

# Koinzidenz-Messungen zur Quantenverschränkung mit Na-22

(siehe auch martinlehner.ch)

Annahme: Python 3 und die nötigen Programme für die Arduino-Ansteuerung sind bereits auf dem Raspberry installiert. Die Kommentare und Erklärungen beziehen sich auf die Programmversionen messen3.ino und koinz3.py. Diese Programme könnte man natürlich umgestalten und v.a. bezüglich Benutzerfreundlichkeit verbessern.

Es ist zu erwarten, dass sich die Energie der Gammaquanten (511 keV) bei der 90 Grad Compton Streuung an beiden Aluminiumwürfel etwa halbiert. Deshalb muss die Verstärkung der beiden Spektrometer-Platinen vorgängig geeignet eingestellt werden.

## 1) Einstellung der Verstärkung in beiden Kanälen

Im Fall einer Koinzidenz wird zuerst die Energie in Kanal 1 und anschliessend in Kanal 2 gemessen. Deshalb ist es wichtig, dass vor allem im Kanal 2 der direkte 511 keV Peak bei einem hohen Slot liegt. Man nimmt also in beiden Kanälen Spektren auf und justiert die Verstärkung entsprechend (siehe separate Anleitung). Die höher energetischen Gammas (des 1275 keV Peaks liegen jetzt ausserhalb des Messbereichs und werden nicht beachtet.

Die Schwellenspannungen dürfen nicht zu hoch eingestellt werden, damit die gestreuten Photonen sicher erfasst werden können (ca. 0.2 V).

Beispiel 511 keV Peak bei:

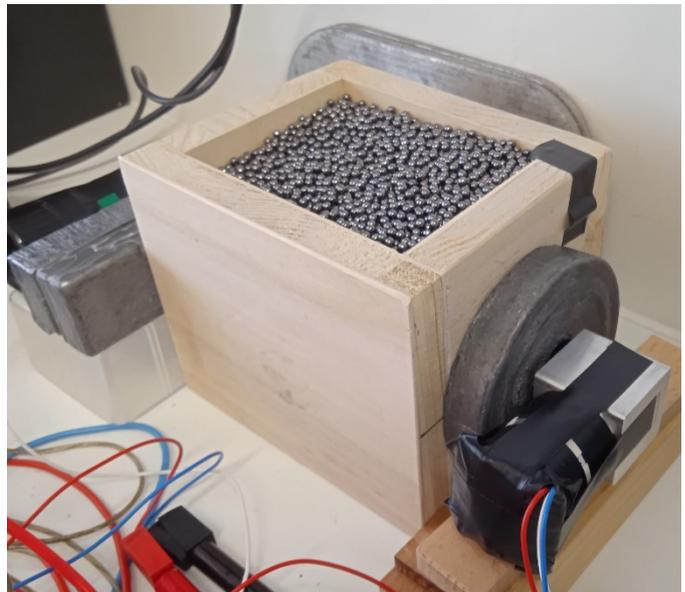
Bei Slot 560 im Kanal 1,

bei Slot 767 im Kanal 2.

## 2) Koinzidenz-Messungen vorbereiten

Nun wird das Koinzidenzprogramm auf den Arduino geladen. Die Aluminium-Würfel werden so angebracht, dass die Mittelpunkte der der Quelle zugewandten Flächen möglichst genau auf der Messachse liegen.

Durch die Box (siehe Bild) verläuft ein Kunststoffrohr von vorne rechts nach hinten links. Die Na-22 Quelle befindet sich in der Mitte dieses Rohres. Das Bild zeigt die  $\varphi = 0^\circ$  Anordnung. Die Box ist mit Bleischrot gefüllt.



Verbesserungs-Ideen:

- Eine längere Box, so dass keine (zusätzlichen) Bleikollimatoren nötig sind.
- Eine durch einen Schrittmotor gesteuerte Mechanik mit stabiler Achse. So könnte die Detektoranordnung eines Kanals präzise um 90 Grad gedreht werden.

Koinzidenzereignisse werden durch AND-Verknüpfung zweier Rechteckpulse gesucht, deren Länge zum Beispiel auf  $8 \mu\text{s}$  eingestellt wird. Diese Wahl beeinflusst u.a. die zu erwartende zufällige Koinzidenzrate (siehe Seite zur Koinzidenzplatine).

### 3) Koinzidenz-Messungen

Das Koinzidenz-Programm auf dem Raspberry wird mit

```
python3 koinz3.py &
```

gestartet. Diese Programmversion schreibt alle Kontrolldaten in ein Logfile (klog.txt), wegen dem &-Zeichen läuft der Prozess im Hintergrund. Im folgenden Output sind einige Kontrollangaben weggelassen:

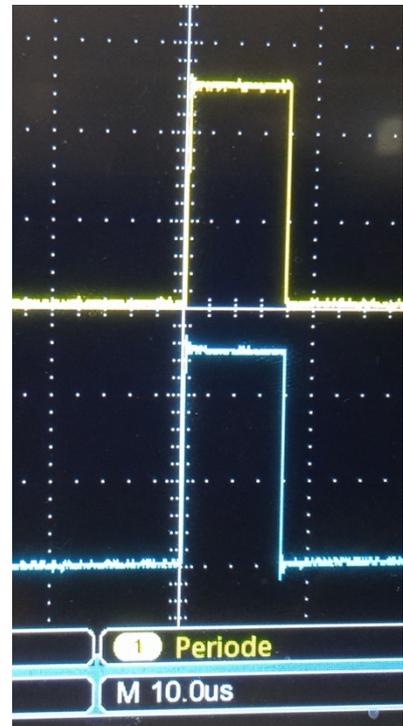
```
Gamma-Koinzidenzmessung (Na-22)
 1 nur Messung, 2 Testanalyse
Kontrolle: 1
```

```
Neue Koinzidenzmessung
-----
```

```
Alles Null gesetzt
Mittleres Verh. K1  1.22
Verh.-Bereich K1  1.10  1.34
Mittleres Verh. K2  1.31
Verh.-Bereich K2  1.18  1.44
```

In beiden Kanälen wird das mittlere Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Messungen am Ausgang (JP4) der Spektrometer-Platine berechnet. Dieses Prozedere ist von der Aufnahme eines Spektrums bekannt.

Jeweils nach zum Beispiel 150 Pulsen (Parameter imo2) im Kanal 1 wird der Zwischenstand im Logfile dokumentiert. Dabei werden zu hohe Peaks durch eine zusätzlich gesetzte Schwelle unterdrückt. Solche Ereignisse sind unerwünscht, da sie nicht einem Compton gestreuten Gamma des Annihilations-Peaks entsprechen können. Die Rate (Kanal 1) ist bei indirekter Messung via Compton-Streuung natürlich viel niedriger als bei direkter Messung. Die 'Gemessene Koinzidenz-Rate pro min' ist noch nicht nach dem gewünschten Puls-Energiebereich gefiltert. Das Bild zeigt zwei etwa 8  $\mu$ s lange Rechteckpulse in Koinzidenz aus den beiden Kanälen (getriggert durch das Koinzidenzsignal). Hier folgt der Schluss eines Logfiles:



```
Gemessene Koinzidenz-Rate pro min 1.38
Koinzidenz Anzahl 159
Anzahl Messungen 91550 Koinzidenzen 159 Zeit in ms 6938937
Anzahl Messungen 91600 Koinzidenzen 159 Zeit in ms 6942839
Anzahl Messungen 91650 Koinzidenzen 159 Zeit in ms 6947090
Totale Anzahl Messungen 91650 Koinzidenzen 159 6947090 ms
Zeit 6947142 ms
Rate pro s 13.19
```

In der Datei koinz.txt wird jedes detektierte Koinzidenzereignis dokumentiert (Rohdaten, hier ein Beispiel für  $\varphi = 0^\circ$ , Anfang und Ende des Files):

```
KOI 1017 1.25 188 250 1 109731
KOI 1241 1.22 293 300 2 128305
KOI 1425 1.25 256 116 3 144774
KOI 1763 1.26 201 144 4 173372
```

etc.

```
KOI 89880 1.24 234 109 157 6814660
KOI 90146 1.23 301 251 158 6835601
KOI 90888 1.21 333 97 159 6891563
```

KOI ist ein Steuerwort. Bedeutung der Zahlen (von links nach rechts):

Totale Anzahl akzeptierte Pulse im Kanal 1  
Verhältnis der 2. zur 3. Analogmessung im Kanal 1 (wie bei Spektren)  
Zweite Analogmessung im Kanal 1 (wie bei Spektren)  
Erste Analogmessung im Kanal 2  
Nummer der Koinzidenz  
Totale Laufzeit in ms

Die zweite Analogmessung im Kanal 1 ist direkt mit der entsprechenden Messung eines Spektrums vergleichbar. Dieser Wert sollte, wie oben erwähnt, etwa der Hälfte der entsprechenden Slotnummer des 511 keV Peaks entsprechen. Die erste Analogmessung im Kanal 2 erfolgt nach den Messungen im Kanal 1 und nach den Messungen und der Analyse des Koinzidenzsignals. Aus dem Abnahmefaktor im Kanal 2 und den nötigen Zeiten der vorgängigen Arduino-Messungen lässt sich errechnen, in welchem Slot der Compton gestreute 511 keV Peak des zweiten Kanals zu erwarten ist.

Typisches Resultat für die um etwa  $\theta = 90^\circ$  Grad Compton gestreuten Gammas:

Kanal 1: Ca. 0.5 mal Slotnummer des 511 keV Peaks im Spektrum

Kanal 2: Ca. 0.3 mal Slotnummer des 511 keV Peaks im Spektrum (verspätete Messung)

Beispiel (siehe oben):

Kanal 1: Direkter Peak bei Slot 560 im Kanal 1, also nach  $90^\circ$  Streuung etwa Slot 280

Kanal 2: Direkter Peak bei Slot 767 im Kanal 2, also nach  $90^\circ$  Streuung etwa Slot 233

Genau genommen ist die Slotnummer 'nicht ganz' eine lineare Funktion der Gammaenergie, was hier vernachlässigt wird. Die Koinzidenz-Dateien werden nach der Messung für beide Anordnungen ( $\varphi = 0^\circ$  und  $\varphi = 90^\circ$ ) vom Raspberry auf einen Laptop übertragen und dort ausgewertet. Die folgenden Ausgabezeilen stammen vom Auswerteprogramm koianalys.py, die beiden Messdateien heissen in diesem Beispiel (siehe oben) koinz-r0.txt und koinz-r90.txt. Es werden (etwas willkürlich) nur Koinzidenzen akzeptiert, deren Slotnummern für beide Kanäle im Bereich  $\pm 20\%$  um die zu erwartenden Slotnummern liegen. Bei längeren Messzeiten könnte man versuchen den Peak der Compton gestreuten Photonen in der Resultats-Verteilung zu finden. Wegen der endlichen Grösse des Aluminium-Würfels ist diese Verteilung bestimmt relativ 'unscharf'. Engere Kollimatoren würden helfen, verkleinern aber natürlich die Rate.

```
Anzahl Datenzeilen 159
File (1=primaer, 2=sekundaer) Nummer: 0
Zeitkorrektur koinz-r0.txt 0 + 6891563 = 6891563
Filename koinz-r0.txt K-Rate pro min 1.38430135515
Zeitkorrektur 0
Schranken primaer 224 bis 337
Schranken sekundaer 184 bis 277
Mit Schranken 0.296014126258 pro min, total: 34
```

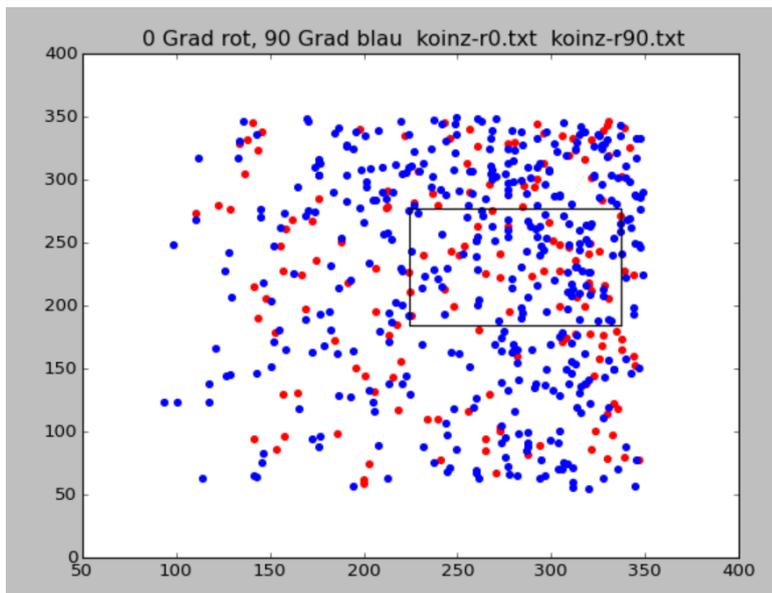
```
Anzahl Datenzeilen 410
File (1=primaer, 2=sekundaer) Nummer: 1
Zeitkorrektur koinz-r90.txt 0 + 8268947 = 8268947
Filename koinz-r90.txt K-Rate pro min 2.97498581137
Zeitkorrektur 0
Schranken primaer 224 bis 337
Schranken sekundaer 184 bis 277
Mit Schranken 0.58774109932 pro min, total: 81
```

```
Verh. 90 zu 0 Grad 1.98551706552
Stat. Fehler 20.4346381711 Prozent
Abs. Fehler 0.405733228163
```

Wie man sieht, bleiben mit der Filterung nach Energie nur noch relativ wenige Koinzidenz-Ereignisse übrig. Die einfache Fehlerabschätzung erfolgt via Poisson-Verteilung in beiden Kanälen und der üblichen Fehlerfortpflanzung beim Verhältnis.

Konkret am Beispiel:  $\sqrt{\left(\frac{\sqrt{34}}{34}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{81}}{81}\right)^2} \approx 0.204$

Es gibt auf jeden Fall viel Verbesserungspotential v.a. bei der Fehlerdiskussion, man könnte z.B. versuchen den involvierten Streuwinkelbereich theoretisch (geometrisch) abzuschätzen. Die hier (und im VSMP-Bulletin) präsentierten Resultate zeigen immerhin, dass man mit einer einfachen Anordnung den von der Theorie geforderten Effekt der Quantenverschränkung mit wenigen Stunden Messzeit einigermaßen signifikant nachweisen kann.



In der nebenstehenden Grafik (aus dem Auswertungsprogramm) sind auf der horizontalen bzw. vertikalen Achse die Slotnummern in den beiden Kanälen aufgetragen. ( $\varphi = 0^\circ$  rote Punkte und  $\varphi = 90^\circ$  blaue Punkte). Der Rahmen markiert den Bereich der akzeptierten Koinzidenzereignisse.

Weitere Erklärungen und Hinweise zur Spin-Verschränkung bei der Positron-Annihilation findet man im Artikel <https://medien.martinlehner.ch/lehner-vsmp-ML.pdf>.