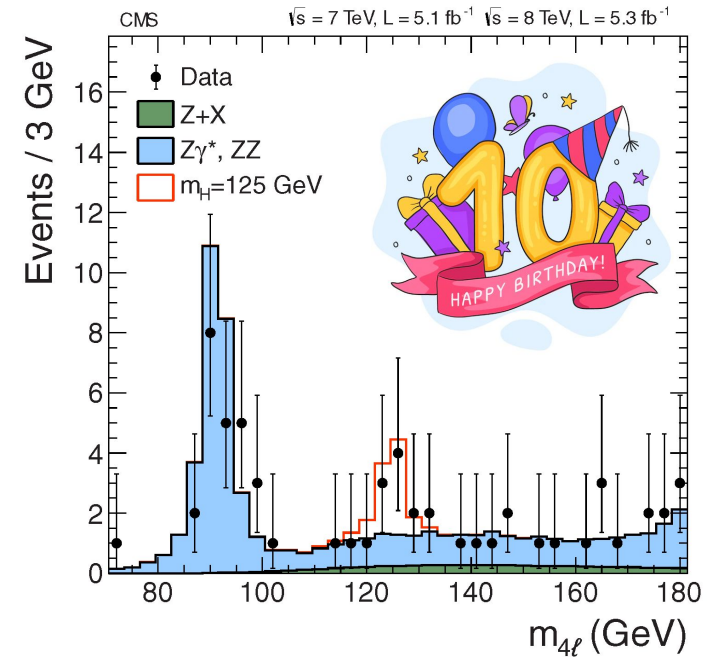


Higgs Entdeckung als ein Masterkurs für Fortgeschrittene

Artur Monsch, Günter Quast
21.03.2023

Das Higgs Boson

- Wichtiges Puzzlestück der Teilchenphysik
- 10 jähriges Jubiläum seit Entdeckung (04. Juli 2022)
- Aufwändige Suche von mehr als 40 Jahren!
 - Spannende Geschichte
 - **Kann von Schülerinnen und Schüler nacherlebt werden!**

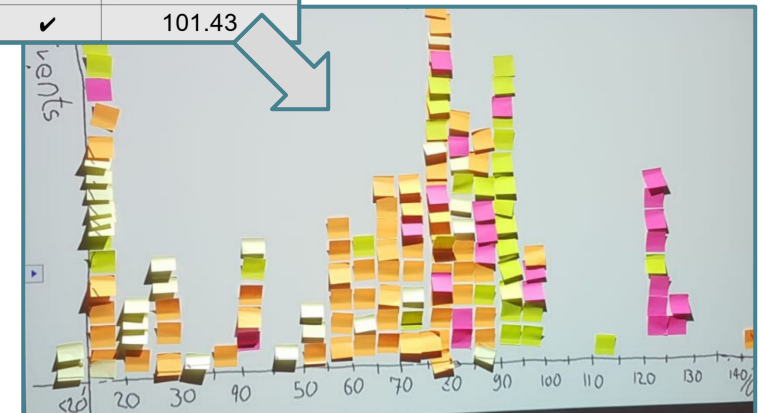
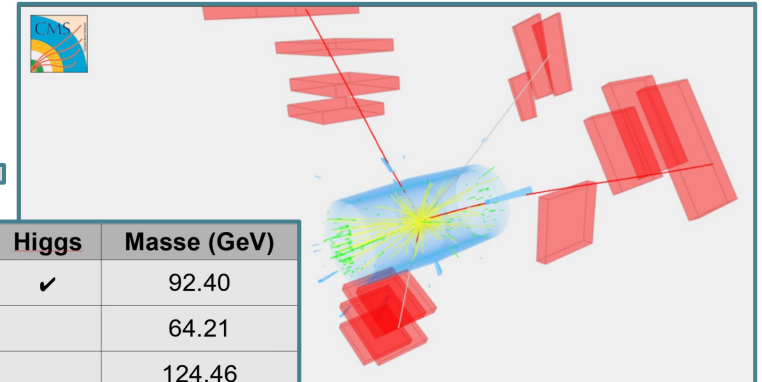


Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC

CMS Masterclass

- Verwendung von echten Messdaten
- Grafische Suche nach dem Higgs-Boson durch Zerfalls-Signaturen (Event Display)
- Ergänzung bereitgestellter Massenlisten
- Interaktive Erstellung einer Verteilung der invarianten Massen

Event	e	μ	W-Boson	Z-Boson	Higgs	Masse (GeV)
144532481	2	2		✓	✓	92.40
143329432	1	0	✓			64.21
134142083	0	0				124.46
112127190	0	4		✓	✓	101.43



Sehr guter Einstieg!

... und was kommt als nächstes?

Masterkurs für Fortgeschrittene

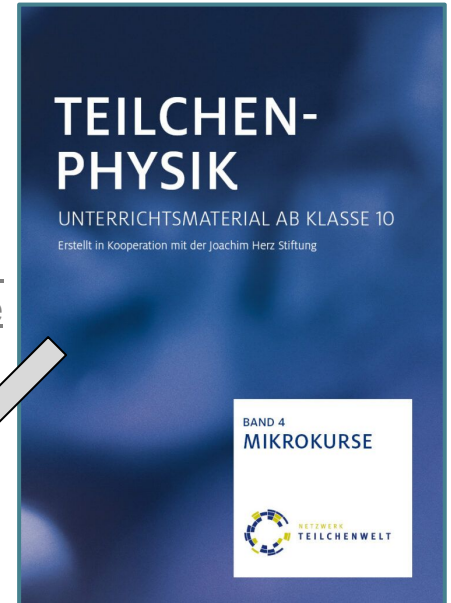
- Für Schülerinnen und Schüler der Oberstufe mit
 - Grundlegenden Python Kenntnissen
 - (Vorwissen aus der ersten Masterclass)
- Nutzung von Jupyter Notebooks:
 - Interaktives Bearbeiten, Festhalten des Wissenserwerbs
 - Intuitive Nutzung der Programmierung (Python)
 - Einfache (lokale) Benutzung im Webbrowser
- Verwendung von **echten Daten** (**vorgefiltert** und in .csv formatiert)
 - Öffentlich zugänglich über das CERN Open Data Portal
 - Hier verwendet: Daten vom CMS - Detektor (2012)

ATLAS ginge auch 😊 .

Invariante Masse und Teilchenrekonstruktion

- Zentrale Größe für Teilchenidentifikation und Suche nach (neuen) Teilchen
- Bekanntes Konzept aus Physik/Mathematik
- Einfache Übersetzung in Code durch Python
- Direkte Ausführung in Jupyter Notebook möglich

Teilchenphysik: Band 4: Mikrokurse



nach m umgestellte relativistische Energie-Impuls-Gleichung für das Mutterteilchen:

$$m = \frac{1}{c^2} \sqrt{E^2 - \vec{p}^2 \cdot c^2} = \frac{1}{c^2} \sqrt{\left(\sum_i E_i\right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i\right)^2 \cdot c^2}$$

```
import numpy as np
```

```
def calculate_invariant_mass(E, px, py, pz):
    E, px, py, pz = np.sum(E), np.sum(px), np.sum(py), np.sum(pz)
    invariant_mass_squared = E ** 2 - (px ** 2 + py ** 2 + pz ** 2)
    return np.sqrt(invariant_mass_squared)
```

Invariante Masse und Teilchenrekonstruktion

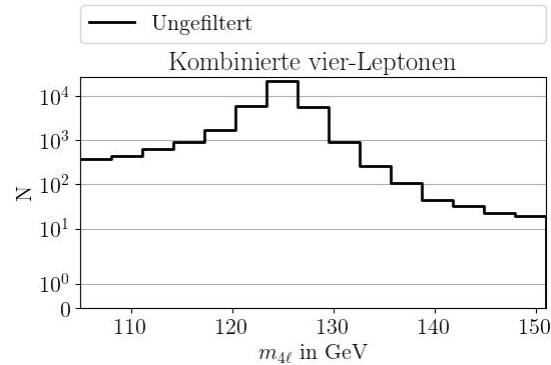
Rekonstruktion von Z-Bosonen, eine interdisziplinäre Aufgabe

Ausgangspunkt: vier Leptonen

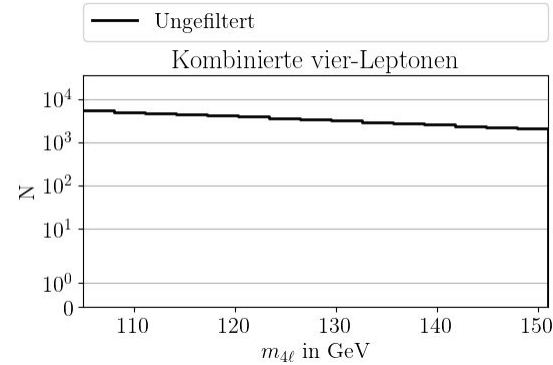
- Kombinationsmöglichkeiten von zwei Leptonen? (Kombinatorik)
- Welche davon können Z-Bosonen sein?
(Teilcheneigenschaften und Ladungserhaltung) (Teilchenphysik)
- Welche Kombination ist am nächsten an $91 \text{ GeV}/c^2$?
Anzahl an Kombinationen nach der ersten Auswahl? (Algorithmik)

(Was ändert sich bei mehr als vier Leptonen?)

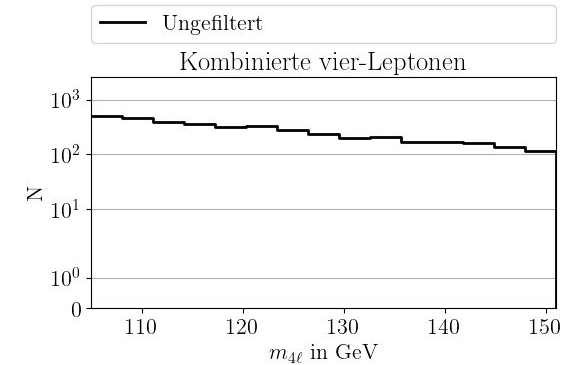
Signalanreicherung - Motivation



Signal-Simulation



Untergrund-Simulation



Messung

- Darstellung der vier Leptonen invarianten Massen als Häufigkeitsverteilung
- Vergleich: Signal und Untergrund (simuliert/erwartet) ↔ Messung

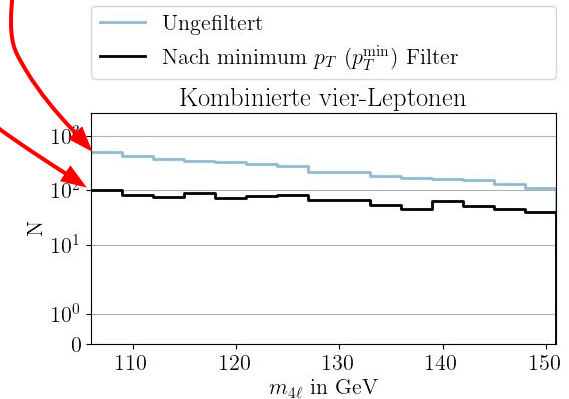
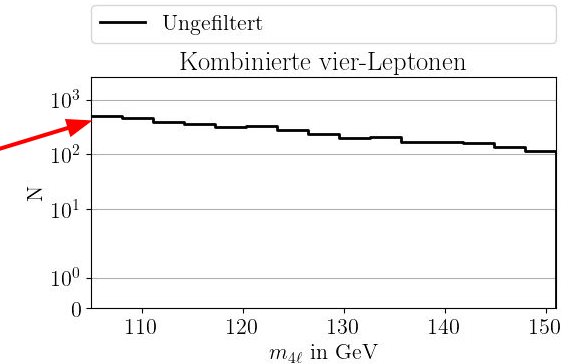
**Ohne zusätzliche Signalanreicherung
geht das Signal im Untergrund verloren!**



Signalanreicherung - Durchführung

- Bereitstellung von vorgefertigten Filtern
- Schwellenwerte, Reihenfolge und Anwendung von Teilnehmern bestimmbar

```
dataset.pipe(plot_masses, 'Ungefiltert')
       .pipe(Filter.min_pt_of_lepton, min_pt_electron=7, min_pt_muon=5)
       .pipe(plot_masses, 'Nach minimum $p_T$ Filter')
```



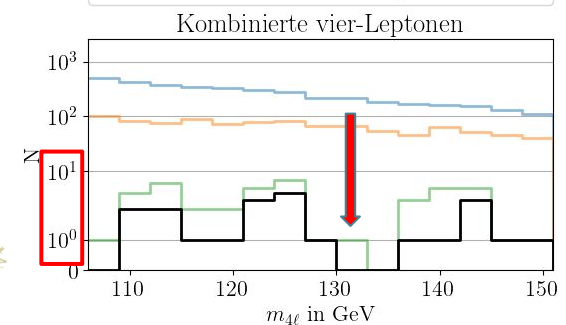
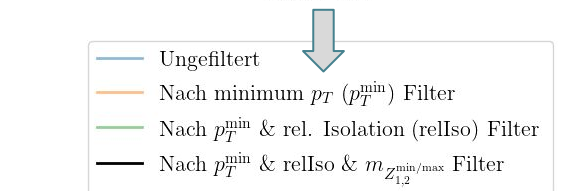
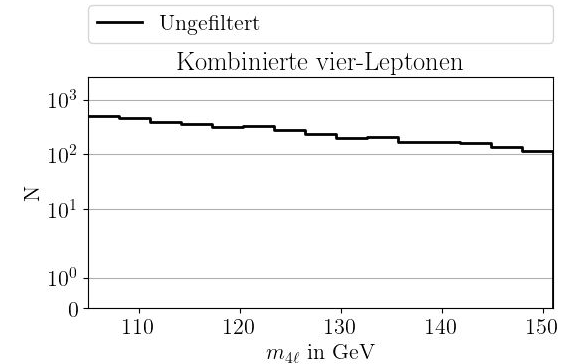
Signalanreicherung - Durchführung

- Bereitstellung von vorgefertigten Filtern
- Schwellenwerte, Reihenfolge und Anwendung von Teilnehmern bestimmbar

```
dataset.pipe(plot_masses, 'Ungefiltert')
        .pipe(Filter.min_pt_of_lepton, min_pt_electron=7, min_pt_muon=5)
        .pipe(plot_masses, 'Nach minimum $p_T$ Filter')
        .pipe(Filter. ...)
        ...
```

(eigene Filter mit Betreuern implementierbar)

Nach Anwendung der Filter bleiben bei der Messung nur eine Handvoll Ereignisse übrig!

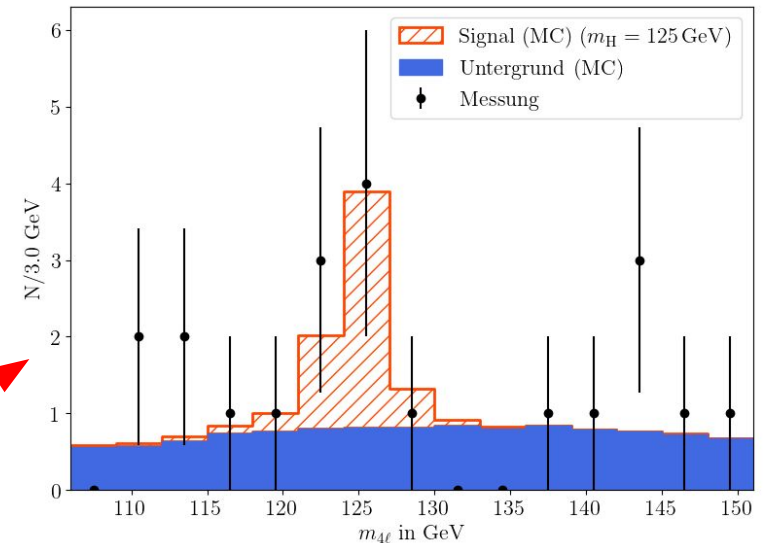


Signifikanz eines beobachteten Überschusses

- Ein Überschuss an Ereignissen wird beobachtet
... ist dieser nur eine Fluktuation des Untergrundes?
... oder ein Hinweis auf etwas Neues?

- Wie signifikant ist diese Beobachtung?

$$Z = \frac{s}{\sqrt{b}} \approx 3\sigma$$



Zusammenfassung

- Möglichkeit für interessierte Schülerinnen und Schüler ihr Wissen zu vertiefen
 - Schwierigkeitsgrad anpassbar
 - Nach Interessen von Teilnehmern erweiterbar

- Als ein Teil einer Facharbeit erprobt

- Vermittler aus Karlsruhe sind mit der grundlegenden Thematik vertraut

- Übung und deren Entwicklung: [GitHub](#)
 - Lokal oder [online ausführbar \(MyBinder.org\)](#)

