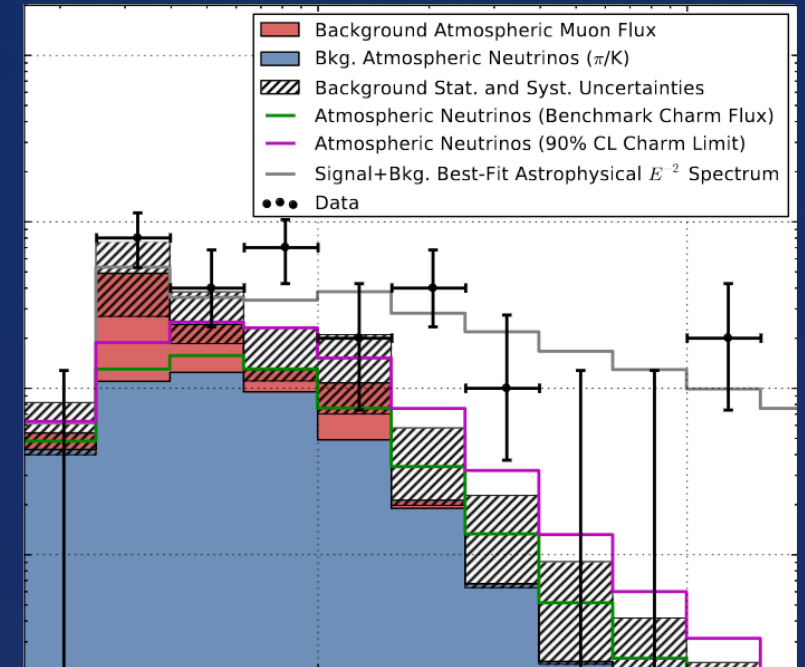
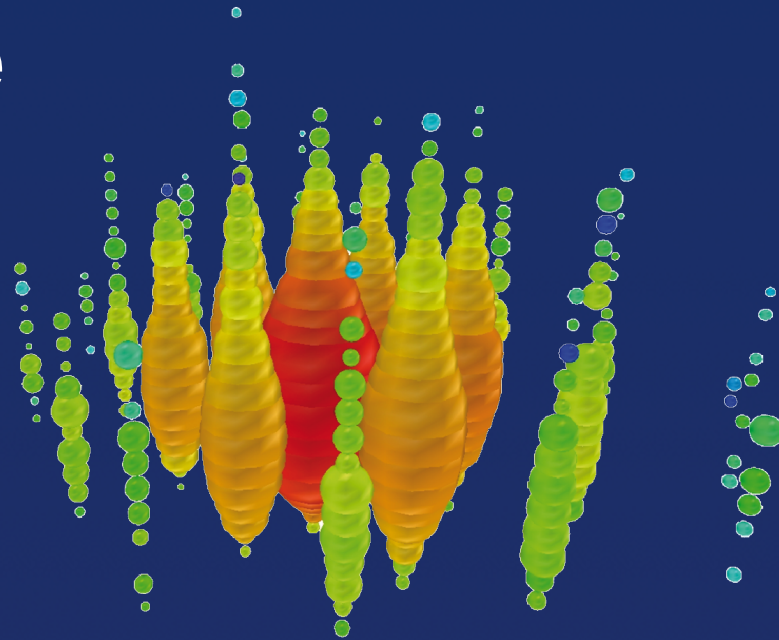




IceCube Masterclass 2025

Datenanalyse

Anke Mosbrugger
Nürnberg, 02.10.25

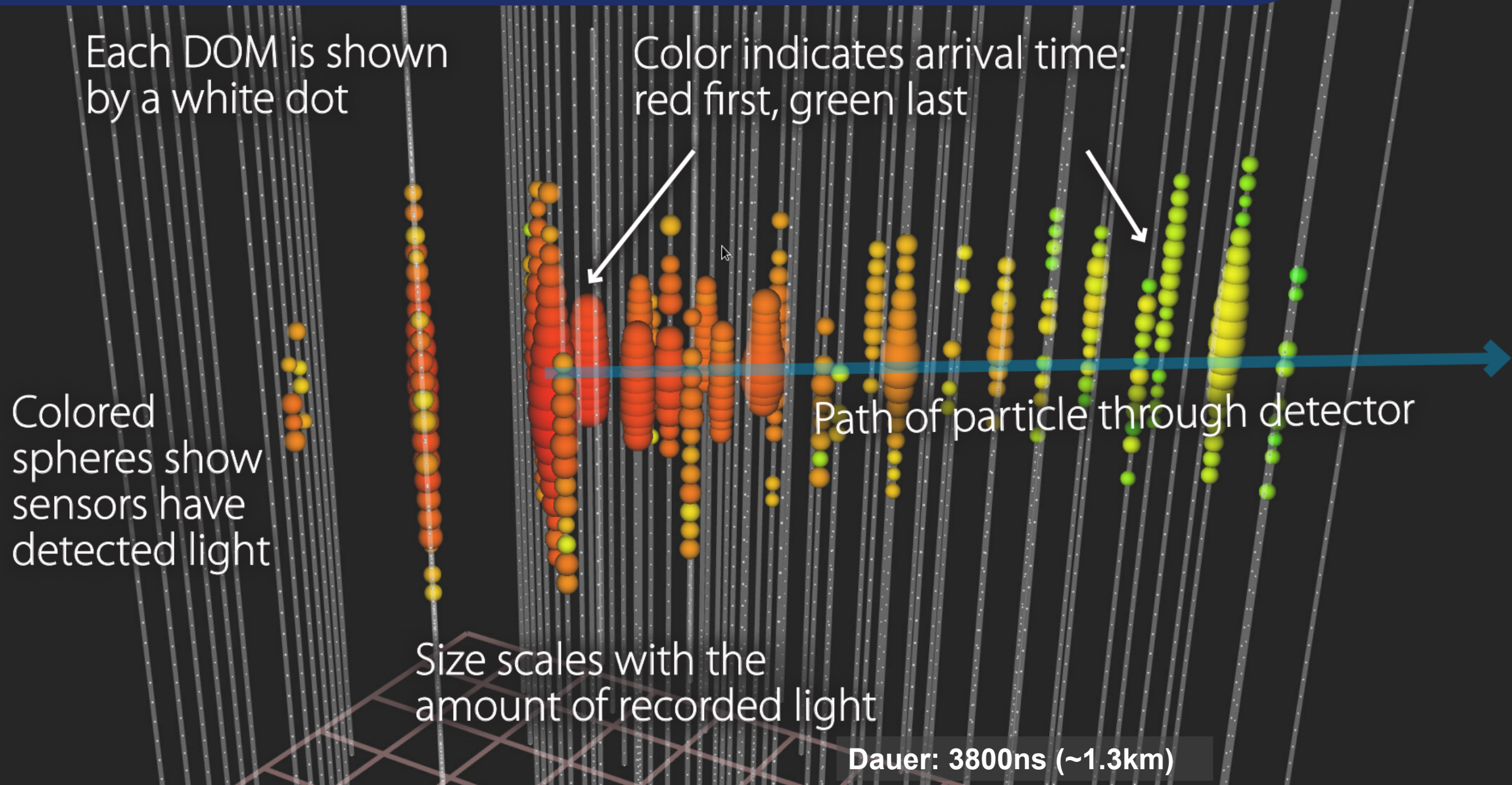


- Jeder DOM registriert eigenständig Lichtsignale an seiner **Position (Zeit, Menge)**
- Wenn genügend DOMs “gleichzeitig” ein Signal melden bauen wir aus den Informationen aller DOMs ein **Event**



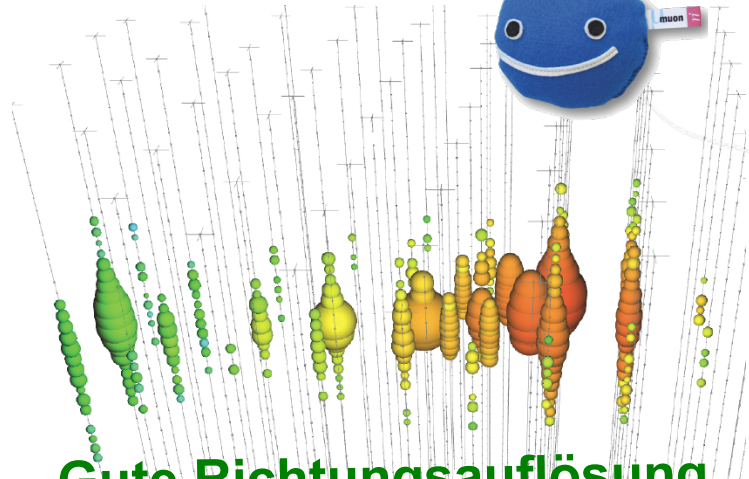
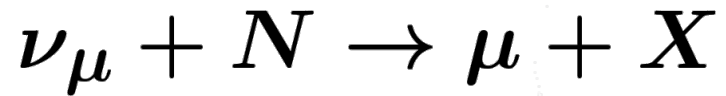
Wie sehen solche Events aus?

Event-Display



Spur (englisch Track):

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



Gute Richtungsauflösung,
schlechte Energieauflösung

Erinnerung:

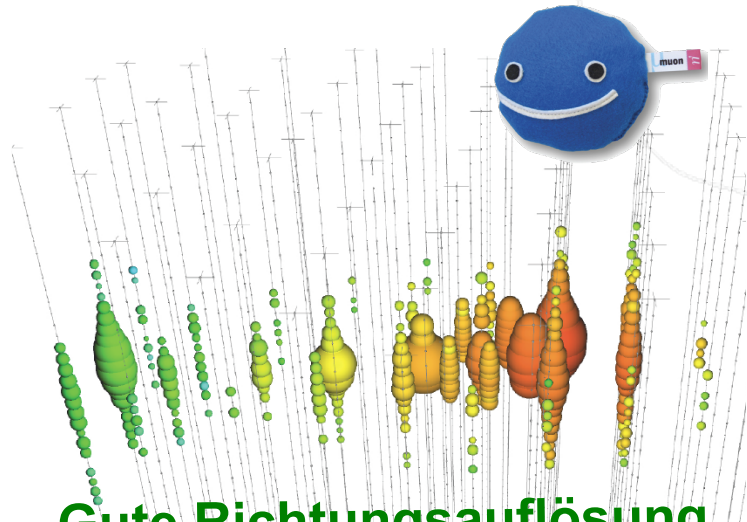
Das Neutrino an sich ist
unsichtbar. Wir sehen nur
Reaktionsprodukte

Spur (englisch Track):

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



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



**Gute Richtungsauflösung,
schlechte Energieauflösung**

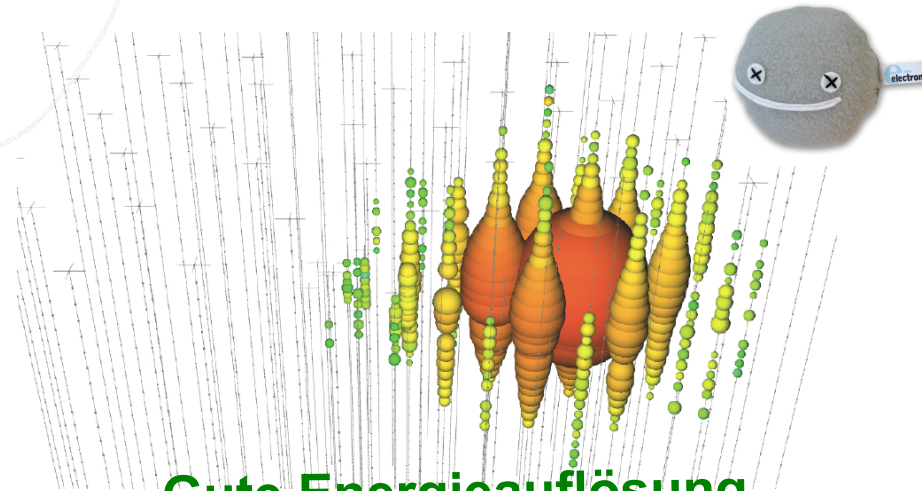
Cascade:

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**



~10 min

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

?

?

Sind das alles Neutrinos?

?

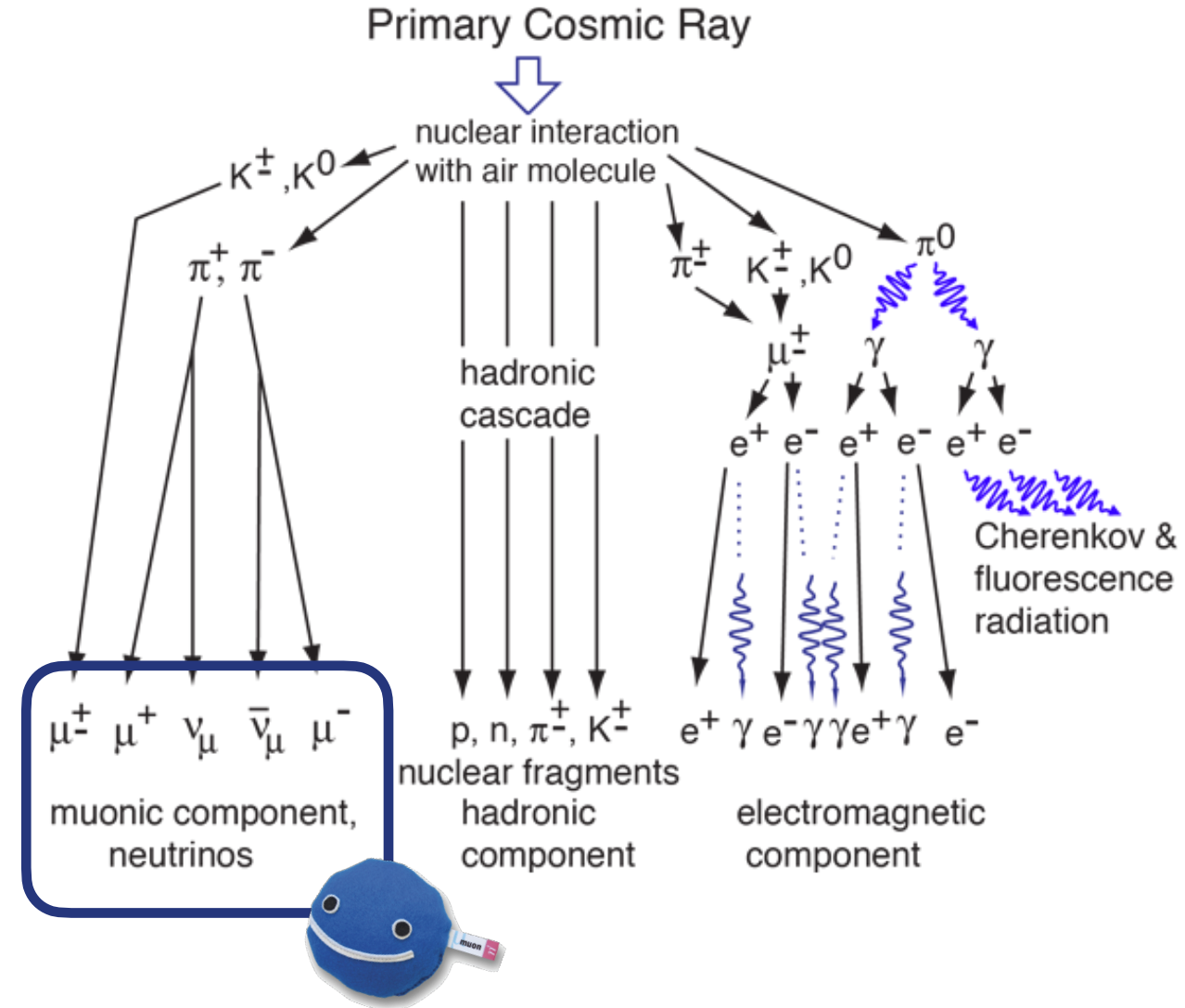
?

Untergrund



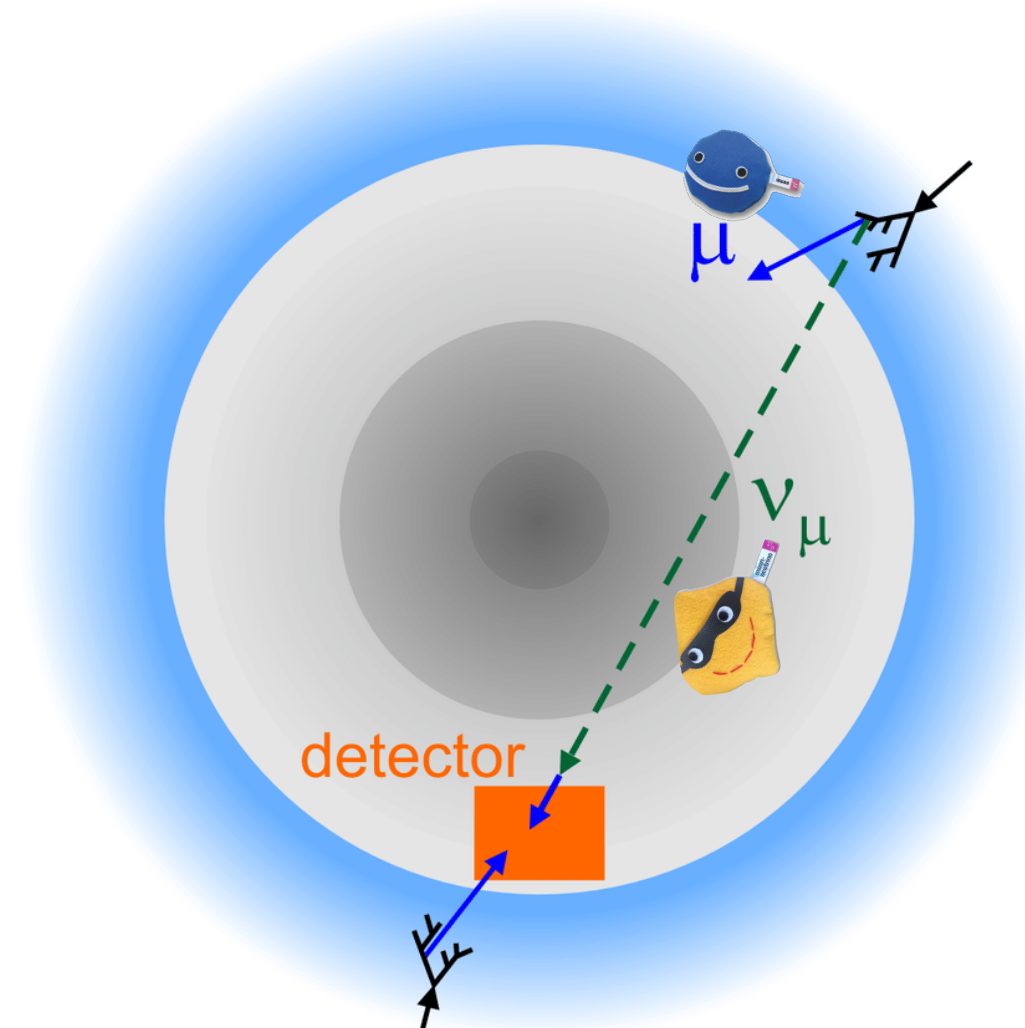
Wir wollen Neutrinos von außerhalb unseres Sonnensystems finden.

Problem: Wir haben verschiedene Arten von Untergrund.



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

Atmosphärische Muonen können nur von oben kommen.



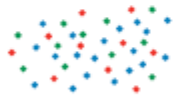
Atmosphärische Neutrinos aus Luftschauern können ebenfalls im Detektor reagieren.

Atmosphärische Neutrinos können von allen Seiten kommen.

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 wie wir Untergrund von



Signal trennen können?



Untergrund-Vermeidung



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



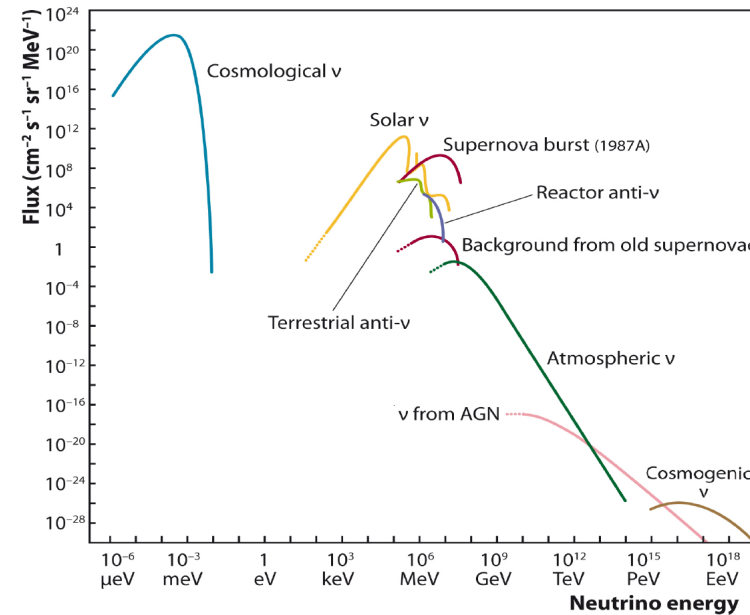
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Tipps:

Neutrinos produzieren kein Licht.

Wir können die Entwicklung des
Events ns-genau auflösen.

Wir können die Energie messen.



?

Habt ihr Ideen wie wir Untergrund von
Signal trennen können?

?

?

?

Der HESE-Ansatz



Veto layer where no first hits
in time are allowed

Region where events
are allowed to start

Dust layer, added to the veto region

Vetoed Event

Starting track

Gefordert:

Das Event soll im Detektor starten

Genauer:

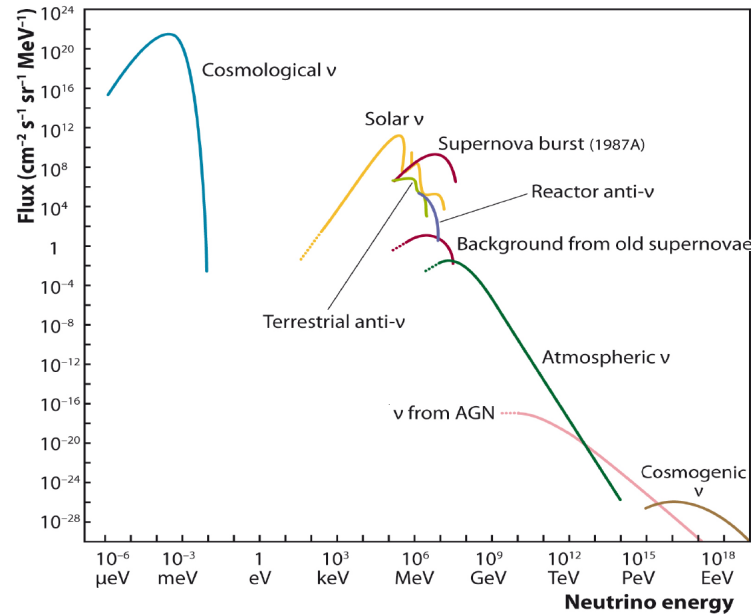
Im Vetobereich dürfen nur 3 PE der
frühesten 250 PE

Ergebnis:

Myonen der Höhenstrahlung werden
verworfen, Neutrinos (alle!!) überleben

Was ist mit den atmosphärischen
Neutrinos??

Der HESE-Ansatz



Dust layer, added to the veto region

Vetoed Event

Starting track

Gefordert:

Das Event soll im Detektor starten

Gefordert:

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

Ergebnis:

Großteil der atmosphärischen Neutrinos aber auch ein Teil des Signals wird verworfen.

Anwendung des HESE-Vetos



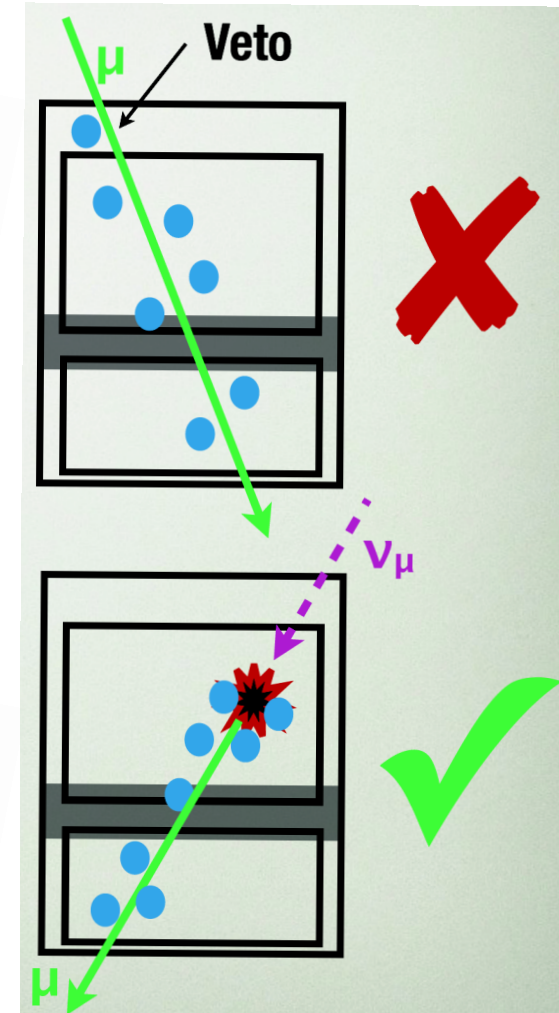
Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

~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.

- $\sim 11\,000$ CPUs
- ~ 500 GPUs
- ~ 6000 TB



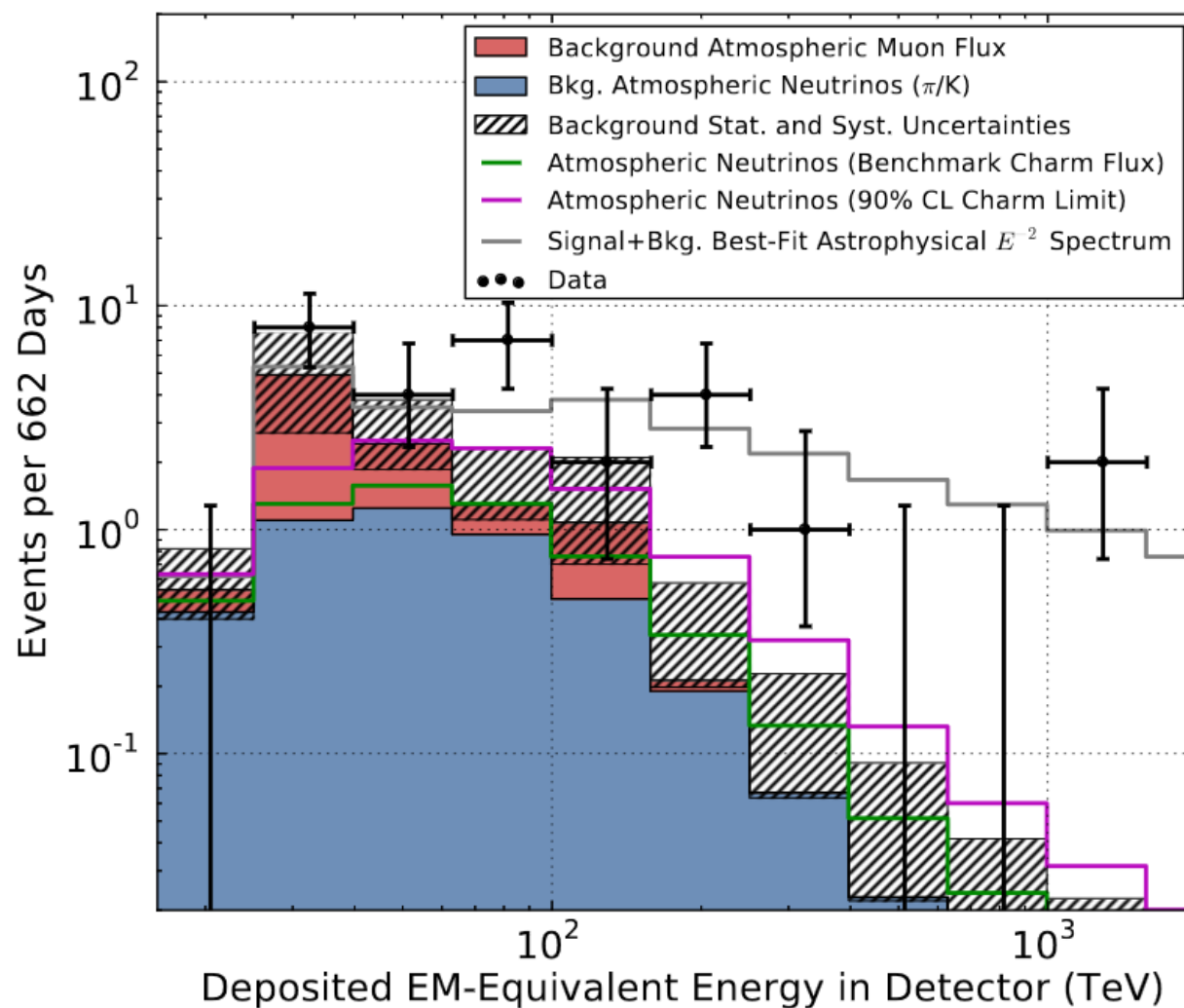
Das Ergebnis!



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



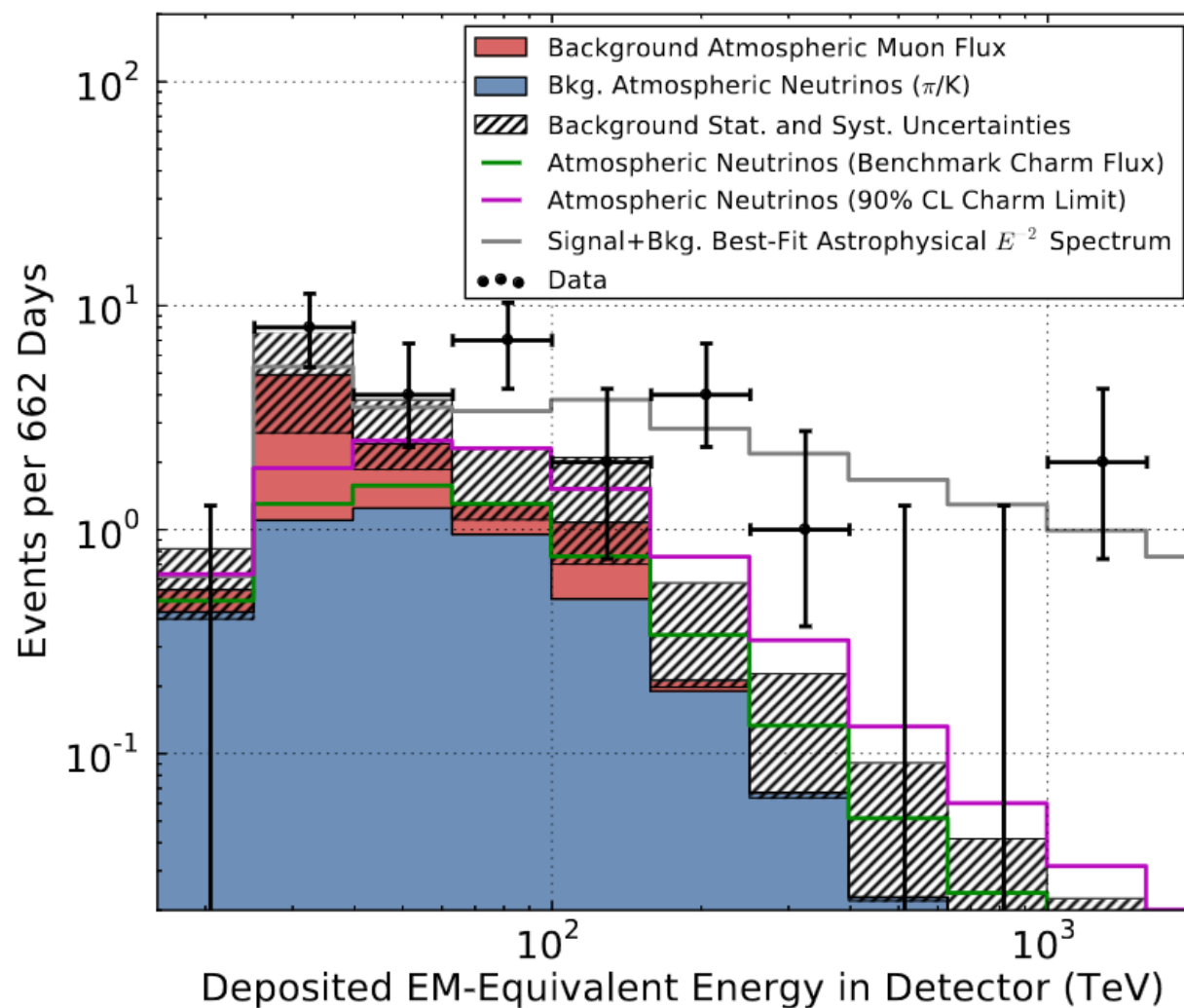
Das Ergebnis!



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



Toll!

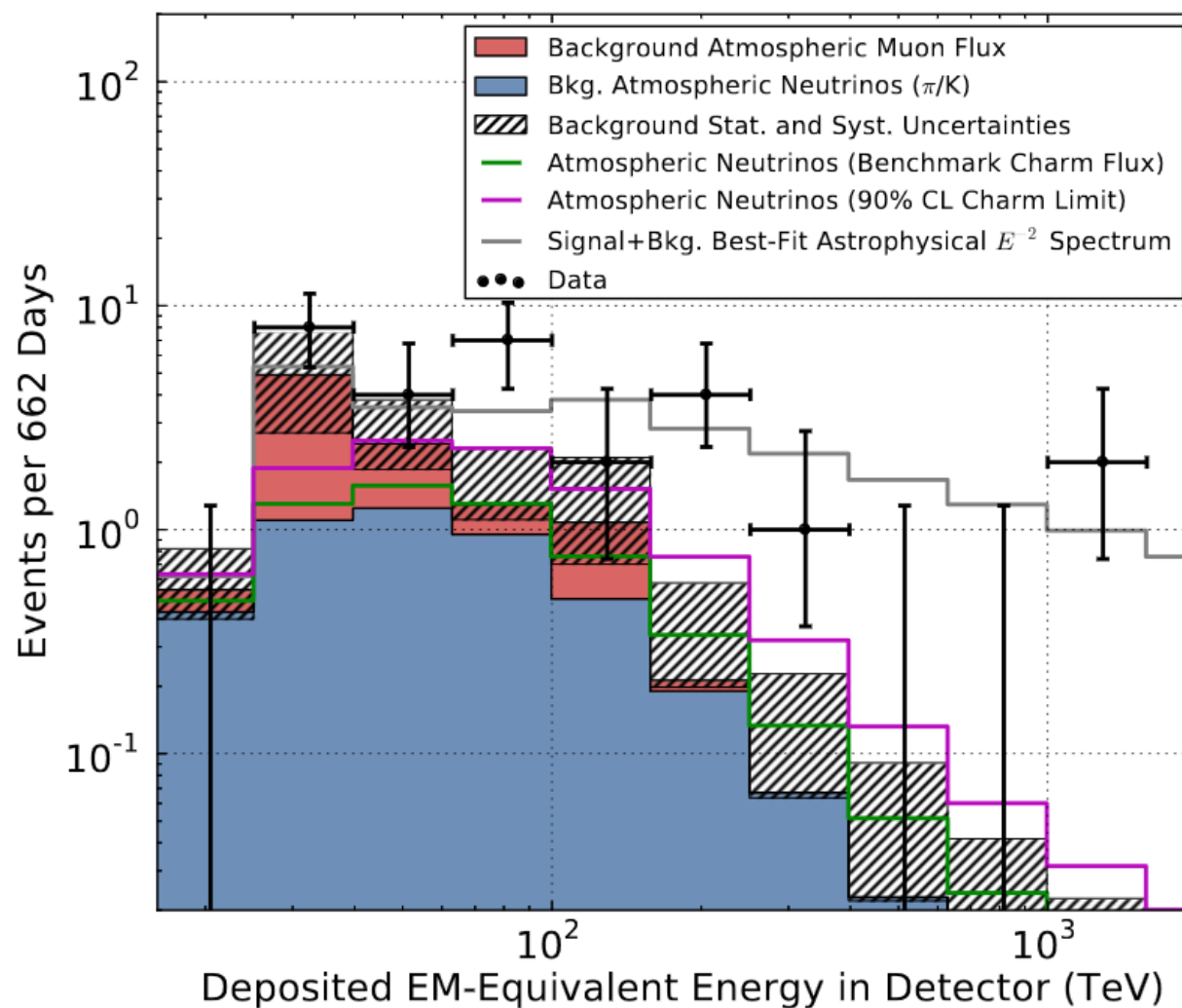
Das Ergebnis!



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

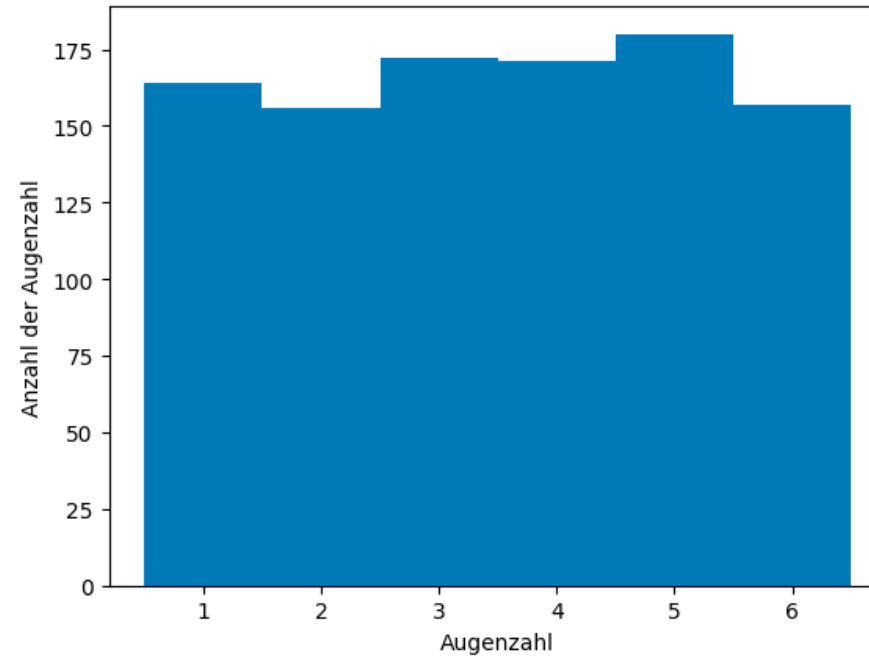


Toll!
Aber was bedeutet das?

Histogramme



Histogramme



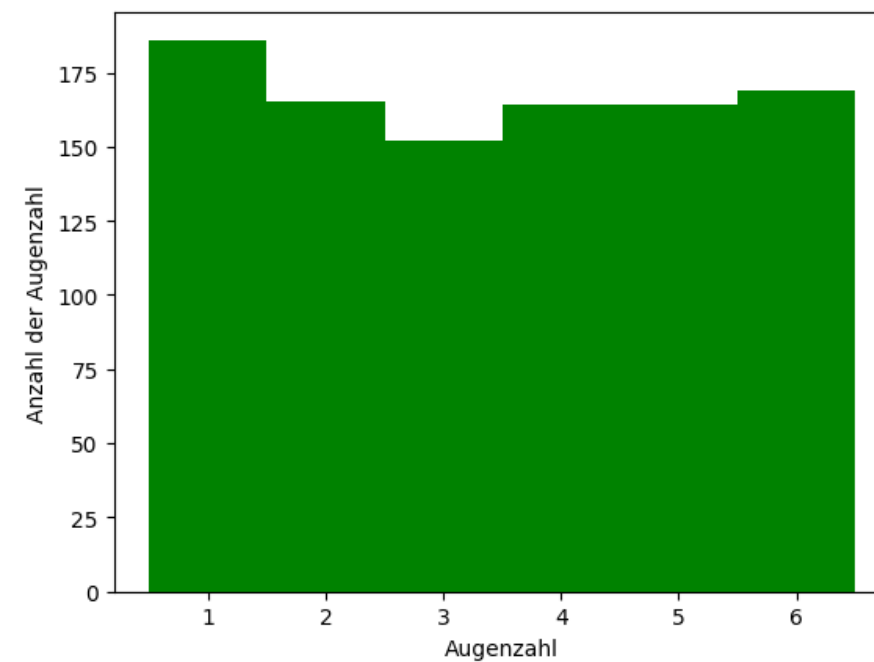
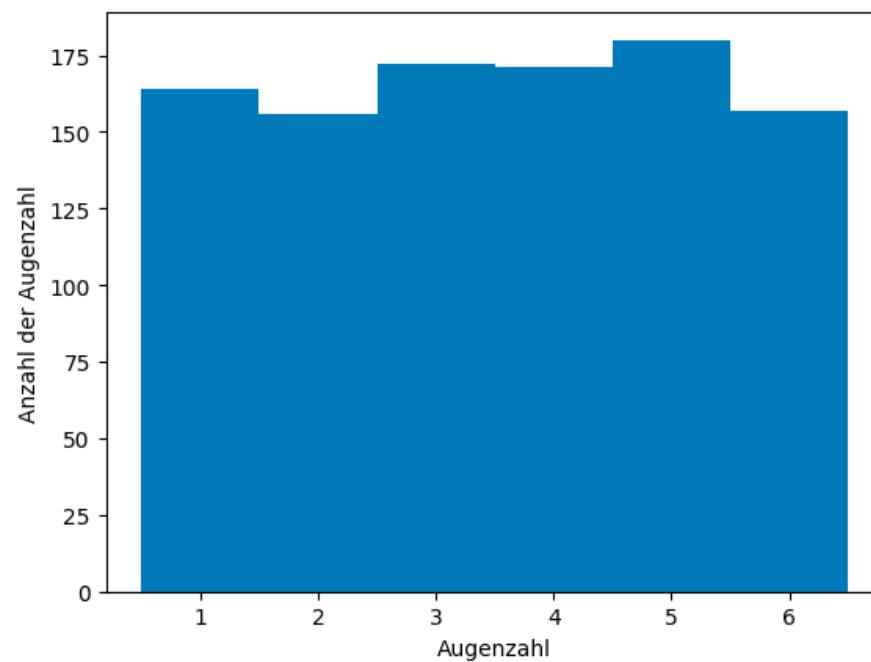
Histogramme



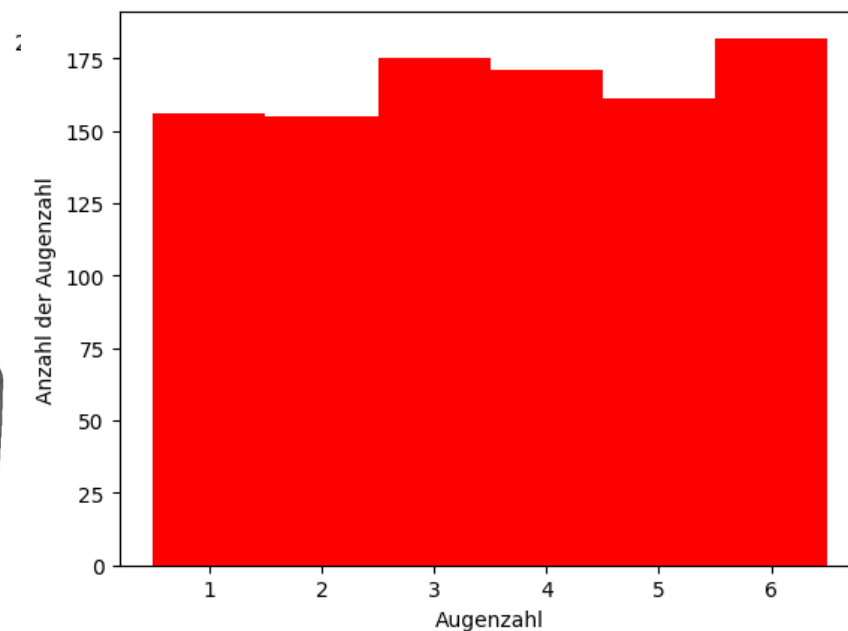
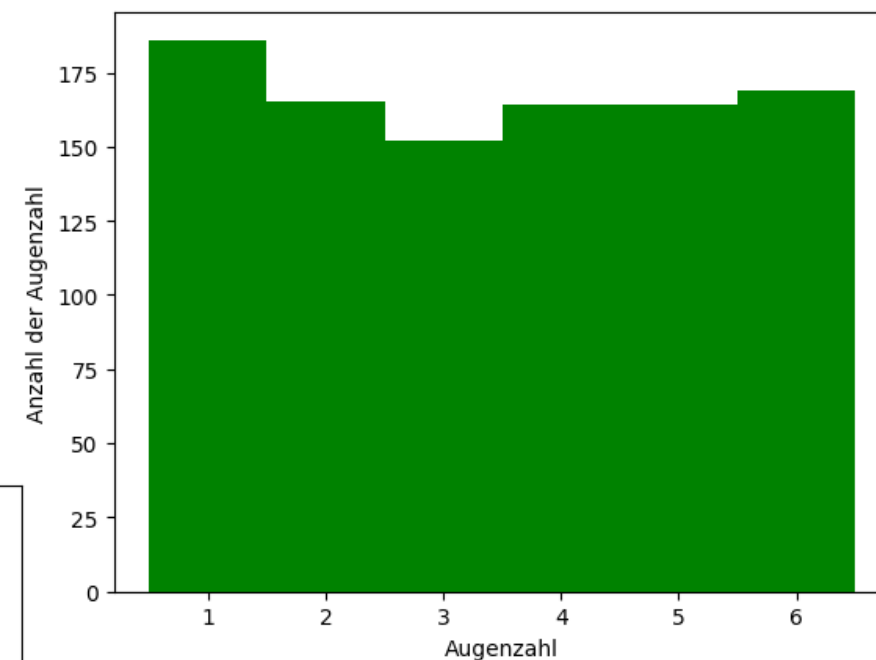
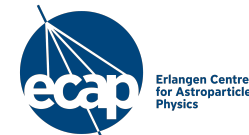
Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



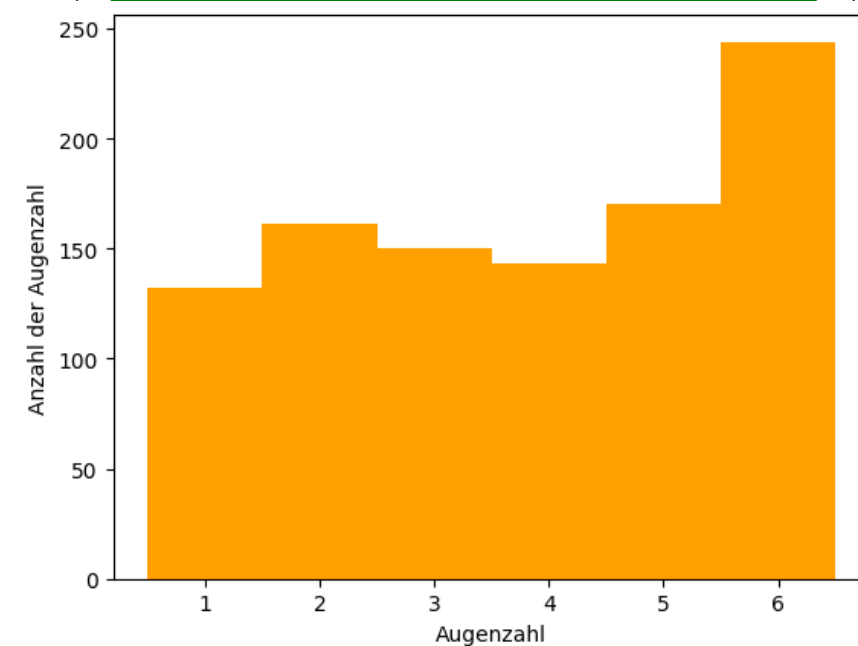
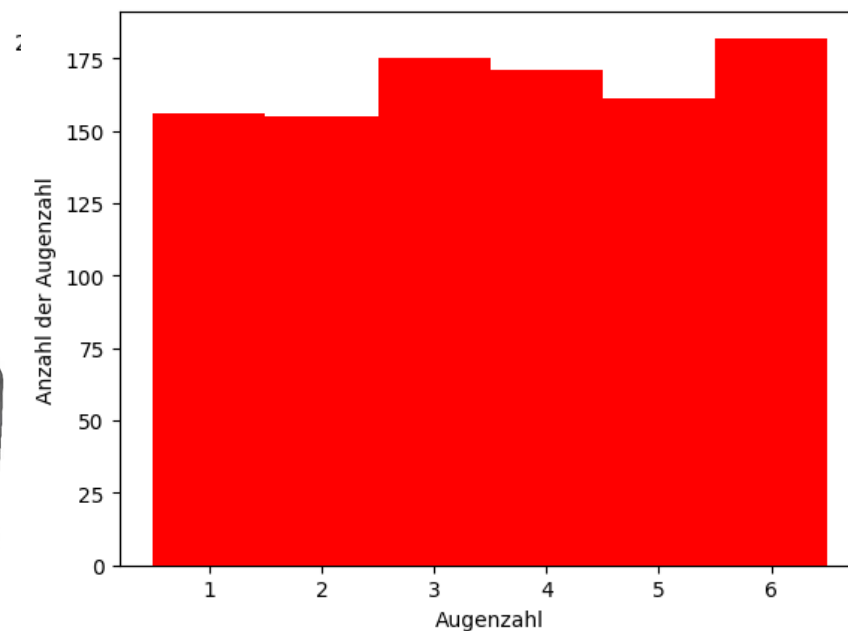
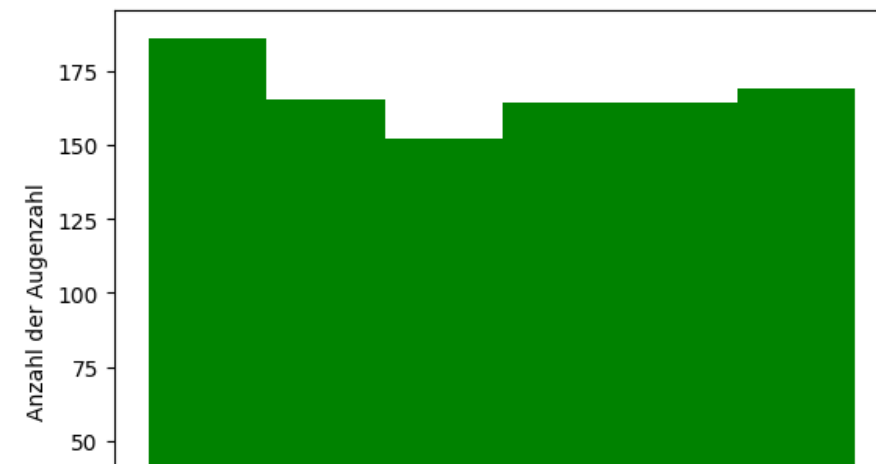
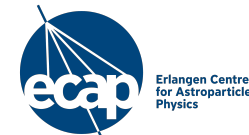
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



Histogramme



Histogramme



Histogramme



Wir wollen nun unsere Neutrino Ereignisse anhand ihrer Energie histogrammieren.

Problem: Die Energie ist kontinuierlich!

Beispiel: Körpergröße

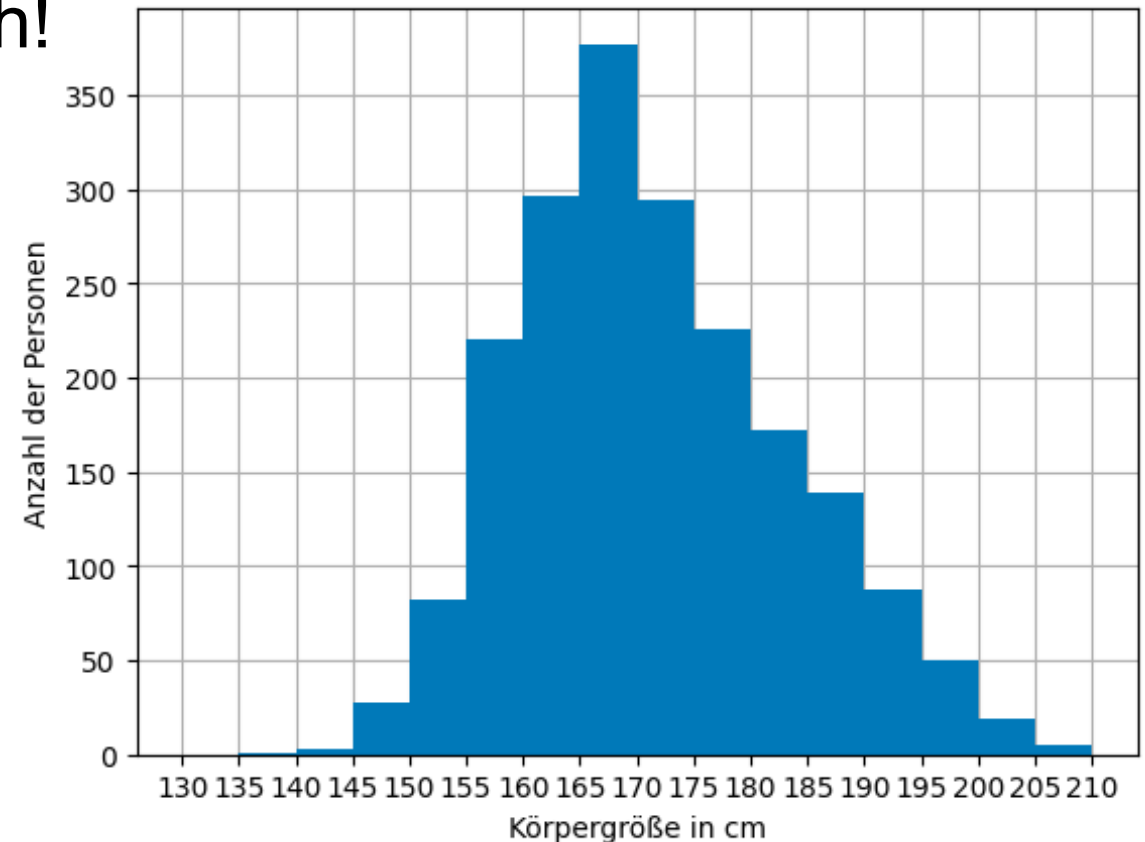
Histogramme



Wir wollen nun unsere Neutrino Ereignisse anhand ihrer Energie histogrammieren.

Problem: Die Energie ist kontinuierlich!

Beispiel: Körpergröße



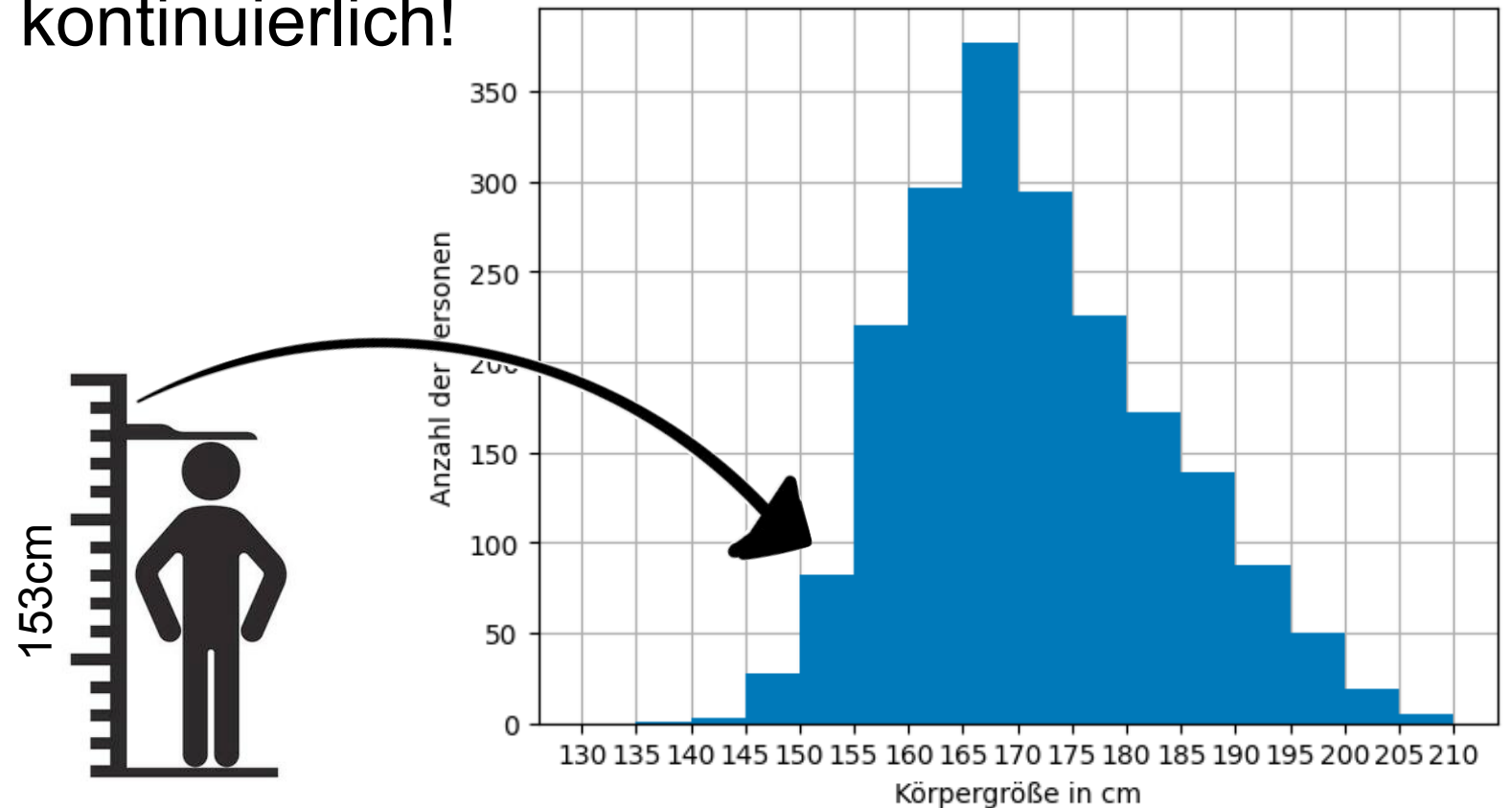
Histogramme



Wir wollen nun unsere Neutrino Ereignisse anhand ihrer Energie histogrammieren.

Problem: Die Energie ist kontinuierlich!

Beispiel: Körpergröße



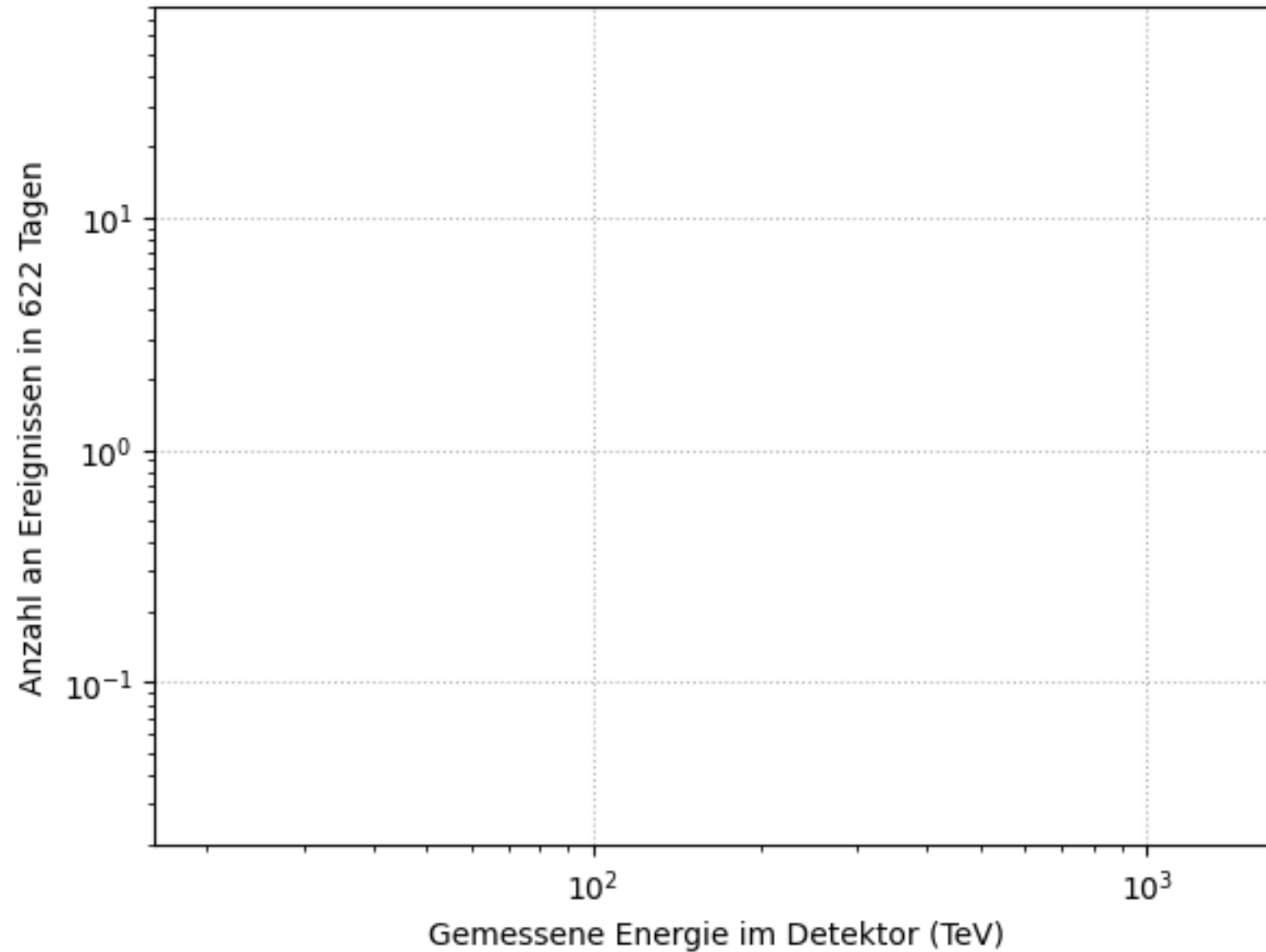
Neutrino Histogramm



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



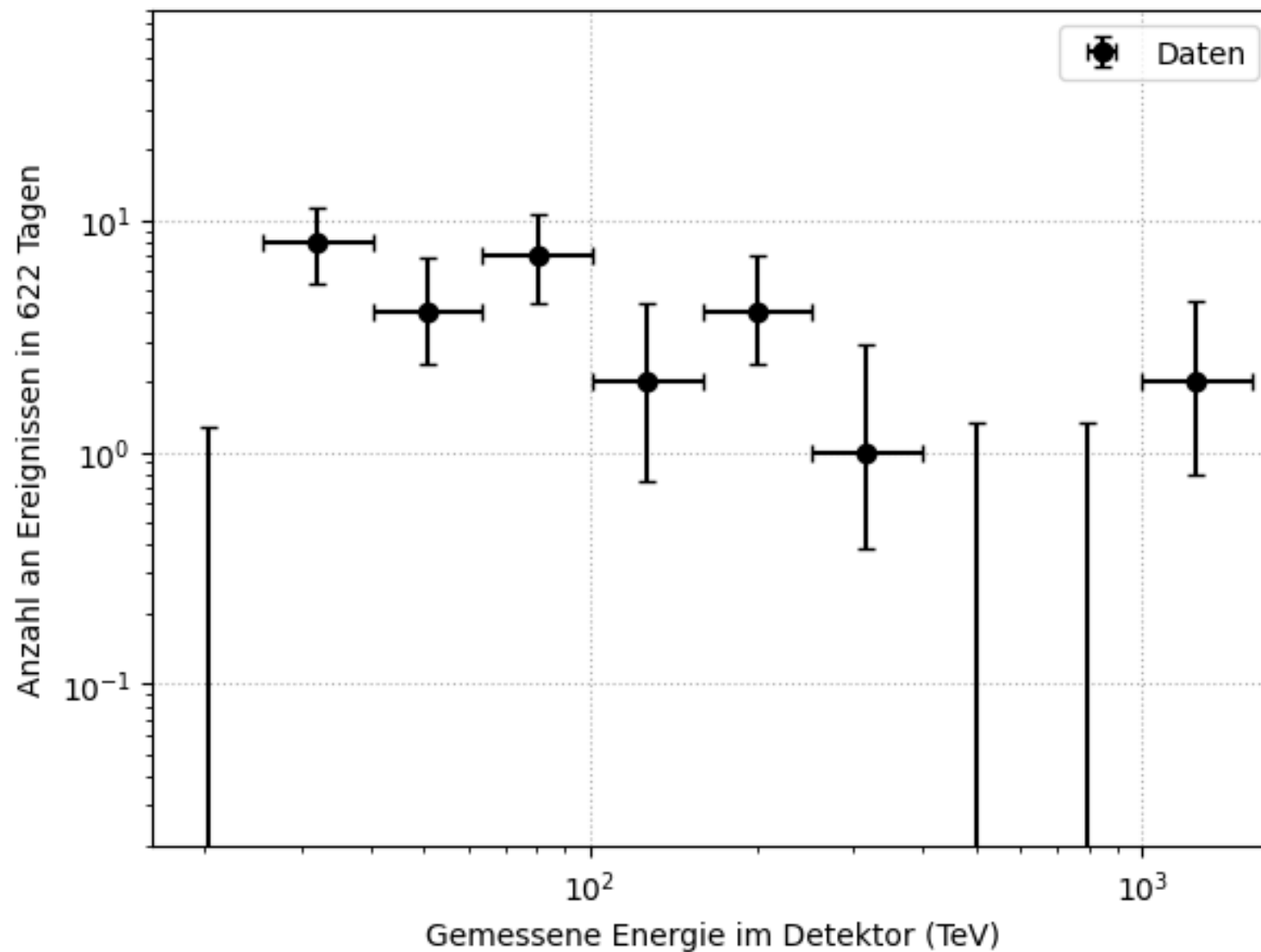
Neutrino Histogramm



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



Neutrino Histogramm

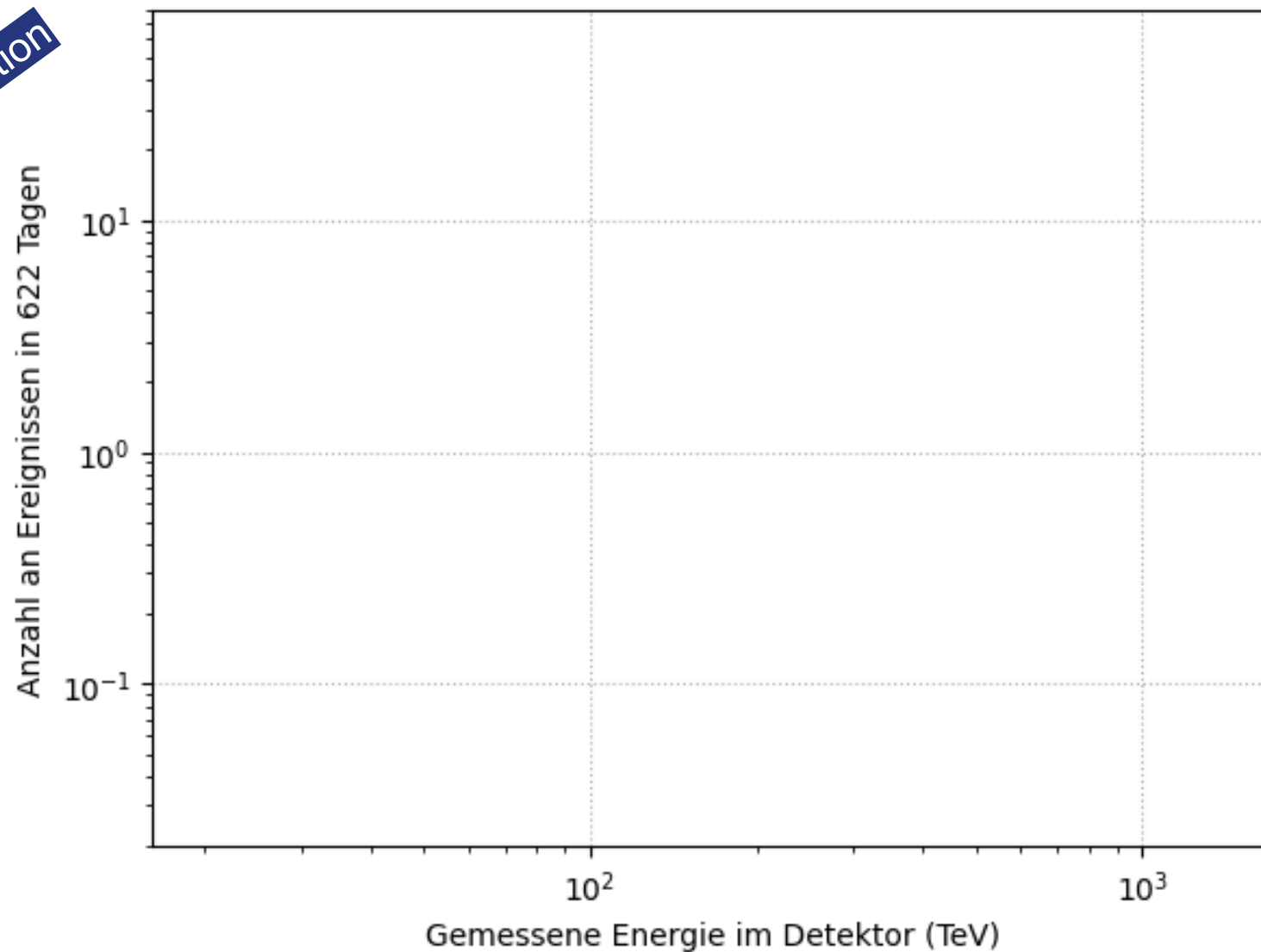


Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Vergleiche mit Simulation



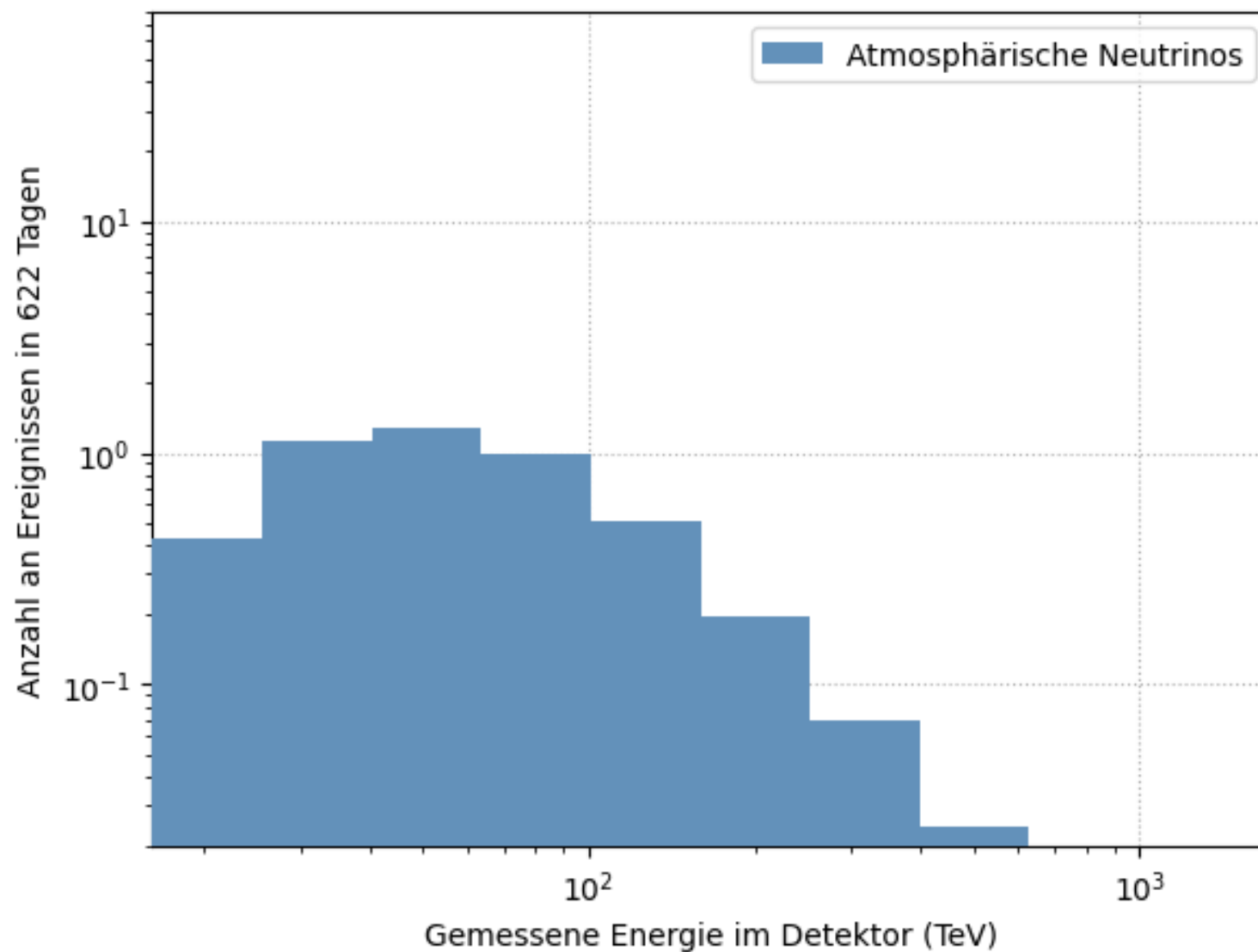
Neutrino Histogramm



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



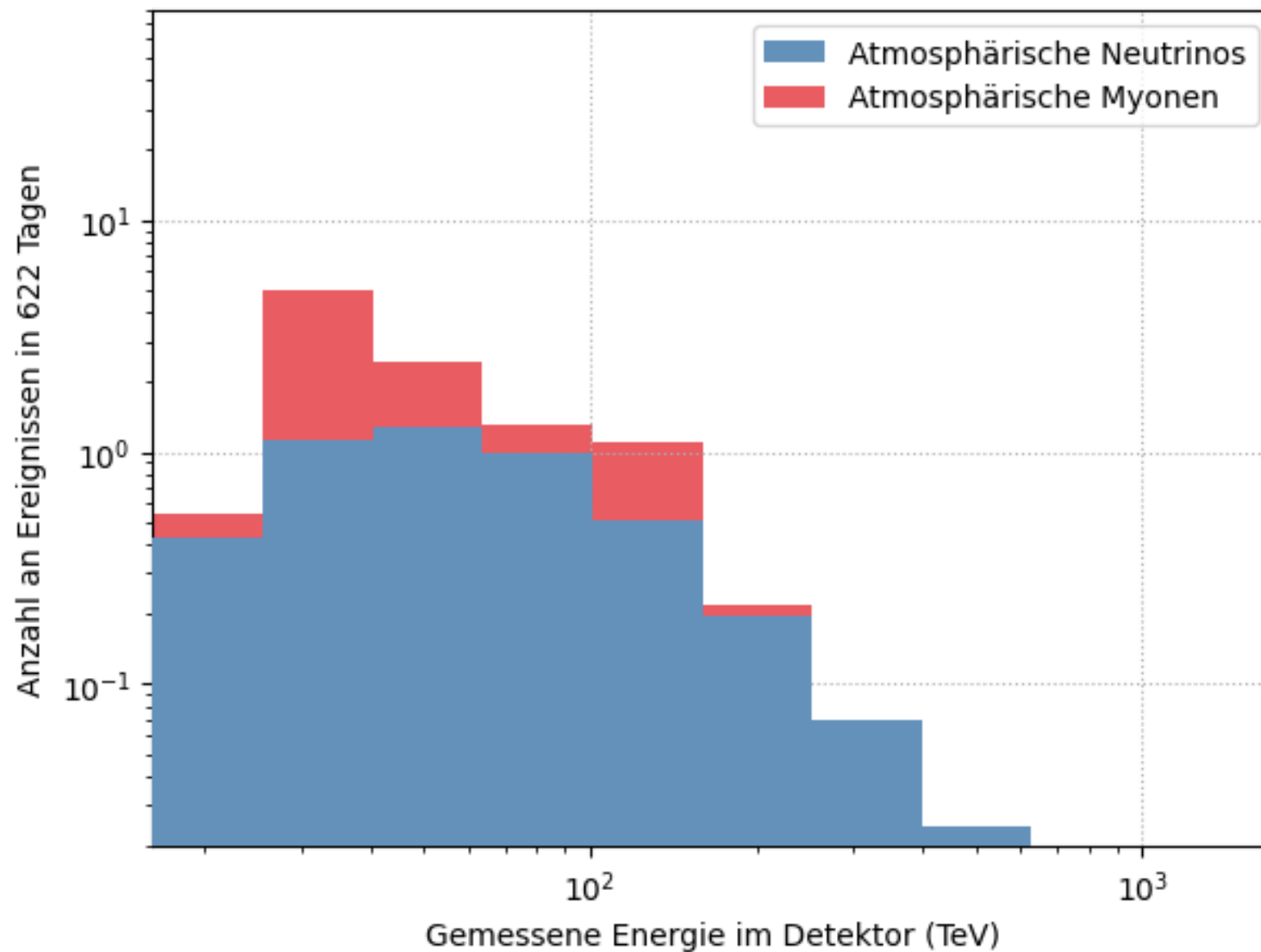
Neutrino Histogramm



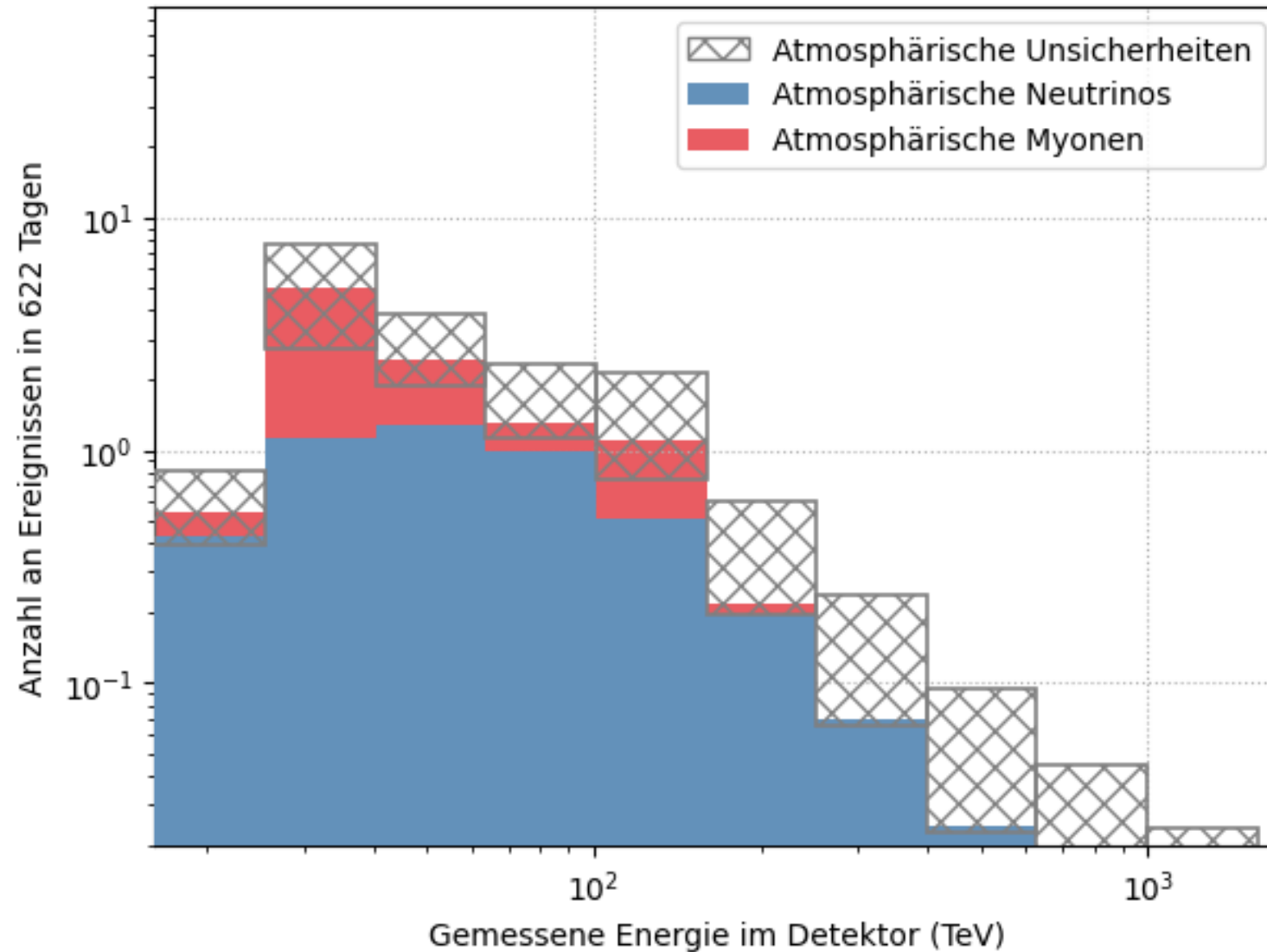
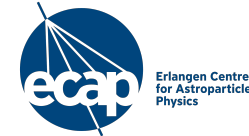
Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



Neutrino Histogramm



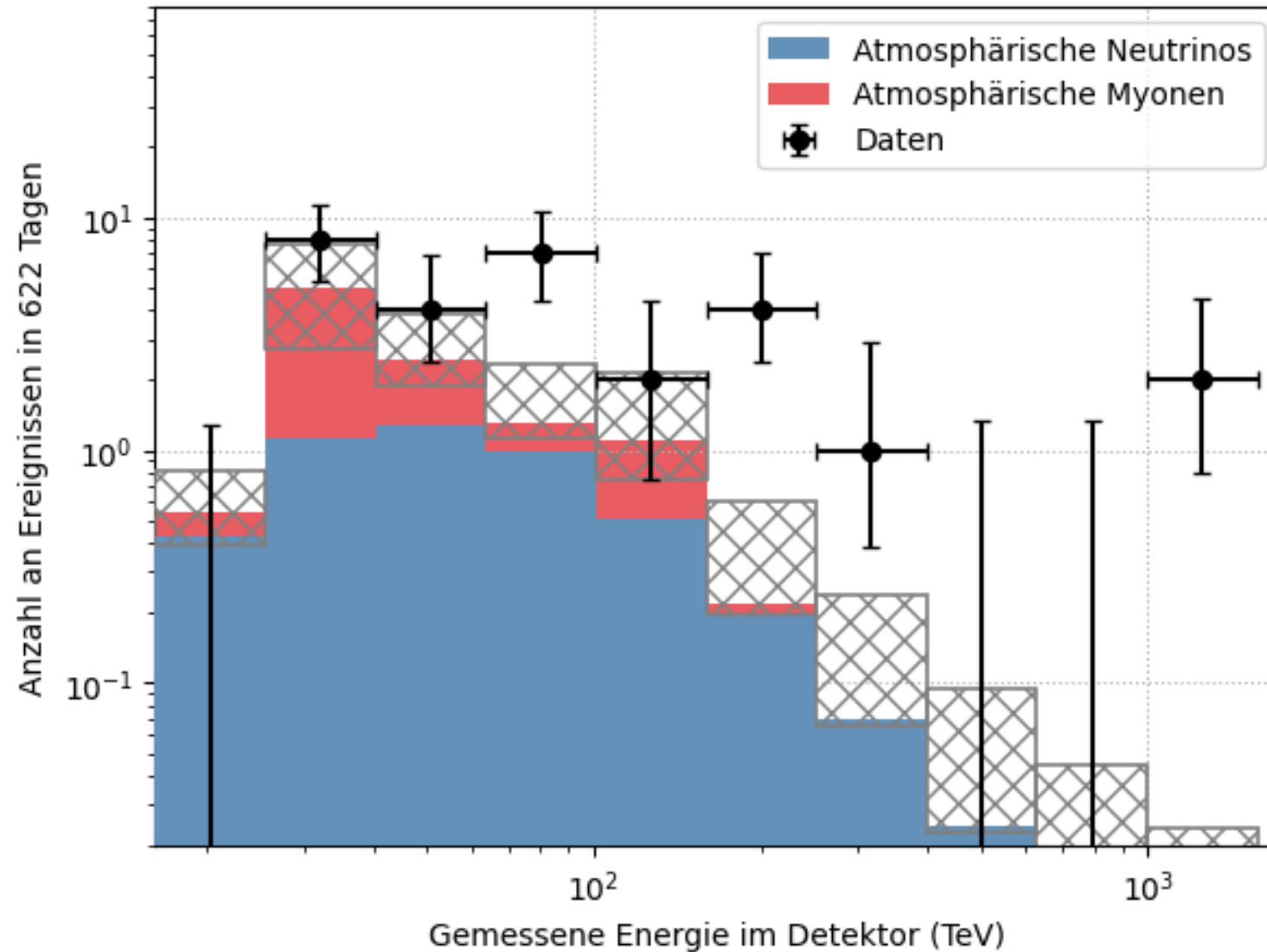
Neutrino Histogramm



Erlangen Centre
for Astroparticle
Physics

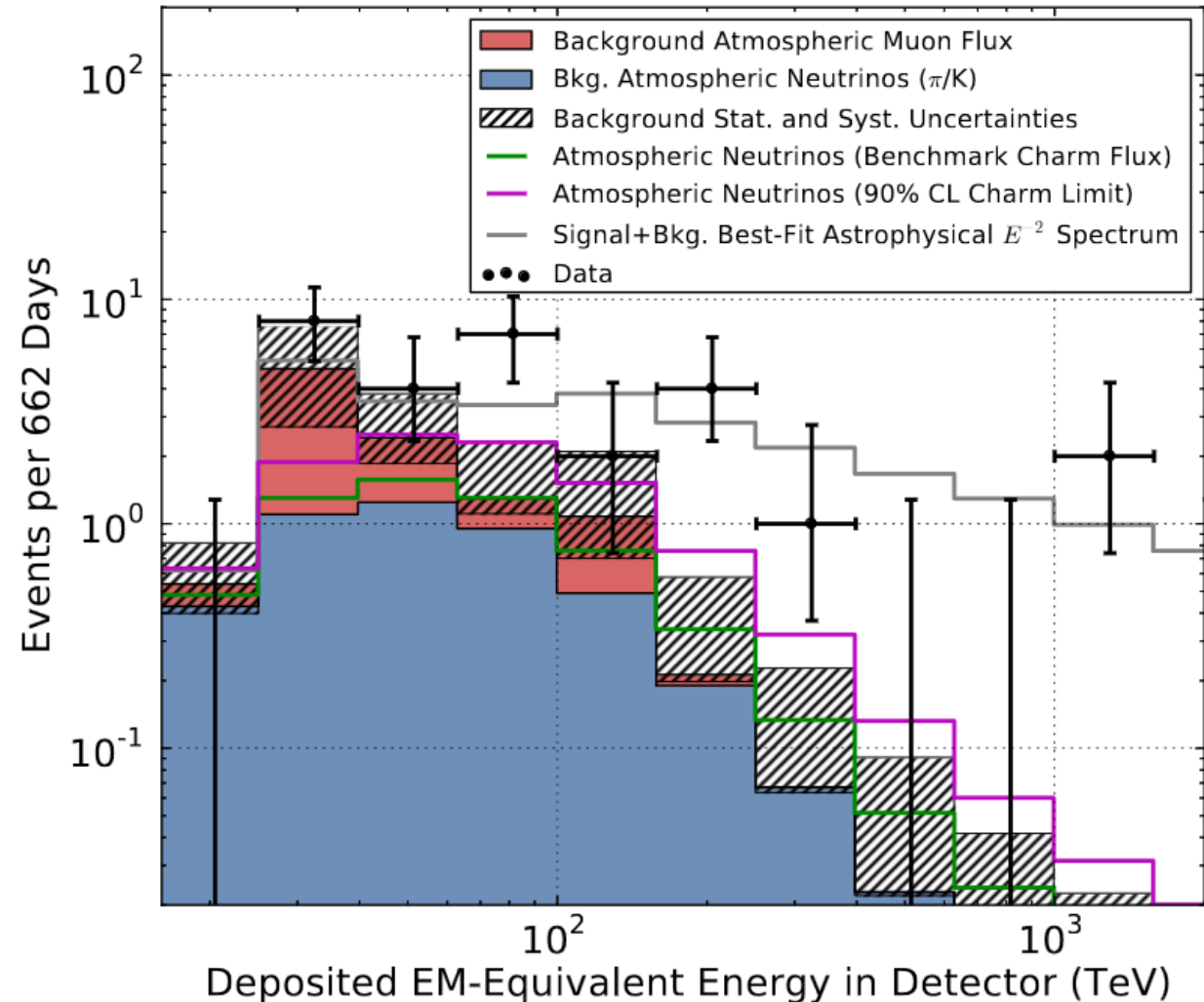


Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



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

Entdeckung von
kosmischen Neutrinos!



Das ganze sieht noch
überzeugender aus mit
längerer Messzeit!

Entdeckung von
kosmischen Neutrinos!

