

Software zur Auslese und Analyse der Experimente des Netzwerks Teilchenwelt

Kurzfassung:

Die in diesem Projekt bereit gestellten *python*-Skripte dienen zur Aufnahme und Auswertung der Daten der CosMO-Detektoren und der Kamiokanne des Netzwerks Teilchenwelt mit einem USB-Oszilloskop.



Übersicht

Das Netzwerk Teilchenwelt, <http://www.Teilchenwelt.de> stellt Experimente zum Nachweis von Myonen aus der kosmischen Strahlung zur Verfügung. Dies sind die Szintillationszähler des CosMO-Experiments und der aus einer Kaffeekanne mit aufgesetzter Photoröhre bestehende Wasser-Cherenkov-Zähler "Kamiokanne". Typisch für diese und ähnliche Detektoren sind kurze Signalpulse von ca. 100 ns Dauer und einigen 10 bis 100 mV Pulshöhe, die zu zufälligen Zeitpunkten entstehen. Die Zeitdifferenzen zwischen zwei solchen Zufallsereignissen folgen einer Exponentialverteilung, deren Zeitkonstante dem Kehrwert der mittleren Ereignisrate entspricht. Mit einem Oszilloskop mit hinreichend hoher Bandbreite können die Signalpulse angezeigt werden. Wegen der zufälligen Natur der Signale ist dabei eine geeignete Einstellung des Oszilloskop-Triggers wichtig.

Moderne, am USB-Port eines Rechners betriebene Oszilloskope wie das PicoScope der Firma PicoTechnology, siehe <http://www.picotech.com>, erlauben es, die Signalformen nicht nur anzuzeigen, sondern auch in Echtzeit an einen Computer zu exportieren, mit dem sie dann aufgezeichnet, angezeigt und analysiert werden können. Diesem Zweck dient das hier beschriebene Projekt "*picoCosmo*". Es ist auf Linux-Systemen und auch auf dem Raspberry Pi lauffähig und unterstützt PicoScope-Geräte mit zwei oder vier Kanälen.

picoCosmo nutzt zur Datenaufnahme den Puffermanager und die Echtzeit-Anzeigen des Projekts *picoDAQ* (<https://github.com/Guenter.Quast/picoDAQ>). Der Puffermanager von *picoDAQ* registriert die Daten des Oszilloskops, speichert sie in einem Zwischenspeicher, dem Puffer, und verteilt sie von dort an mehrere sog. Konsumenten wie Echtzeit-Anzeigen oder weitere Prozesse zur Datenauswertung.

picoCosmo ist eine angepasste und um umfangreiche Funktionalität zur Datenauswertung erweiterte Variante des Scripts *runDAQ.py* aus dem Projekt *picoDAQ*.

Die Analyse der vom Oszilloskop-Trigger ausgewählten und danach aufgezeichneten Pulsformen wird im sog. PulsFilter durchgeführt und verläuft in drei Schritten:

1. Validierung der Trigger-Schwelle des Oszilloskops

Der Signalverlauf um den Triggerzeitpunkt wird mit einem Musterpuls verglichen und das Signal akzeptiert, wenn die Form gut übereinstimmt und der Puls eine Mindesthöhe überschreitet.

2. Suche nach Koinzidenzen

Als nächstes werden Pulse auf allen aktiven Kanälen in der Nähe des Triggerzeitpunkts gesucht. Bei mehr als einem angeschlossenen Detektor wird ein aufgezeichnetes Ereignis akzeptiert, wenn mindestens zwei in zeitlicher Koinzidenz auftreten.

3. Suche nach verzögerten Pulsen

Im optionalen dritten Schritt werden weitere Pulse auf allen aktiven Kanälen gesucht und die Zeitdifferenz zum Triggerzeitpunkt festgehalten. Solche Pulse treten auf, wenn ein Myon aus der kosmischen Strahlung nach Durchgang durch den bzw. die Detektoren gestoppt und das aus dem Zerfall entstandene Elektron registriert wird. Die registrierten individuellen Lebensdauern folgen einer Exponential-Verteilung mit einer mittleren Lebensdauer von $2,2\mu\text{s}$, die auf diese Weise bestimmt werden kann. Natürlich treten auch Zufallskoinzidenzen auf, wenn ein zweites Myon oder ein Rausch-Pulse sehr kurz nach dem Myon eintrifft, das den Trigger ausgelöst hat.

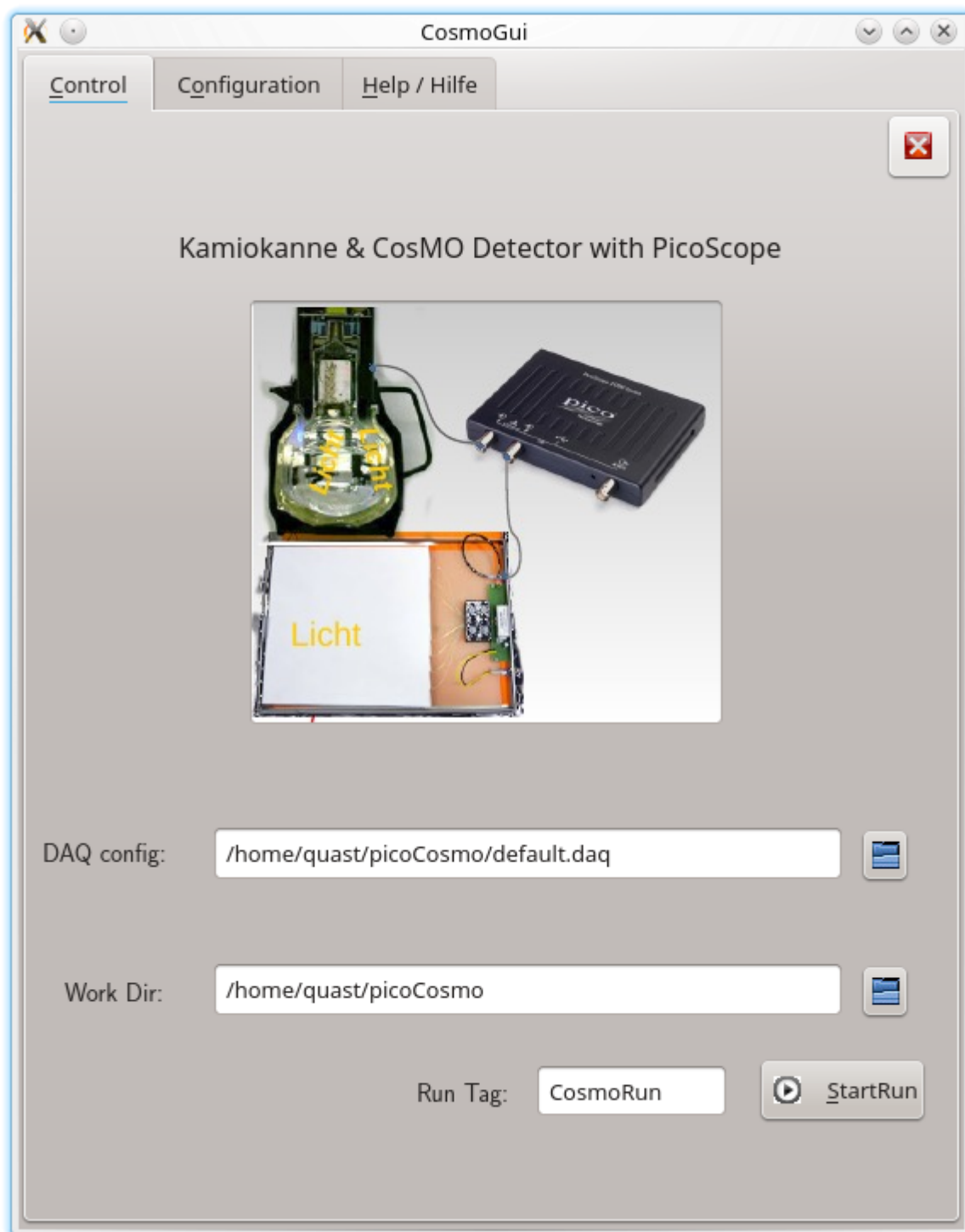
Die Software bietet Echtzeit-Anzeigen der Myon-Rate, der aufgenommenen Pulshöhen und der Myon-Lebensdauern. Die in Echtzeit bestimmten Signal-Parameter werden optional kontinuierlich in Dateien geschrieben. Zusätzlich können Mehrfach-Pulse als Rohdaten der registrierten Pulsformen oder als Bilder im *.png*-Format gespeichert werden.

Details zu Abhängigkeiten und zur Installation von *picoCosmo* finden sich in der Datei [README de.md](#).

Starten des Programms

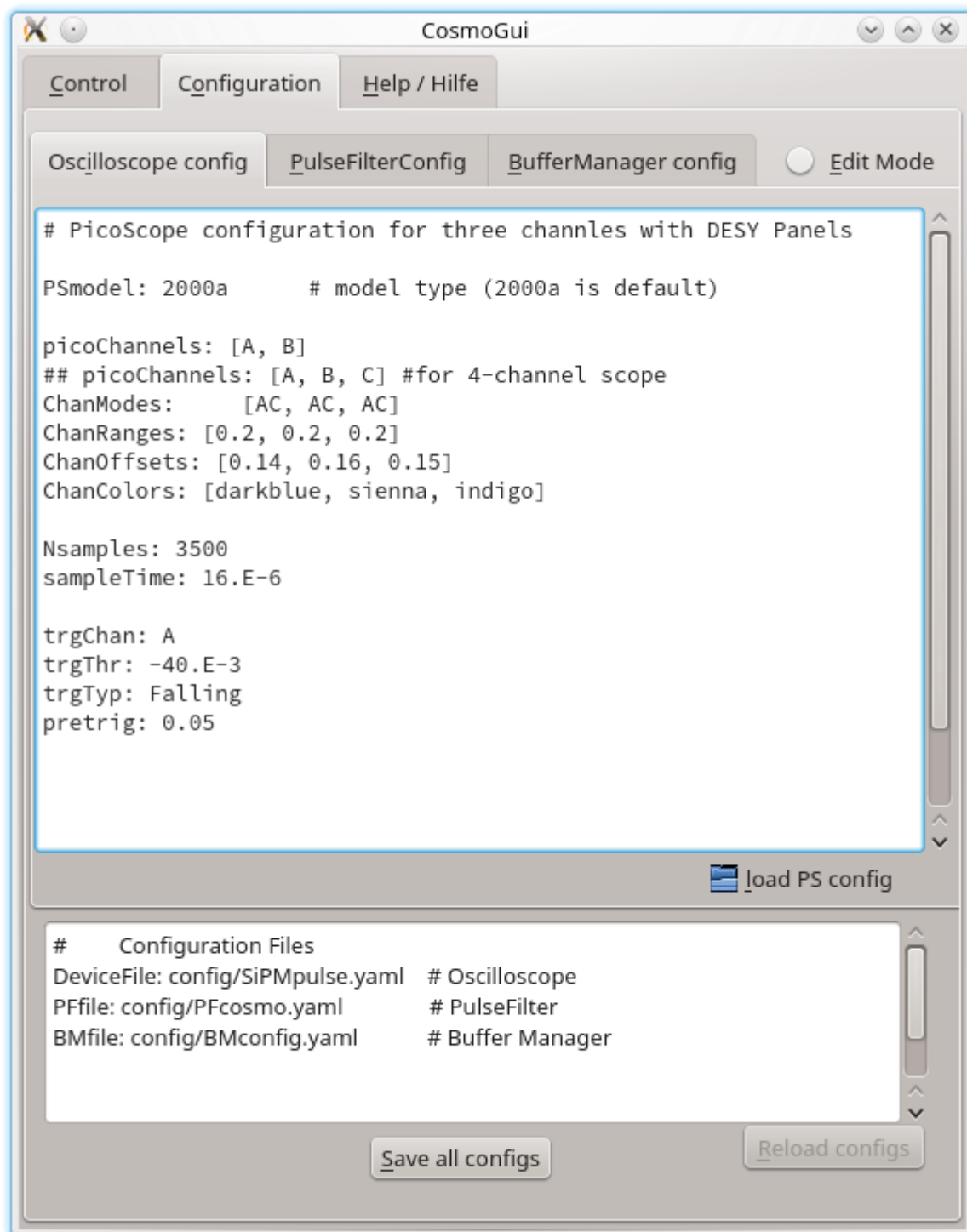
Nach dem Anschließen des PicoScopes an den USB-Port kann das Programm gestartet werden. Dies kann entweder auf der Linux-Kommandozeile über das Script *runCosmo.py*, am einfachsten aber über die grafische Oberfläche, *CosmoGui.py*, erfolgen. Die grafische Oberfläche kann auch mit einem *Icon* verknüpft werden, so dass das Programm durch einfaches Anklicken gestartet werden kann.

Die grafische Oberfläche erlaubt das Festlegen und Bearbeiten der Konfiguration und des Arbeitsverzeichnisses, in dem Dateien abgelegt werden, sowie den Start der eigentlichen Datenaufnahme. Hier ein Bild des Begrüßungsbildschirms der grafischen Oberfläche:



In den Feldern mit Dateinamen steht zunächst die Haupt-Konfigurationsdatei, in der alle weiteren Konfigurationsdateien enthalten sind, sowie das Arbeitsverzeichnis, in dem modifizierte Konfigurationen und die aufgezeichneten Daten abgelegt werden. Im Feld *Run Tag* steht ein Name, der der aktuellen Messung zugeordnet ist und aus dem die Dateinamen für Konfigurations- und Ausgabedateien abgeleitet werden.

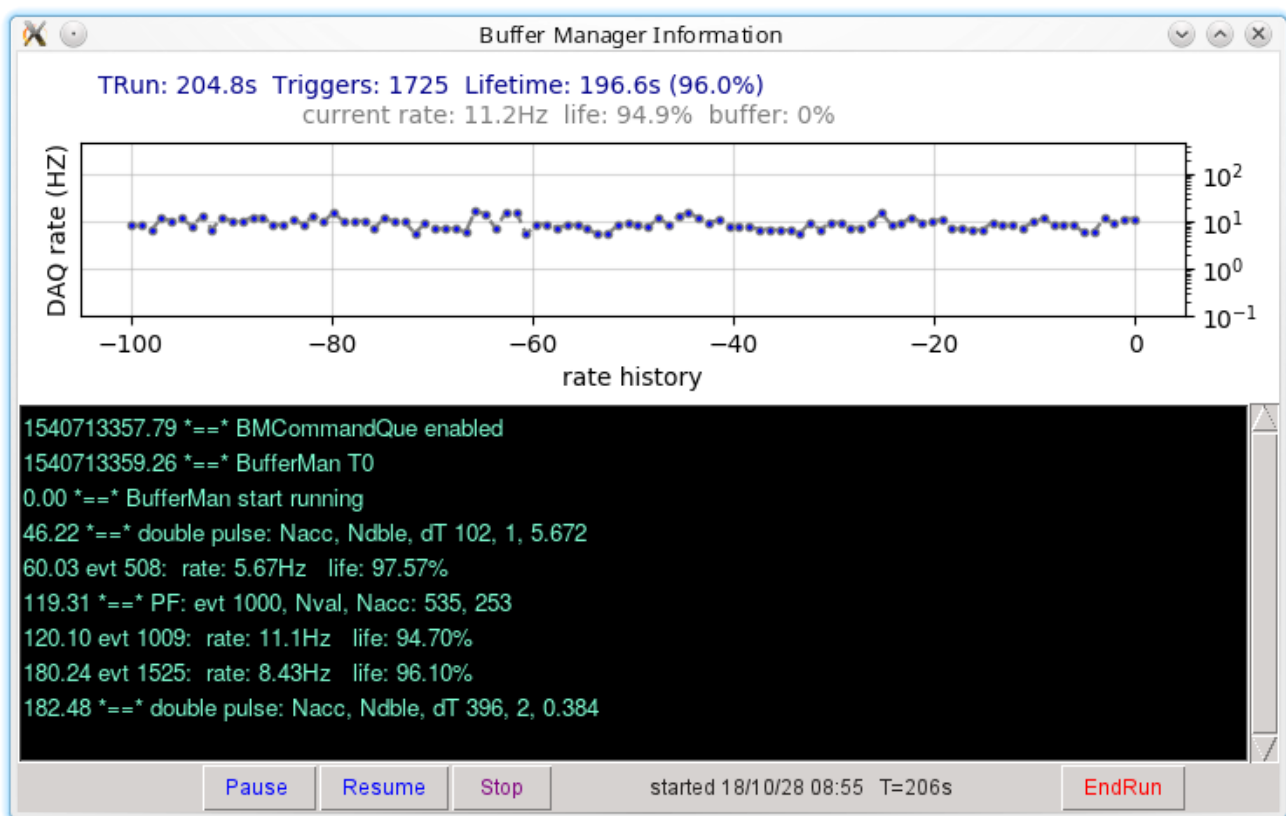
Bei Klick auf den Reiter *Configuration* öffnet sich die Anzeige der aktuellen Konfigurationsdateien:



Ganz unten im Fenster wird die Hauptkonfiguration angezeigt, die lediglich die Namen der Konfigurationsdateien für das USB-Oszilloskops, die Pulsanalyse und die Datennahme enthält. Die Reiter *Oscilloscope*, *PulseFilter* und *BufferManager* zeigen die einzelnen Konfigurationsdateien an. Die Konfigurationsdateien können mittels der grafischen Oberfläche ausgewählt (Klick auf das Dateisymbol) oder verändert werden (Knopf *EditMode* aktivieren). Details zu den einzelnen Konfigurationen werden weiter unter erklärt.

Wenn alle Konfigurationsdateien erstellt sind, können sie mit dem Feld `Save all configs` im Arbeitsverzeichnis unter den in der Hauptkonfiguration angegebenen Namen gespeichert werden. Der Name der Hauptkonfigurationsdatei ist dabei der im Feld `Run Tag` gesetzte Text mit der Erweiterung `.daq`. Vor dem Abspeichern erfolgt eine Überprüfung auf syntaktische Richtigkeit - sollte eine Fehlermeldung angezeigt werden, kann die betroffene Datei korrigiert und dann die gesamte Konfiguration abgespeichert werden.

Das Starten der Datennahme erfolgt mit dem Knopf `Start Run` im Begrüßungsbildschirm. Im gewählten Arbeitsverzeichnis wird eigenes Unterverzeichnis erzeugt, dessen Name aus dem im Feld `Run Tag` eingetragenen Text und dem aktuelle Datum abgeleitet wird. Auch die komplette Konfiguration wird dort abgespeichert, so dass jederzeit ersichtlich ist, unter welchen Bedingungen die Daten im Verzeichnis aufgenommen wurden. Danach beendet sich die grafische Oberfläche, und die eigentliche Datennahme (engl. "Run") beginnt mit dem Start der grafischen Oberfläche des Puffer-Managers und den in dessen Konfiguration festgelegten Echtzeitanzeigen. Die grafische Oberfläche ist hier gezeigt:



Über die Kontrollflächen des Puffer-Managers kann die Datennahme pausiert (*Pause*), wieder aufgenommen (*Resume*) oder beendet werden (*Stop* und *EndRun*). In gestopptem Zustand werden die Ausgabedateien geschlossen, aber alle Fenster bleiben noch geöffnet, so dass Grafiken betrachtet oder gespeichert und statistische Information ausgewertet werden können. Wird der Run beendet, verschwinden alle Fenster.

Das Programm wird in einem Konsolenfenster ausgeführt, in dem vielfältige Informationen zur Initialisierung, Konfiguration und zum Start einzelner, jeweils als Hintergrundprozesse ausgeführten Programmkomponenten angezeigt werden. Die Kontrolle ist auch über Eingabe einzelner Kommandos mit der Tastatur möglich, wenn das Ausgabefenster vorher durch Anklicken aktiviert wurde:

```
type -> E(nd), P(ause), S(top) or R(esume) + <ret>
```

Als einer der Datenkonsumenten des Puffermanagers startet neben den diversen Echtzeitanzeigen auch der Pulsfilter zur Analyse der vom Oszilloskop ausgelesenen Daten mit den in dessen Konfiguration festgelegten Echtzeit-Anzeigen.

Informationen über die im Pulsfilter erkannten Signale werden laufend in Dateien auf der Festplatte abgelegt:

- Dateien mit dem Namensanfang *pfilt* enthalten Informationen zu allen aufgezeichneten Signalen, die die Stufe der Triggervalidierung passiert haben und bei denen bei mehreren Detektoren -mindestens ein weiterer angesprochen hat (Zweifach-Koinzidenz).

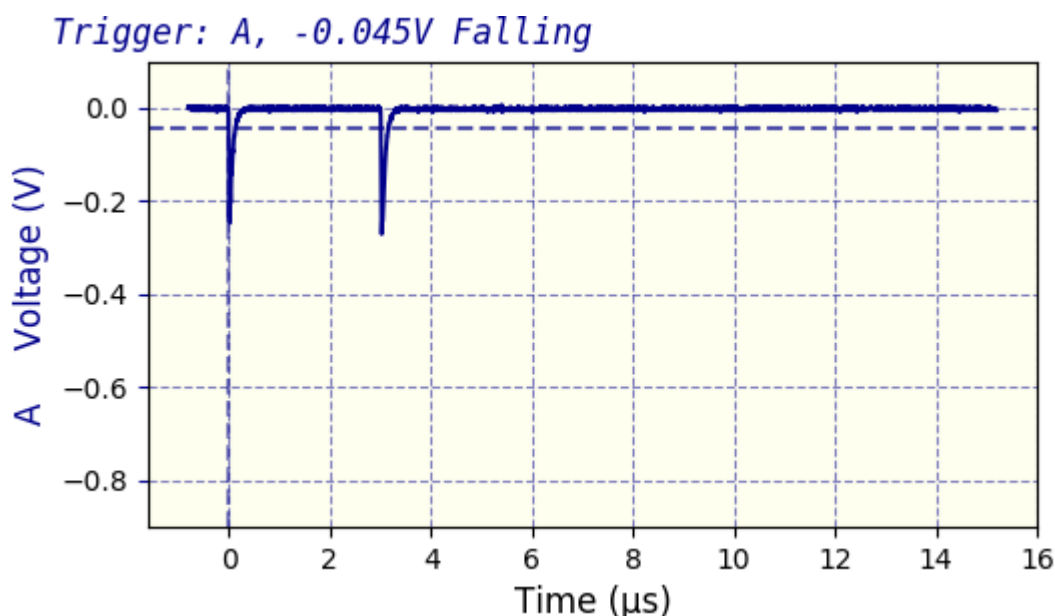
Wenn die Suche nach Doppelpulsen aktiviert ist, können zusätzliche Informationen gespeichert werden:

- Dateien mit dem Namensanfang *dpfilt* enthalten Informationen zu den aufgezeichneten Doppelpulsen im CSV-Format:

```
Nacc, Ndbble, Tau, delT(iChan), ... , V(iChan), ...
```

- *Nacc* : Zahl der akzeptierten Pulse
- *Ndbble*: Zahl der akzeptierten Doppelpulse
- *Tau*: Zeitlicher Abstand zwischen Triggerpuls und (erstem) Folgepuls (= gemessene μ -Lebensdauer)
- *delT(iChan)* : zeitlicher Abstand des Doppelpulses vom Triggerpuls in Kanal *iChan*
- *V(iChan)*: Pulshöhe in mV des Folgepulses in Kanal *iChan*
- Falls eingeschaltet, werden auch die vollständigen Rohdaten von allen erkannten Doppelpulsen in der Datei mit Namensbeginn *dpRaw* im *.yaml*-Format abgelegt. Damit können eigene Analysen der Rohdaten ausgeführt werden.

Es ist auch möglich, grafische Darstellungen von Doppelpulsen im Verzeichnis mit Namensbeginn *dpFig* abzulegen. Hier Beispiel für einen Doppelpuls in der Kamiokanne mit einem nach ca. 3 μ s zerfallenden Myon:



Zwei Hilfsanwendungen, *plotDoublePulses.py* und *makeFigs.py* ermöglichen das Einlesen der abgespeicherten Pulsformen und deren grafische Anzeige bzw. Abspeichern als Grafikdateien im *.png*-Format.

Eine weitere Hilfsanwendung, *fit_dpData.py*, führt die Anpassung einer Exponentialfunktion an die in Dateien mit Namensanfang *dpFilt* abgelegten individuellen μ -Lebensdauern. Zum Start einer Anpassung an die in der Datei *dpFilt.dat* abgelegten Daten im Bereich von 1.0 bis 15 μ s folgenden Befehl auf der Kommandozeile eingeben:

```
./fit_dpData.py dpFilt<Name> 1.0 15.
```

Details zu Konfiguration

Die Konfigurationsdateien für das USB-Oszilloskop, den Puffer-Manager und die Signalanalyse sind in jeweils einer Datei vom Typ *.yaml* im Unterverzeichnis *config/* festgelegt. Die Dateinamen sind in Dateien vom Typ *.daq* enthalten, also *Kanne.daq* für Kamiokanne und *Cosmo.daq* für die CosMO-Panels. Sie können entweder mit einem Text-Editor oder auch mit Hilfe der oben beschriebenen grafischen Oberfläche bearbeitet werden.

Die folgenden Beispiele gelten für den Kamiokanne-Detektor. Generell entspricht die in den Konfigurationsdateien verwendete Syntax der Markup-Sprache *yaml*. Insbesondere kennzeichnet Text nach einem `#`-Zeichen erklärende Kommentare oder enthält alternative, auskommentierte Konfigurationsoptionen, die durch Löschen des `#`-Zeichens aktiviert werden können.

Diese folgende Datei enthält die Dateinamen der einzelnen Konfigurationsdateien:

Inhalt der Datei *Kanne.daq*:

```
# file Kanne.daq
# -----
# Konfigurationsdateien für den Kamiokanne-Detektor

DeviceFile: config/PMpulse.yaml # Konfiguration des Oszilloskops
BMfile:     config/BMconfig.yaml # Konfiguration des Puffer-Managers
PFfile:     config/PFconfig.yaml # Konfiguration des Pulsfilters
```

Konfiguration des Oszilloskops

Die Oszilloskop-Konfiguration enthält Informationen zum Typ des Oszilloskops, die aktiven Kanäle und zum Trigger. Bei den Einstellungen zum Messbereich kann ein analoger Offset eingestellt werden, der zum Signal addiert wird. Bei unipolaren Pulsen, wie sie viele Detektoren produzieren, kann so eine Erhöhung der Auflösung sowie eine optimierte Darstellung erreicht werden. Wenn nur ein Kanal aktiv ist, werden Angaben für die weiteren Kanäle ignoriert.

Die Einstellungen zur Zeitbasis des Oszilloskops erlauben die Angabe der gesamten, aufzuzeichnenden Zeitdauer und die Anzahl der Messwerte - die Differenz zwischen zwei Abtastungen ergibt sich dann als Quotient dieser Werte. Die Einstellungen zum Trigger erlauben die Auswahl des Triggerkanals, die Triggerschwelle und die Richtung des Signals - also steigend (*Rising*) oder fallend (*Falling*). Es ist auch möglich, die Signalausgabe vor dem eigentlichen Triggerzeitpunkt zu starten - dazu dient der Eintrag *pretrig*, der den prozentualen Anteil der vor dem Triggerzeitpunkt ausgegebenen Werte angibt.

Es ist an dieser Stelle wichtig anzumerken, dass die vorgegebenen Werte nicht unbedingt denen entsprechen, die vom Oszilloskop unterstützt werden. Bei der Initialisierung werden die vorgegebenen Werte durch solche ersetzt, die unterstützt werden und den Vorgaben am nächsten kommen. Die tatsächlich eingestellten Werte werden nach Initialisierung des Oszilloskops in der Textkonsole angezeigt.

Ein typisches Beispiel einer Konfigurationsdatei für einen Kanal und den Betrieb an einer Photoröhre ist hier gezeigt (Datei `PMpulse.yaml`) :

```
# file PMpulse.yaml
# -----
# Konfigurationsdatei für PicoScope an Photoroehre

PSmodel: 2000a      # Modeltyp (2000a ist voreingestellt)

picoChannels:      [A]          # aktiver Kanal, [A,B] aktiviert beide Kanäle
ChanRanges:        [0.5, 0.2]   # Messbereich
ChanOffsets:       [0.4, 0.45]  # analoger Offset, der vor Anzeige addiert wird.

sampleTime: 16.E-6 # Zeit zwischen zwei Messpunkten in s
                # Zahl im wissenschaftlichen Format mit '.' und Exponent mit Vorzeichen
Nsamples: 3500     # Anzahl der aufzunehmenden Messpunkte

trgChan: A         # Kanal, auf den der Trigger wirkt
trgThr: -45.E-3    # Schwelle
trgTyp: Falling    # fallend (Falling) oder ansteigend (Rising)
trgTO: 5000        # Timeout, nach dieser Zeit wird einmal ausgelesen
pretrig: 0.05      # Anteil der vor dem Trigger ausgelesenen Daten
ChanColors: [darkblue, sienna, indigo] # Farben für Darstellung der Kanäle
```

Konfiguration des Pulsfilters

Die Konfiguration der Pulsanalyse spezifiziert die gewünschten Ausgabedateien und gibt die Pulsform und die Pulshöhe für jeden Kanal sowie die zu startenden Anzeige-Module an. Im ersten Teil des unten gezeigten Beispiels werden die gewünschten Ausgabedateien angegeben, also die Ausgabe aller Pulsparameter nach der Validierung der Triggerbedingung, die Pulsparameter oder die kompletten Rohdaten der Signalformen für gefundene Doppelpulsen oder auch die Abspeicherung der Signalformen als Grafiken. Im zweiten Teil der Datei werden die Pulsparameter für die Pulssuche angegeben, und zwar für die Näherung als Trapezförmiges Signal mit Anstiegszeit (*taur*), Haltezeit (*tauon*) und Abfalleit (*tauf*) sowie der Pulshöhe am Maximum (*pheight*) als Parameter. Ein solcher Eintrag kann für jeden aktiven Kanal angegeben werden; wird nur einer angegeben, gilt er für alle Kanäle.

Oft ist es notwendig, für den Triggerpuls andere Pulsparameter auszuwählen. Dazu kann optional mit dem Schlüsselwort *trgPulseShape* eine eigene Pulsdefinition für den Triggerpuls auf dem Triggerkanal gewählt werden.

Über das Schlüsselwort *modules* werden die gewünschten Echtzeit-Anzeigen angegeben. Möglich sind eine Darstellung der Rate akzeptierter Ereignisse in Abhängigkeit von der Zeit, eine einfache Anzeige der Signalthöhen für jedes akzeptierte Ereignis als Balkendiagramm und die Anzeige von Häufigkeitsverteilungen (Histogramme) von Pulsparametern. Die Konfigurationsparameter der gewünschten Histogramme werden im letzten Teil der Datei angegeben. Dies sind der Wertebereich, die Zahl der Intervalle, der Maximalwert

der Häufigkeit, ein Name für die angezeigte Größe und die Wahl einer linearen oder logarithmischen Skala. In der gegenwärtigen Version der Software sind nur die vier unten gezeigten Histogramme in genau dieser Reihenfolge implementiert.

Über den Schlüssel *doublePulse* kann die Doppelpussuche ggf. abgeschaltet werden, wenn man den Wert auf *false* setzt.

Ein Beispiel für die Analyse von Signalen einer Photoröhre ist hier gezeigt (Datei BFconfig.yaml):

```
# file PFKanne.yaml
# -----
# Konfigurationsdtei für den PulseFilter mit Kamiokanne

#logFile: pFilt      # speichere Angaben zu allen gefundenen Pulsen
logFile: Null        #      Null falls keine Ausgabe erwuenscht
logFile2: dpFilt     # speichere nur Doppelpulse, Null falls nicht erwuenscht
rawFile:  rawDP      # speichere Rohdaten von Doppelpulsen, put Null if not wanted
pictFile: pictDP     # Speichere Bilder von Doppelpulsen

# Puls-Parameter
#
#      /-----\
#     /         \
#    /           \
#   /             \
#  /               \
# /                 \
# r       on       f
#
# r = rise (Anstiegszeit), on (Haltezeit), f = falling (Abfallzeit)

# Pulsformen für die aktiven Kanaele
#      falls nur eine angegeben, gilt sie fuer all Kanaele
pulseShape:
- pheight: -0.035    # Pulshoehe
  taur   : 20.E-9    # Anstiegszeit
  tauon  : 12.E-9    # Haltezeit
  tauf   : 128.E-9   # Abfallzeit

# Pulsform fuer Triggerpuls
#      optional - falls nicht angegeben, nutze pulseShape
trgPulseShape:
- pheight: -0.045    # Pulshoehe
  taur   : 20.E-9    # Anstiegszeit
  tauon  : 12.E-9    # Haltezeit
  tauf   : 128.E-9   # Abfallzeit

NminCoincidence: 2  # min nbr to accept event

# Anzeigen, die gestartet werden sollen
modules: [RMeter, Display, Hists] # Rate, Pulsform, Histogramme

# Definition der Histogramme
histograms:
# min  max Nbins ymax      title                lin/log
- [0., 0.4, 50, 20., "noise Trg. Pulse (V)", 0]
- [0., 0.8, 50, 15., "valid Trg. Pulse (V)", 0]
- [0., 15., 45, 7.5, "Tau (µs)", 1]
```

```
- [0., 0.8, 50, 15., "Pulse Height (V)", 0]
```

```
doublePulse: true # Doppelpulssuche ein, false falls nicht erwünscht
```

Konfiguration des Puffer-Managers

Die Konfigurationsdatei für den Puffer-Manager muss meist nicht geändert werden. Sie gibt an, wie viele Puffer verwendet werden, welche Anzeige-Module gestartet werden und ob ein Log-File erstellt werden soll. Hier ein Beispiel (Datei BMconfig.yaml):

```
# file BMconfig.yaml
# -----
# Konfigurationsdatei des picoDAQ Puffermanagers

NBuffers: 16          # Anzahl der Puffer für aufgezeichnete Pulsformen
BMmodules: [mpOsci]   # BufferMan- Module, die gestartet werden sollen
verbose: 1            # setze Niveau der ausgegebenen Nachrichten (0, 1, 2)
LogFile: BMsum        # Schreibe log-Datei mit laufenden Angaben
```

Wahl der Konfigurationsparameter

Typisch für Messungen, bei denen Signal- und Rauschpulse vorkommen, ist die Notwendigkeit, einen optimalen Arbeitspunkt festzulegen, an dem Signale von Rauschpulsen getrennt werden. Hier ist die kritische Größe die Pulshöhe, die für den Trigger des Oszilloskops und im Pulsfilter angegeben wird. Ist die Schwelle zu hoch, verliert man Signale, wenn sie zu niedrig gewählt wird, werden zu viele Rauschpulse akzeptiert.

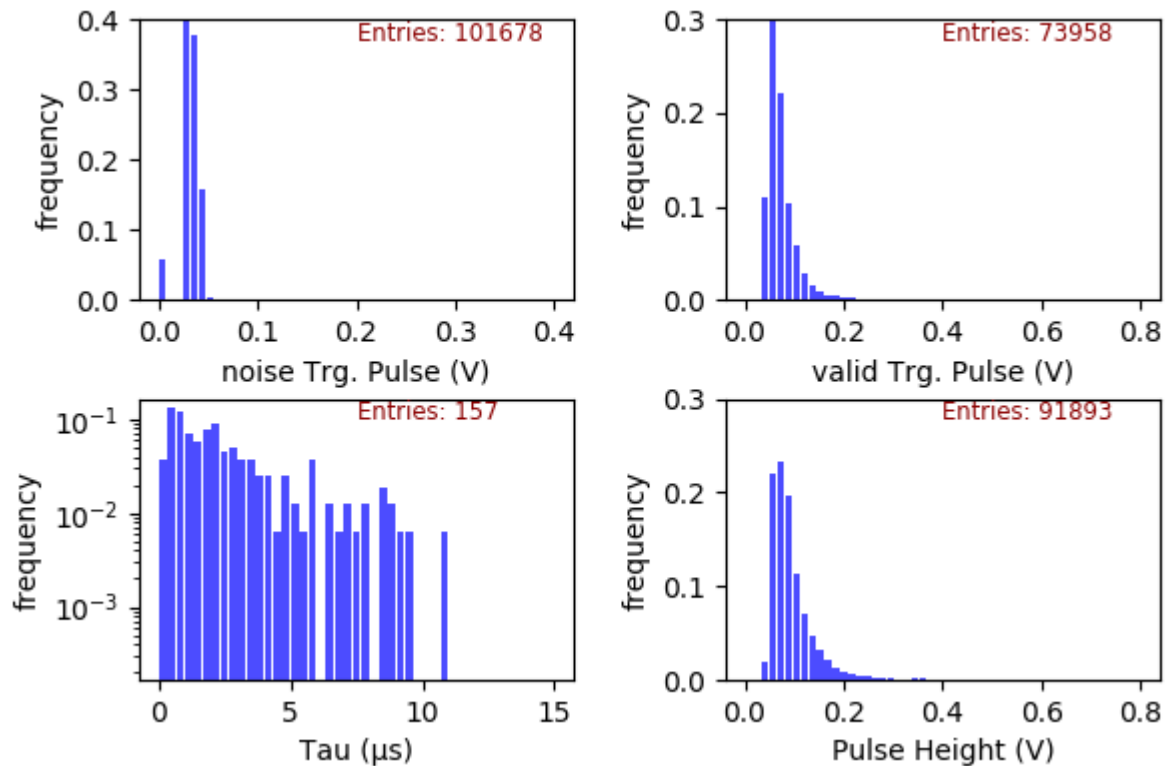
Die Triggerschwelle des Oszilloskops sollte niedriger als die Schwelle für den entsprechenden Kanal im Pulsfilter gewählt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass praktisch alle Signale, die der Pulsfilter akzeptiert, auch den Trigger ausgelöst haben.

Als Einstellungshilfe bietet der *PulsFilter* Häufigkeitsverteilungen der Pulshöhen für Signale, die

1. den Trigger ausgelöst, aber vom Pulsfilter nicht akzeptiert wurden
2. den Trigger ausgelöst und vom Pulsfilter akzeptiert wurden
3. die Pulshöhen der Pulse auf den übrigen Kanälen, falls mehr als ein Detektor angeschlossen wurde.

Wird eine Suche nach Doppelpulsen durchgeführt, wird in einem weiteren Histogramm die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Zeitdifferenzen zwischen dem Triggerpuls und dem ersten verzögerten Puls, also die individuelle Lebensdauern der zerfallenden Myonen, angezeigt.

Ein Beispiel zeigt die folgende Grafik:



Das beobachtete Spektrum der Signalhöhen fällt stark zu großen Werten ab, insbesondere bei kleinen Pulshöhen steigt die Rate sehr schnell an. Bei den CosMO-Panels ist keine klare Trennung zwischen Signal- und Rauschpulsen möglich. Hinweise zur Wahl der Schwelle finden sich weiter unten im Absatz *Messen mit picoCosmo*.

Beispielausgabe

Das Verzeichnis `./output` enthält Ergebnisse einer Langzeitmessung (ca. 20 Tage) mit der Kanne und einer etwa eintägigen Messung mit zwei Cosmo-Panels.

Die gepackte Datei `rawDP_.dat.zip` enthält die Rohdaten der aufgezeichneten Pulsformen für erkannte Doppelpulse. Die Skripte `plotDoublePulses.py` und `makeFigs.py` erlaubt das Einlesen der gepackten Datei und die grafische Darstellung der Doppelpulse bzw. die Speicherung als Grafikdateien im `.png`-Format. Die aus den Doppelpulsen bestimmten Lebensdauern sind in der Datei `dpKanne2_180403.dat` enthalten. Eine Anpassung einer Exponentialfunktion an gemessene Lebensdauern zwischen $1.5\ \mu\text{s}$ and $15\ \mu\text{s}$ kann mit dem Skript `fit_dpData.py` ausgeführt werden; das Ergebnis zeigt die Grafikdatei `life-ofMU_180403.png`.

Messen mit *picoCosmo*

Wichtig für das Verständnis der Messung der Eigenschaften der Myonen aus der kosmischen Strahlung ist eine gewisse Vertrautheit mit der Verwendung von Oszilloskopen, insbesondere die Notwendigkeit des Triggers und der Speicherfunktion zur Darstellung von kurzen, zufällig auftretenden Signalen. Zur Einführung kann dazu die Oszilloskop-Software *Picoscope* verwendet werden, die mit dem Oszilloskop auf CD ausgeliefert bzw. heruntergeladen werden kann. Als Download ist auch die Linux-Version der Software erhältlich.

Registrierung zufälliger Pulse mit einem Oszilloskop

Mit einem am Eingang des Oszilloskops angeschlossenen Mikrofon sollten Schüler zunächst versuchen, das akustische Signal eines kurzen Schallsignals darzustellen. Dazu müssen Zeitbasis, Messbereich und die Triggerbedingung entsprechend eingestellt werden.

Suche nach Signalen der Myon-Detektoren

Als zweiten Schritt kann man nun einen der Detektoren zum Nachweis von Teilchen aus der kosmischen Strahlung anschließen und wieder nach entsprechenden Pulsen suchen. Wenn Signale dargestellt werden, sollten die Einstellungen notiert werden, um sie später in die Konfiguration der der picoCosmo-Software eingeben zu können.

Koinzidenzen

Um sicher zu stellen, dass es sich bei den beobachteten Signalen nicht um Rauschen oder im Sensor selber erzeugte Pulse handelt, ist eine Koinzidenz-Messung mit zwei Sensoren notwendig. Dazu kann man zwei gleiche Detektoren oder auch eine Kanne und eines der CosMO-Panels verwenden. Wenn man auf den einen Kanal triggert und gleichzeitig beide Kanäle beobachtet, wird man Koinzidenzen sehen, wenn die Detektoren geometrisch so angeordnet sind, dass sie gleichzeitig von Spuren durchdrungen werden. Stellt man die Detektoren nebeneinander in weiter Entfernung auf, so werden keine Koinzidenzen beobachtet. Mit dieser einfachen Vorgehensweise kann also der Nachweis geführt werden, dass es sich um ein äußeres Phänomen - wie zum Beispiel den gleichzeitigen Durchgang von Teilchen durch beide Detektoren - handeln muss.

Ratenmessungen

Nach diesen Vorversuchen sollten nun mit Hilfe von picoCosmo Messungen der Koinzidenzrate unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden. Dazu sollten mindestens zwei Panels verwendet werden, um Rauschsignale zu unterdrücken. Am besten stellt man in der Oszilloskop-Konfiguration eine Samplingzeit von $0.8 \mu\text{s}$ mit 200 Samples einstellen. Dazu gibt es eine vorbereitete Konfiguration, *CosmoRate.daq*.

Nach dem Start der Datennahme wird im Fenster "RateDisplay" der zeitliche Verlauf der Koinzidenzrate angezeigt. Die Fluktuationen der Rate sind eine Folge der zufälligen Natur der registrierten Ereignisse - man kann die angezeigte Kurve gut "per Auge" mitteln, um eine zuverlässige Ratenbestimmung vorzunehmen. Ein genaueres Ergebnis erhält man, wenn man die im Textfeld des RateDisplays angezeigte Anzahl akzeptierter Ereignisse durch die ebenfalls angezeigte Gesamtlaufzeit dividiert.

Wie in den Histogrammen oben gezeigt, ist die Wahl einer Schwelle für akzeptierte Pulse wichtig, um eine hohe Effizienz für Myonen bei hinreichend guter Unterdrückung von Rauschsignalen zu erreichen. Die Koinzidenzrate, kann man im Fenster *RateDisplay* ablesen. Bei niedriger Wahl der Schwelle ist sie praktisch unabhängig von der Schwelle, sinkt aber bei zu hohen Schwellenwerten schnell ab. Für die CosMO-Panels haben sich Schwellen von ca. 30 mV für den Triggerkanal und 35 mV im Pulsfilter als günstig erwiesen.

Mit diesem experimentellen Set-Up können nun die Eigenschaften des eben entdeckten Phänomens untersucht werden. Interessant sind die folgenden Fragen:

- **Aus welcher Richtung kommen die Signale ?** dazu werden die Detektoren übereinander, nebeneinander oder um 30° und 60° gedreht angeordnet und die gemessenen Raten verglichen.
- **Lassen sich die Signale abschirmen ?** Dazu können verschieden dicke Materialien auf einem Tisch über den Detektoren angebracht und die jeweiligen Raten gemessen werden. Eine überzeugende Bestätigung, dass die beobachteten Teilchen Materie leicht durchdringen, erhält man, wenn man

Messungen im Keller mit solchen aus den oberen Stockwerken vergleicht. Achtung: wegen der statistischen Natur haben die gemessenen Raten eine statistische Unsicherheit, die durch die Poisson-Verteilung beschreiben ist. Der Fehler auf die gesamte gemessene Anzahl N ist gleich der Wurzel aus N , also $\Delta N = \sqrt{N}$, der relative Fehler auf die Rate also $\Delta N/N = 1/\sqrt{N}$.

Eigenschaften der Detektoren und Korrekturen

Eine quantitative Untersuchung des Signal-zu-Rauschverhältnisses in Abhängigkeit von der Schwelle wird möglich, wenn man drei Detektoren zur Verfügung hat. Nutzt man zwei Detektoren in Koinzidenz, so hat man mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit einen echten Teilchendurchgang identifiziert. Jetzt kann man überprüfen, ob auch der dritte Detektor angesprochen hat. Die Ansprechwahrscheinlichkeit ist also die Zahl der Dreifachkoinzidenzen, N_{123} , dividiert durch die Zahl der Zweifachkoinzidenzen, N_{12} .

Zur einfachen Bestimmung werden im Text-Fenster des BufferManagers die Zahlen der registrierten Zwei- und Dreifachkoinzidenzen angezeigt. Auch am Ende der log-Datei, in der die Pulsparameter abgespeichert werden, findet sich diese Information.

Wegen des Triggerkanals, der immer ansprechen muss, können Zweifachkoinzidenzen auf zwei Arten entstehen: Panel 2 hat angesprochen und Panel 3 nicht, **oder** Panel 3 hat angesprochen und Panel 2 nicht. Dreifachkoinzidenzen werden beobachtet, wenn zusätzlich zum Triggerkanal Panel 2 **und** Panel 3 ansprechen. Wenn man - vereinfachend - annimmt, dass alle Detektoren in etwa die gleiche Ansprechwahrscheinlichkeit ϵ haben, so ergibt sich für die Anzahlen der Zwei- und Dreifachkoinzidenzen, N_2 bzw. N_3 :

$$\begin{aligned} N_2 &= 2 \cdot \epsilon \cdot (1 - \epsilon) \cdot N \\ N_3 &= \epsilon^2 \cdot N \end{aligned}$$

N ist dabei die Zahl der insgesamt aufgetretenen Myonen, die Kanal 1 getriggert haben. Bildet man das Verhältnis von N_2 und N_3 , so kann die Ansprechwahrscheinlichkeit bestimmt werden:

$$\epsilon = 1 - [N_2 / (2 \cdot N_3 + N_2)]$$

Die wahre Myon-Rate ergibt sich nun durch Korrektur der gemessenen Koinzidenzraten auf die Ansprechwahrscheinlichkeit.

Verwendet man zwei Panels mit gleicher Ansprechwahrscheinlichkeit ϵ , so ist die Rauschrate praktisch Null, die Zahl der Myonen ergibt sich also aus der Zahl der Zweifachkoinzidenzen als $N_\mu = N_2 / \epsilon^2$.

Bei Verwendung von drei Panels und der Bedingung, dass mindestens zwei davon angesprochen haben, ergibt sich die Zahl der Myonen nach etwas Kombinatorik aus der Zahl der Zweifach- und Dreifachkoinzidenzen zu

$$N_\mu = (N_2 + N_3) / (2 \cdot \epsilon^2 - \epsilon^3)$$

Für eigene Auswertungen zum Ansprechverhalten der Detektoren können die für jedes akzeptierte Ereignis gespeicherten Puls-Parameter verwendet werden. Damit ist dann auch die Messung der individuellen Ansprechwahrscheinlichkeit für jedes Panel möglich. In jeweils einer Zeile der Datei im CSV-Format werden für jedes Myon die Ereignis-Nummer, der Zeitpunkt relativ zum Run-Start sowie die Pulshöhen und Zeitpunkte relativ zum Trigger für Pulse auf jedem Kanal angegeben:

`EvNr, EvT, V(1), T(1), ... , V(NC), T(NC)`

Eine Pulshöhe von Null bedeutet dabei, dass kein Signal gefunden wurde.

Anmerkung:

Prinzipiell kann die Ansprechwahrscheinlichkeit auch mit nur zwei Panels gemessen werden. Dazu wählt man für den Triggerkanal eine sehr hohe Schwelle, so dass nur echte Myonen den Trigger auslösen. Im Pulsfilter kann über die Einstellung `NminCoincidence: 1` erreicht werden, dass ein validiertes Triggersignal ausreicht, um ein Ereignis zu akzeptieren. Die Zahl der Zweifachkoinzidenzen dividiert durch die Zahl der akzeptierten Ereignisse ergibt die Ansprechwahrscheinlichkeit des zweiten Panels. Allerdings ist zu beachten, dass immer noch ein Anteil an Rauschpulsen fälschlich als Myon-Ereignis akzeptiert wird und dadurch die Effizienz des zweiten Panels unterschätzt wird.

Berücksichtigung der **Auslese-Totzeit**

Der Transfer der Daten vom Oszilloskop über die USB-Schnittstelle in den Pufferspeicher benötigt eine gewisse Zeit, während der keine Signale aufgezeichnet werden können. Diese sogenannte "Totzeit" zeigt der Buffer Manager im Grafik-Fenster an. Die gesamte aktive Zeit, also die Laufzeit verringert um die Totzeit und ggf. Zeiten, die im *paused*-Zustand verbracht wurden, werden am Ende in den Log-Dateien ausgegeben. Damit lässt sich direkt die um die Totzeit korrigierte Rate berechnen:

$$R = N / T_{\text{life}}.$$

Betrachten wir zum Abschluss ein typisches **Beispiel** mit 3 CosMO-Panels, Triggerschwelle 27.5 mV, PulseFilter 30 mV: → 11.9 Hz Trigger Rate, 3.9 Hz Myon Rate, 79,8% Totzeit (auf Raspberry Pi) $N_2 = 635$, $N_3 = 2376$ → $\epsilon = 88.2$, $2 \cdot \epsilon^2 - \epsilon^3 = 0.870$ Auf Effizienz und Totzeit korrigierte Myon-Rate: $3.9 \text{ Hz} / 0.870 / 0.798 =$
5.6 Hz Fläche der Panels: $20 \times 20 \text{ cm}^2$ → Myon-Rate **$R_\mu = 0.014 / \text{cm}^2 / \text{s}$**

Messung der Myon-Lebensdauer

Wenn Myonen im Detektor oder in dessen Nähe zur Ruhe kommen, zerfallen sie in einer typischen mittleren Lebensdauer, die einer Exponentialverteilung folgt. Dieser Teilchenzerfall ist völlig analog zum Zerfall radioaktiver Kerne. Myonen zerfallen in je ein Elektron und zwei Neutrinos. Wenn die Elektronen den Detektor treffen, werden auch sie nachgewiesen, und zwar zu einem um die individuelle Lebensdauer des zerfallenen Myons verzögerten Zeitpunkt. Die Signatur des Zerfalls eines gestoppten Myons ist also ein Doppelpuls. Ein Oszilloskop-Bild eines solchen Ereignisses wurde schon oben gezeigt.

Der Anteil gestopppter Myonen liegt nur im Promille-Bereich, und deshalb muss die Suche nach Doppelpulsen automatisiert werden, um genügend Ereignisse aufzusammeln. Es ist aber durchaus möglich, durch hinreichend lange Beobachtung des Oszilloskop-Bildschirms einen Doppelpuls zu sehen.

In *picoCosmo* werden die aufgezeichneten Signale des USB-Oszilloskops nach Doppelpulsen durchsucht und die Daten der identifizierten Ereignisse abgespeichert. Zur Messung der Myon-Lebensdauer gibt eine vorbereitete Konfigurationsdatei, *CosmoLife.daq*, die als Grundlage für eigene Messungen verwendet werden kann.

picoCosmo führt die Doppelpuls-Suche in Echtzeit aus und speichert wahlweise unterschiedlichste Informationen ab:

1. Pulshöhe und Zeitpunkt relativ zum Trigger in allen Ereignissen mit identifiziertem Doppelpuls
2. die vom Oszilloskop ausgegebenen Rohdaten
3. die Rohdaten als grafische Darstellung (.png-Format)

Mit diesen Daten sind unterschiedliche Auswertungen möglich.

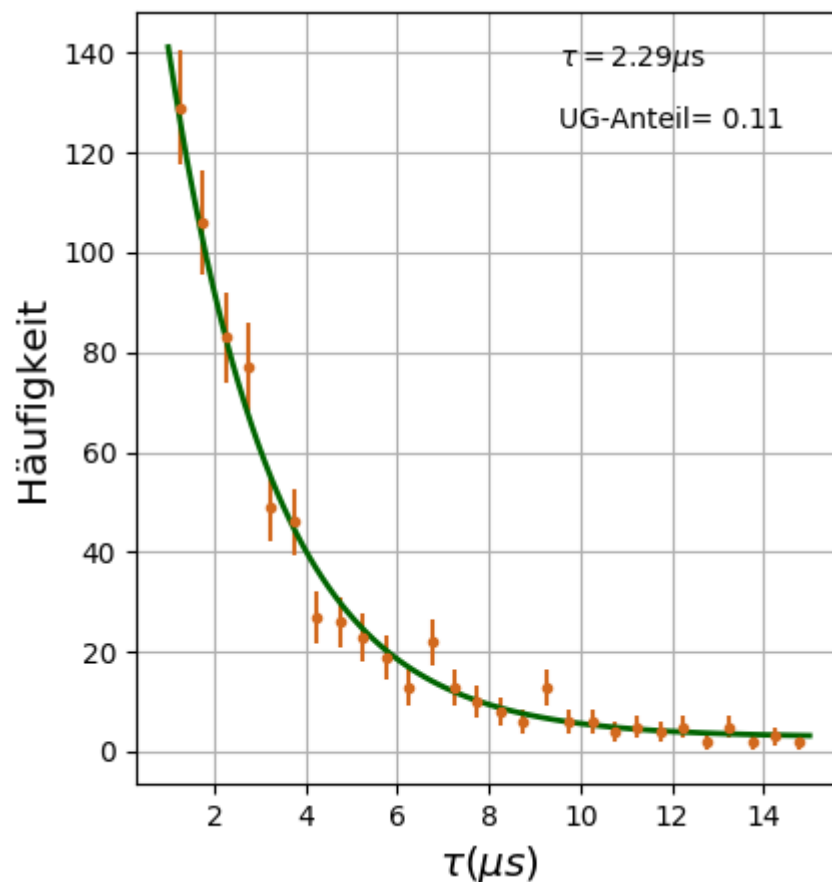
Im einfachsten Fall verwendet man die Grafiken und lässt Schüler die jeweils beobachteten Lebensdauern in eine Häufigkeitsverteilung eintragen. Dazu bietet sich Gruppenarbeit und eine entsprechende Aufteilung des Datensatzes an - dann können die Gruppenergebnisse statistisch kombiniert, d. h. in eine einzige Häufigkeitsverteilung eingetragen werden.

Mit den Daten zu den Parametern der Doppelpulse können eigene Auswertungen ausgeführt werden. Für jedes Ereignis mit einem Doppelpuls werden Anzahl der akzeptierten Myonen, die laufende Nummer des Doppelpulses, der Zeitpunkt des ersten verzögerten Pulses sowie daran anschließend die Zeitpunkte relativ zum Trigger und die registrierten Pulshöhen der verzögerten Pulse für jeden Kanal dargestellt:

```
Nacc, Ndb1e, Tau, dT(1) , ..., dT(NC), V(1), ..., V(NC)
```

Eine Pulshöhe von Null bedeutet dabei, dass kein verzögertes Signal im entsprechenden Kanal gefunden wurde.

Aus der dritten Spalte dieser Datei lässt sich die Häufigkeitsverteilung der Lebensdauern gewinnen:



Mit Hilfe des *python*-Programms *fit_dpData.py* wurde eine Exponentialfunktion an die Daten angepasst. Die Grafik enthält ca. 700 mit den Cosmo-Panels aufgezeichnete Doppelpulse im Bereich von $1\mu s$ - $15\mu s$.

Neben echten Myon-Zerfällen sind im Datensatz auch Zufällige verzögerte Koinzidenzen enthalten, die entstehen, wenn zwei Myonen oder auch ein Myon und ein Rauschpuls kurz nacheinander im Detektor eintreffen. Die Wahrscheinlichkeit solcher Zufallskoinzidenzen in einem Zeitfenster ΔT lässt sich über die Einzelrate R der Panels bestimmen:

$$W_z = \Delta T \cdot R_p$$

Die insgesamt während der gesamten Messzeit mit N_μ registrierten Myonen aufgetretenen Zufallskoinzidenzen sind also:

$$N_z = \Delta T \cdot R_p \cdot N_\mu \cdot N_{\text{panels}}$$

Setzt man Zahlen ein, so sieht man, dass Zufallskoinzidenzen mit 10 - 20% zu den Ereignissen mit Doppelpulsen beitragen. In der oben gezeigten Anpassung wurde daher zusätzlich zur Exponentialfunktion ein konstanter Anteil aus Zufallskoinzidenzen berücksichtigt.

Neben den Zufallskoinzidenzen ist ein weiterer physikalischer Effekt relevant: Negativ geladene, gestoppte Myonen werden von Atomkernen angezogen und lösen dort Kernreaktionen aus. Bei schweren Kernen wie Blei ist die damit assoziierte Lebensdauer kurz. Zeiten unterhalb von $1 \mu\text{s}$ sollten deshalb nicht in der Anpassung berücksichtigt werden. Bei leichteren Kernen (z.B. Kohlenstoff im organischen Material der Szintillator-Panels) liegt die Lebensdauer für Myon-Einfang allerdings in der gleichen Größenordnung wie die Myon-Lebensdauer und kann das Ergebnis verfälschen.

Liste der Dateien im Projekt *picoCosmo*

- `CosmoGui.py`
Grafische Benutzeroberfläche zum Editieren der Konfigurationsdateien und Starten des Skripts `runCosmo.py`
- `runCosmo.py`
Datennahme und Anzeigen wie in den Konfigurationsdateien (Vorgabe *default.daq* für zwei Cosmo-Panels mit Messung der μ -Lebensdauer)
- `README_de.md` bzw. `README_de.pdf`
Deutschsprachige Beschreibung
- `Anleitung.md` bzw. `Anleitung.pdf`
Deutschsprachige Anleitung

Module

- `picocosmo/PulseFilter.py`
Analyse der vom Oszillographen gelieferten Pulsformen;
Auslese und Anzeige mittels der Module im Projekt *picoDAQ*

Konfigurationsdateien

- `default.daq`
Konfiguration für zwei Cosmo-Panels
- `Cosmo.daq`
Konfiguration für zwei Cosmo-Panels

- `Kanne.daq`
Konfiguration für eine Kanne mit Photoröhre und Pulslänge 150 ns
- `CosmoRate.daq` Ratenmessungen mit zwei oder mehr CosMO-Panels
- `CosmoLife.daq` Messung der Myon-Lebensdauer mit zwei oder mehr CosMO-Panels
- `config/BMconfig.yaml`
Konfiguration für den Puffermanager
- `SiPMpulse.yaml`
Konfiguration des Picoscopes für SiPM-Pulse
- `PMpulse.yaml`
Konfiguration des Picoscopes für Photomultiplier-Pulse
- `SiPMpulse2000.yaml`
Konfiguration eines Picoscopes 2202A für SiPM-Pulse
- `PFcosmo.yaml`
Konfiguration des PulseFilters für Cosmo-Panels
- `PFKanne.yaml`
Konfiguration des PulseFilters für eine Kanne
- `PFcosmo2000.yaml`
Konfiguration des PulseFilters für Cosmo-Panels an Picoscope 2202A

Beispiele

- `output/CosmoPanels_180514`
Beispielausgabe einer Datennahme mit den Cosmo-Panels
 - `dpFilt_180514_1806.dat` enthält die Daten von aufgezeichneten Doppelpulsen
 - `rawDP_180403.zip` enthält gepackte Rohdaten der Doppelpulse
- `output/Kanne_180403`
Beispielausgabe einer Datennahme mit einer Kanne
 - `dpKanne2_180403.dat` enthält die Daten von aufgezeichneten Doppelpulsen
 - `rawDP_180514.zip` enthält gepackte Rohdaten der Doppelpulse
- `output/fit_dpData.py`
python-Skript zur Anpassung einer Exponentialfunktion an Daten in Dateien *dpFilt.dat**
- `output/makeFigs.py`
Erzeugen von Grafiken aus Dateien *dpRaw.dat**
- `output/plotDoublePulses.py`
Anzeigen von Doppelpulsen aus Dateien *dpRaw.dat* als Grafiken auf dem Bildschirm