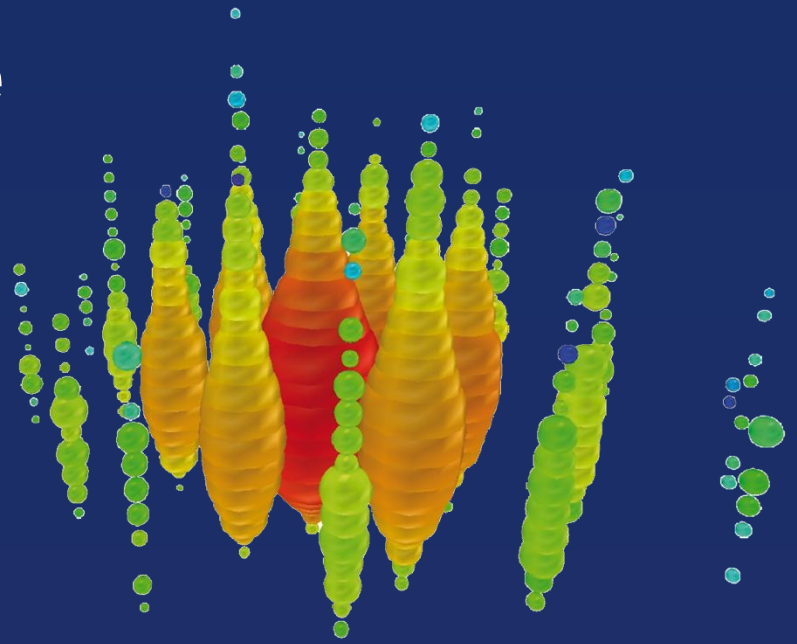
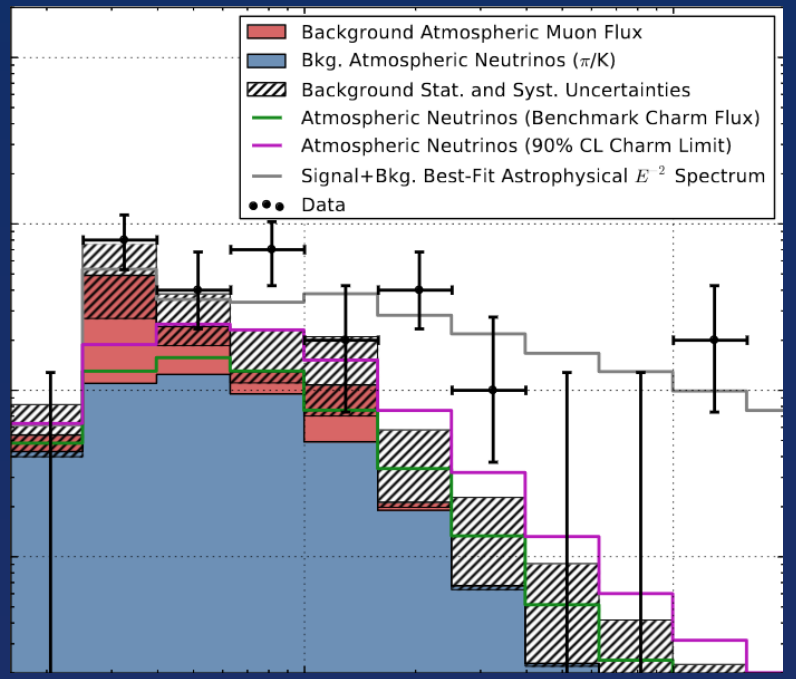
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



IceCube Masterclass 2025
Datenanalyse





Oliver Janik
Erlangen, 10.07.25

Rohdaten

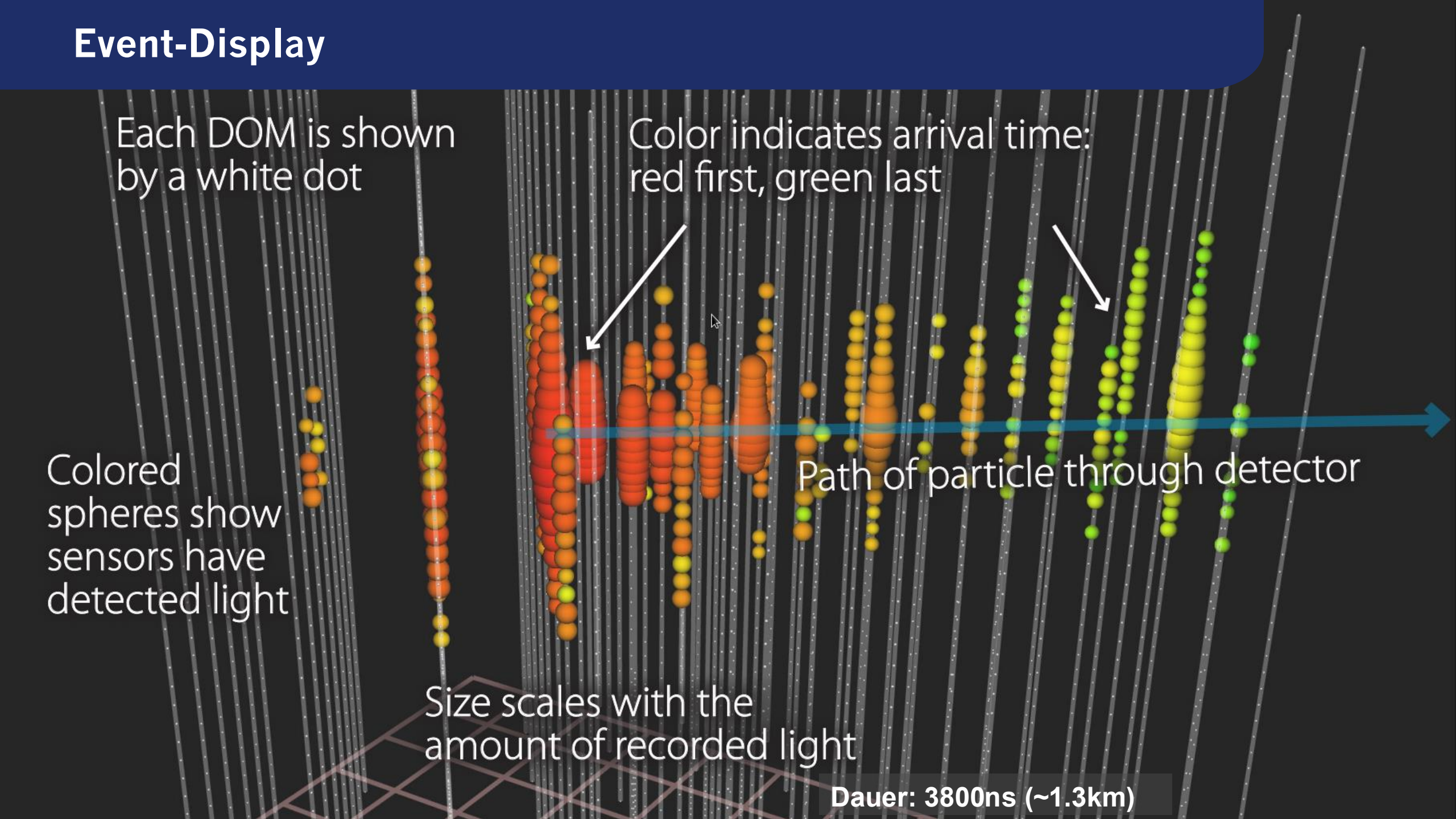
- Jeder DOM registiert eigenständig Lichtsignale an seiner **Position (Zeit, Menge)**

- Wenn genügend DOMs “gleichzeitig” ein Signal melden bauen wir aus den Informationen aller DOMs ein **Event**



Wie sehen solche Events aus?

Event-Display



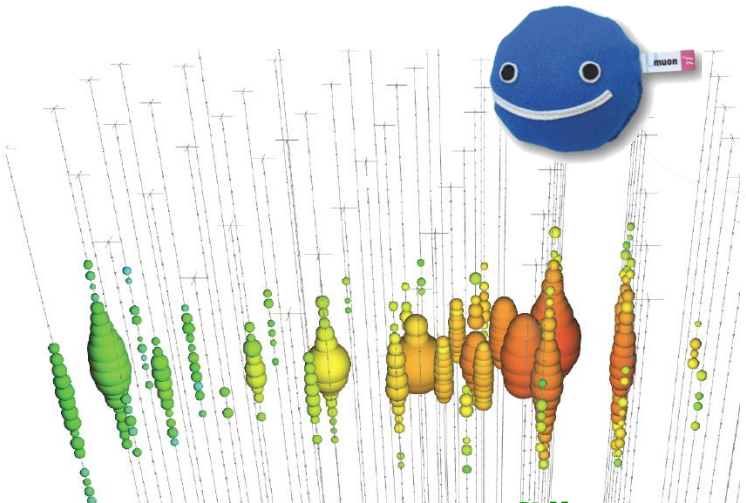
Signal

Spur (englisch Track):

Das Neutrino “stößt” durch ein $W^{+/-}$ einen Kern an



$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$$



Gute Richtungsauflösung,
schlechte Energieauflösung

Erinnerung:
Das Neutrino an sich ist unsichtbar. Wir sehen nur Reaktionsprodukte

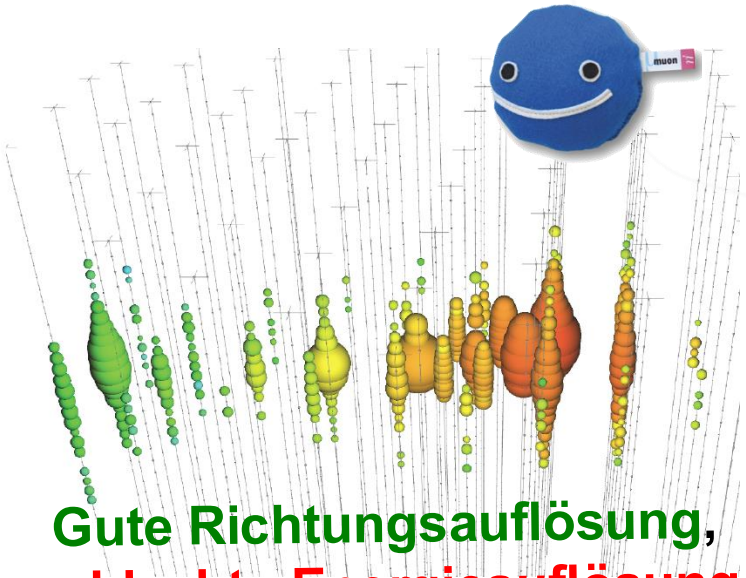
Signal

Spur (englisch Track):

Das Neutrino “stößt” durch ein $W^{+/-}$ einen Kern an



$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$$



Gute Richtungsauflösung,
schlechte Energieauflösung

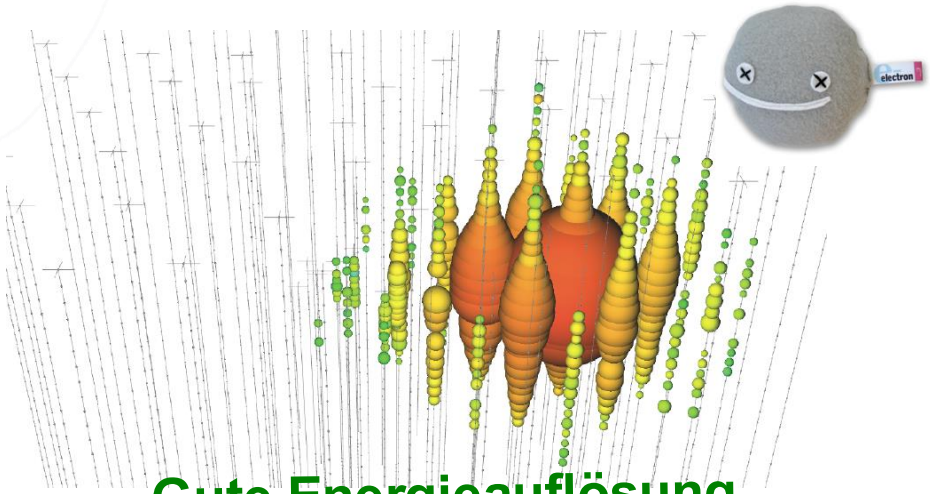
Cascade:

Das Neutrino “stößt” durch ein $W^{+/-}$ oder Z^0 einen Kern an



$$\nu_e + N \rightarrow e + X$$

$$\nu_x + N \rightarrow \nu_x + X$$



Gute Energieauflösung,
schlechte Richtungsauflösung

Signal-Identifikation

~10 min

http://icecube.wisc.edu/viewer/quiz

?

?

Sind das alles Neutrinos?

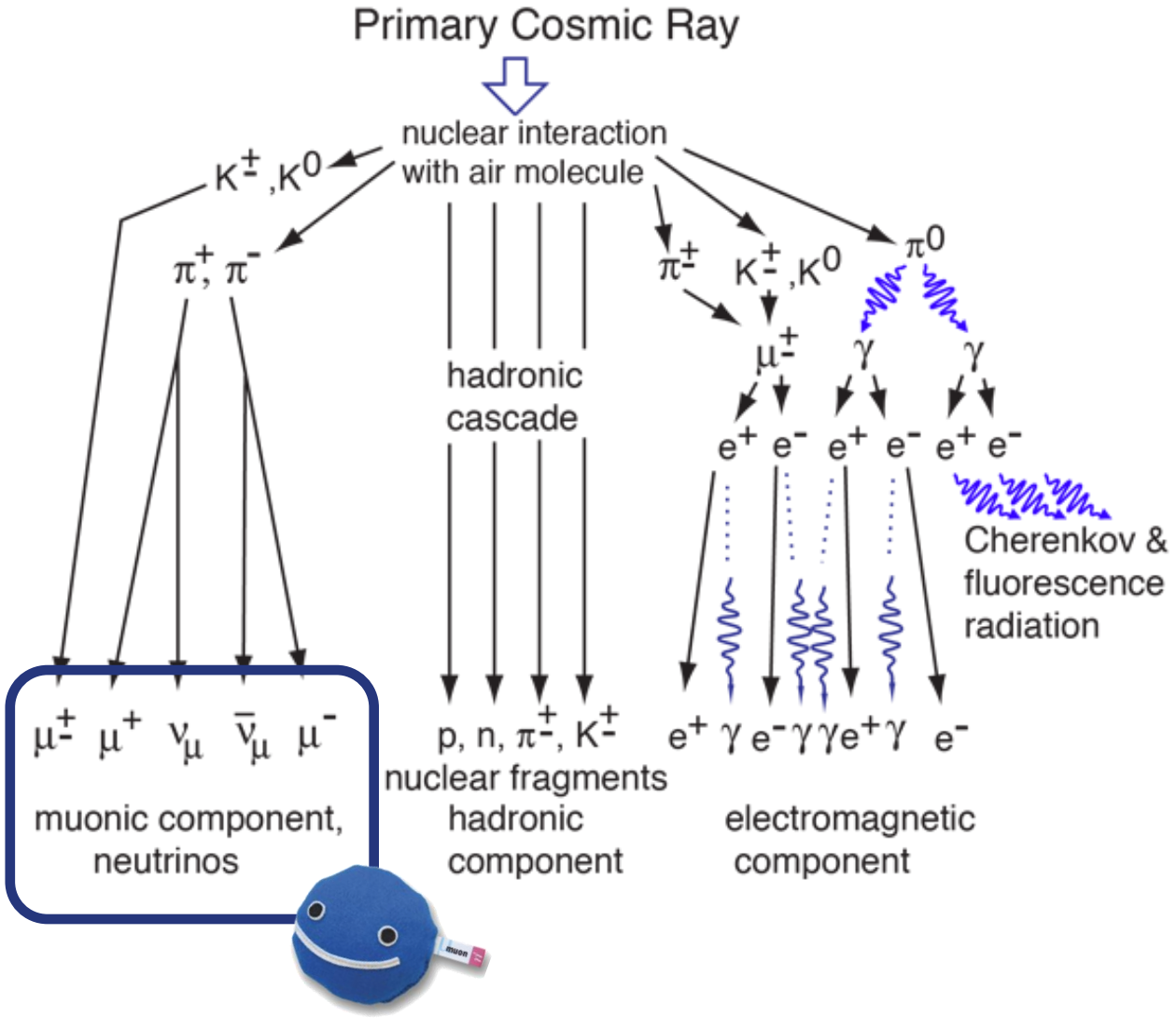
?

?

Untergrund

Wir wollen Neutrinos von außerhalb unseres Sonnensystems finden.

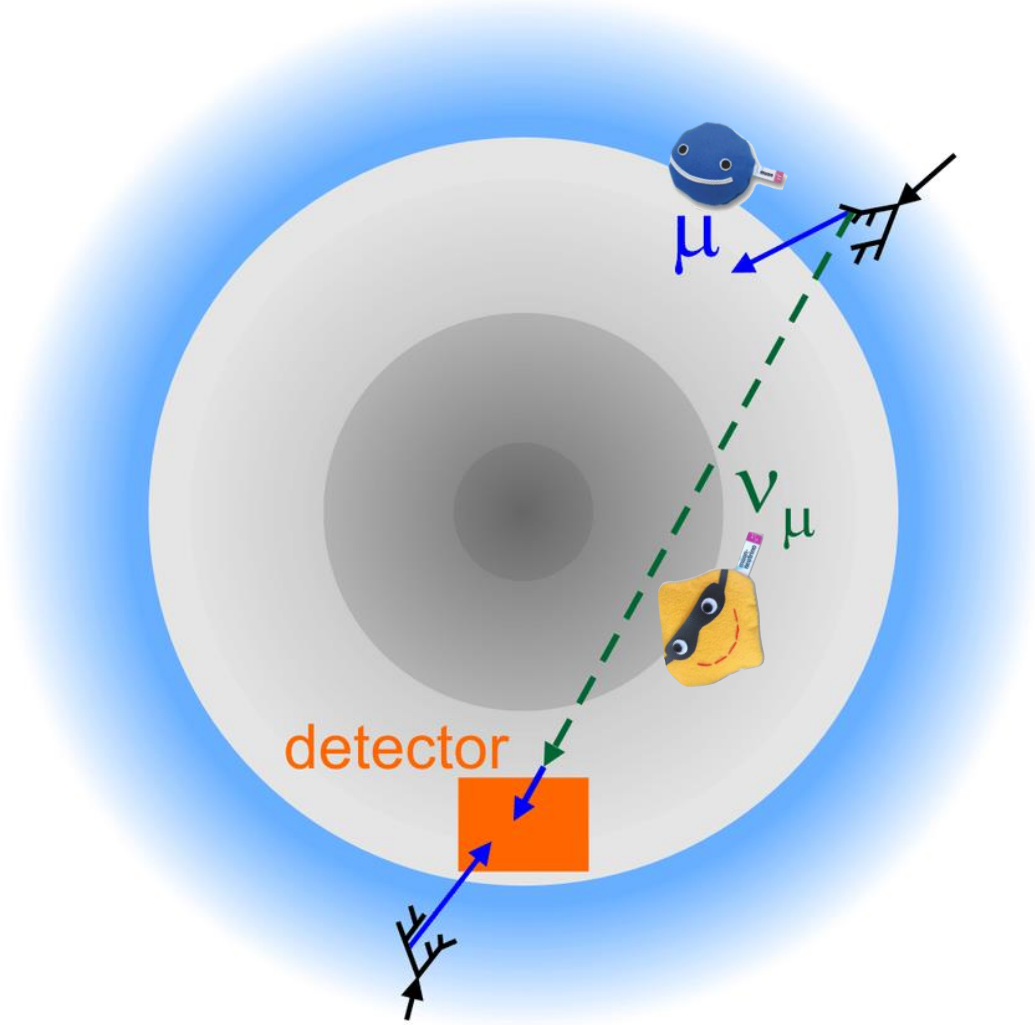
Problem: Wir haben verschiedene Arten von Untergrund.



Untergrund

Hochenergetische **atmosphärische Muonen** von Luftschauern können bis in den Detektor vordringen.

Atmosphärische Muonen können nur von oben kommen.



Atmosphärische Neutrinos aus Luftschauern können ebenfalls im Detektor reagieren.

Atmosphärische Neutrinos können von allen Seiten kommen.

Untergrund

Finding needles in a haystack



275 million atmospheric muons are detected daily, created by interactions of cosmic rays with the earth's atmosphere



8,250 atmospheric neutrinos are detected monthly



only 10s of cosmic neutrinos are detected per year

?

?

Habt ihr Ideen wir wir Untergrund von

? **Signal trennen können?** ?

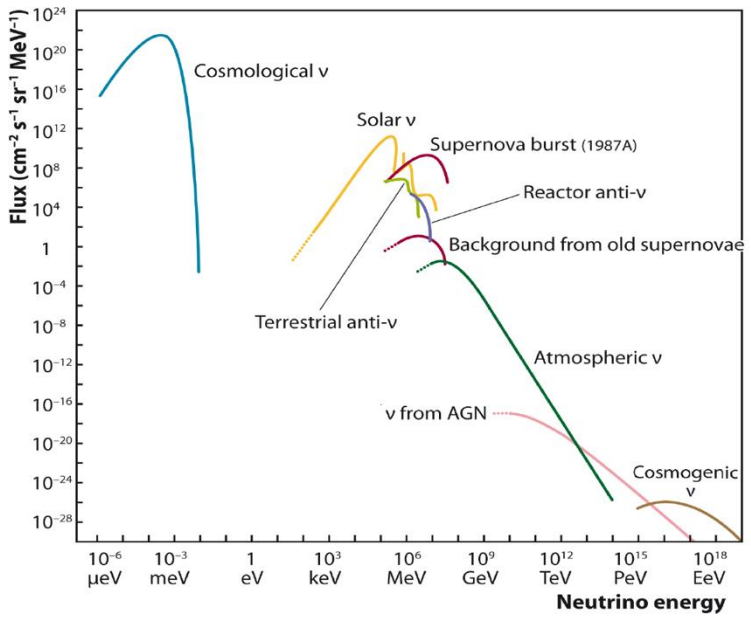
Untergrund-Vermeidung

Tipps:

Neutrinos produzieren kein Licht.

Wir können die Entwicklung des Events ns-genau auflösen.

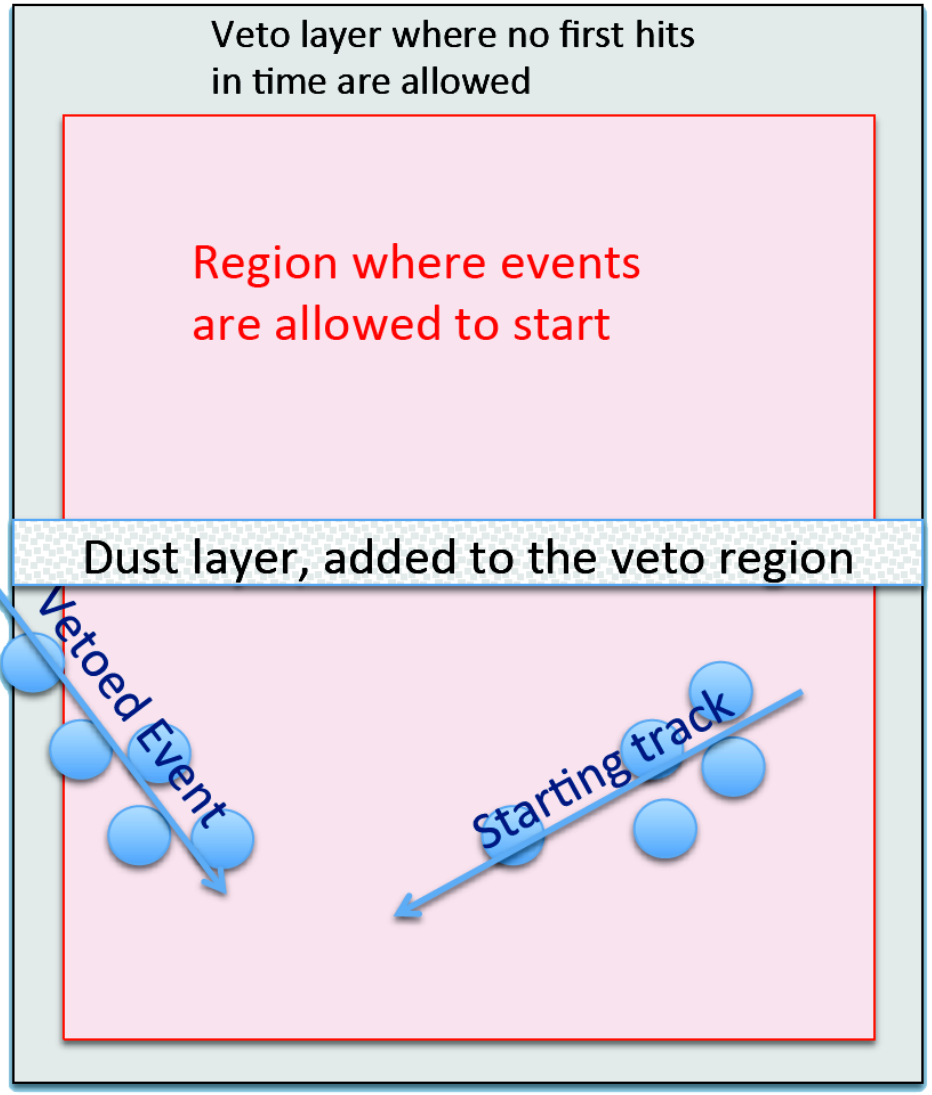
Wir können die Energie messen.



? ? ? ?

Habt ihr Ideen wir wir Untergrund von Signal trennen können?

Der HESE-Ansatz



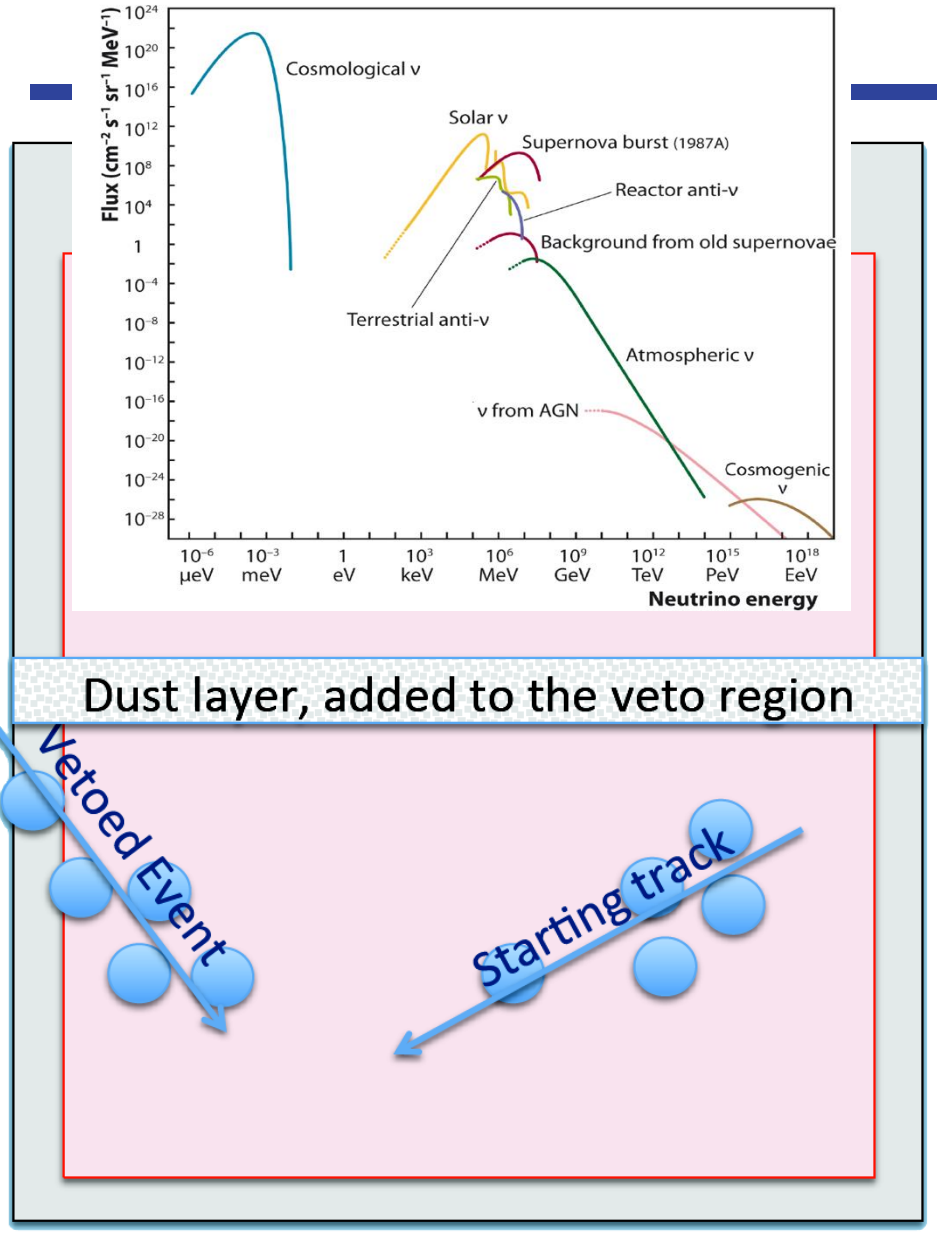
Gefordert:
Das Event soll im Detektor starten

Genauer:
Im Vetobereich dürfen nur 3 PE der frühesten 250 PE

Ergebnis:
Muonen der Höhenstrahlung werden verworfen, Neutrinos (alle!!) überleben

Was ist mit den atmospärischen Neutrinos??

Der HESE-Ansatz



Gefordert:
Das Event soll im Detektor starten

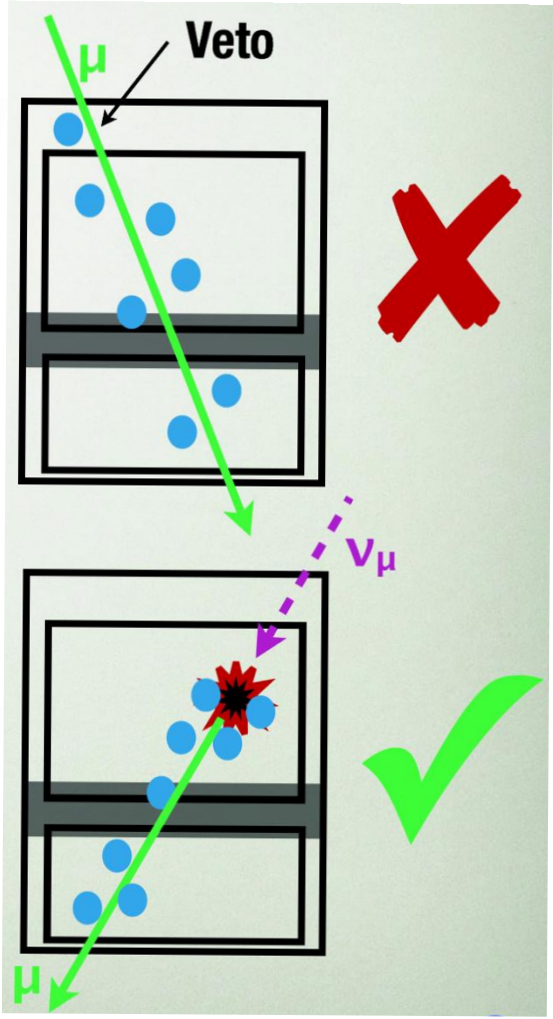
Gefordert:
Das Event soll hochenergetisch (mehr als 6000 PE) sein.

Ergebnis:
Großteil der atmospärischen Neutrinos aber auch ein Teil des Signals wird verworfen.

Anwendung des HESE-Vetos

~15 min





http://icecube.wisc.edu/viewer/training



Datenanalyse

- Nach 5 Jahren haben wir 28 Ereignisse gemessen!
- Sind 28 Ereignisse signifikant?
- Wie viel (Untergrund) erwarten wir?

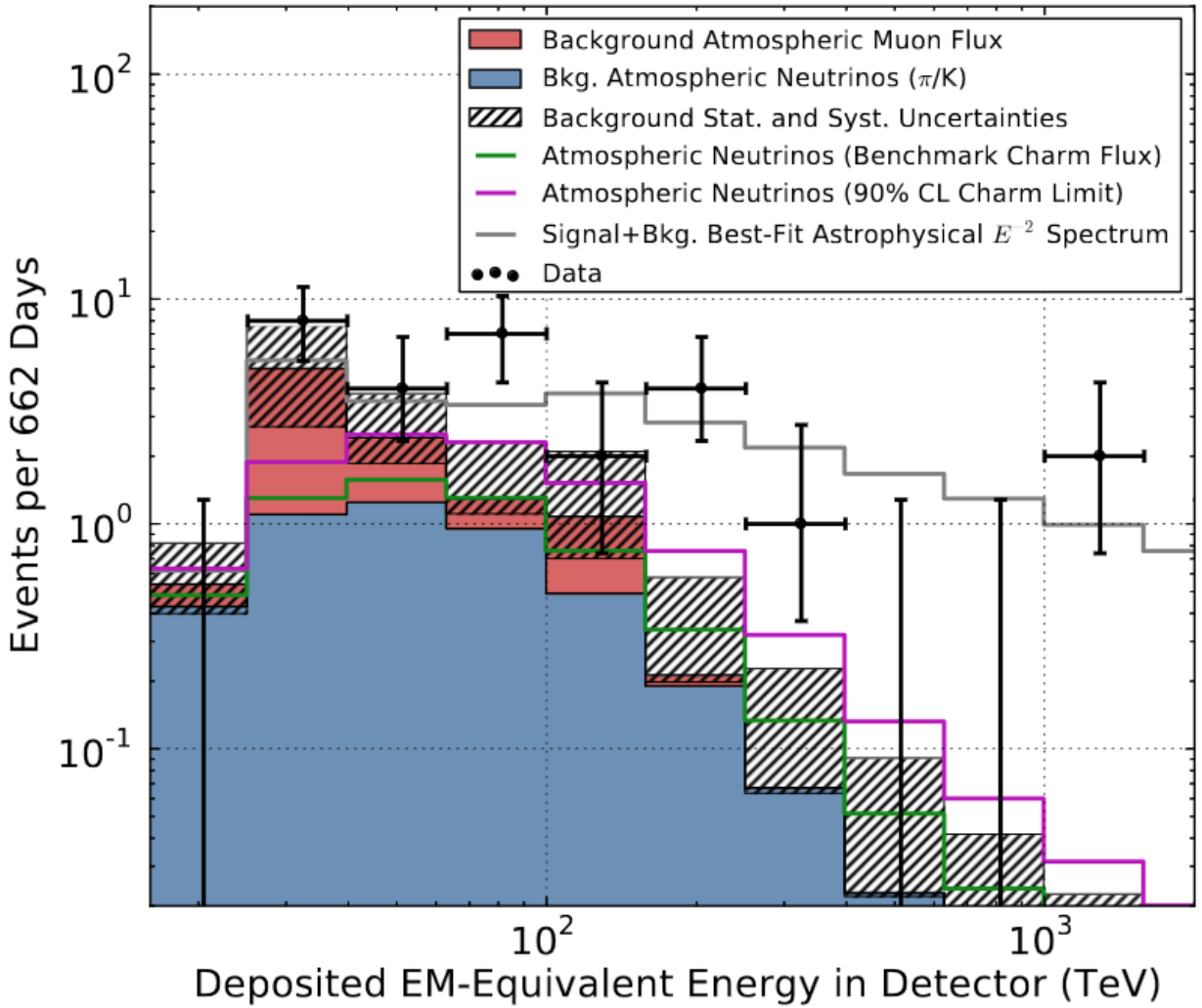
- Dazu haben wir eine komplette Computer-Simulation des Detektors und des bekannten Untergrunds!

- Es werden dann experimentelle mit simulierten Daten verglichen.

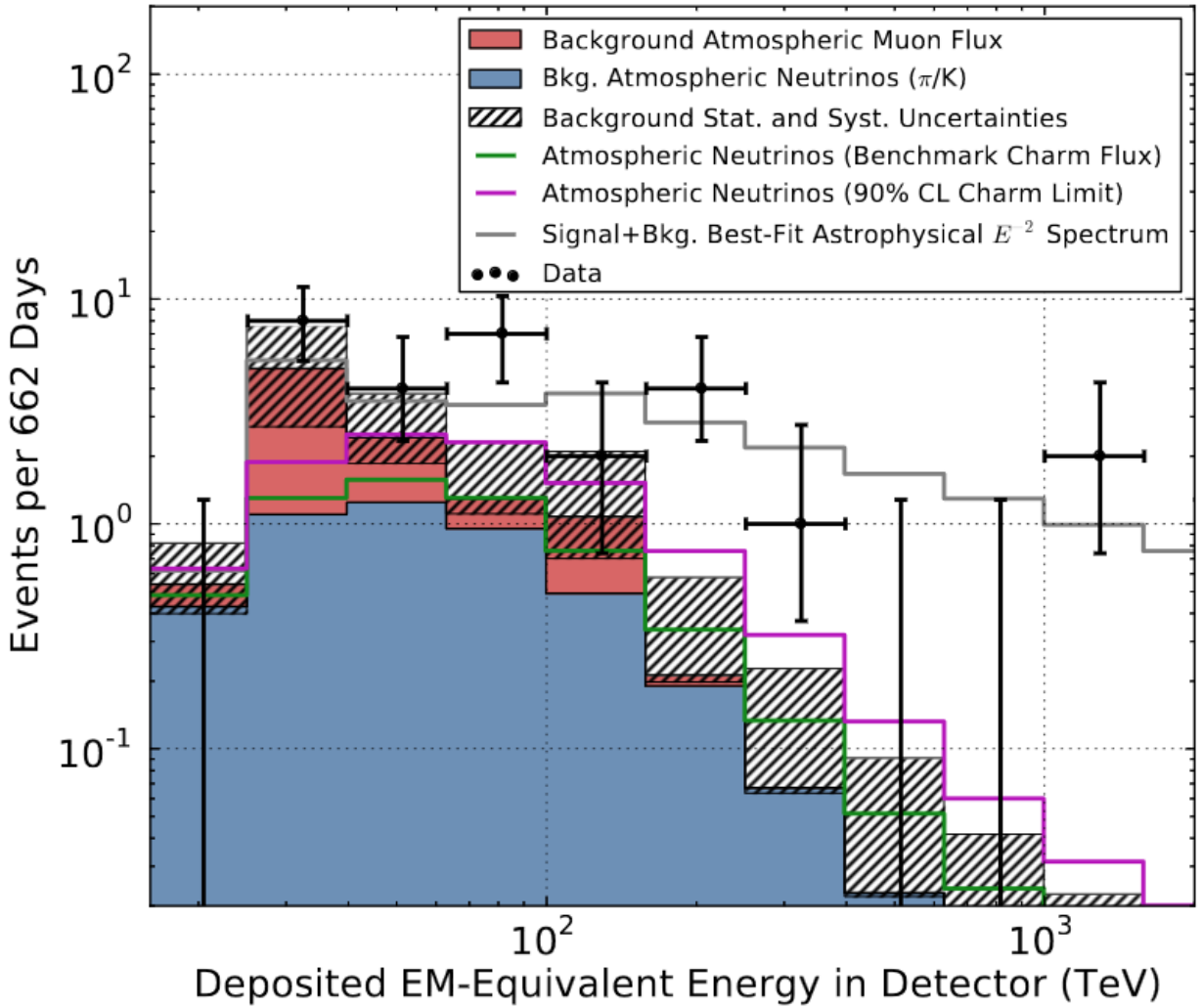
- ~11 000 CPUs
- ~500 GPUs
- ~6000 TB



Das Ergebnis!

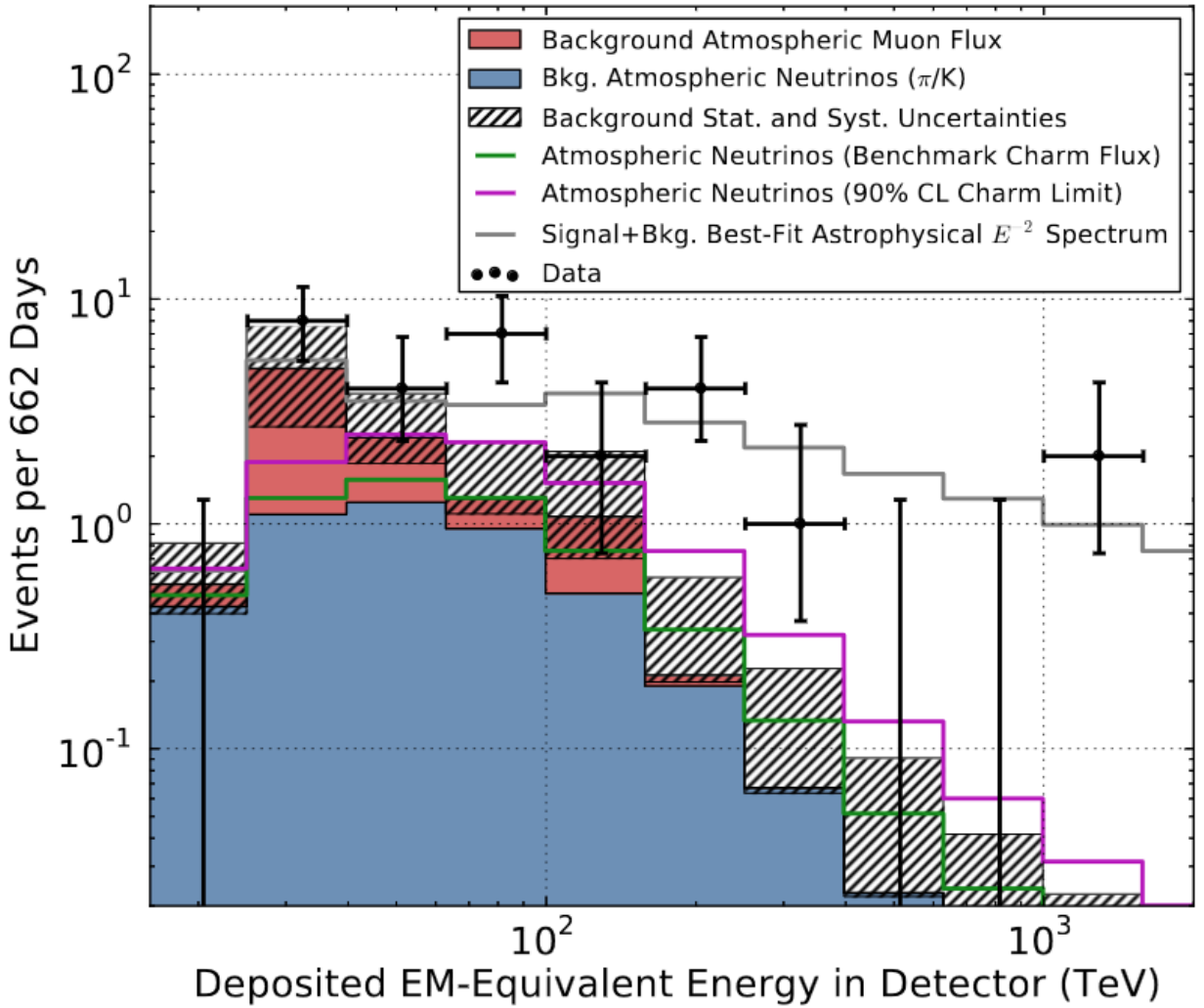


Das Ergebnis!



Toll!

Das Ergebnis!



Toll!

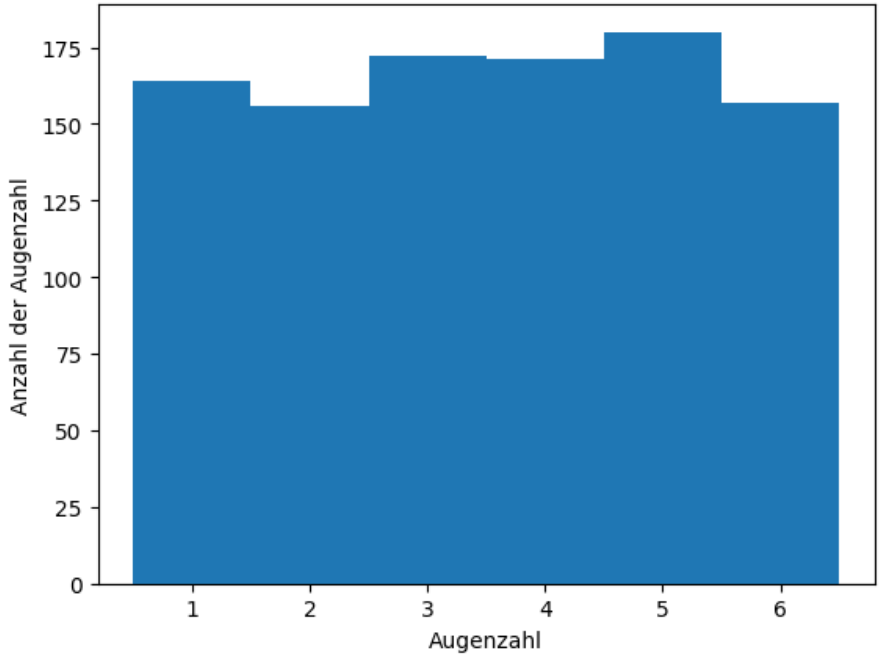
Aber was bedeutet das?

Histogramme



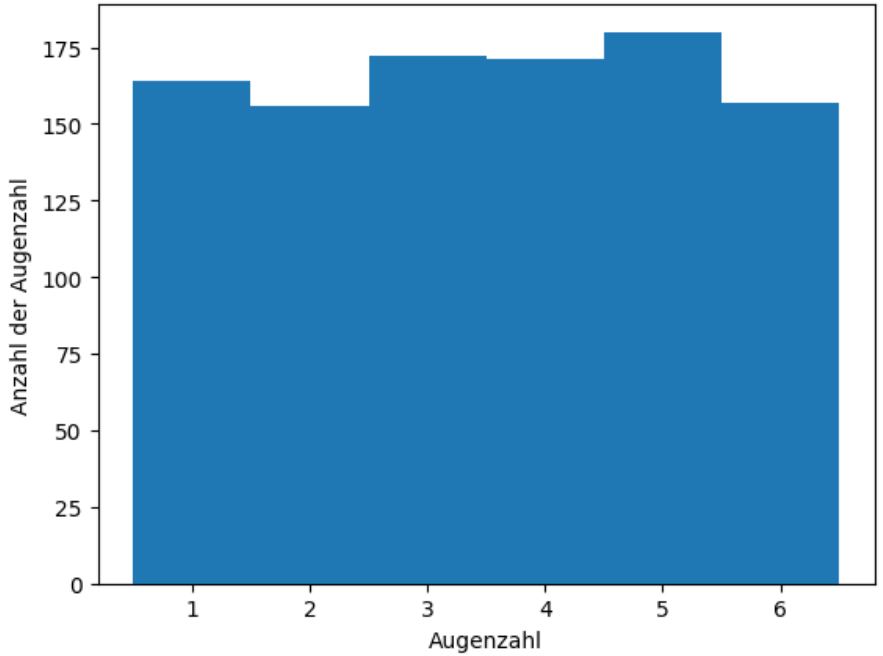
Histogramme

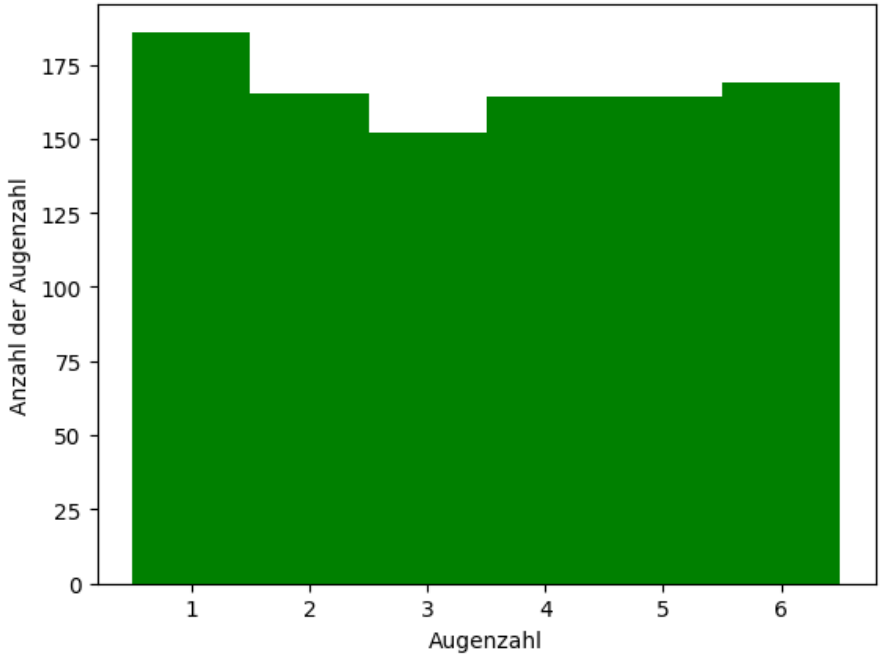




Histogramme



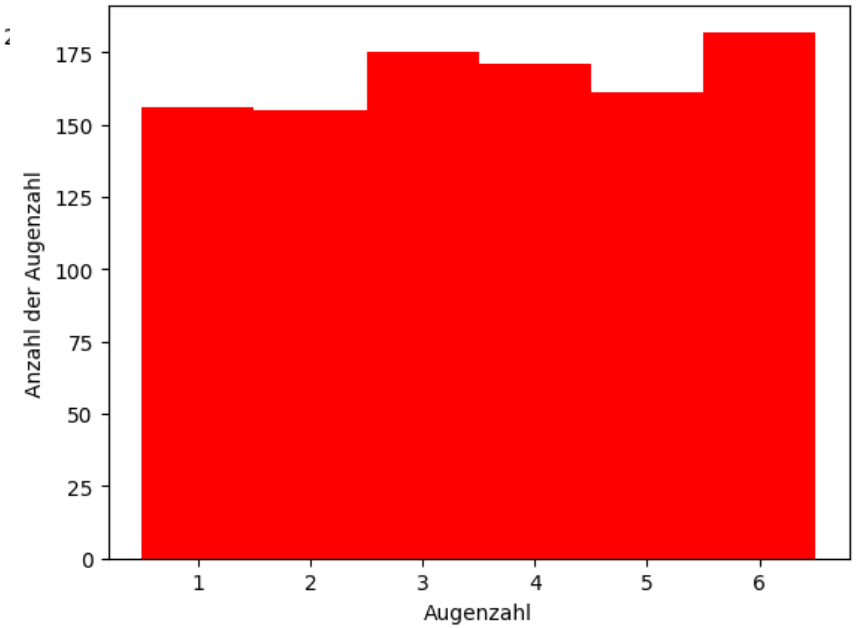


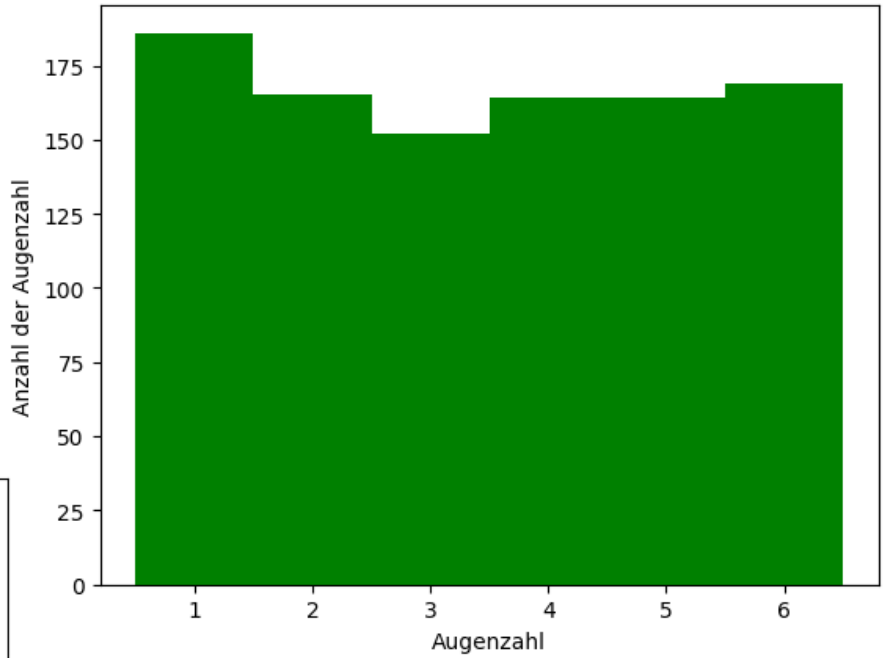


Histogramme





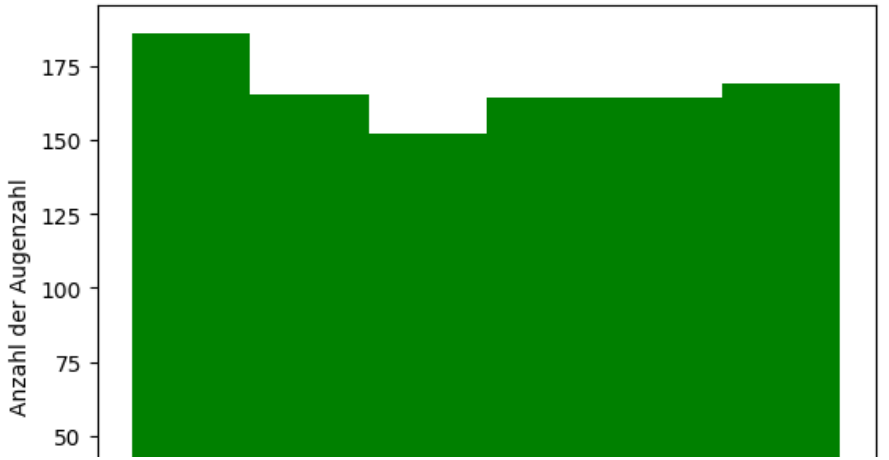


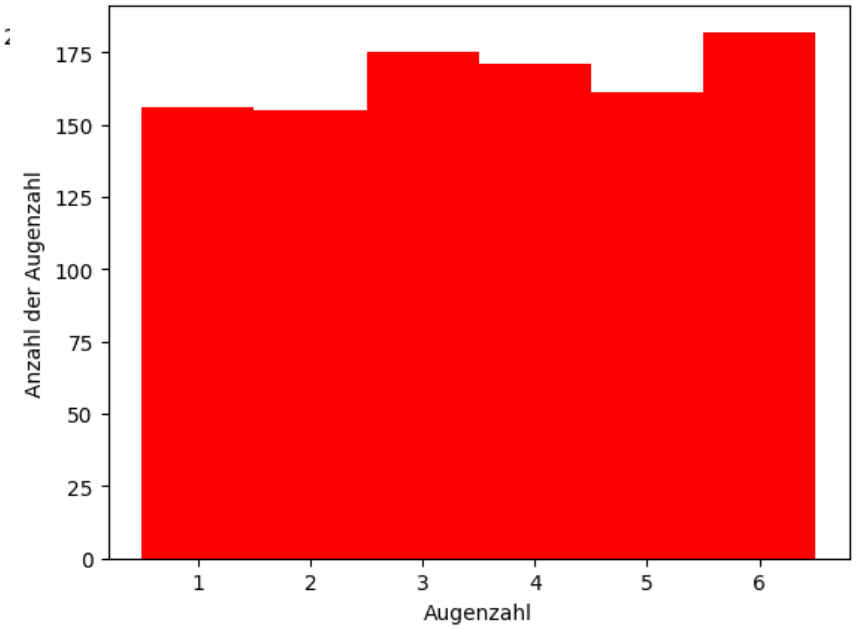


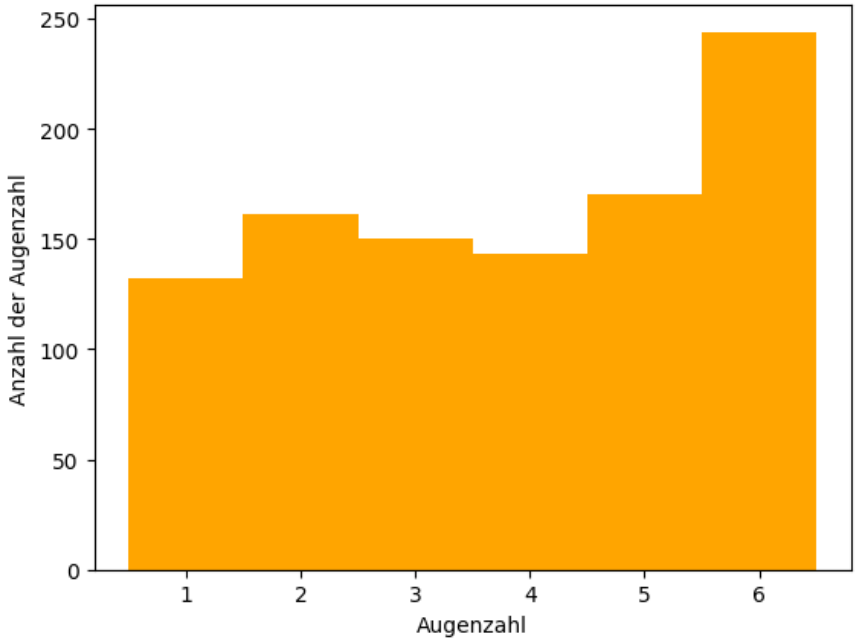
Histogramme











Histogramme

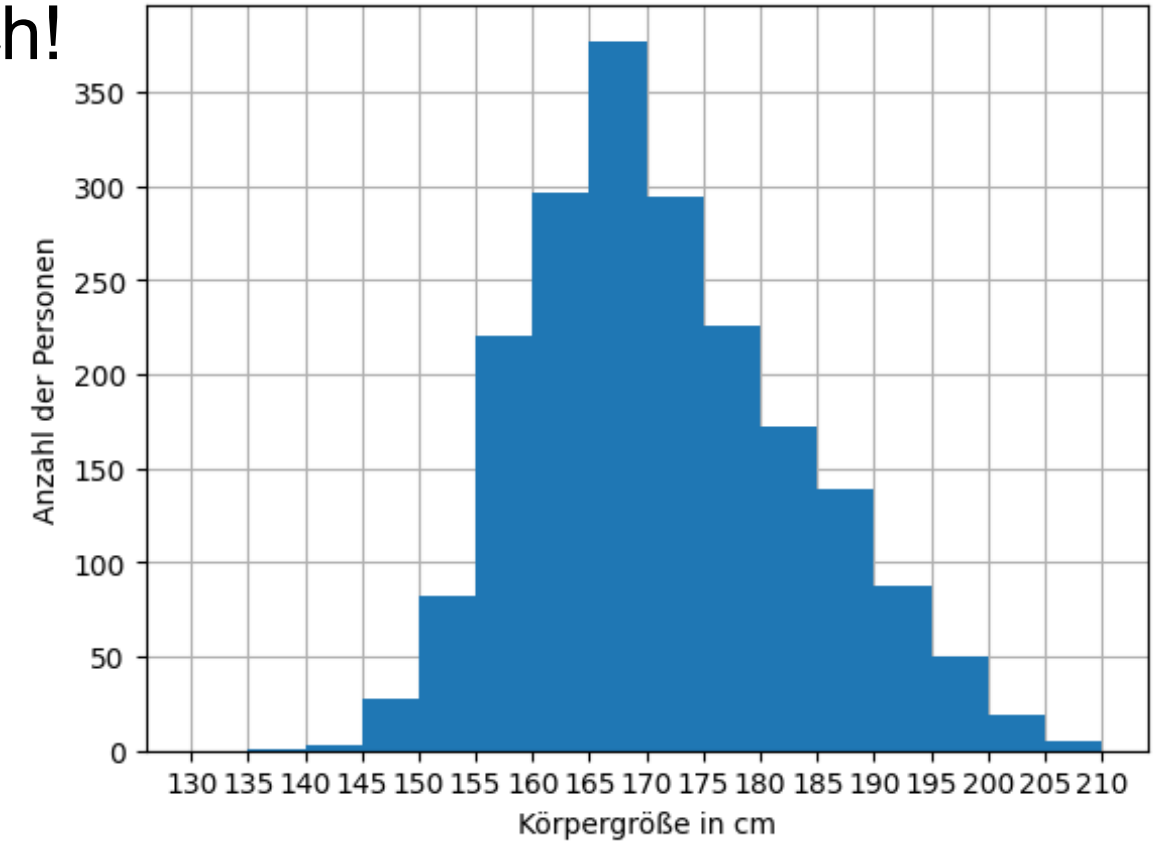
Wir wollen nun unsere Neutrino Ereignisse anhand ihrer Energie histogrammieren.
Problem: Die Energie ist kontinuierlich!

Beispiel: Körpergröße

Histogramme

Wir wollen nun unsere Neutrino Ereignisse anhand ihrer Energie histogrammieren.
Problem: Die Energie ist kontinuierlich!

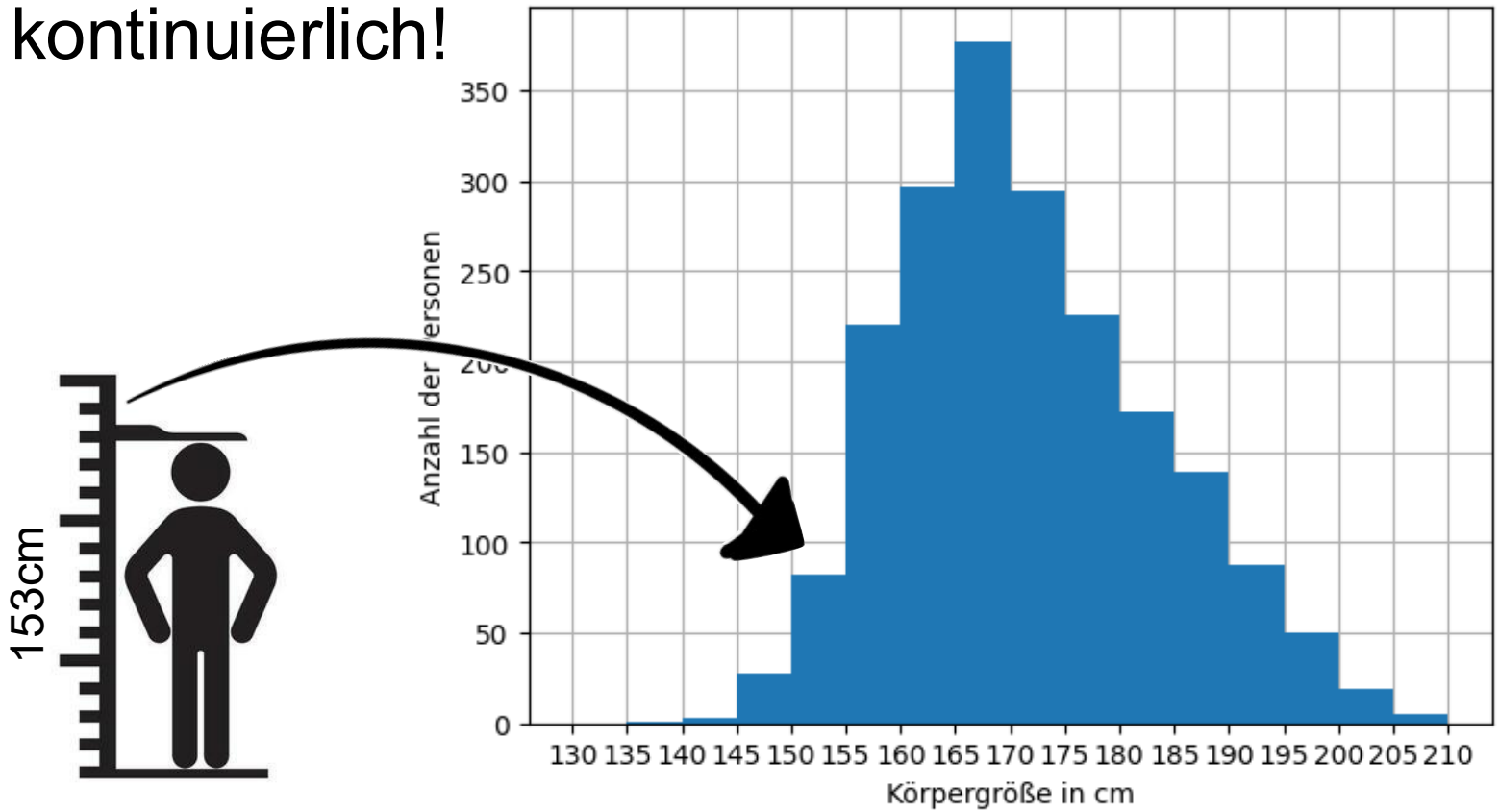
Beispiel: Körpergröße



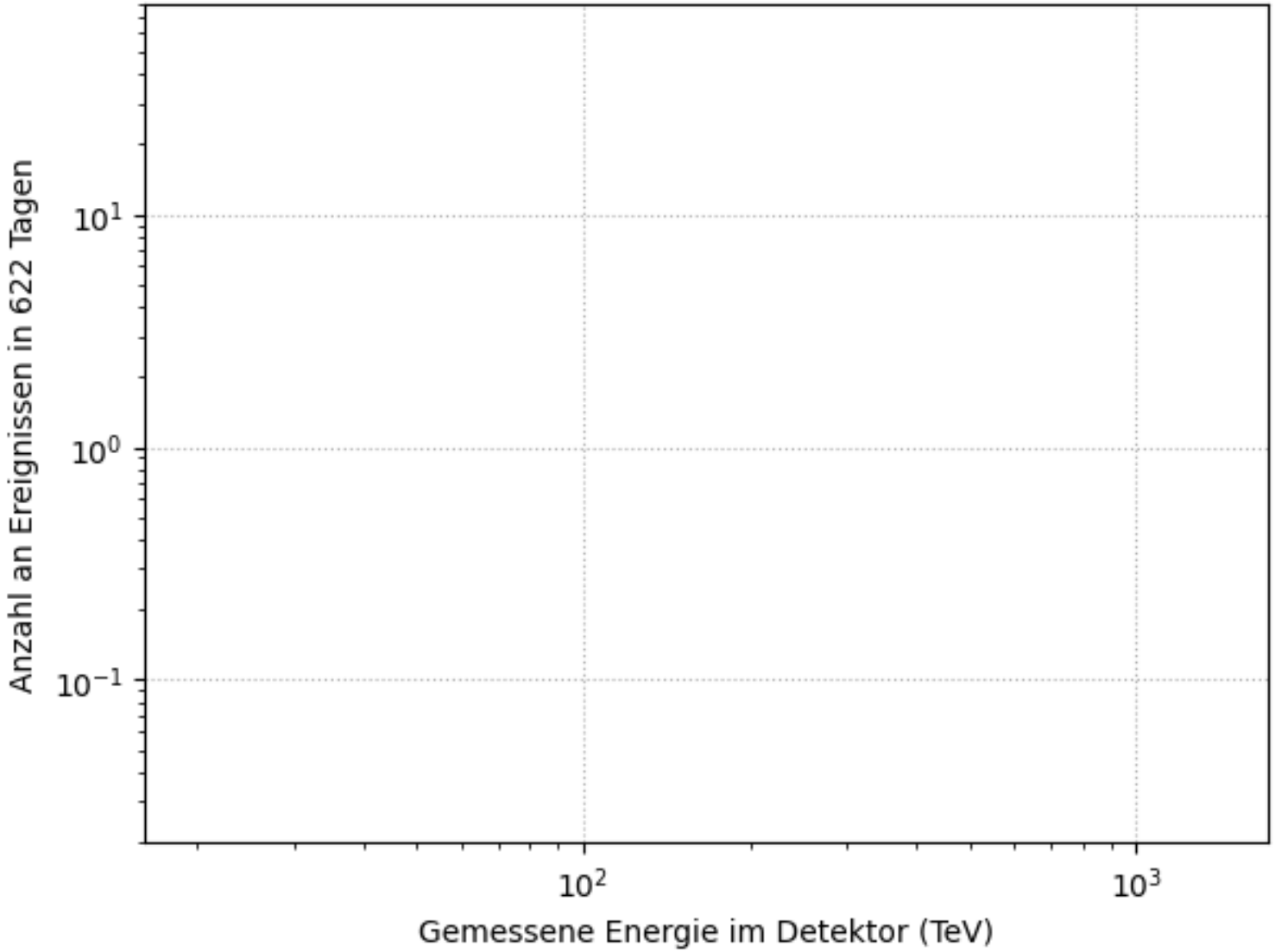
Histogramme

Wir wollen nun unsere Neutrino Ereignisse anhand ihrer Energie histogrammieren.
Problem: Die Energie ist kontinuierlich!

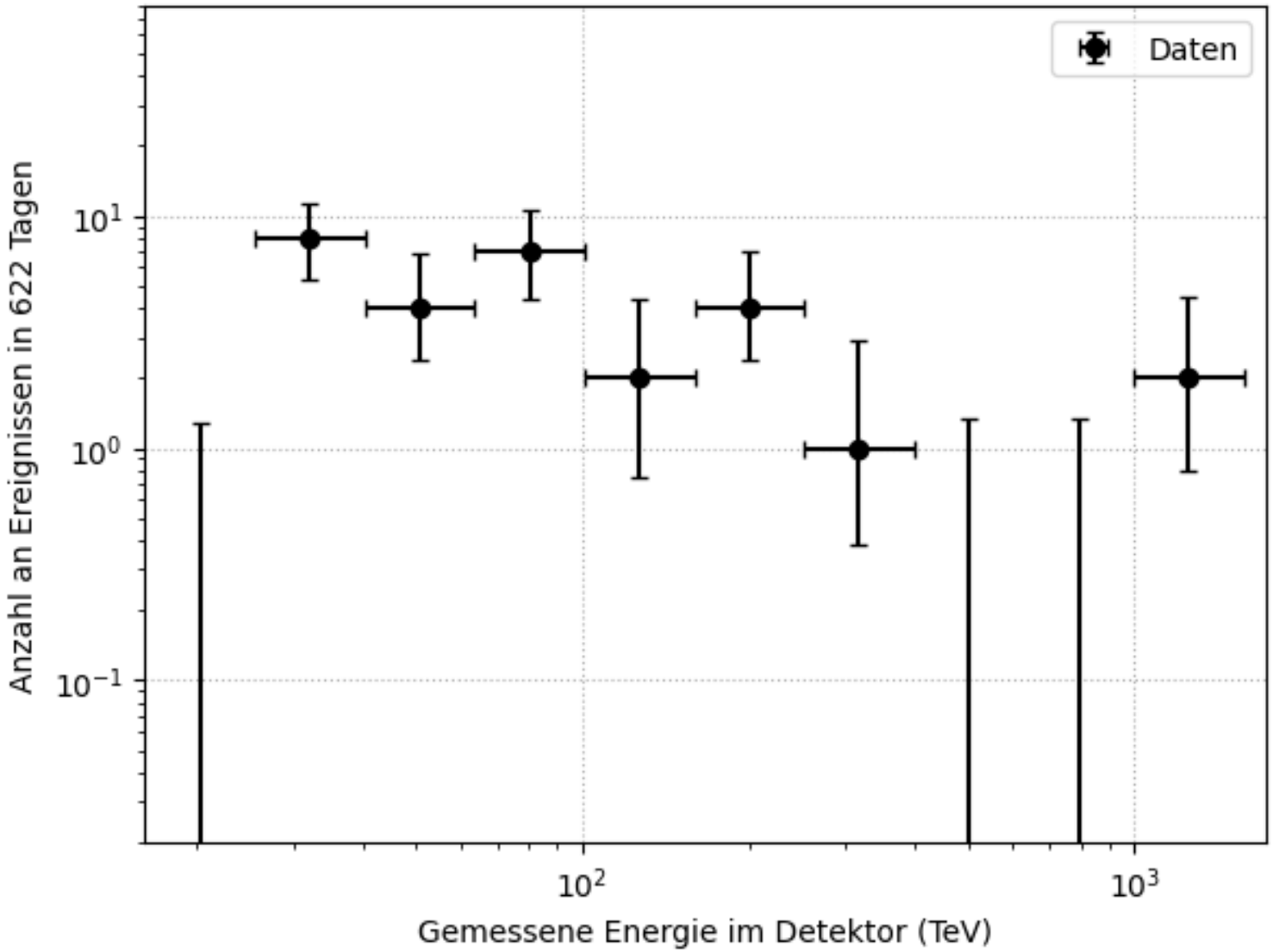
Beispiel: Körpergröße



Neutrino Histogramm

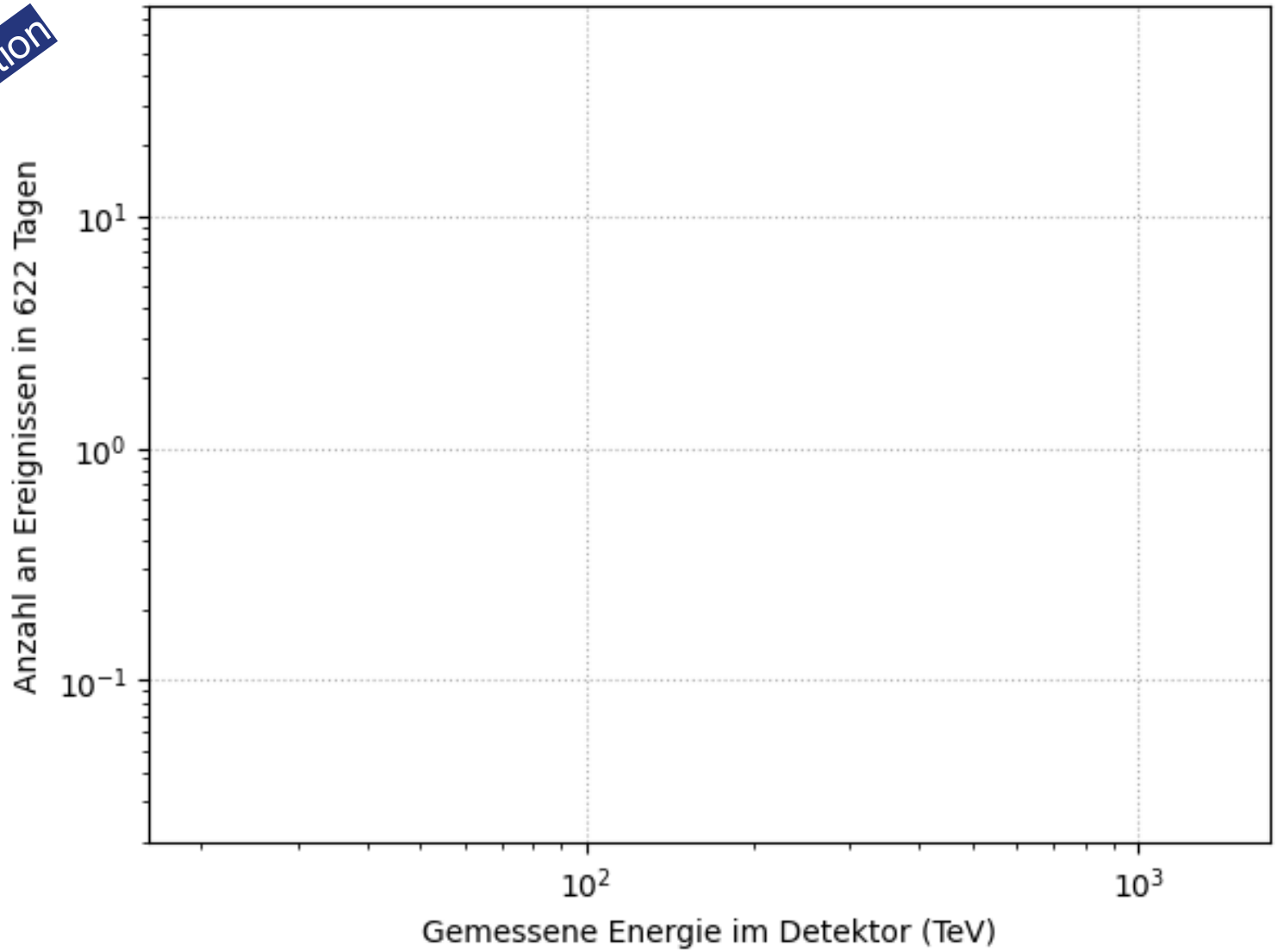


Neutrino Histogramm

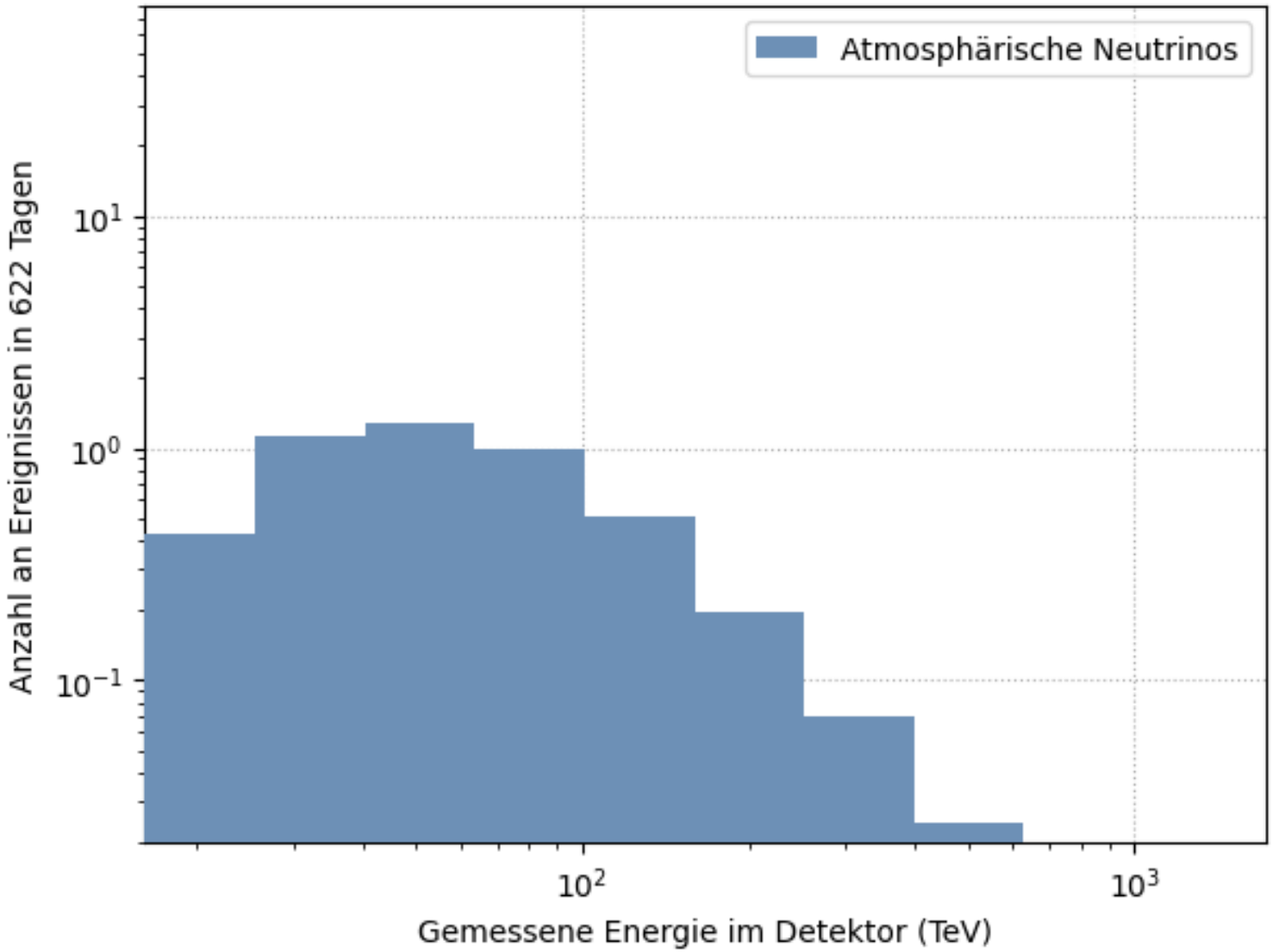


Neutrino Histogramm

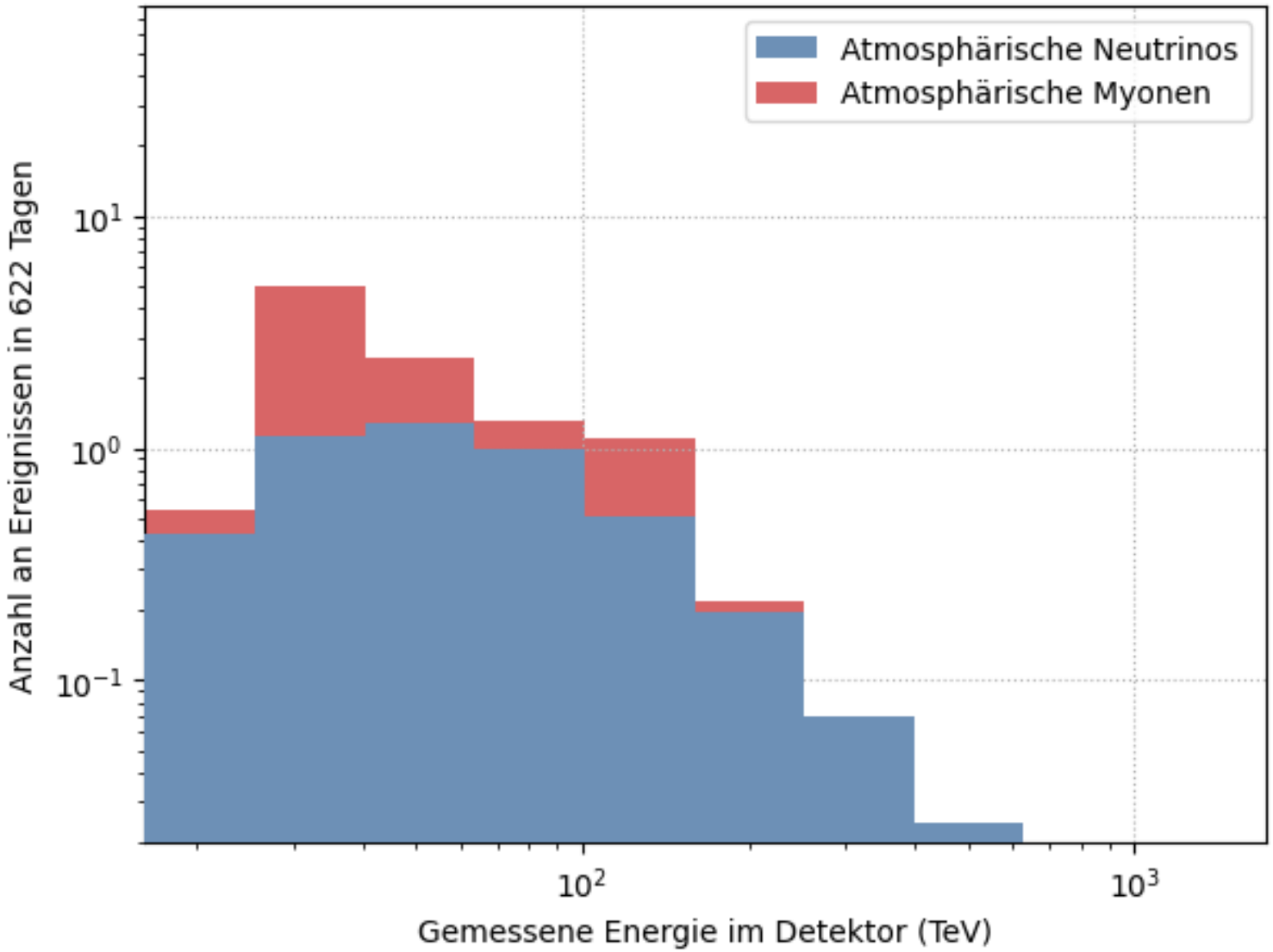
Vergleiche mit Simulation



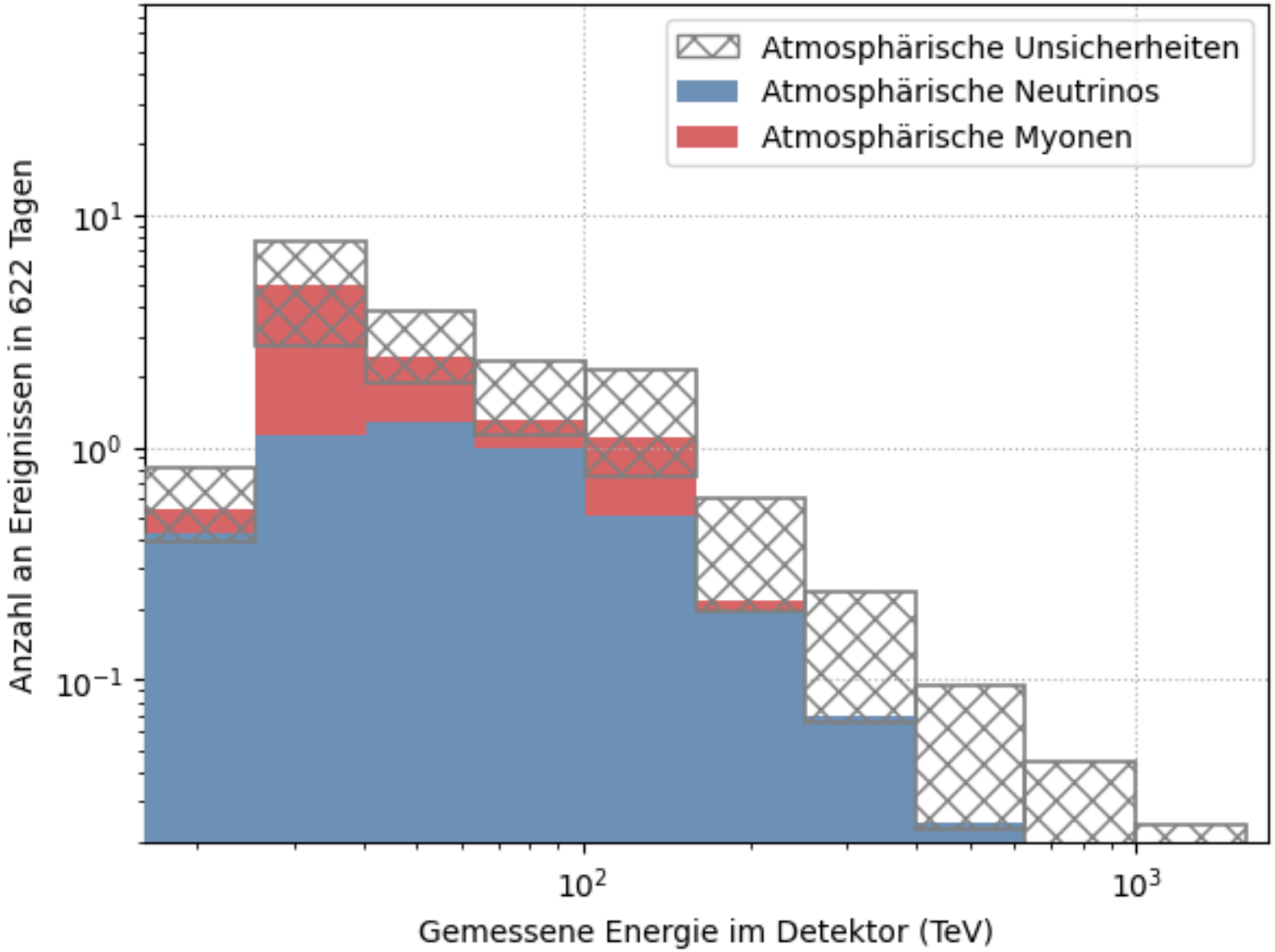
Neutrino Histogramm



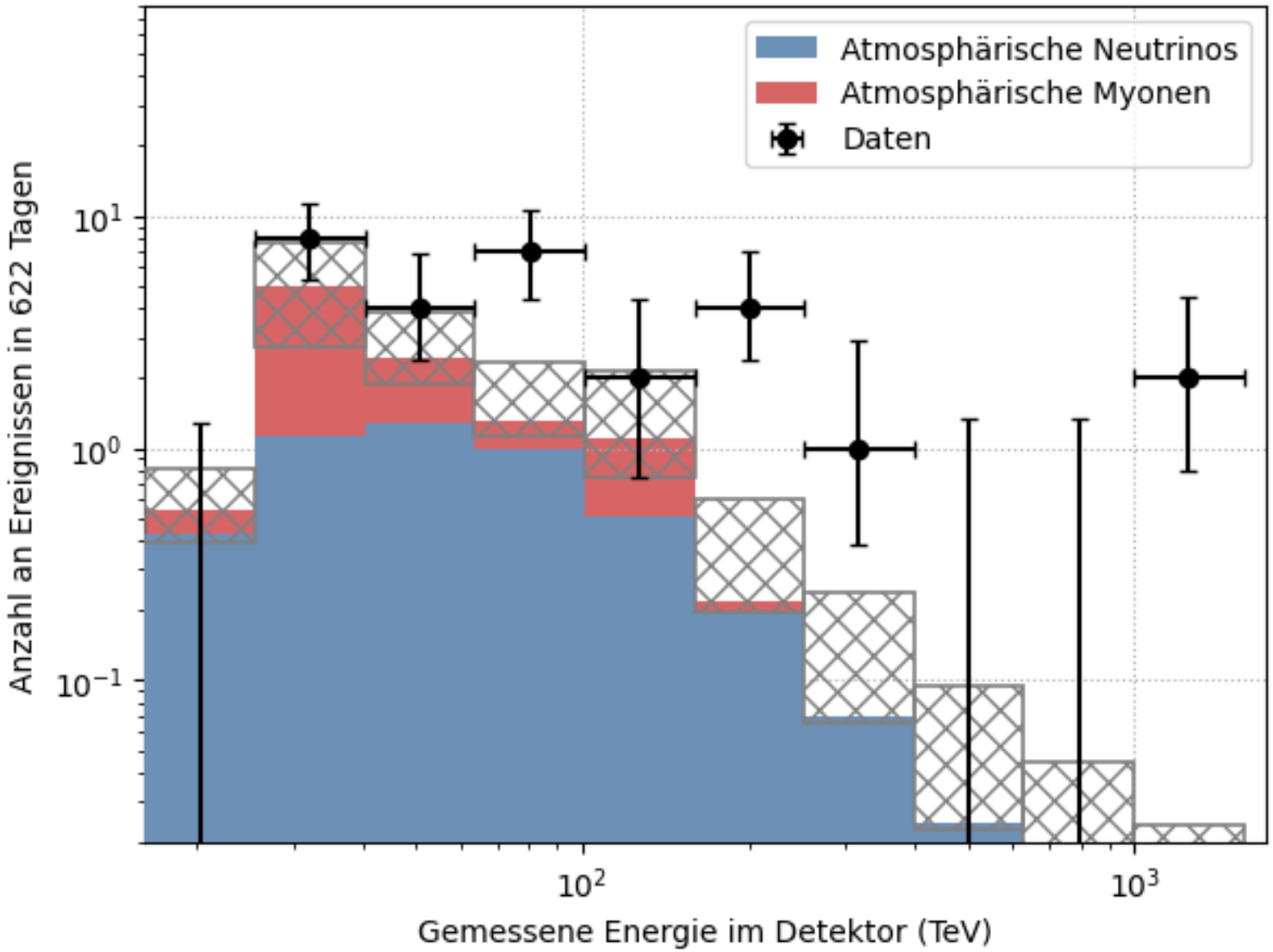
Neutrino Histogramm



Neutrino Histogramm



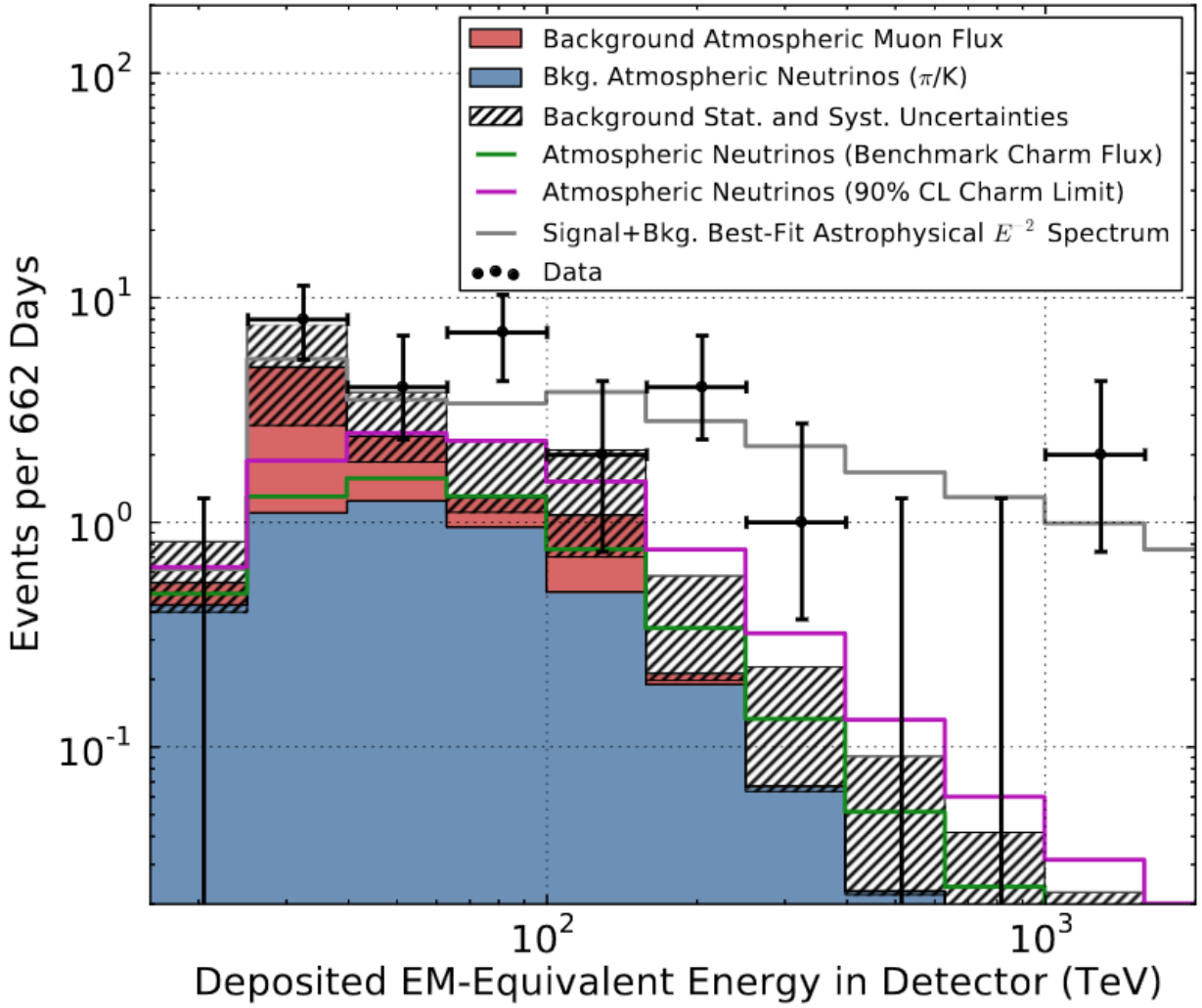
Neutrino Histogramm



Datenanalyse

Gemessene Daten lassen sich nicht alleine durch atmosphärische Muonen und atmosphärische Neutrinos erklären!

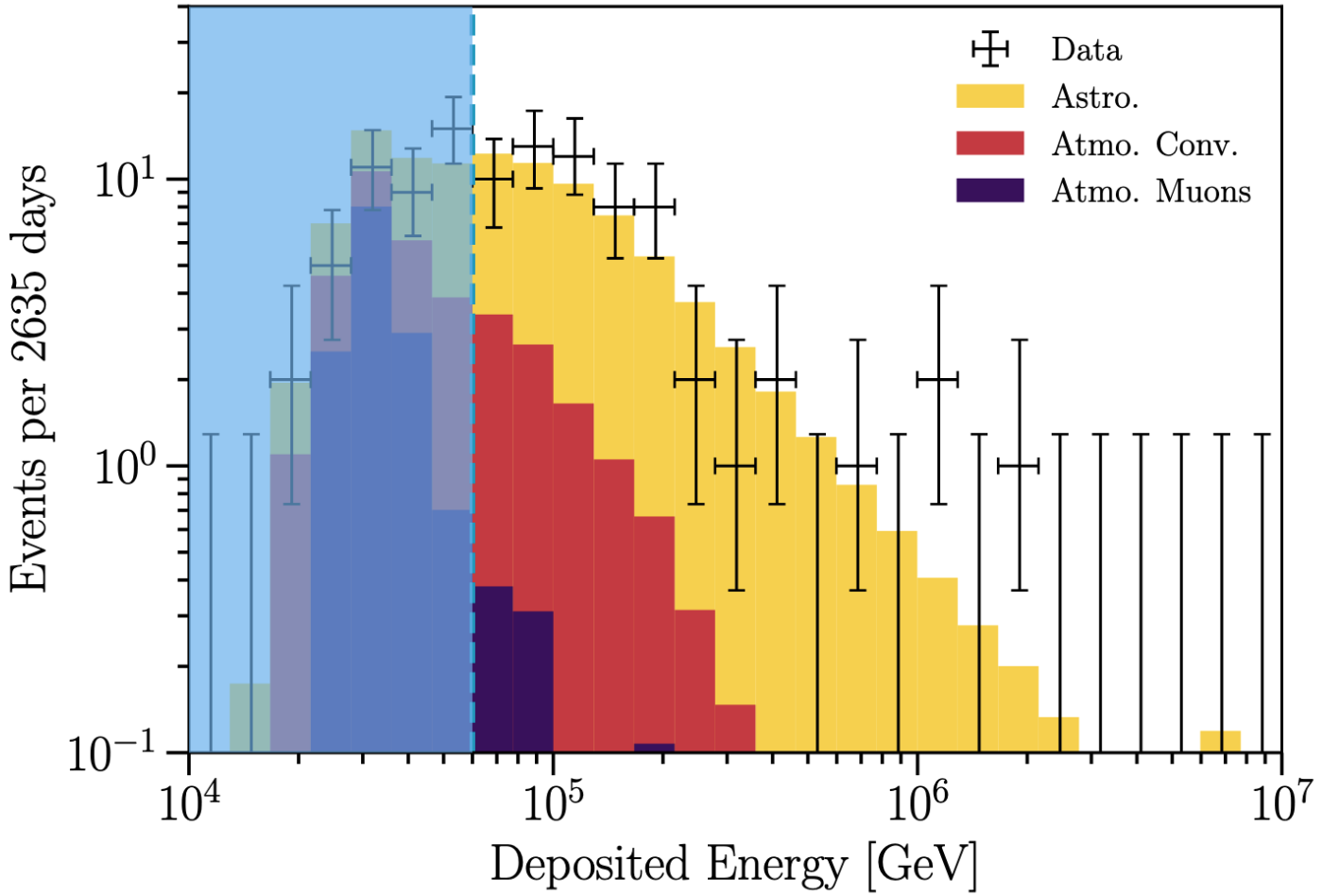
Entdeckung von kosmischen Neutrinos!



Datenanalyse

Das ganze sieht noch überzeugender aus mit längerer Messzeit!

Entdeckung von kosmischen Neutrinos!



NOBELPRISET I FYSIK 2026
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2026

KUNGL. VETENSKAPS-AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

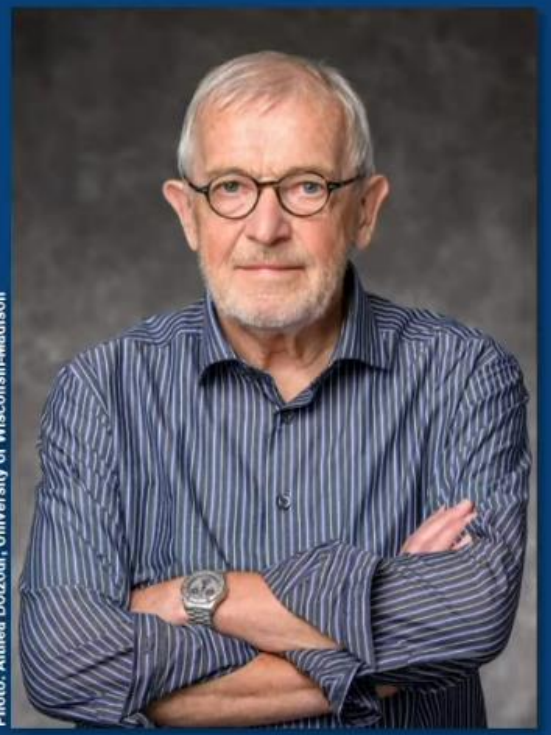


Photo: Althea Dotzour, University of Wisconsin-Madison

”för avgörande bidrag till IceCube-observatoriet och upptäckten av högenergetiska neutriner av astrofysikaliskt ursprung”

“for decisive contributions to the IceCube Neutrino Observatory and the discovery of high-energy neutrinos of astrophysical origin”

Francis Halzen

University of Wisconsin–Madison, USA
Born 1944, Belgium

#NobelPrize

THE NOBEL PRIZE