



Karlsruhe Institute of Technology



Institut für Experimentelle Teilchenphysik

T 76.6



Computer-Kurs auf Basis von Jupyter Notebooks zur Higgs-Entdeckung als Masterkurs für Fortgeschrittene

Artur Monsch, Günter Quast

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für experimentelle Teilchenphysik (ETP)



Warum Higgs?

- Theoretische Vorhersage bereits im Jahr 1964
- Entdeckung eines Higgs-artigen Bosons im Jahr 2012.
→ Januar 2013: Bestätigung als Higgs-Boson des Standardmodells!
- 10.12.2013: Peter Higgs  und François Englert 

| HIGGS-TEILCHEN | |
|---|--------------------------------------|
| NACHWEIS: 2012 | |
|  | |
| Masse: | $\sim 125000 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ |
| Elektrische Ladungszahl: | 0 |
| Starker Farbladungsvektor: | farblos $\vec{0}$ |
| Schwache Ladungszahl: | $-\frac{1}{2}$ |
| Mittlere Lebensdauer: | $2 \cdot 10^{-22} \text{ s}$ |

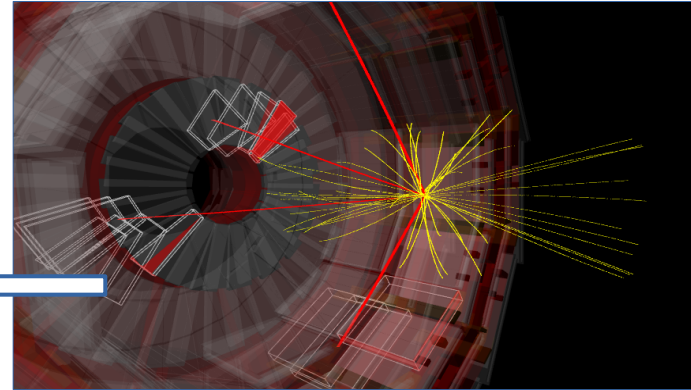
Netzwerk Teilchenwelt

→ Aktuelles und spannendes Thema für Schülerinnen und Schüler

Grundlage: CMS Masterclass I

- Grafische Auswahl von Ereignissen anhand passender Zerfallssignatur
- Bestimmung der invarianten Massen:
→ unvollständiges Tabellenblatt

| Event | e | μ | W cand | Z cand | H cand | Masse (GeV) |
|-----------|---|-------|--------|--------|--------|-------------|
| 145942990 | 4 | 0 | | ✓ | ✓ | 89.40 |
| 143928422 | 0 | 1 | ✓ | | | 74.41 |
| 114902683 | 0 | 0 | | | | 126.46 |



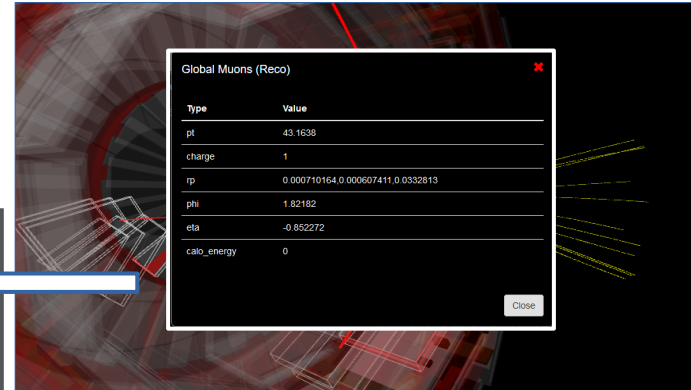
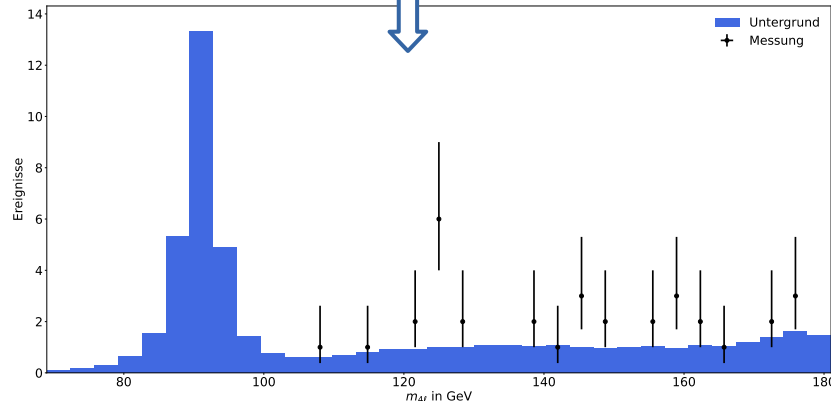
Für den Masterkurs für Fortgeschrittene...

- Teilnehmer? → **Schülerinnen und Schüler der Oberstufe**, die
 - an der ersten Masterclass teilgenommen oder
 - vergleichbares Wissen im Unterricht erarbeitet haben
- Arbeitsumgebung? → **Jupyter Notebooks!**
 - Alles an einem Platz: Fragen - Code - Ergebnisse
 - Intuitive Programmierung (Python)
 - Benutzung (lokal) im Webbrowser
- Daten? → **Weiterhin echte Daten!** → Formatierung in lesbare Formate → .csv
 - Veröffentlichung der Daten auf dem [CERN Open Data Portal](#)
 - Hier verwendet: [Daten vom CMS – Detektor \(2012\)](#)
 - Auch auf den ATLAS – Detektor übertragbar

CMS Masterclass II - Higgs

- (Grafische) Auswahl von Ereignissen anhand passender Zerfallssignatur
- Bestimmung der invarianten Massen:
→ selbst berechnen!

```
def calc_inv_mass(lorentz_vectors):  
    # Your brainpower goes here  
    v = sum(lorentz_vectors)  
    inv_mass = sqrt(v.E ** 2 - v.p ** 2)  
    return inv_mass
```



Bekanntes wiedererkennen...
... und programmieren.

Open Data

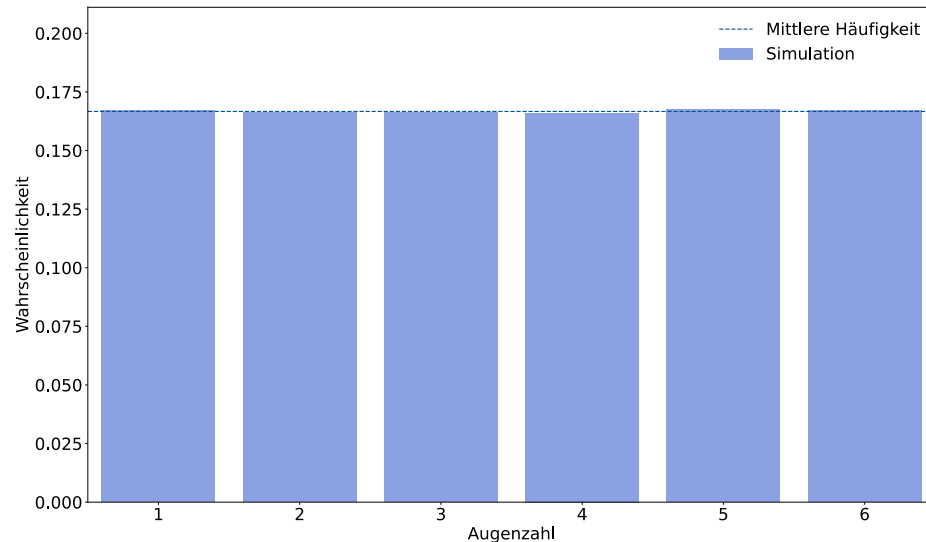


Teilchenphysik - Mikrokurse

CMS Masterclass II – Higgs: Statistik Analogie

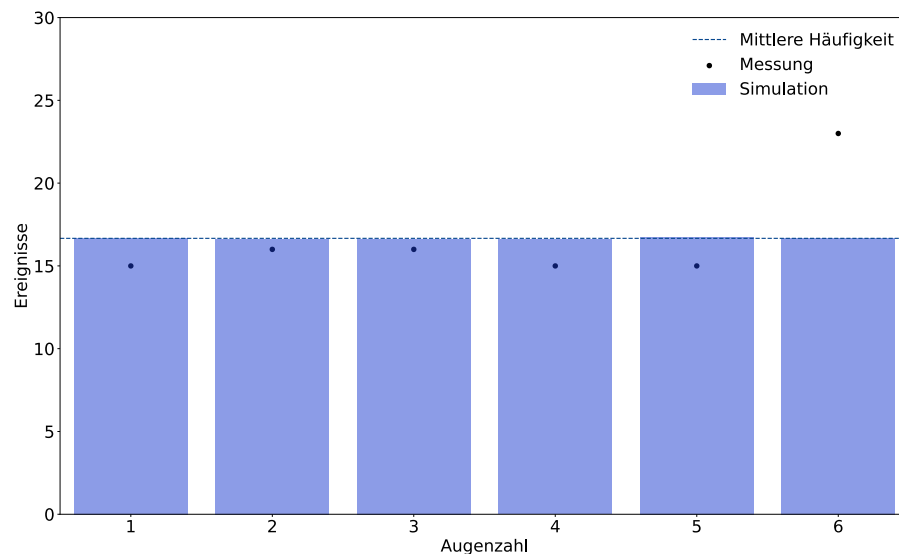
- Würfel mit einer Anomalie \leftrightarrow Simulation vom Untergrund und einem Higgs-Boson
 - Generierung einer Häufigkeitsverteilung

- Beschreibung einer Häufigkeitsverteilung
 - Programmieren wichtiger Größen



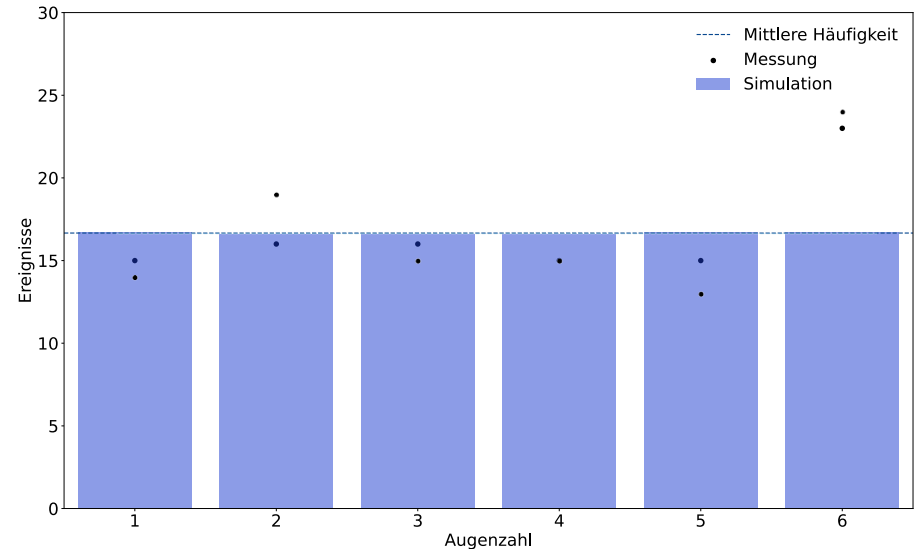
CMS Masterclass II – Higgs: Statistik Analogie

- Würfel mit einer Anomalie \leftrightarrow Simulation vom Untergrund und einem Higgs-Boson
 - Generierung einer Häufigkeitsverteilung
- Beschreibung einer Häufigkeitsverteilung
 - Programmieren wichtiger Größen
- Vergleich mit einem Experiment
 - Wie gut beschreibt das Modell die Messung?



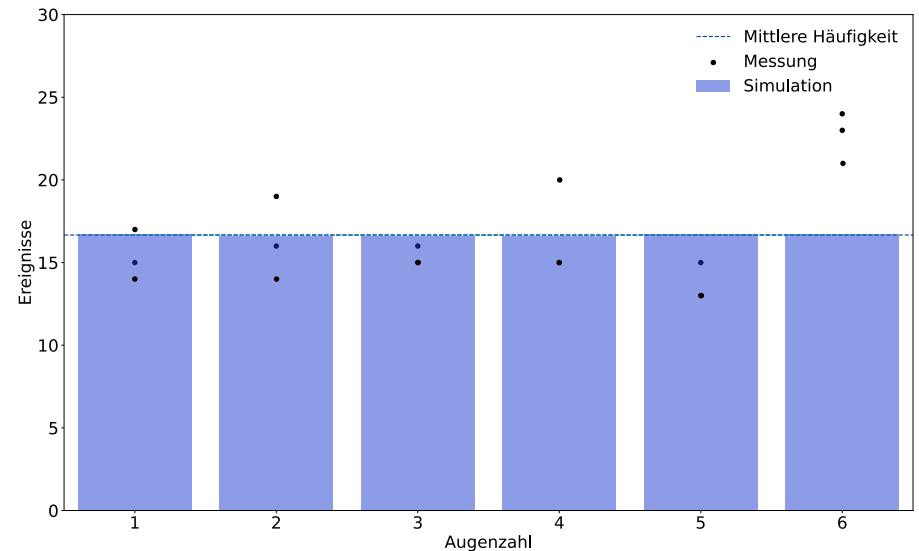
CMS Masterclass II – Higgs: Statistik Analogie

- Würfel mit einer Anomalie \leftrightarrow Simulation vom Untergrund und einem Higgs-Boson
 - Generierung einer Häufigkeitsverteilung
- Beschreibung einer Häufigkeitsverteilung
 - Programmieren wichtiger Größen
- Vergleich mit einem Experiment
 - Wie gut beschreibt das Modell die Messung?



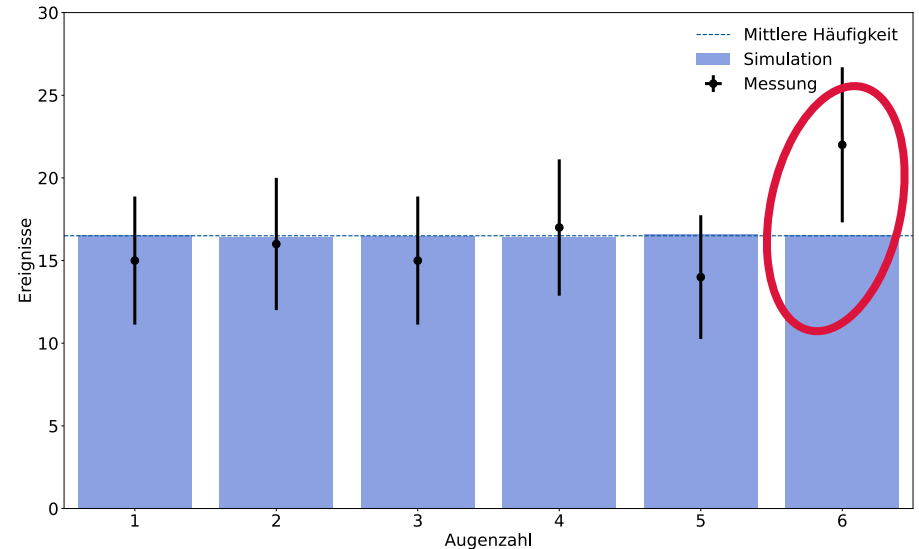
CMS Masterclass II – Higgs: Statistik Analogie

- Würfel mit einer Anomalie \leftrightarrow Simulation vom Untergrund und einem Higgs-Boson
 - Generierung einer Häufigkeitsverteilung
- Beschreibung einer Häufigkeitsverteilung
 - Programmieren wichtiger Größen
- Vergleich mit einem Experiment
 - Wie gut beschreibt das Modell die Messung?



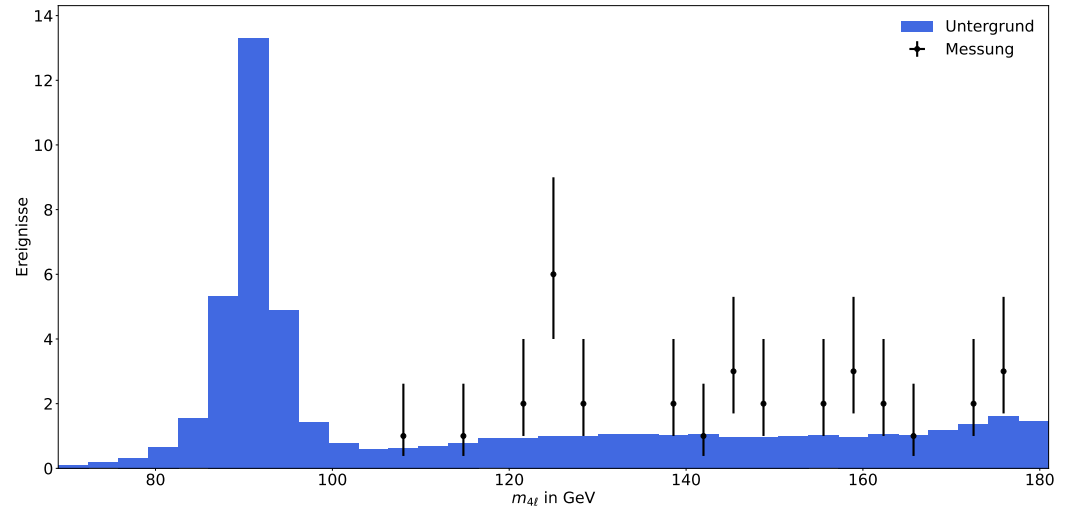
CMS Masterclass II – Higgs: Statistik Analogie

- Würfel mit einer Anomalie \leftrightarrow Simulation vom Untergrund und einem Higgs-Boson
 - Generierung einer Häufigkeitsverteilung
- Beschreibung einer Häufigkeitsverteilung
 - Programmieren wichtiger Größen
- Vergleich mit einem Experiment
 - Wie gut beschreibt das Modell die Messung?
 - **Ist ein beobachteter Überschuss signifikant?**



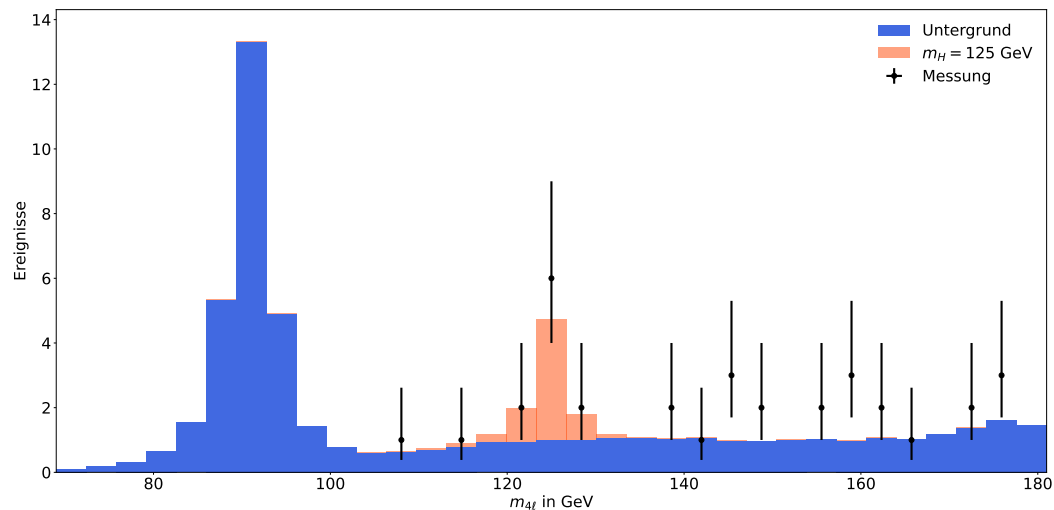
CMS Masterclass II – Higgs

- Theoretische Erwartung als Häufigkeitsverteilung...
 - ... ohne Higgs-Boson



CMS Masterclass II – Higgs

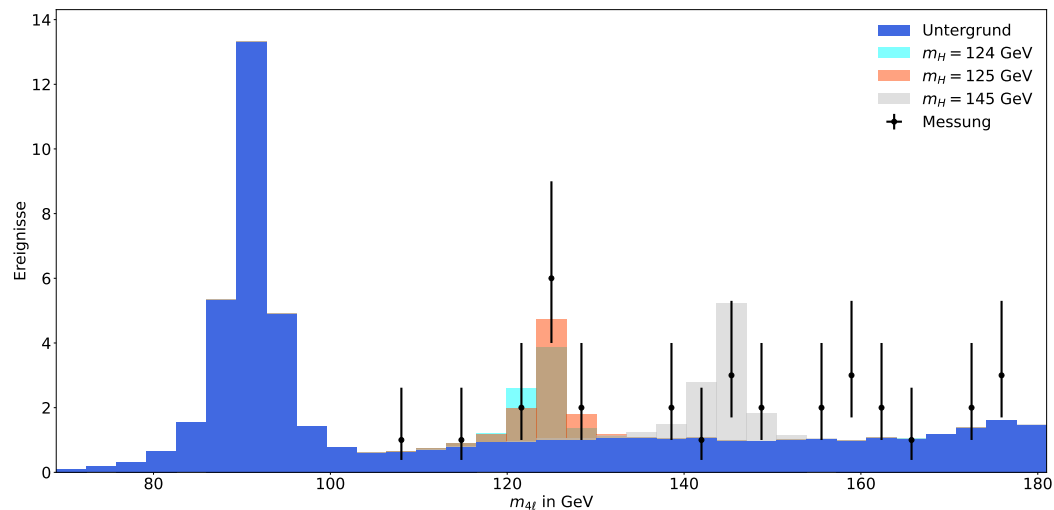
- Theoretische Erwartung als Häufigkeitsverteilung...
 - ... **ohne** Higgs-Boson
 - ... **mit** einem Higgs-Boson gegebener Masse



CMS Masterclass II – Higgs

- Theoretische Erwartung als Häufigkeitsverteilung...

- ... **ohne** Higgs-Boson
- ... **mit** einem Higgs-Boson
gegebener Masse?



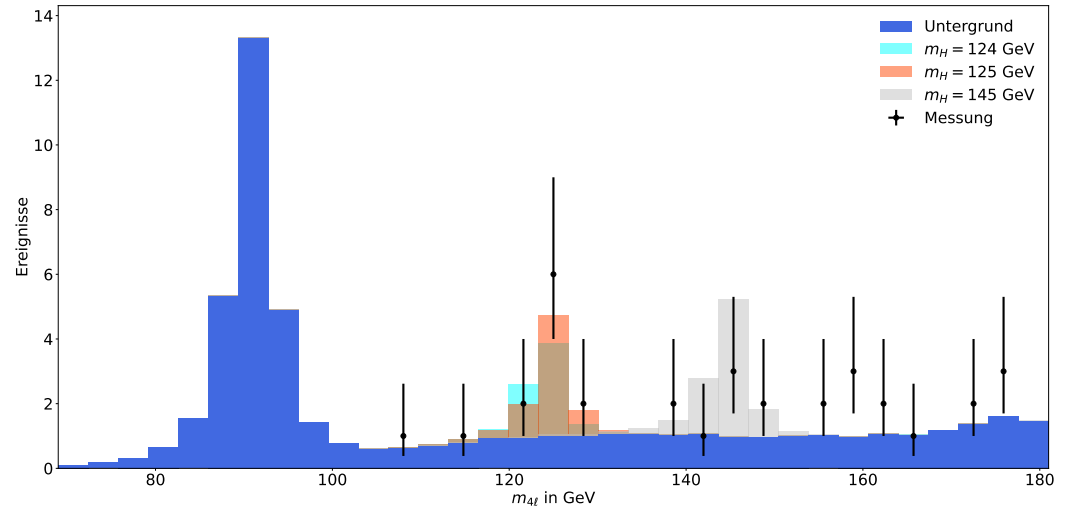
CMS Masterclass II – Higgs

- Theoretische Erwartung als Häufigkeitsverteilung...

- ... **ohne** Higgs-Boson
- ... **mit** einem Higgs-Boson gegebener Masse?

- Aufgabe:
Auswahl einer Vorhersage für ein Higgs-artiges Boson...

... **mithilfe von Hypothesentests**



... auch von grundlegender Bedeutung und Teil des Lehrplans!

[...] das Argumentationsmuster erläutern, das dem Testen von Hypothesen zugrunde liegt [...]
Signifikanzniveau und Irrtumswahrscheinlichkeit gegeneinander abgrenzen [...]

Bildungsplan 2016 – Gymnasium – Mathematik (BaWü)

CMS Masterclass II – Aufgabenstellungen

- Suche nach einem Higgs-artigen Boson im Event-Display
- Signalanreicherung in größeren Datensätzen mit Programmieraufgaben:
 - Erkennung von e und μ
 - Kombinationen zu Z Kandidaten
 - Berechnung von invarianten Massen (Z_1, Z_2, Z_1Z_2)
 - Unterdrücken von Untergrund
 - Erzeugung von Häufigkeitsverteilung
 - Statistische Auswertung

„Expertengruppe“: Ereignisse

- Aufteilung in Expertengruppen für Myonen und Elektronen

„Expertengruppe“: Statistik

- Würfelbeispiel und Übertragung auf die Higgs Suche

„Expertengruppe“: Theorie

- Genaueres Verständnis der Higgs Vorhersage mit simulierten Ereignissen

Paralleles bzw. sequenzielles Arbeiten im Falle kleiner Gruppenstärke

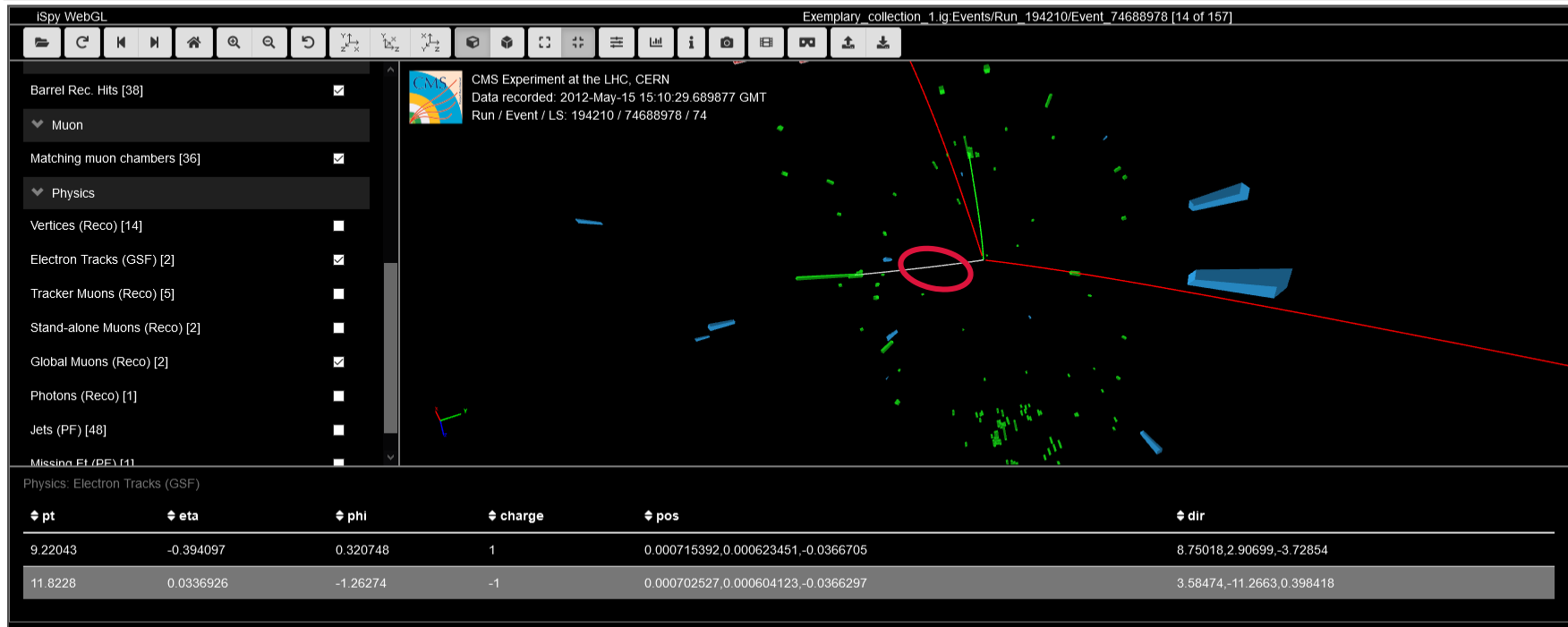
Bereitgestellte Hilfen

- Jupyter Notebooks mit vorbereitenden Aufgabenstellungen
- Angepasste Datensätze
 - Unterschiedlich viel Untergrund
 - Vorgegebene physikalischen Größen
 - Angepasste simulierte Daten
- Ausführung auf einem Jupyter Server am Institut
 - oder Umgebung auch als Docker Container zur lokalen Ausführung (Win 10 v20H2+)

„Live“ Demo

anschließend über die IspyWebGL Option `Open` eingelesen werden.

```
In [4]: %%html
<iframe src="https://ispy-webgl.web.cern.ch/ispy-webgl/" width="100%" height="700"></iframe>
```

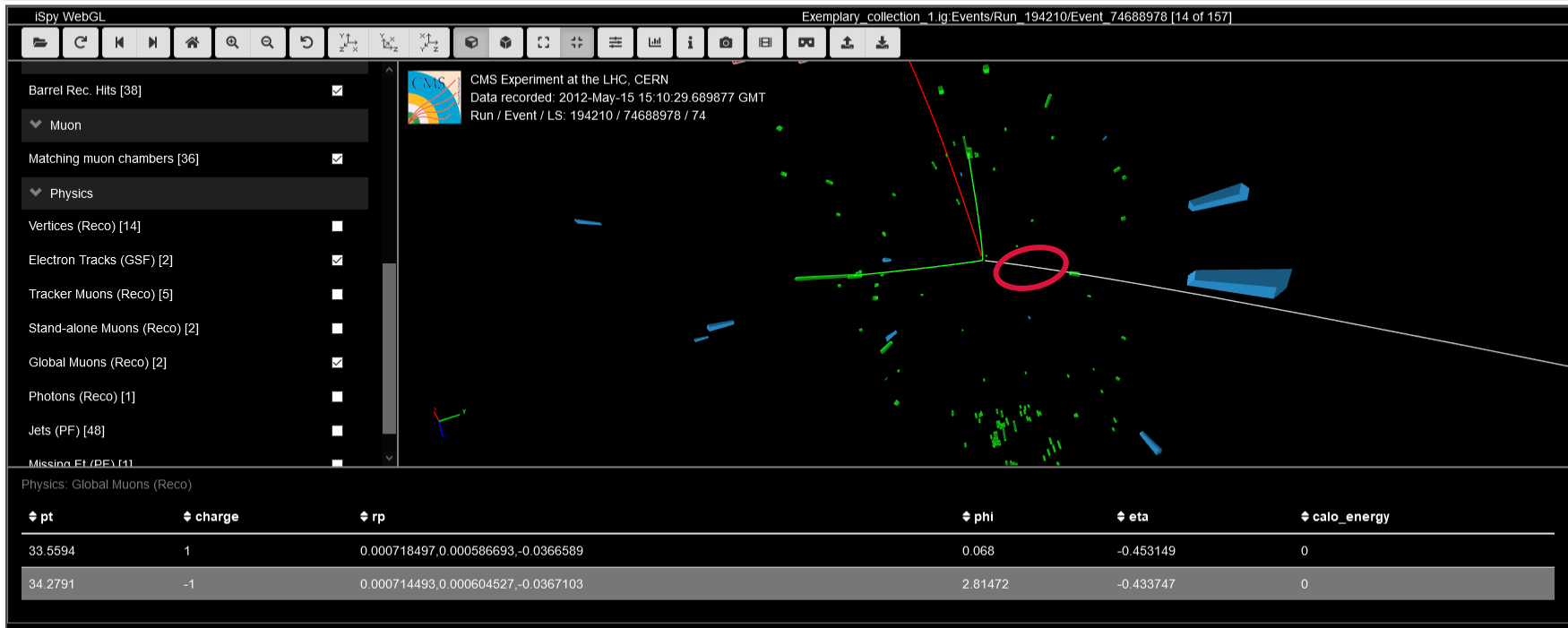


Nach der Berechnung der invarianten Massen der vier Leptonen mithilfe der oben implementierten Formel können die Ergebnisse nun in einem Histogramm zusammengetragen werden:

```
In [ ]: from include.widget.HiggsWidget import HiggsWidget as HW
```

anschließend über die IspyWebGL Option `Open` eingelesen werden.

```
In [4]: %%html
<iframe src="https://ispy-webgl.web.cern.ch/ispy-webgl/" width="100%" height="700"></iframe>
```

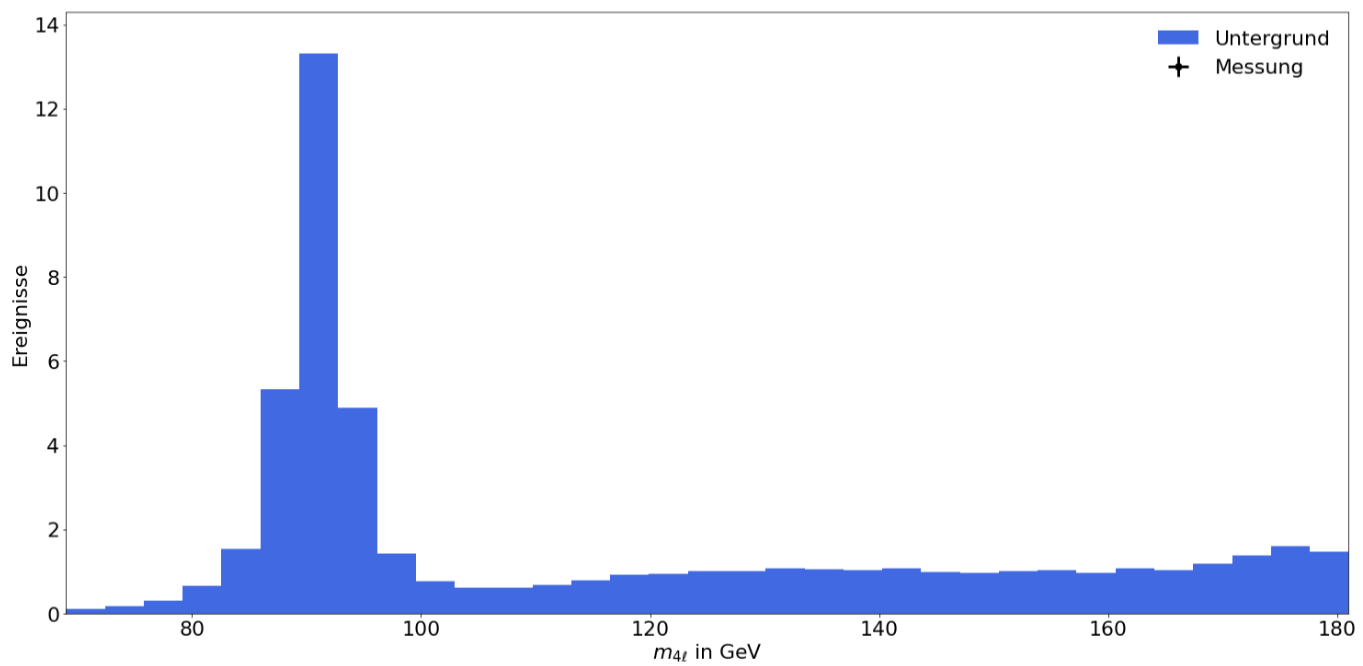


Nach der Berechnung der invarianten Massen der vier Leptonen mithilfe der oben implementierten Formel können die Ergebnisse nun in einem Histogramm zusammengetragen werden:

```
In [ ]: from include.widget.HiggsWidget import HiggsWidget as HW
```

```
In [7]: hw = HW(language="DE")  
hw.run
```

Histogramm



■ Untergrund
+ Messung

Bins

Bereich

Statistische Bewertung

Simulierte Daten von einem Higgs Boson der Masse:

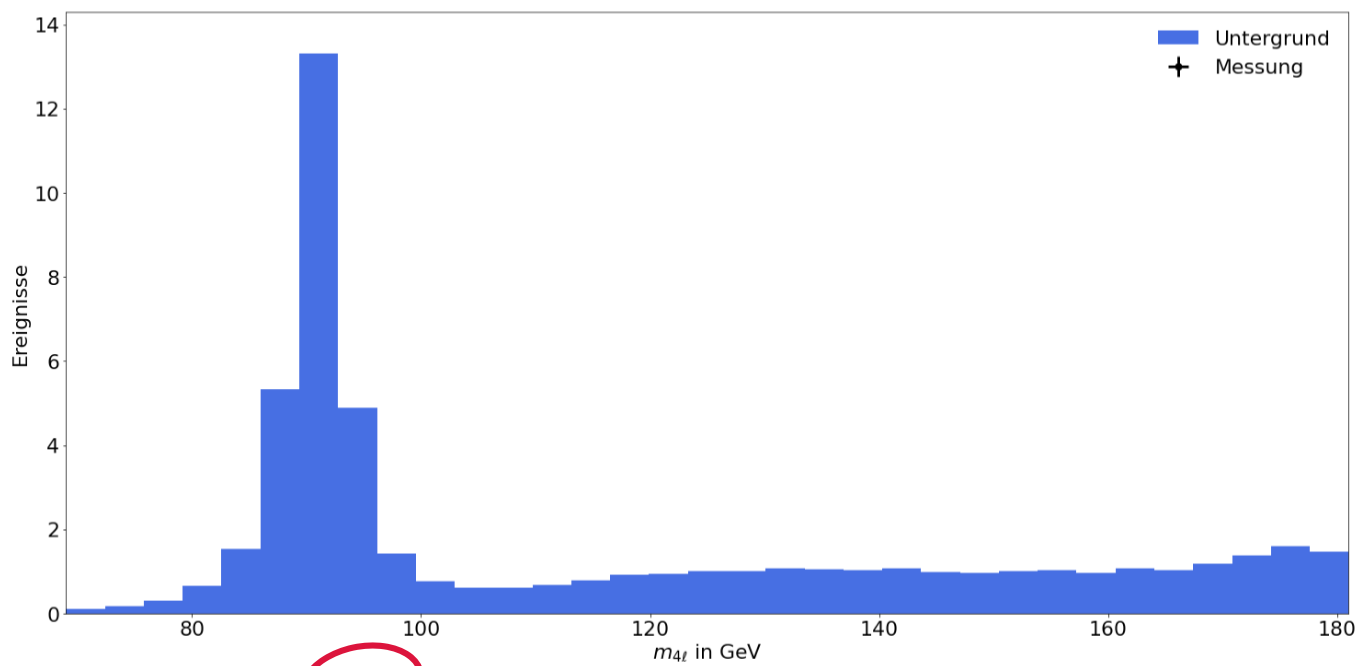
- $m_{H} = 115$ GeV
- $m_{H} = 120$ GeV
- $m_{H} = 122$ GeV
- $m_{H} = 124$ GeV
- $m_{H} = 125$ GeV
- $m_{H} = 128$ GeV
- $m_{H} = 130$ GeV
- $m_{H} = 135$ GeV
- $m_{H} = 140$ GeV
- $m_{H} = 145$ GeV
- $m_{H} = 150$ GeV

Messung hinzufügen

Messung:

```
In [7]: hw = HW(language="DE")  
hw.run
```

Histogramm



Bins:
Bereich:
 Statistische Bewertung

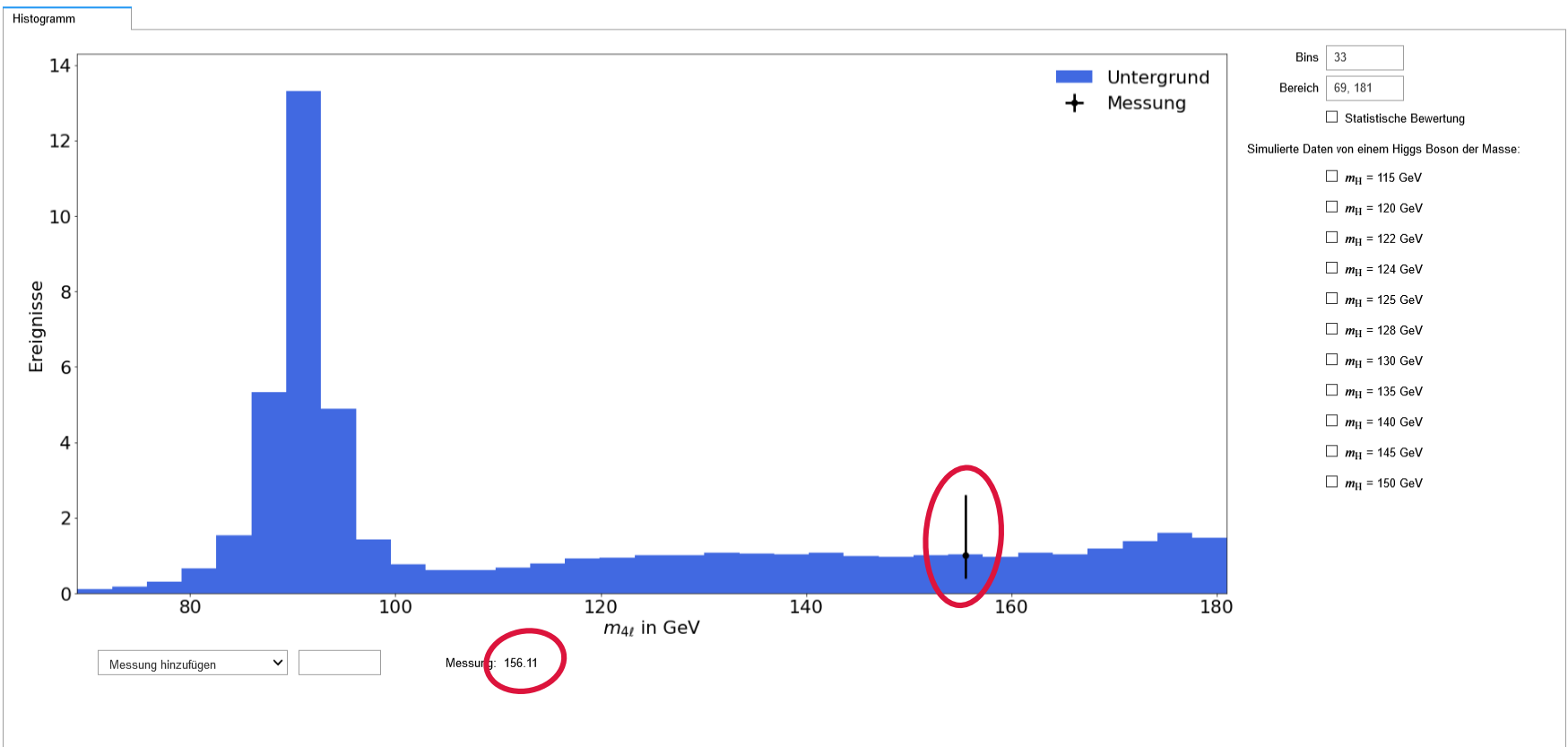
Simulierte Daten von einem Higgs Boson der Masse:

- $m_{H} = 115$ GeV
- $m_{H} = 120$ GeV
- $m_{H} = 122$ GeV
- $m_{H} = 124$ GeV
- $m_{H} = 125$ GeV
- $m_{H} = 128$ GeV
- $m_{H} = 130$ GeV
- $m_{H} = 135$ GeV
- $m_{H} = 140$ GeV
- $m_{H} = 145$ GeV
- $m_{H} = 150$ GeV

Messung hinzufügen

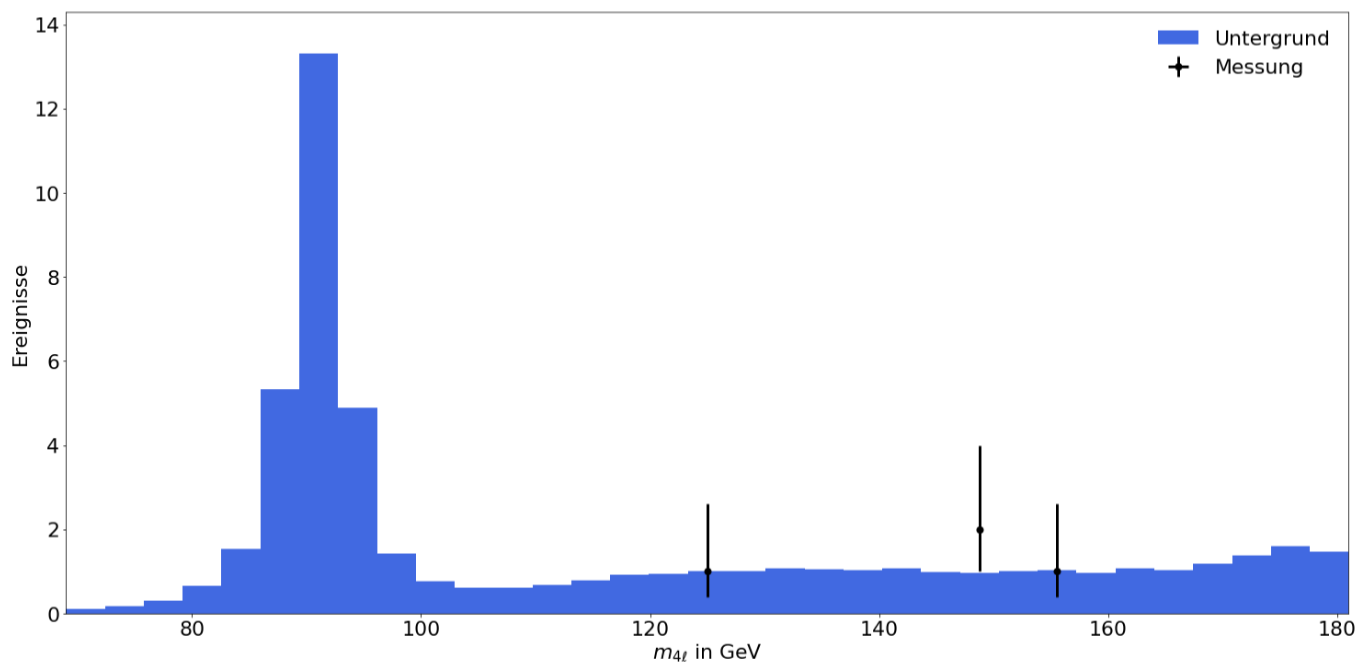
Messung:

```
In [7]: hw = HW(language="DE")  
hw.run
```



```
In [7]: hw = HW(language="DE")  
hw.run
```

Histogramm



Bins:
Bereich:
 Statistische Bewertung

Simulierte Daten von einem Higgs Boson der Masse:

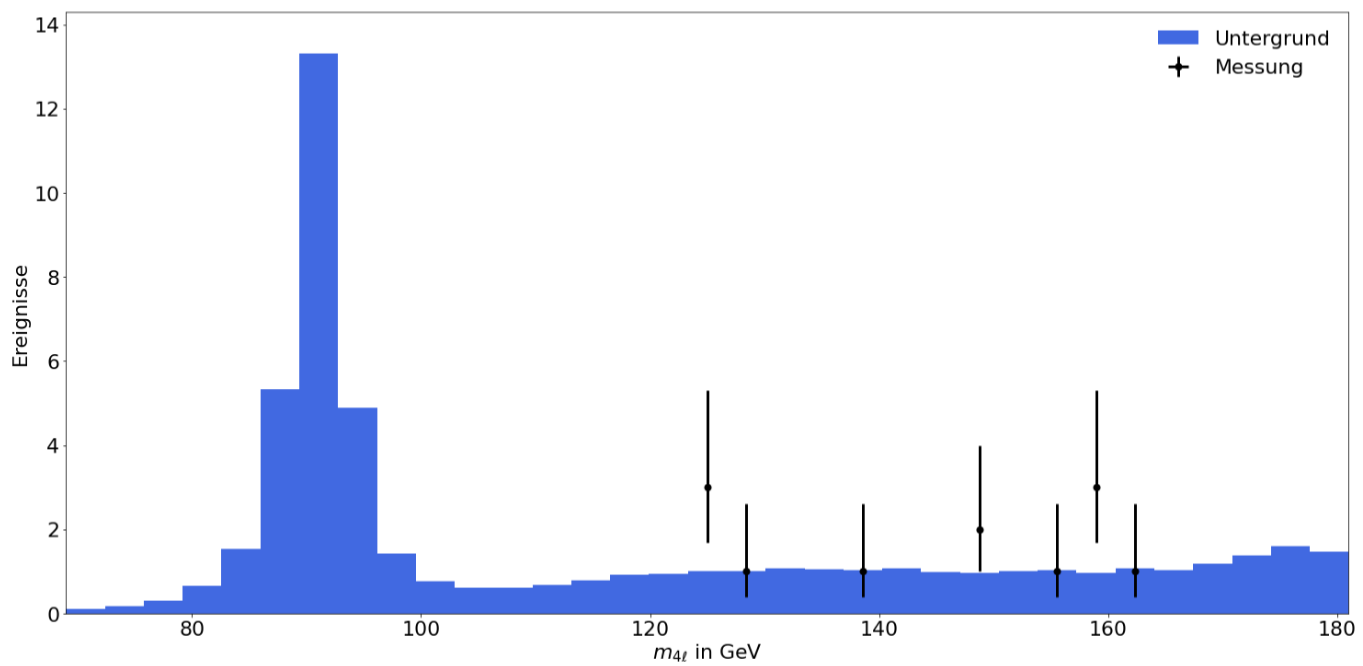
- $m_{H} = 115$ GeV
- $m_{H} = 120$ GeV
- $m_{H} = 122$ GeV
- $m_{H} = 124$ GeV
- $m_{H} = 125$ GeV
- $m_{H} = 128$ GeV
- $m_{H} = 130$ GeV
- $m_{H} = 135$ GeV
- $m_{H} = 140$ GeV
- $m_{H} = 145$ GeV
- $m_{H} = 150$ GeV

Messung hinzufügen

Messung: 126.477, 147.77, 148.94, 156.11

```
In [7]: hw = HW(language="DE")  
hw.run
```

Histogramm



Messung hinzufügen

Messung: 124.634, 126.292, 126.477, 128.583, 140.123, 147.77, 148.94, 156.11, 157.516, 157.869, 160.54, 160.655

Bins

Bereich

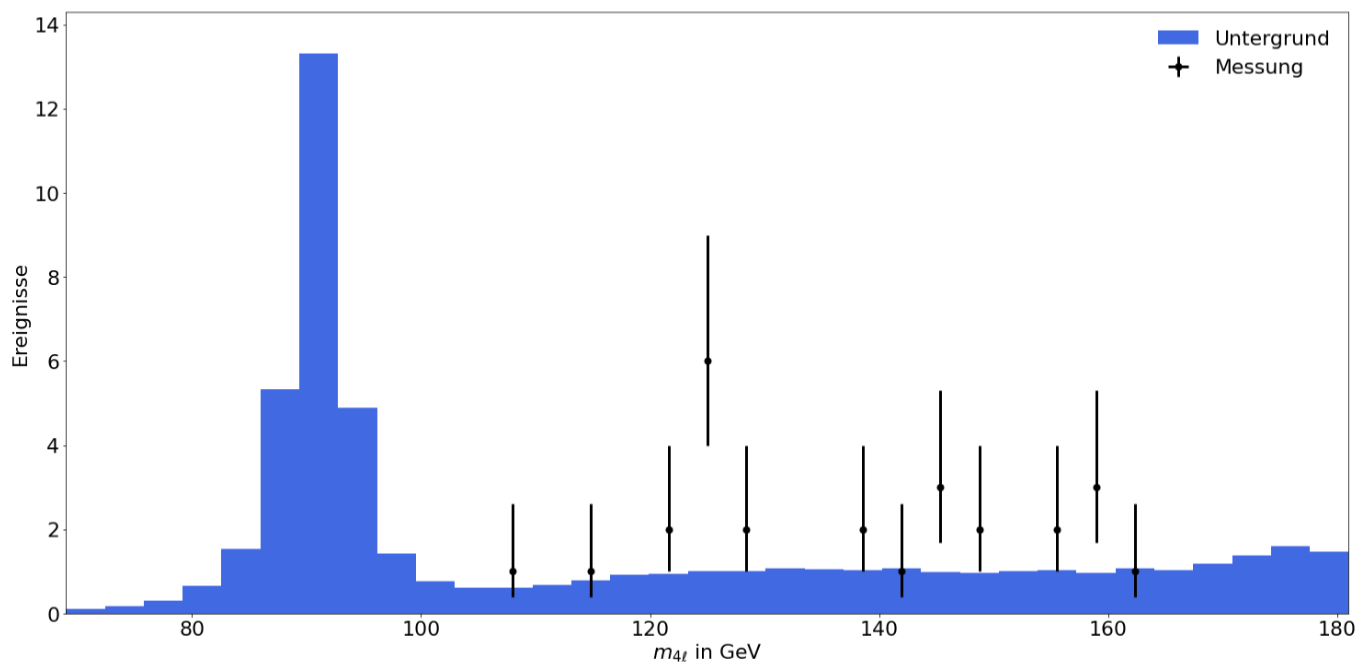
Statistische Bewertung

Simulierte Daten von einem Higgs Boson der Masse:

- $m_{H_1} = 115$ GeV
- $m_{H_1} = 120$ GeV
- $m_{H_1} = 122$ GeV
- $m_{H_1} = 124$ GeV
- $m_{H_1} = 125$ GeV
- $m_{H_1} = 128$ GeV
- $m_{H_1} = 130$ GeV
- $m_{H_1} = 135$ GeV
- $m_{H_1} = 140$ GeV
- $m_{H_1} = 145$ GeV
- $m_{H_1} = 150$ GeV


```
In [7]: hw = HW(language="DE")  
hw.run
```

Histogramm



Bins: 33
Bereich: 69, 181
 Statistische Bewertung

Simulierte Daten von einem Higgs Boson der Masse:

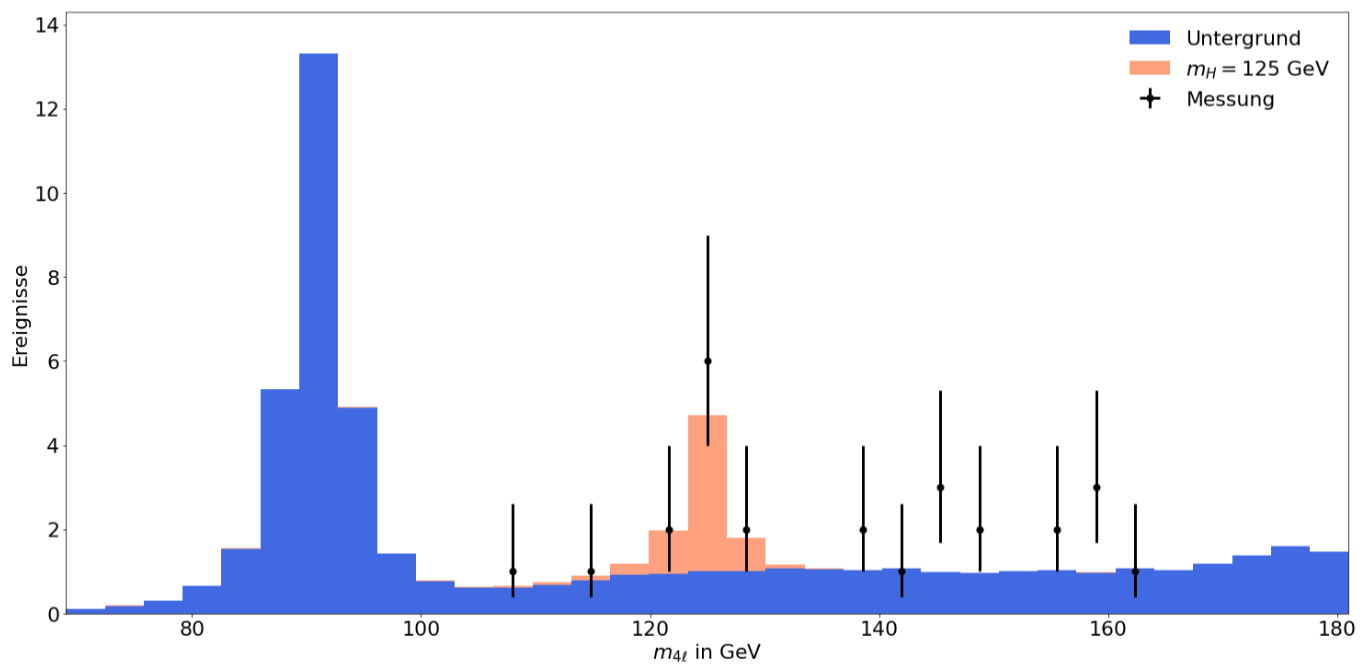
- $m_{H} = 115$ GeV
- $m_{H} = 120$ GeV
- $m_{H} = 122$ GeV
- $m_{H} = 124$ GeV
- $m_{H} = 125$ GeV
- $m_{H} = 128$ GeV
- $m_{H} = 130$ GeV
- $m_{H} = 135$ GeV
- $m_{H} = 140$ GeV
- $m_{H} = 145$ GeV
- $m_{H} = 150$ GeV

Messung hinzufügen

Messung: 109.723, 113.494, 121.803, 122.001, 124.634, 125.164, 125.342, 125.374, 126.292, 126.477, 128.583, 129.912, 138.555, 140.123, 141.967, 144.324, 144.446, 144.838, 147.77, 148.94, 153.917, 156.11, 157.516, 157.869, 160.54, 160.655

```
In [7]: hw = HW(language="DE")  
hw.run
```

Histogramm



Bins: 33
Bereich: 69, 181
 Statistische Bewertung

Simulierte Daten von einem Higgs Boson der Masse:

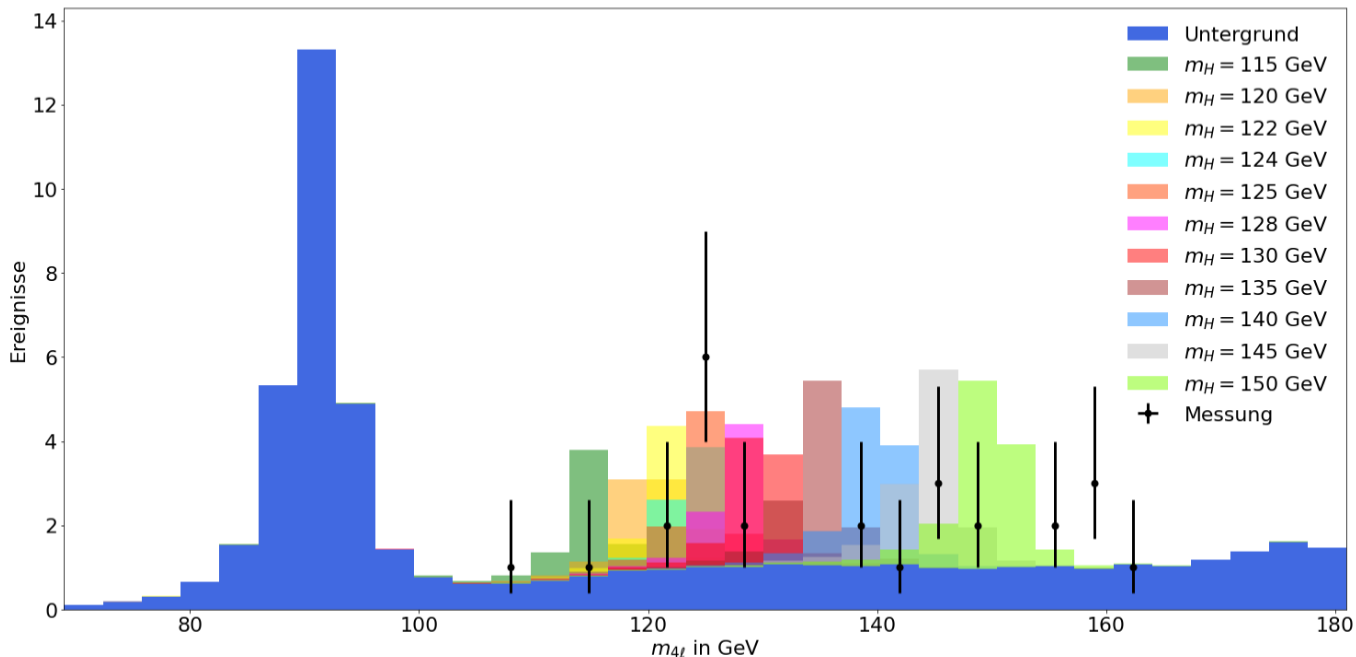
- $m_H = 115$ GeV
- $m_H = 120$ GeV
- $m_H = 122$ GeV
- $m_H = 124$ GeV
- $m_H = 125$ GeV
- $m_H = 128$ GeV
- $m_H = 130$ GeV
- $m_H = 135$ GeV
- $m_H = 140$ GeV
- $m_H = 145$ GeV
- $m_H = 150$ GeV

Messung hinzufügen

Messung: 109.723, 113.494, 121.803, 122.001, 124.634, 125.164, 125.342, 125.374, 126.292, 126.477, 128.583, 129.912, 138.555, 140.123, 141.967, 144.324, 144.446, 144.838, 147.77, 148.94, 153.917, 156.11, 157.516, 157.869, 160.54, 160.655

```
In [7]: hw = HW(language="DE")
hw.run
```

Histogramm



Bins

Bereich

Statistische Bewertung

Simulierte Daten von einem Higgs Boson der Masse:

- $m_H = 115$ GeV
- $m_H = 120$ GeV
- $m_H = 122$ GeV
- $m_H = 124$ GeV
- $m_H = 125$ GeV
- $m_H = 128$ GeV
- $m_H = 130$ GeV
- $m_H = 135$ GeV
- $m_H = 140$ GeV
- $m_H = 145$ GeV
- $m_H = 150$ GeV

Messung hinzufügen

Messung: 109.723, 113.494, 121.803, 122.001, 124.634, 125.164, 125.342, 125.374, 126.292, 126.477, 128.583, 129.912, 138.555, 140.123, 141.967, 144.324, 144.446, 144.838, 147.77, 148.94, 153.917, 156.11, 157.516, 157.869, 160.54, 160.655

Zusammenfassung

- Flexibles Konzept
 - anpassbar an Vorwissen,
 - erweiterbar um zusätzliche Komponenten
- Arbeiten mit Schülergruppen
 - beliebiger Größen
 - bereits mit einzelnen Schülern getestet
- Thematik ist vertraut für neue Vermittler aus Karlsruhe
- Vorstellung auf der Lehrerfortbildung Sept. 21 (Heilbronn - Experimenta)
- Aktueller Entwicklungsstand auf: [GitHub](#)

Masterclass

