auch in den früheren Semestern des Studiums. Durch ihn sehe ich die Dinge nicht immer ganz so pessimistisch.

Marvin danke ich fürs Zuhören und für alle anderen familiären Aktivitäten. Zuletzt danke ich meinen Eltern, dass sie mir das Studium finanziell ermöglicht haben und mich während der ganzen Studienzeit in jeder Weise unterstützt haben.