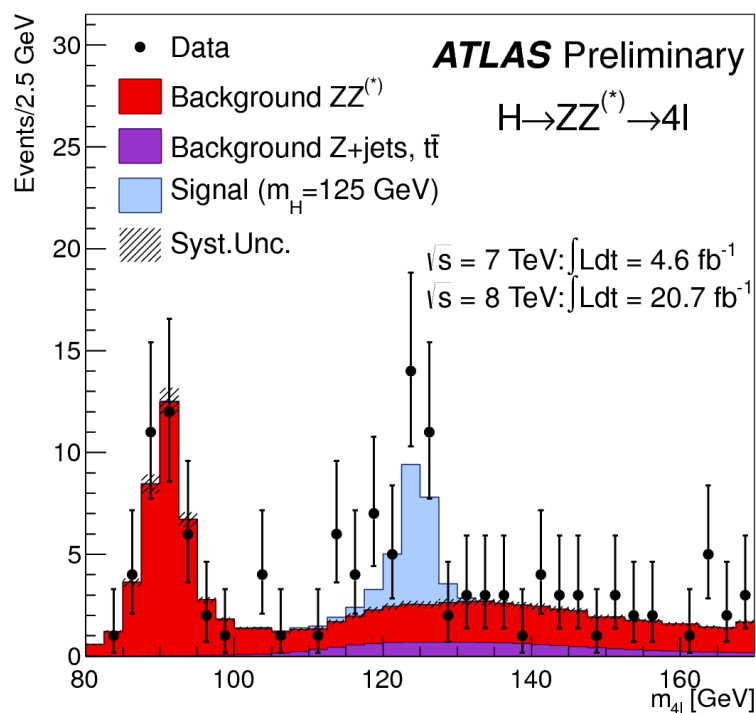


# Der Nachweis des Higgs-Bosons am Large Hadron Collider (LHC)

Prof. Dr. Wolfgang Wagner  
Bergische Universität Wuppertal

Forschung trifft Schule: CERN Summer School  
29. Juli 2022

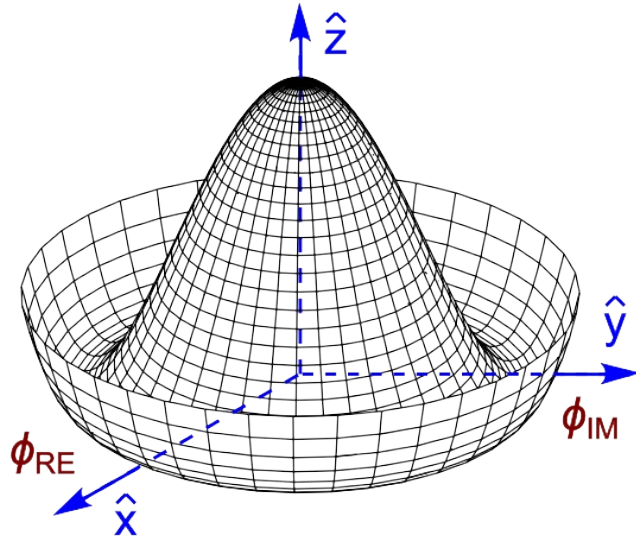




- 1) Einführung
- 2) Produktion und Zerfall von Higgs-Bosonen
- 3) Nachweis des Higgs-Bosons in drei Zerfallskanälen
- 4) Zusammenfassung

## Potential des Higgs-Feldes

$$V(\phi) = \frac{1}{2}\mu^2\phi^\dagger\phi + \frac{1}{4}\lambda(\phi^\dagger\phi)^2$$



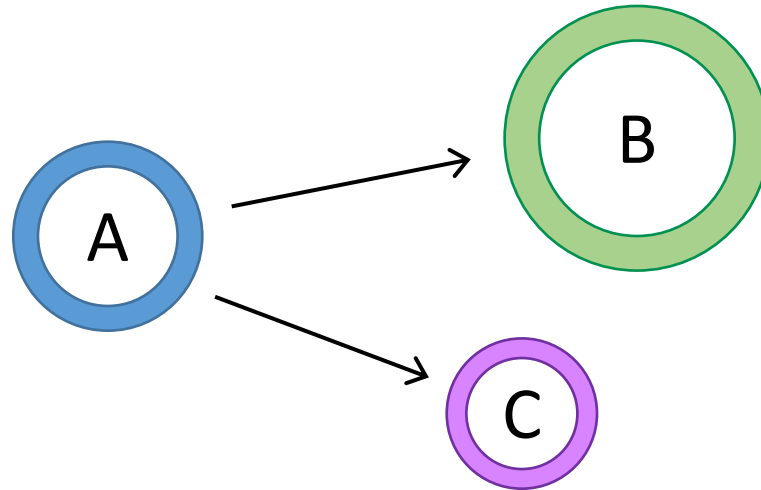
- Das Higgs-Boson ist die **Anregung** des Higgs-Felds.
- Weist man das Higgs-Boson nach, beweist man die Richtigkeit des BEH-Mechanismus.

- Zunächst sind die Teilchen im Standardmodell **masselos**.
- Widerspruch zur Realität, besonders für die Eichbosonen der **schwachen Wechselwirkung** ( $W^\pm$  und  $Z^0$ )
- **Brout-Englert-Higgs-Mechanismus** führt skalares Feld ein (Higgs-Feld)
- Spontane Symmetriebrechung  
⇒ Elementarteilchen erhalten Masse

## Nobelpreis 2013



Teilchen A  
kurzlebig, nicht direkt  
messbar

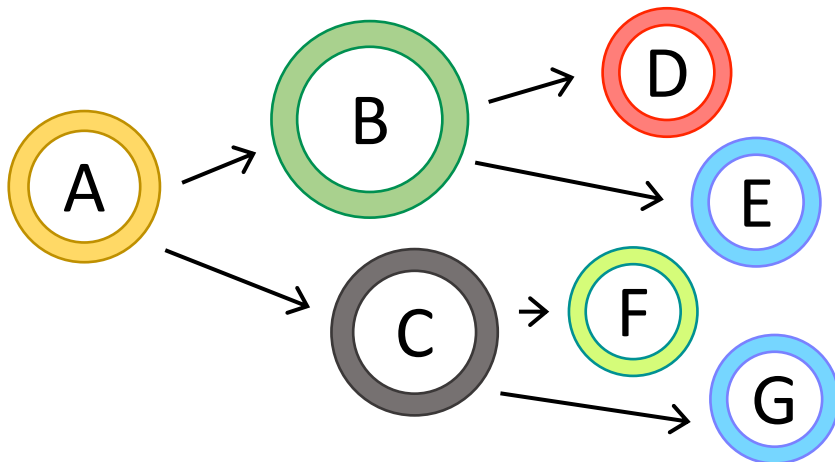


- Tochterteilchen B und C sind mit einem Detektor messbar.
- Rekonstruktion des Viererimpulses von A:

$$p_\mu^A = p_\mu^B + p_\mu^C$$

## Kaskadenzerfall

Auch die Tochterteilchen sind instabil und zerfallen.

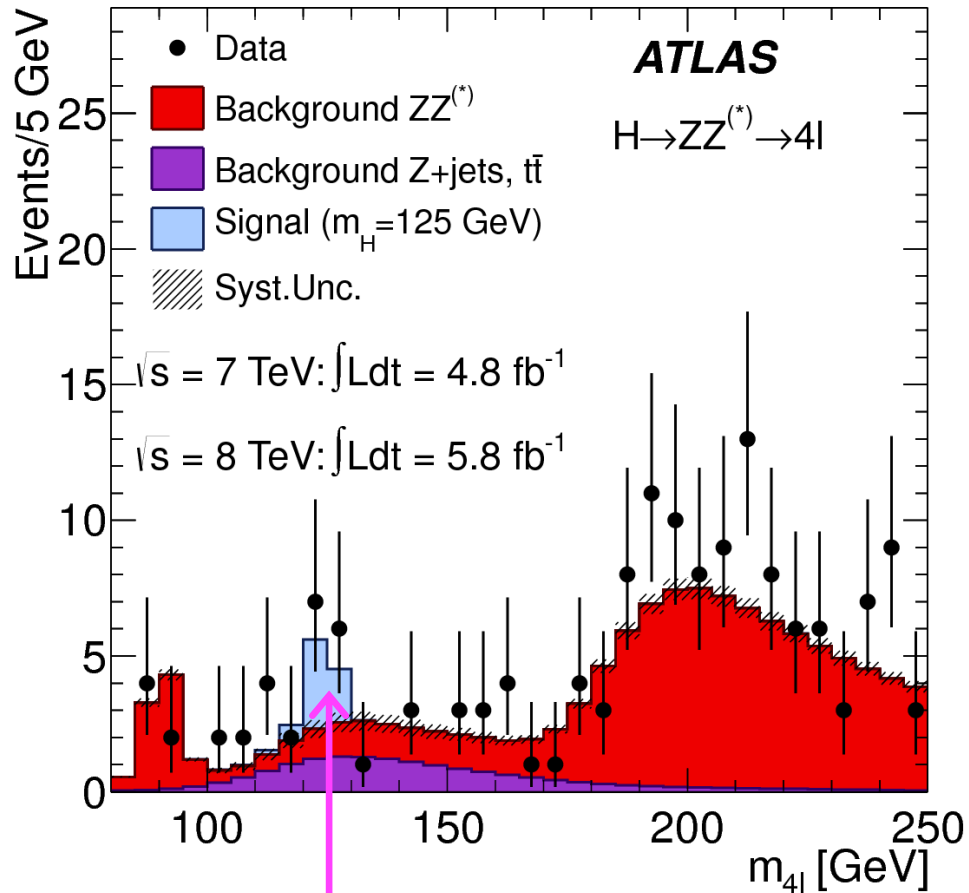


- Berechnung der **invarianten Masse**:

$$m_A^2 = p_\mu(A)p^\mu(A)$$

- Die Ruhemasse  $m_A$  ist charakteristisch für das Teilchen.
- Zunächst Rekonstruktion von B und C, dann von A.

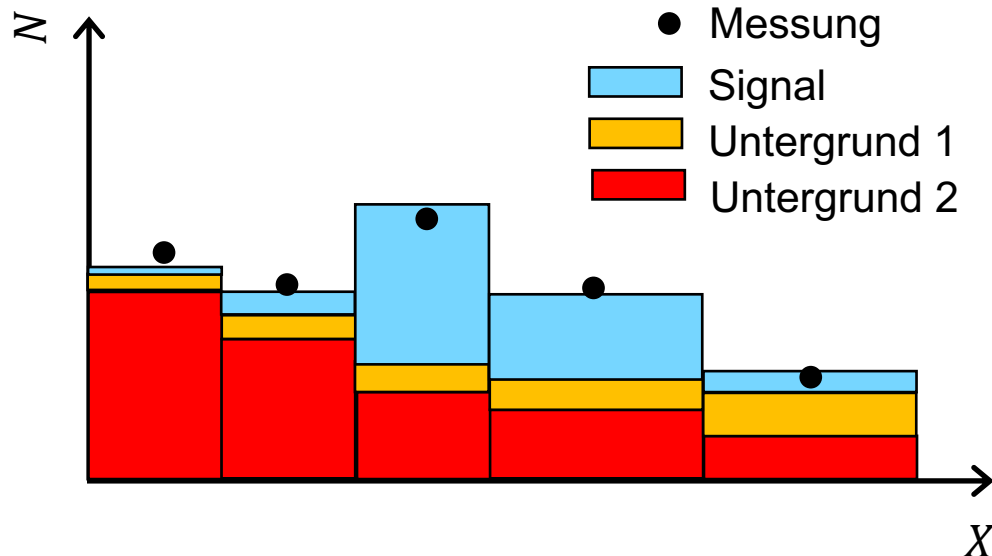
# Evidenz für Neues in gemessenen Verteilungen



Higgs-Boson-Signal?

- Wie weist man ein Signal eines neuen Teilchens in einer gemessenen Verteilung nach?

Histogramm einer gemessenen  
Observablen  $X$



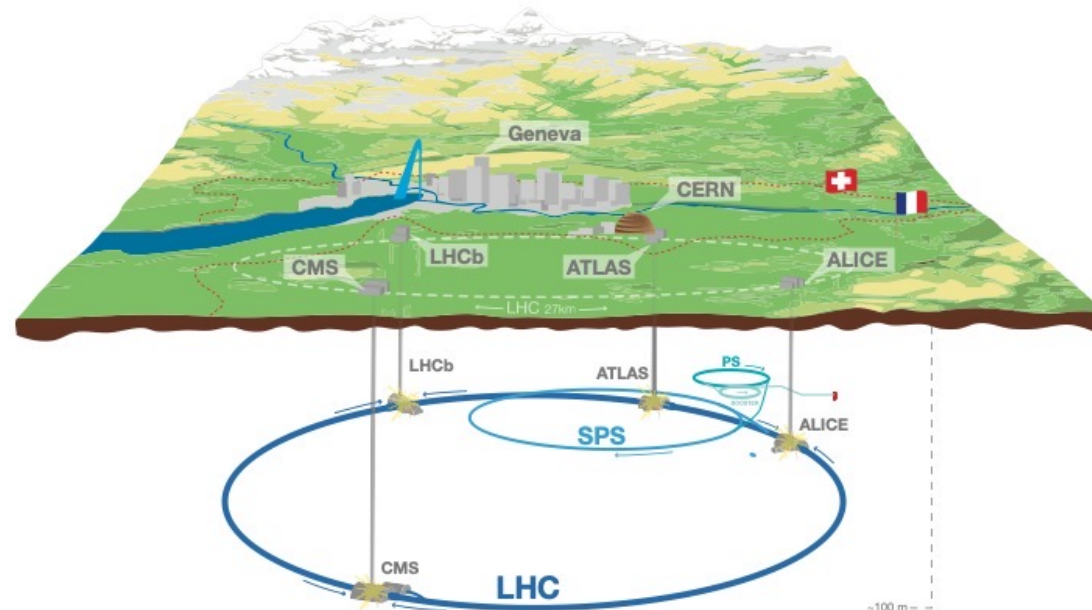
- Das Modell gibt an, wie viele Einträge (Ereignisse) in einem Intervall (Bin) erwartet werden.
- Parameter des Modells können an die Daten angepasst werden (Fit).

- Beispiele für Observablen:
  - Invariante Masse
  - Transversalimpuls
  - Winkel zur Strahlachse
- Häufig wird die Observable einmal für jedes Kollisionsereignis berechnet und histogrammiert.
- Die  $x$ -Achse des Histogramms ist in Intervalle unterteilt (Bins).
- Sowohl der Signalprozess als auch Untergrundprozesse tragen zu dem Histogramm bei.
- Die Variable  $X$  muss möglichst gut zwischen trennen.
- Die gemessenen Daten werden mit einem Modell verglichen.

# Die Strategie zum Nachweis des Higgs-Bosons



- Nutze **Proton-Proton-Kollisionen** am LHC um Higgs-Bosonen zu erzeugen.
- Weise Higgs-Bosonen in **drei** verschiedenen Zerfällen nach.
- Nutze **zwei** verschiedene **Detektoren** mit verschiedenen Analysemethoden und Akteuren.



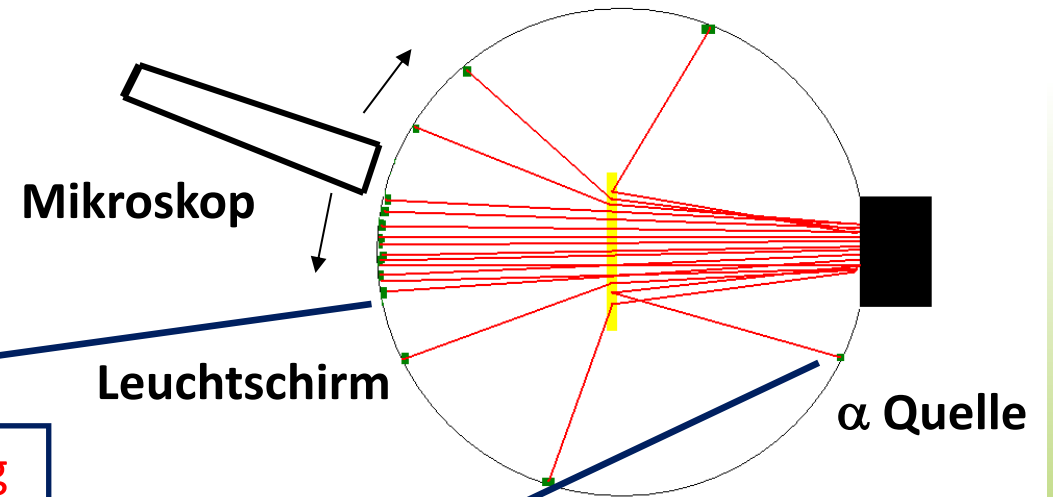
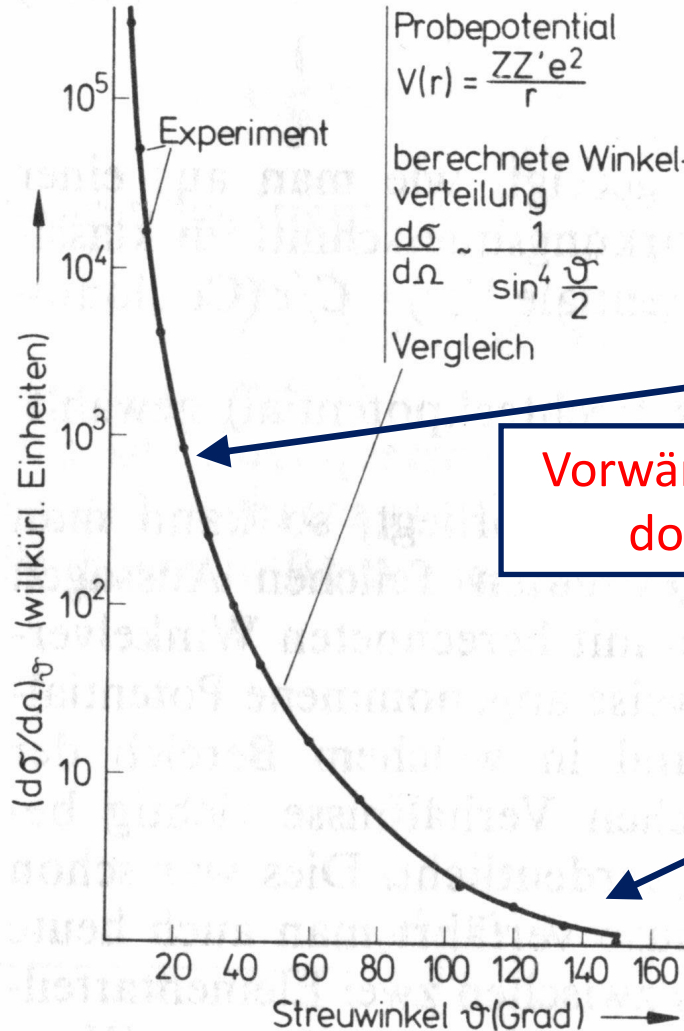
# Das Rutherford-Experiment als historisches ...



## ... Vorbild für die moderne Teilchenphysik

Messung des  
differentiellen  
Wirkungsquer-  
schnitts

Vergleich mit  
berechneter  
Verteilung  
(Coulomb-  
Streuung)

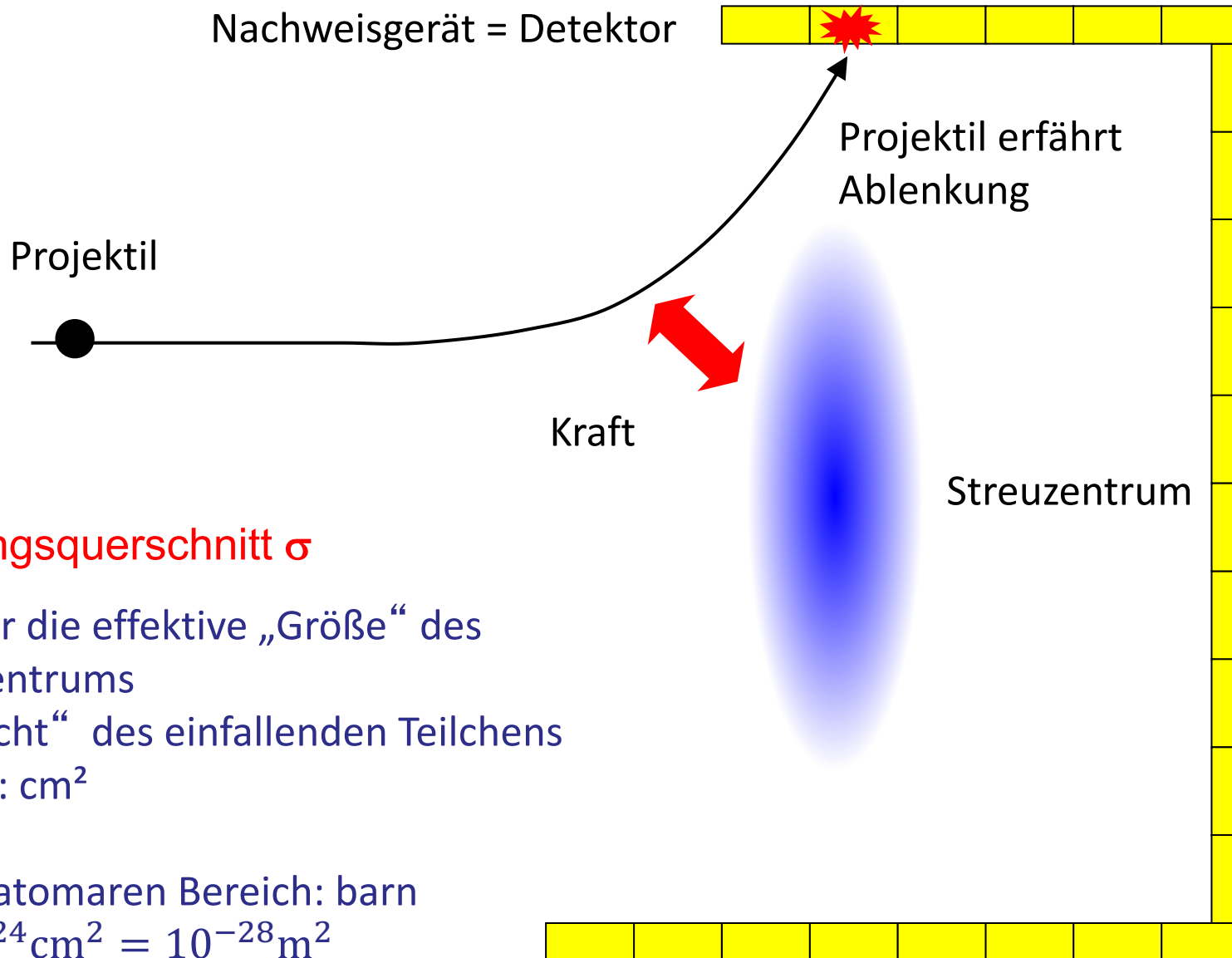


Vorwärtsstreuung  
dominiert

Rückwärtsstreuung ist selten, kommt aber vor



# Prinzip eines Streuexperimentes



## Wirkungsquerschnitt $\sigma$

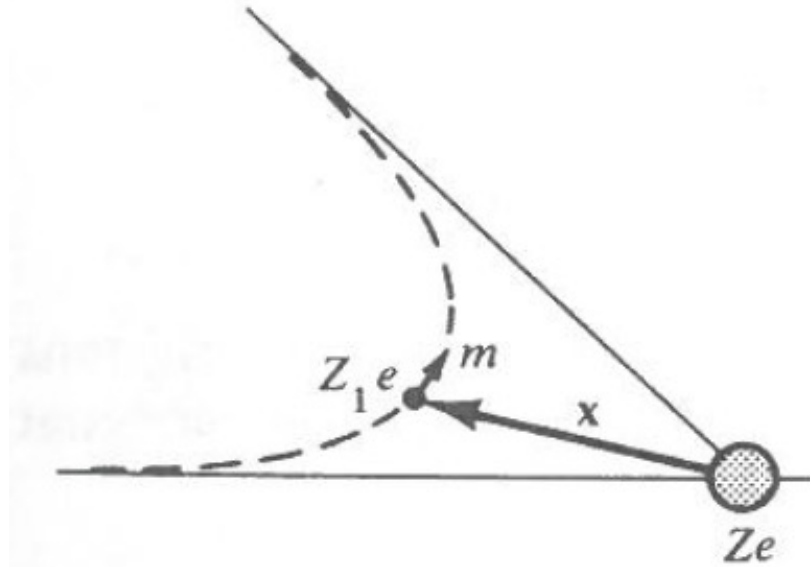
Maß für die effektive „Größe“ des Streuzentrums aus „Sicht“ des einfallenden Teilchens  
Einheit:  $\text{cm}^2$

Im subatomaren Bereich: barn  
 $= 10^{-24} \text{cm}^2 = 10^{-28} \text{m}^2$

## Elemente eines Streuexperimentes

- Streupartner  
z.B. stationäres Streuzentrum und Projektil (Teilchenstrahl)
- Wechselwirkung (Kraft) zwischen den Streupartnern
- Nachweis der gestreuten Teilchen (Detektor)

## Elastische Streuung an einem Coulombpotential



Klassische Bahn eines Teilchens mit Ladung  $Z_1 \cdot e$ .

## Annahmen:

- 1) Das Streuzentrum (Atomkern) ist schwer und nimmt keine Energie auf (aber Impuls!).
- 2) Das einfallende Teilchen hat Spin 0.
- 3) Das einfallende Teilchen und das Streuzentrum haben keine Struktur, d.h. sie sind punktförmig.

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Z_1 Z e^2}{4E_{\text{KIN}}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Rutherford'sche Streuformel

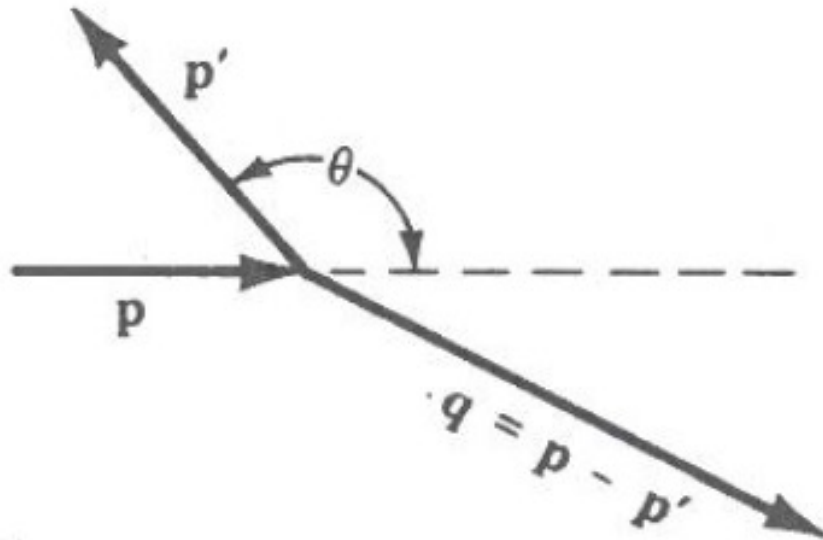
Beziehung zwischen  $\vec{q}$  und dem Streuwinkel  $\theta$ :

$$|\vec{q}| = 2 |\vec{p}| \sin \frac{\theta}{2}$$

Damit folgt:  $\frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} = \frac{1}{q^2} \cdot 8 m E_{\text{KIN}}$

Umschreiben der Streuformel:

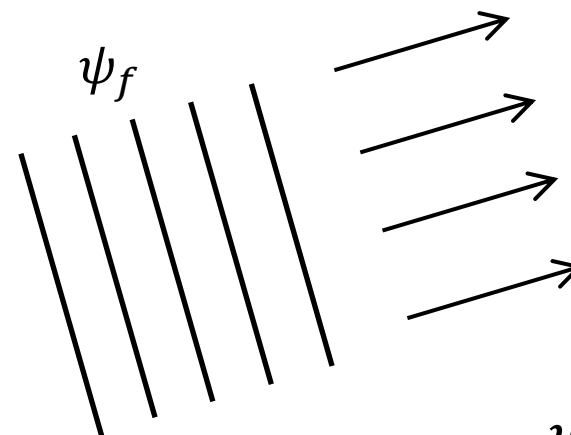
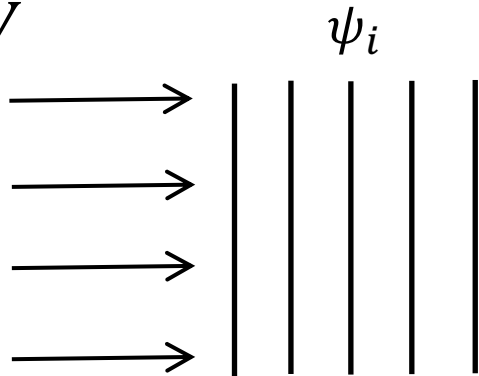
$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} (2m Z_1 Z e^2)^2 \frac{1}{q^4}$$



$\vec{q} = \vec{p} - \vec{p}'$  ist der **Impulsübertrag**

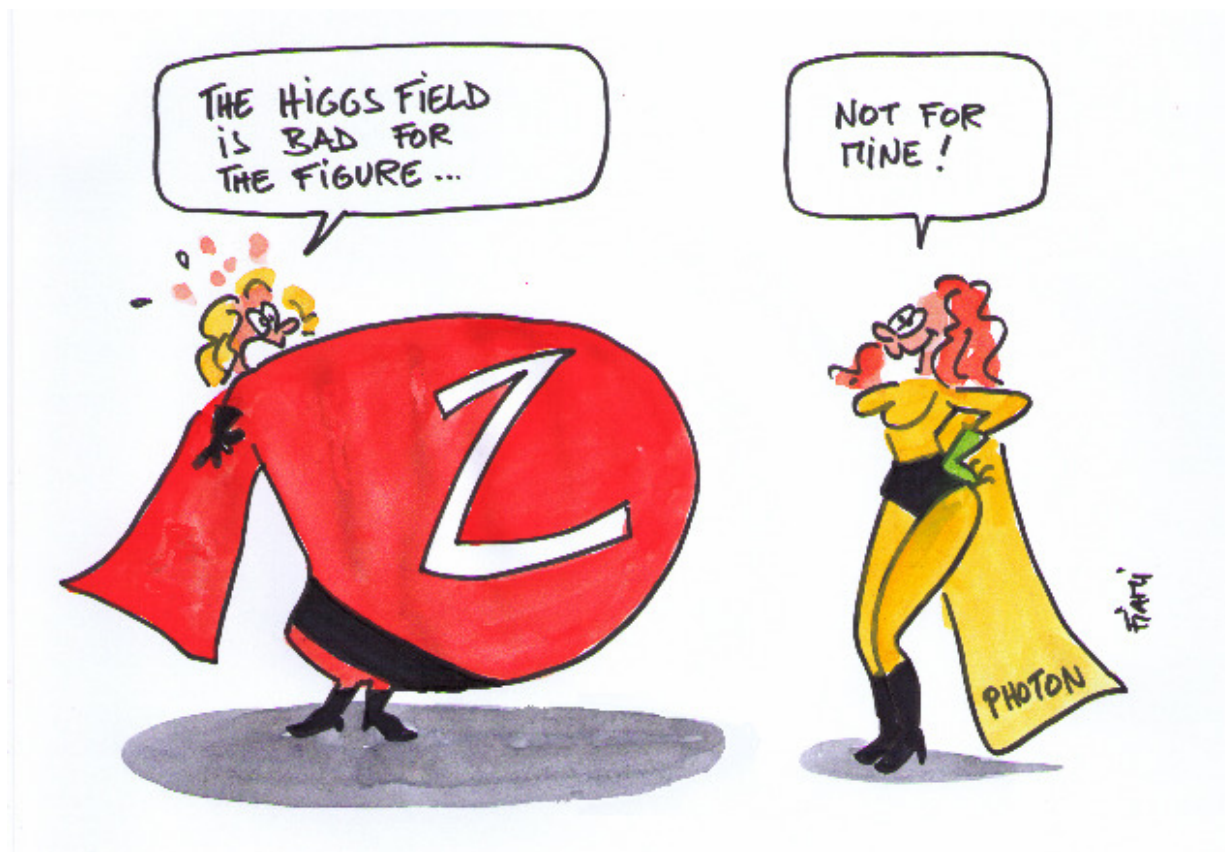
- Es werden nur die Erhaltungsgrößen **Impuls** und **Energie** (Viererimpuls) zur Beschreibung herangezogen.
- Präpariere **Anfangszustand** und messe den **Endzustand**.
- Projektile – Streuzentrum – Detektor
- Nutze **ebene Wellen** um streuende Teilchen quantenmechanisch zu beschreiben.
  - Deren Ort ist maximal unscharf, der **Impuls** ist genau **festgelegt** (Unbestimmtheitsrelation).

$$\psi_i = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i \vec{p} \vec{r} / \hbar}$$



$$\psi_f = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i \vec{p}' \vec{r} / \hbar}$$

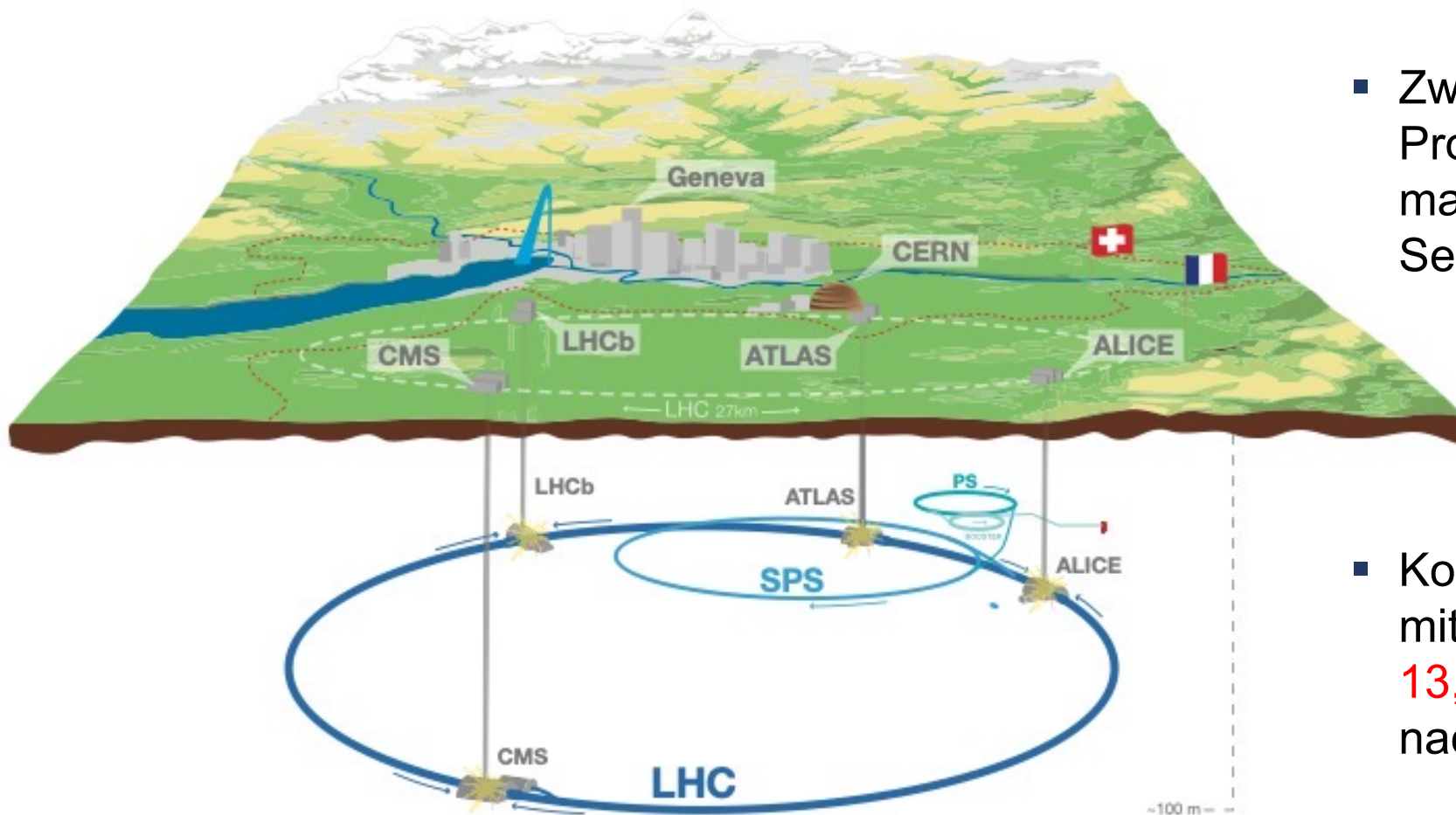
## 2) Produktion und Zerfall von Higgs-Bosonen



# Der Large Hadron Collider (LHC)



- Der leistungstärkste Beschleuniger der Welt: im Tunnel am CERN mit 27 km Umfang.



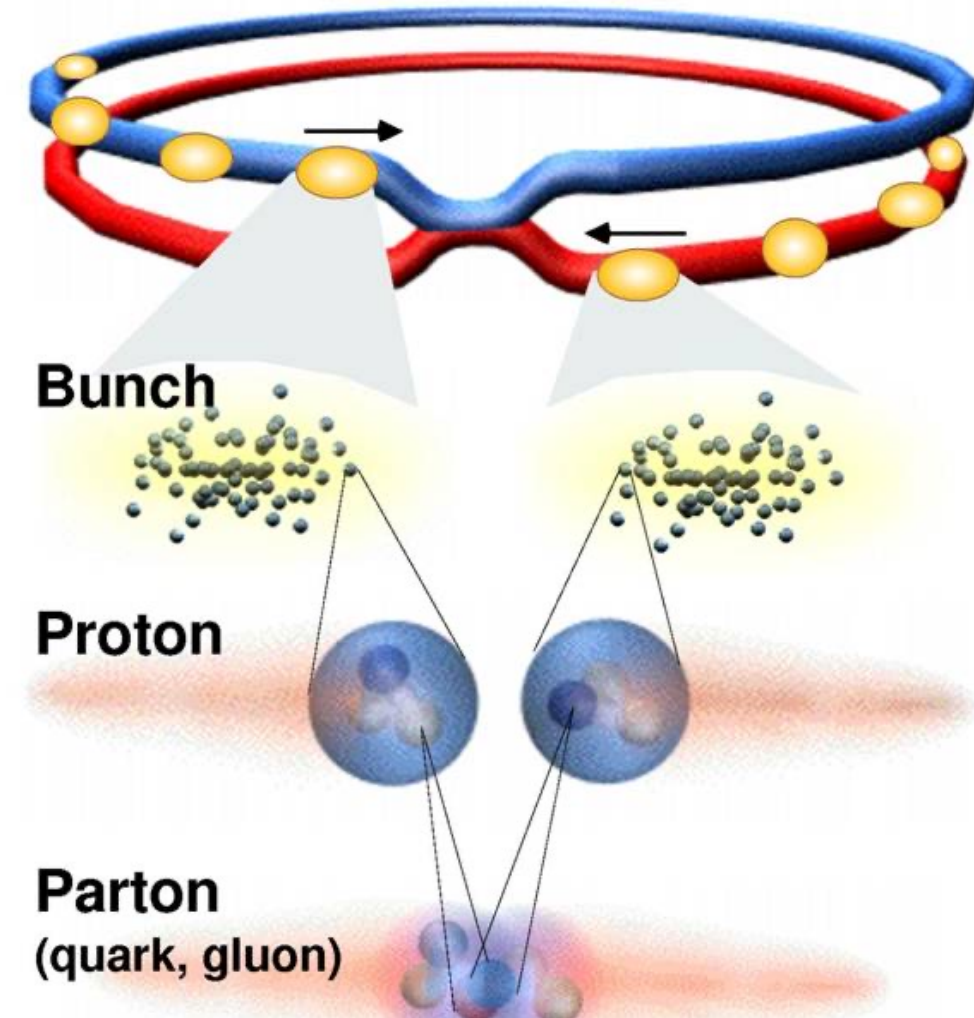
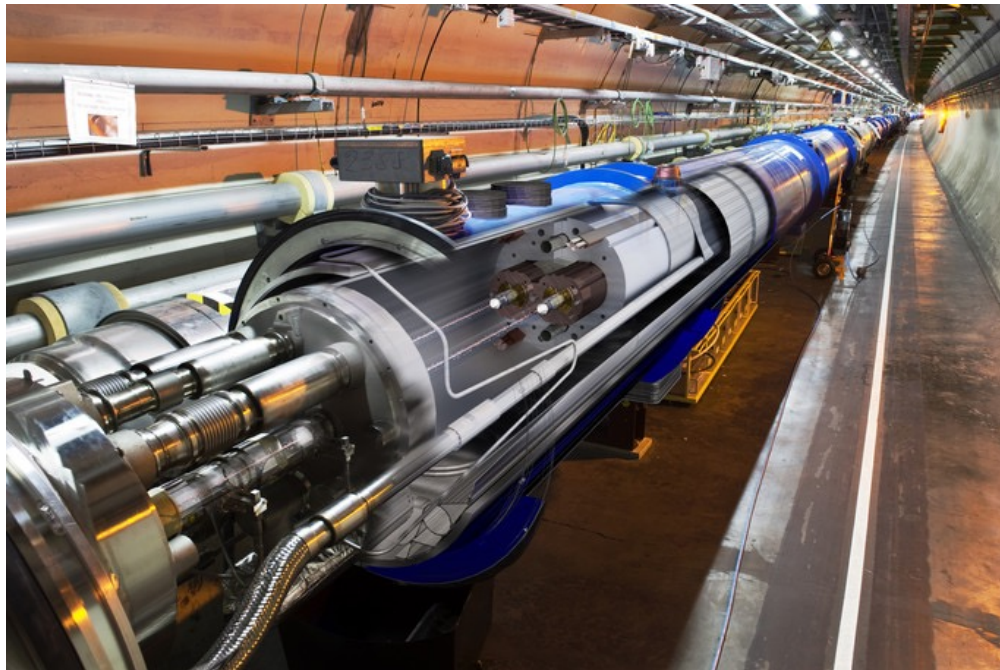
- Zwei gegenläufige Protonenstrahlen: machen 10.000 Runden / Sekunde

- Kollisionen an 4 Punkten mit Rekordenergie von **13,6 TeV**, wie  $10^{-13}$  -  $10^{-14}$  s nach dem Urknall.

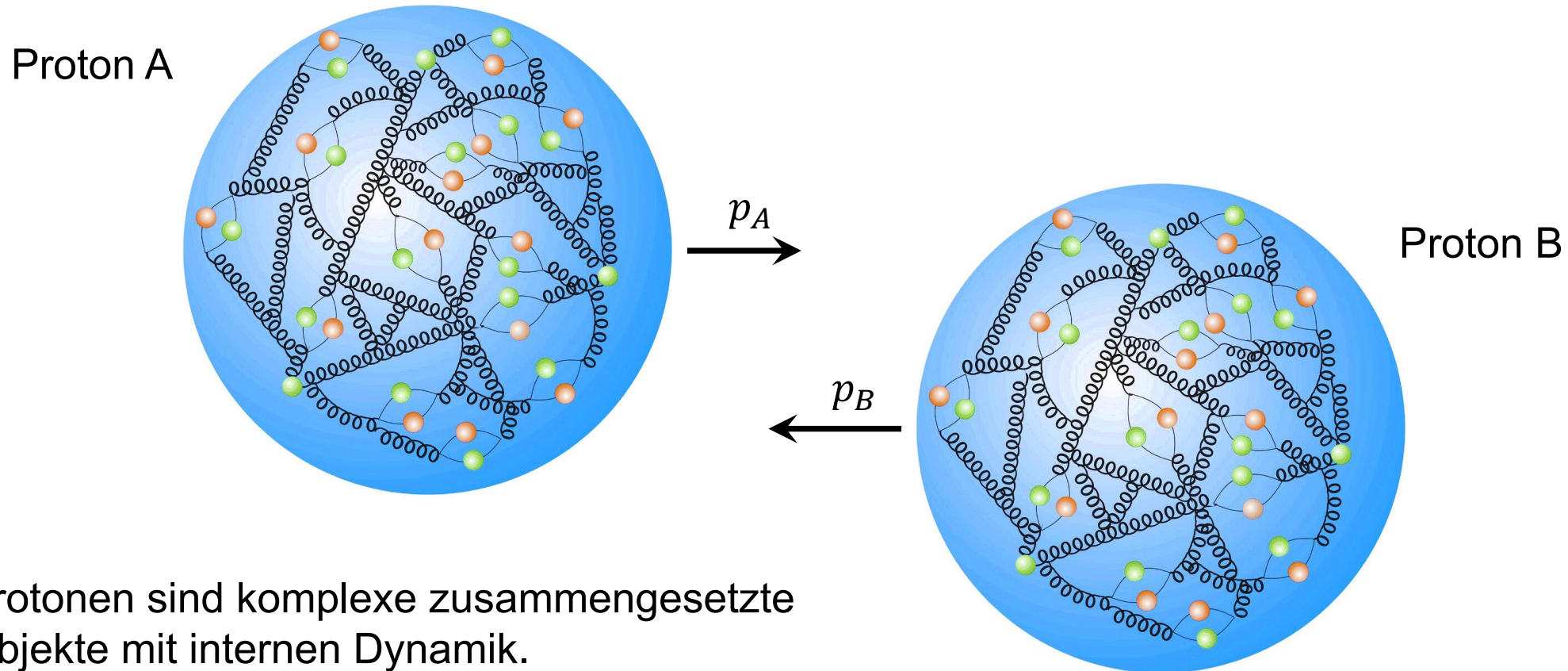
# Proton-Proton-Kollisionen am LHC



- Jeder Strahl hat ca. 2500 Protonenpakete.
- 100 Milliarden Protonen pro Paket (klingt viel, aber  $1 \text{ mol} = 6 \cdot 10^{23}$ )
- Seit März 2022 wieder Betrieb: bei 13,6 TeV!



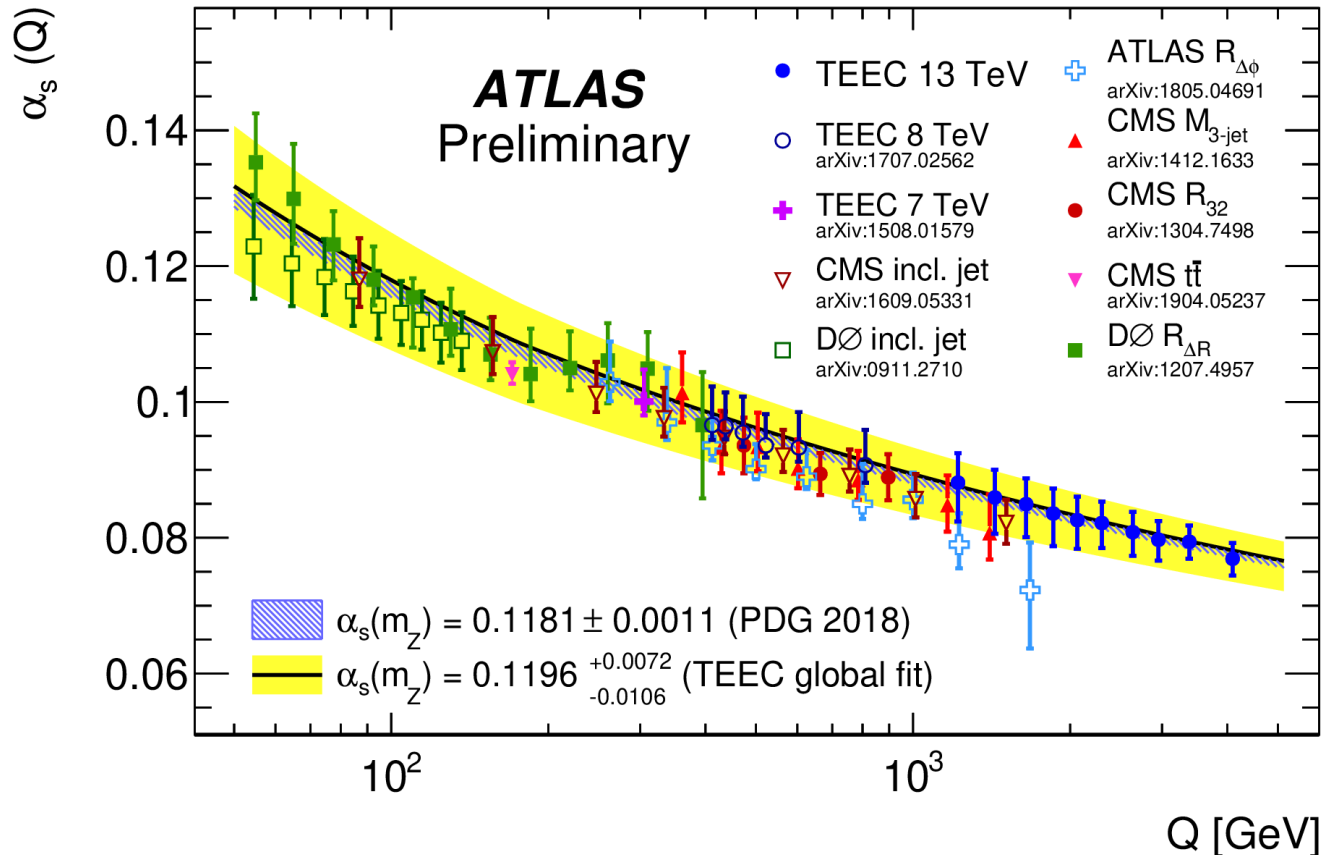
# Sind Proton-Proton-Kollisionen berechenbar?



- Protonen sind komplexe zusammengesetzte Objekte mit internen Dynamik.
- **Valenzquarks** (Quantenzahlen!), **Seequarks** und **Gluonen**.
- Wie kann man trotz dieser Komplexität sinnvolle Experimente machen, aus denen sich Rückschlüsse ziehen lassen?

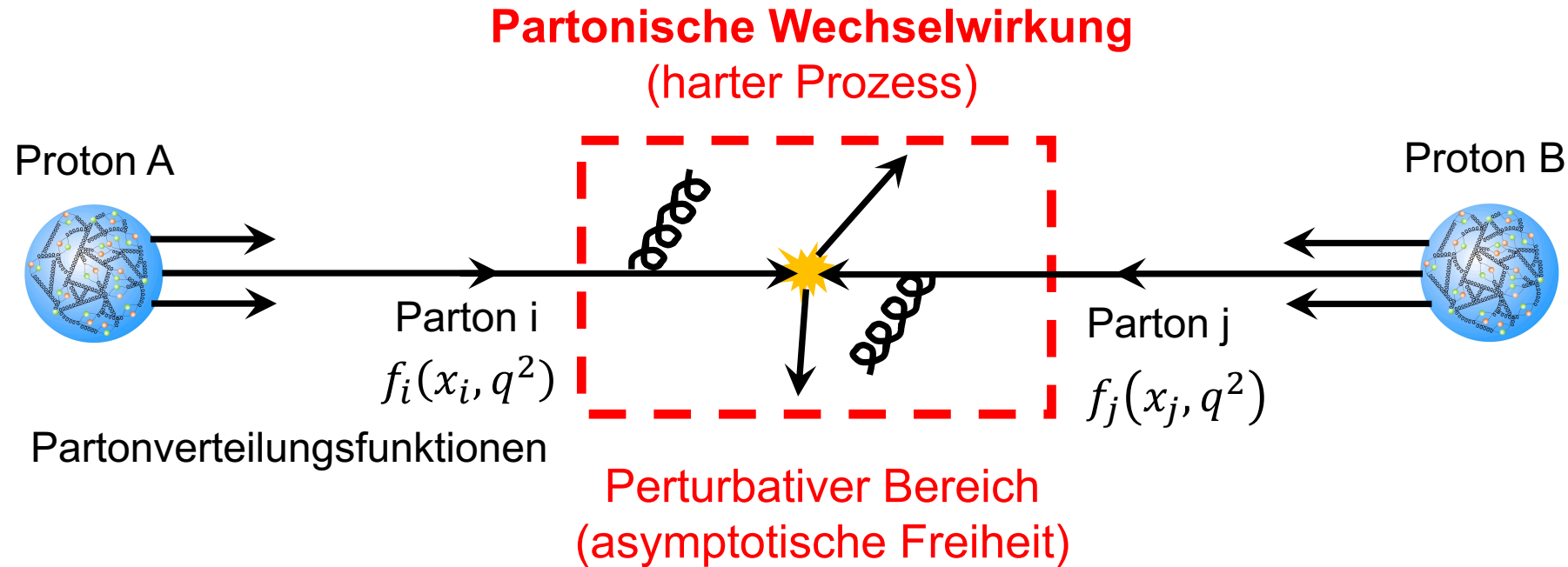


- Hadronen (hier Protonen) werden durch die **starke Wechselwirkung** zusammengehalten.
- Besondere Eigenschaft:  
Die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung,  $\alpha_s$ , nimmt mit steigender Energie ab.



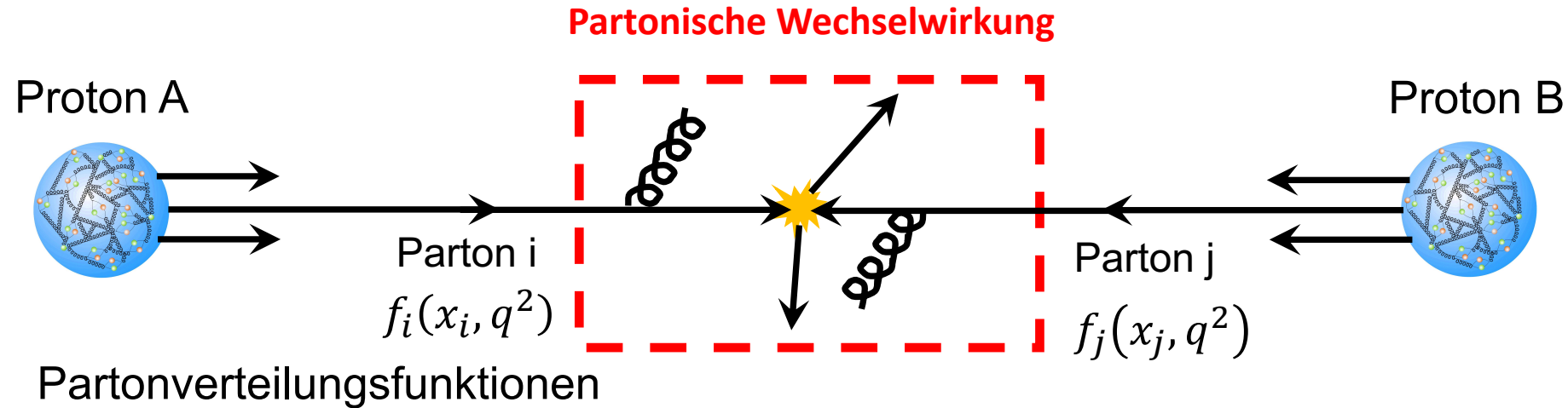
- Wirkungsquerschnitte hochenergetischer Prozesse lassen sich in einer **Störungsreihe** entwickeln.

$$\sigma(pp \rightarrow XY) = \alpha_s^2 \sigma_0 + \alpha_s^3 \sigma_1 + \dots$$



Kernaussagen des Partonmodells:

- Protonen bestehen aus **quasi-freien Partonen** (Bausteinen): Quarks und Gluonen.
- Die harte Wechselwirkung (Austausch von viel Impuls) erfolgt zwischen den Partonen.



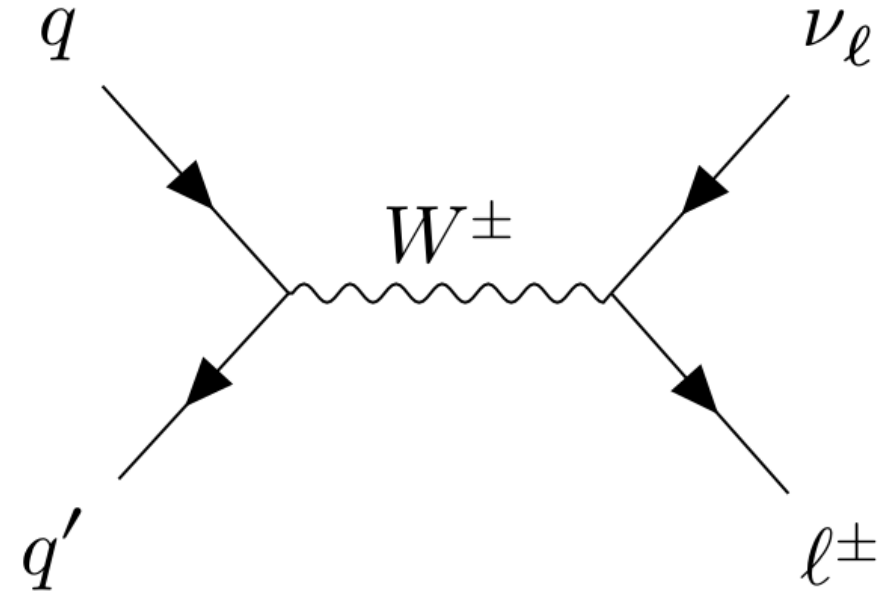
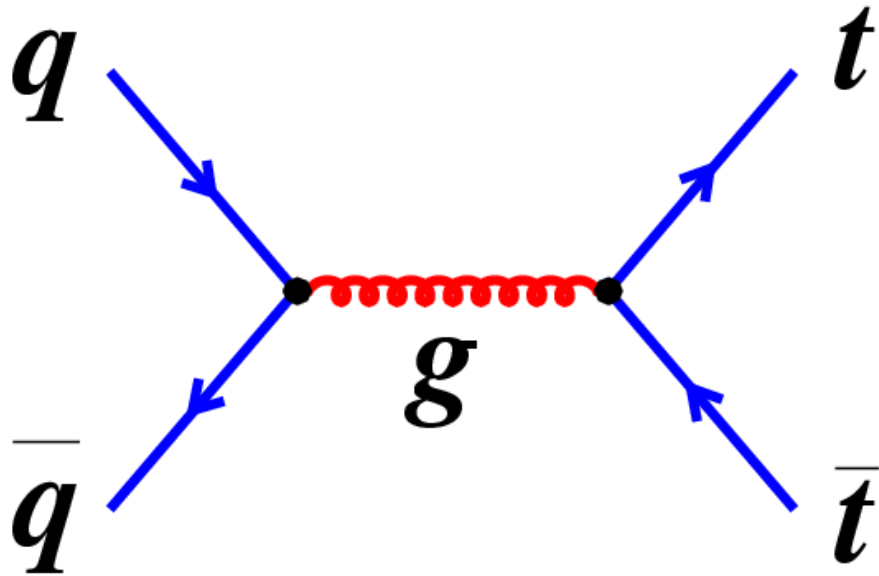
$$\sigma(pp \rightarrow XY) = \sum_{i,j} \int d\hat{s} \mathcal{L}_{ij}(\hat{s}; s, \mu_f) \cdot \hat{\sigma}_{ij}(ij \rightarrow XY; \hat{s}; \mu_f)$$

mit  $\mathcal{L}_{ij}(\hat{s}; s, \mu_f) = \frac{1}{s} \int_{\hat{s}}^s f_{i/A}\left(\frac{\tilde{s}}{s}\right) f_{j/B}\left(\frac{\hat{s}}{\tilde{s}}\right) \frac{1}{\tilde{s}} d\tilde{s}$  **Partonluminosität**

# Beispiele für partonische Prozesse



z.B. Top-Quark-Top-Antiquark-Paarproduktion oder  $W$ -Boson-Produktion

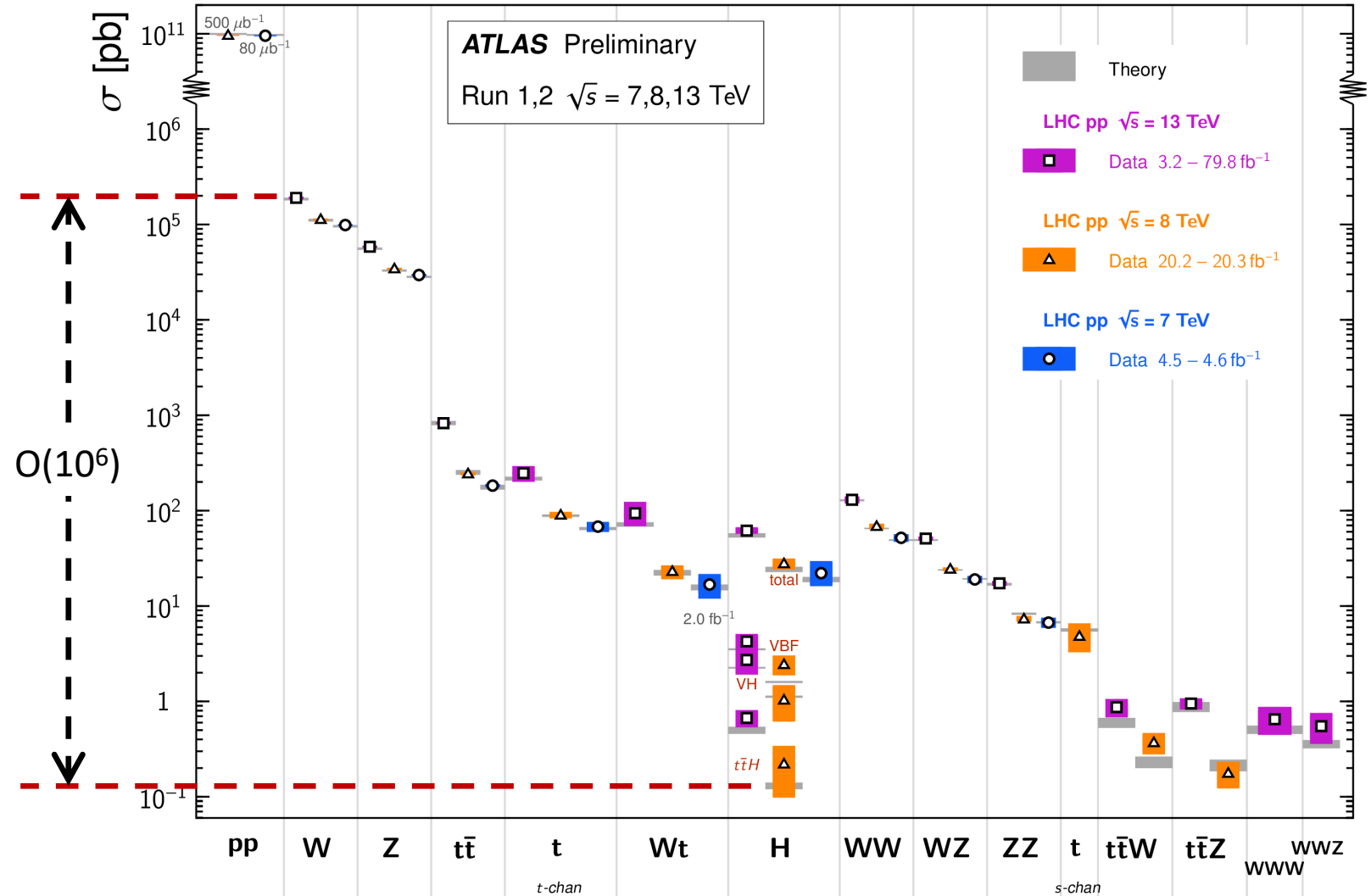


Aufgrund der hohen Masse von Top-Quark (ca.  $173 \text{ GeV}/c^2$ ) und  $W$ -Boson (ca.  $80.4 \text{ GeV}/c^2$ ) müssen die Prozesse bei **hoher Energie** (Impulsübertrag  $q$ ) statt finden.

$\Rightarrow$  Asymptotische Freiheit bzw. Störungstheorie ist anwendbar.

- Die Wirkungsquerschnitte von Prozessen mit hohem Transversalimpuls ( $p_T$ ) erstrecken sich über 6 Größenordnungen!
- In  $139 \text{ fb}^{-1}$  (Run 2 Datensatz) wurden
  - $O(26 \text{ Milliarden})$   $W$  Boson-Ereignisse
  - $O(28\text{k})$   $t\bar{t}H$  Ereignisse produziert.

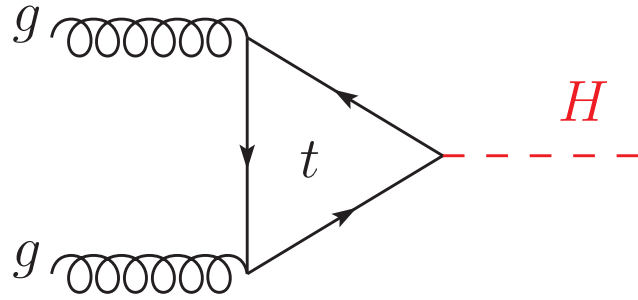
Standard Model Total Production Cross Section Measurements Status: May 2020



# Produktion von Higgs-Bosonen am LHC

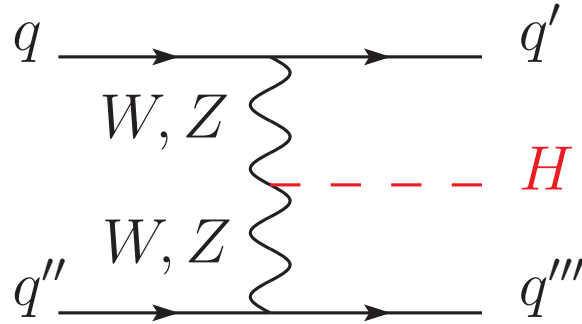


Gluon-Gluon-Fusion



$\sigma = 48.6 \text{ pb}$

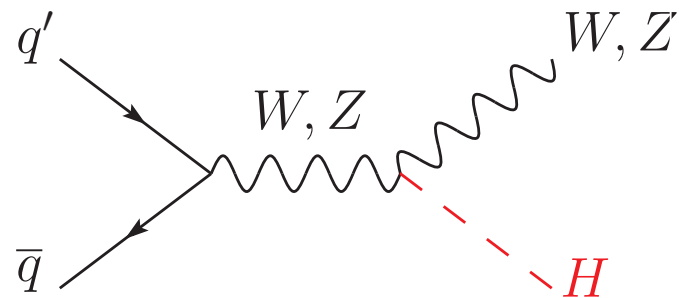
Vektor-Boson-Fusion



$\sigma = 3.78 \text{ pb}$

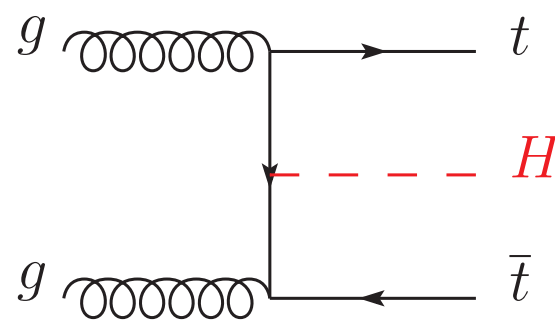
für  $m_H = 125 \text{ GeV}/c^2$

Assoziierte VH-Produktion

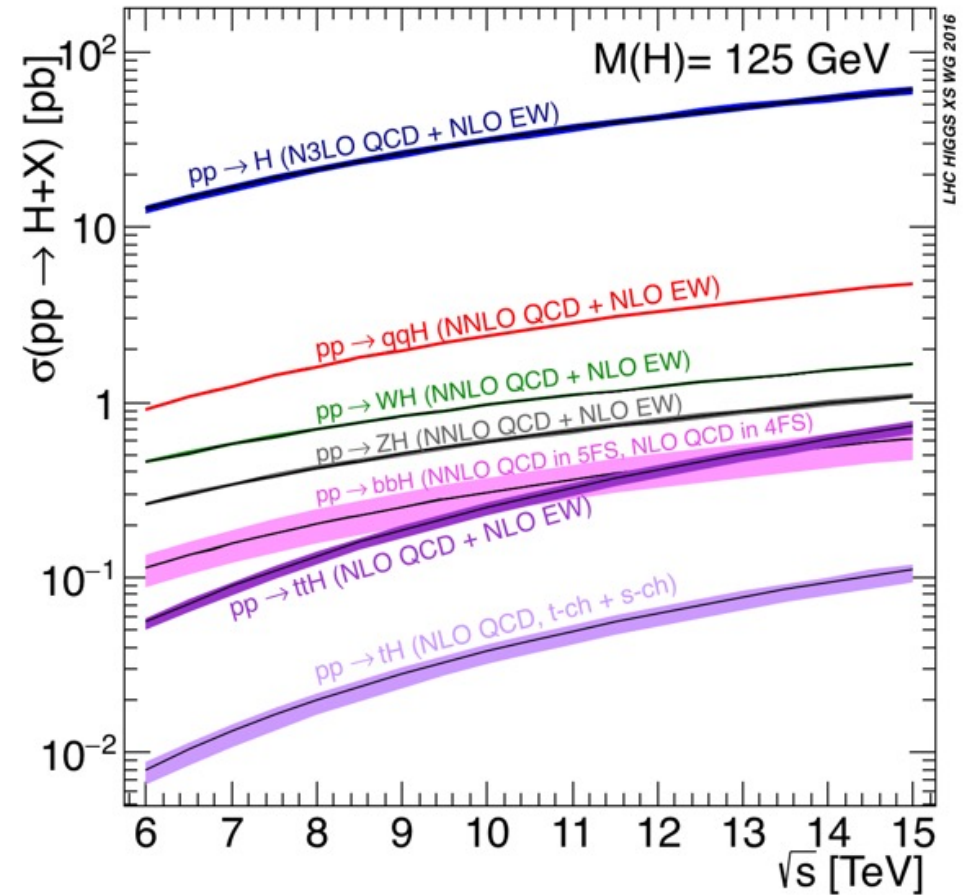


$\sigma = 1.37 \text{ pb} + 0.88 \text{ pb}$

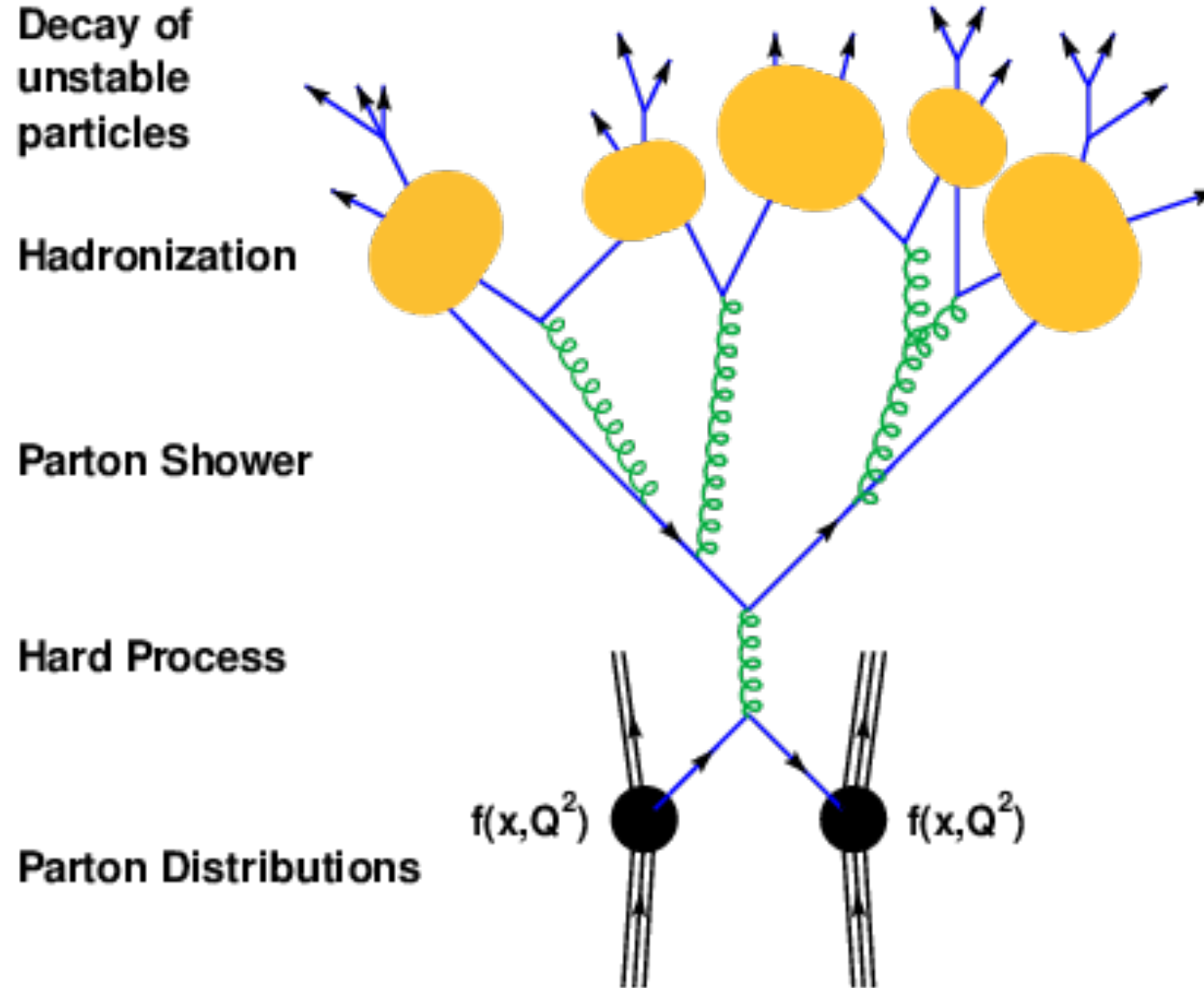
$t\bar{t}H$  Produktion



$\sigma = 0.5 \text{ pb}$



# Verschiedene Ebenen von Proton-Proton-Kollisionen



# Higgs-Boson-Zerfall



Widerstreitende  
Kriterien bei der  
Auswahl

vielversprechender  
Zerfallskanäle für die  
Entdeckung:

- Viele Ereignisse  
⇒ hohes Verzwei-  
gungsverhältnis
- Niedriger  
Untergrund
- Für die Entdeckung  
im Jahr 2012  
spielten drei  
Kanäle eine Rolle:

$$\mathcal{B}(H \rightarrow b\bar{b}) = 58.2 \%$$

$$\mathcal{B}(H \rightarrow W^\pm W^{\mp*}) = 21.4 \%$$

$$\mathcal{B}(H \rightarrow gg) = 8.19 \%$$

$$\mathcal{B}(H \rightarrow \tau^+ \tau^-) = 6.27 \%$$

$$\mathcal{B}(H \rightarrow c\bar{c}) = 2.89 \%$$

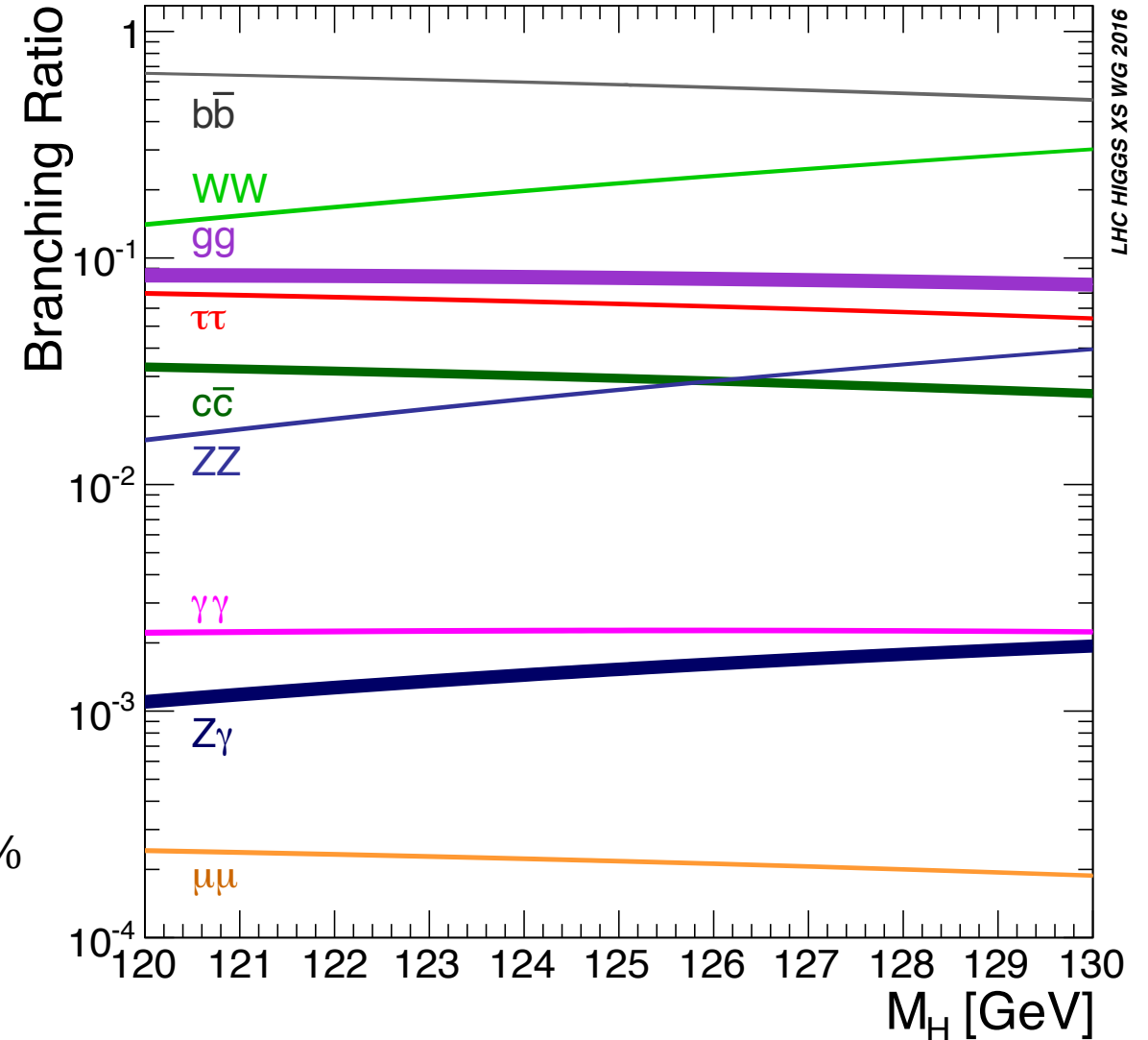
$$\mathcal{B}(H \rightarrow ZZ^*) = 2.62 \%$$

$$\mathcal{B}(H \rightarrow \gamma\gamma) = 0.227 \%$$

$$\mathcal{B}(H \rightarrow Z\gamma) = 0.153 \%$$

$$\mathcal{B}(H \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 0.0218 \%$$

$H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow ZZ^*$  und  
 $H \rightarrow W^\pm W^{\mp*}$





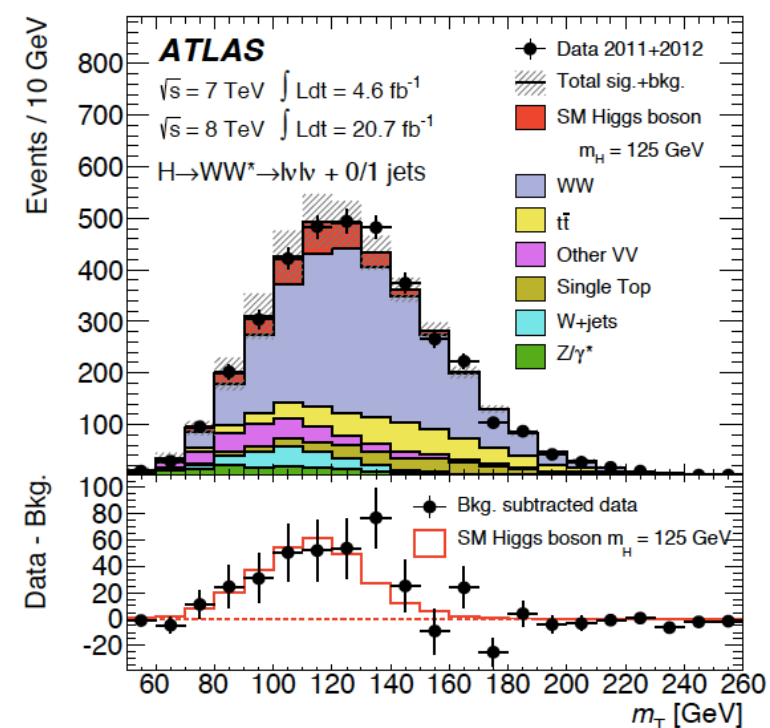
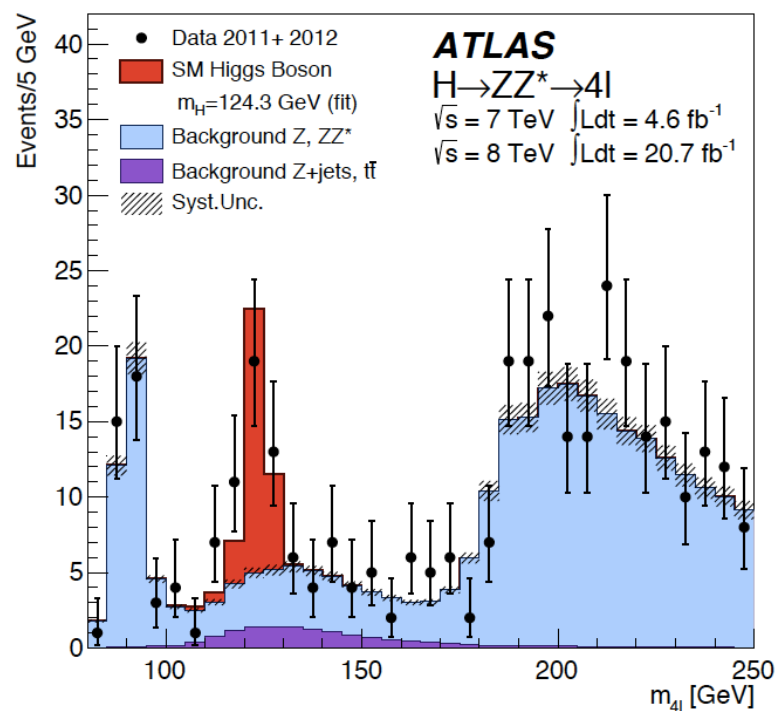
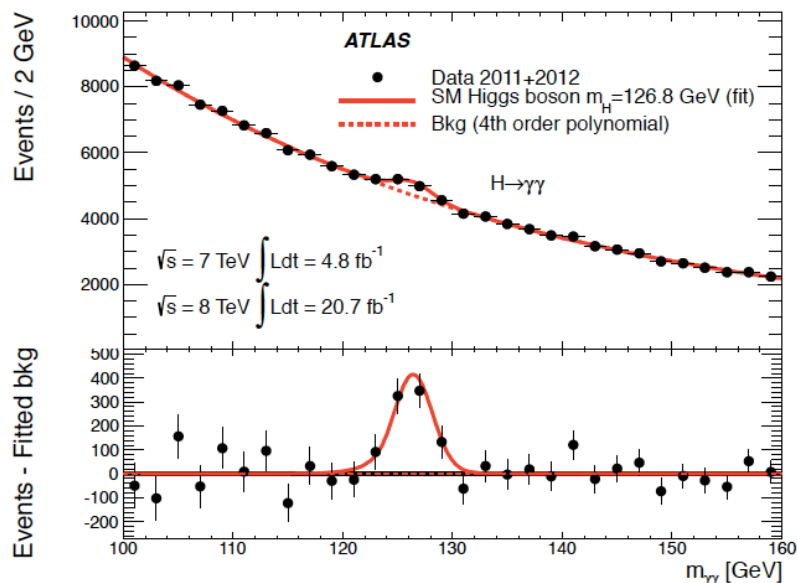
# 3) Nachweis des Higgs-Bosons im Jahr 2012

3.1)  $H \rightarrow \gamma\gamma$

3.2)  $H \rightarrow ZZ^*$

3.3)  $H \rightarrow W^\pm W^\mp$

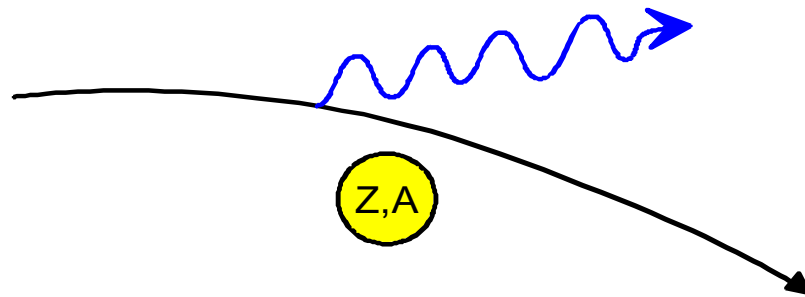
(Diagramme mit dem vollen Datensatz der Jahre 2011 und 2012)



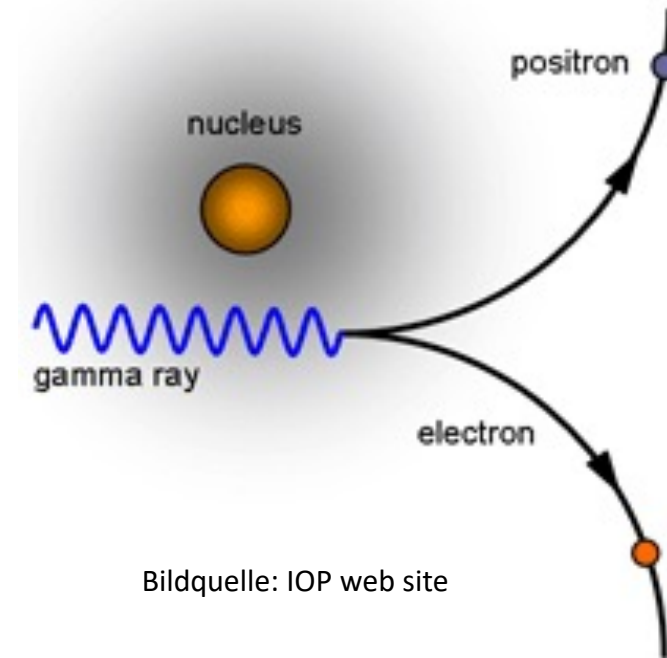
# 3.1) $H \rightarrow \gamma\gamma$ : Nachweis von Photonen



- Bei hohen Energien (ab ca. 100 MeV) wird die Wechselwirkung von Photonen mit Materie durch die Bildung von  $e^+e^-$  Paaren dominiert (**Paarbildung**).
- Hochenergetische Elektronen und Positronen erzeugen bei Wechselwirkung mit Materie **Bremsstrahlung**.

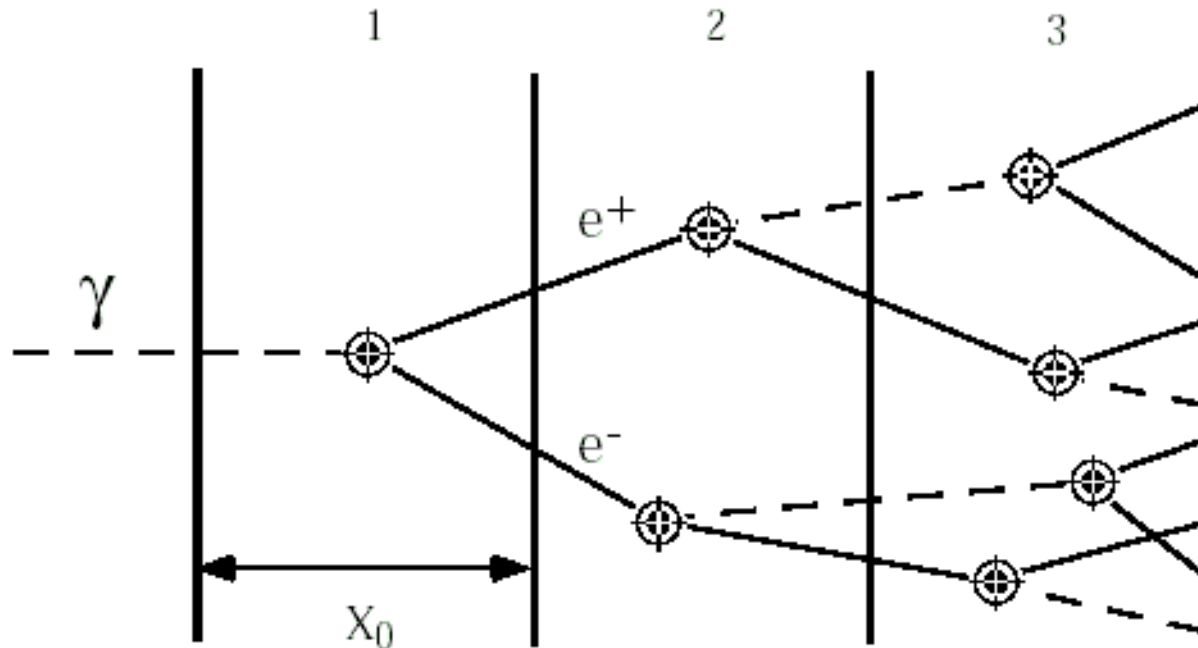


$$\frac{dE}{dx} \propto - \frac{e^4 E}{m^2} Z^2$$

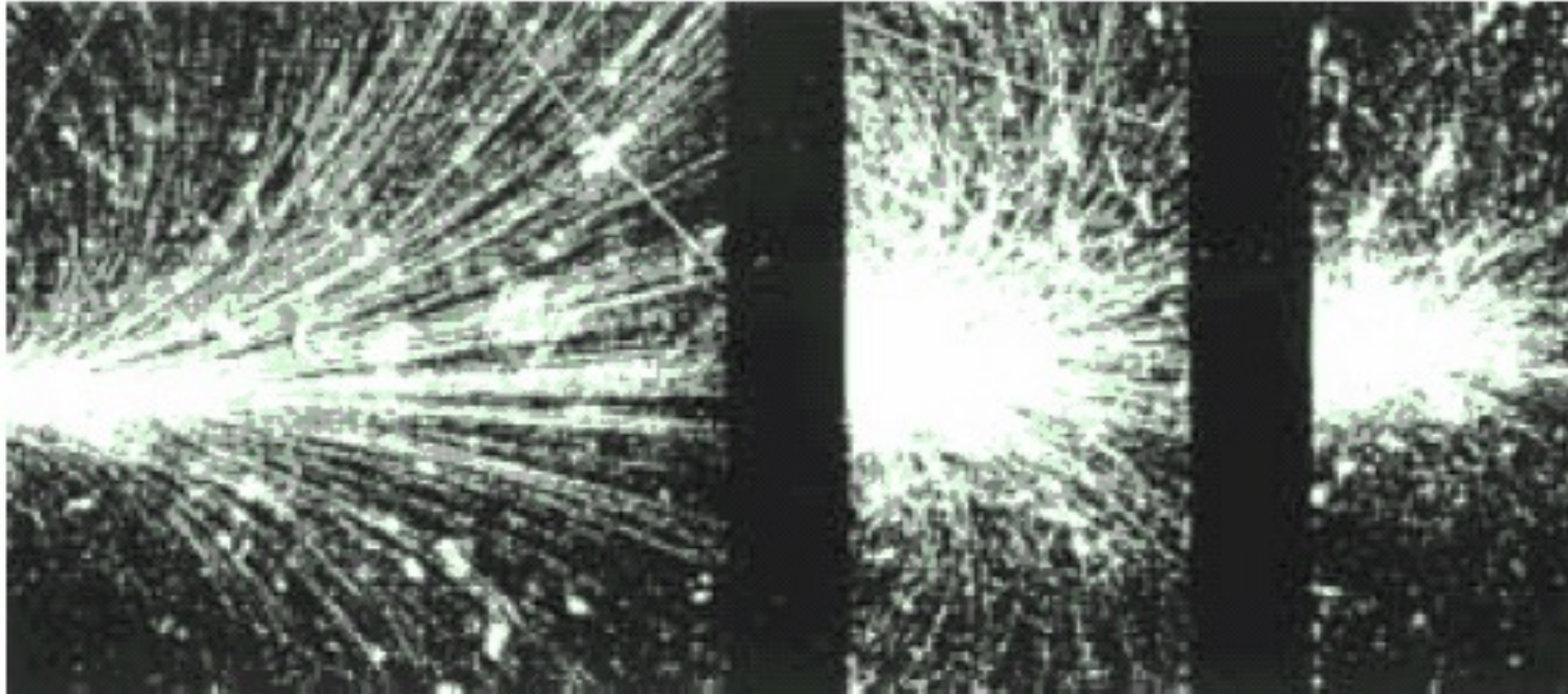


Bildquelle: IOP web site

Die Wechselwirkungsprozesse Paarbildung und Bremsstrahlung laufen in aufeinander folgenden Schritten (Generationen) im Wechsel ab.

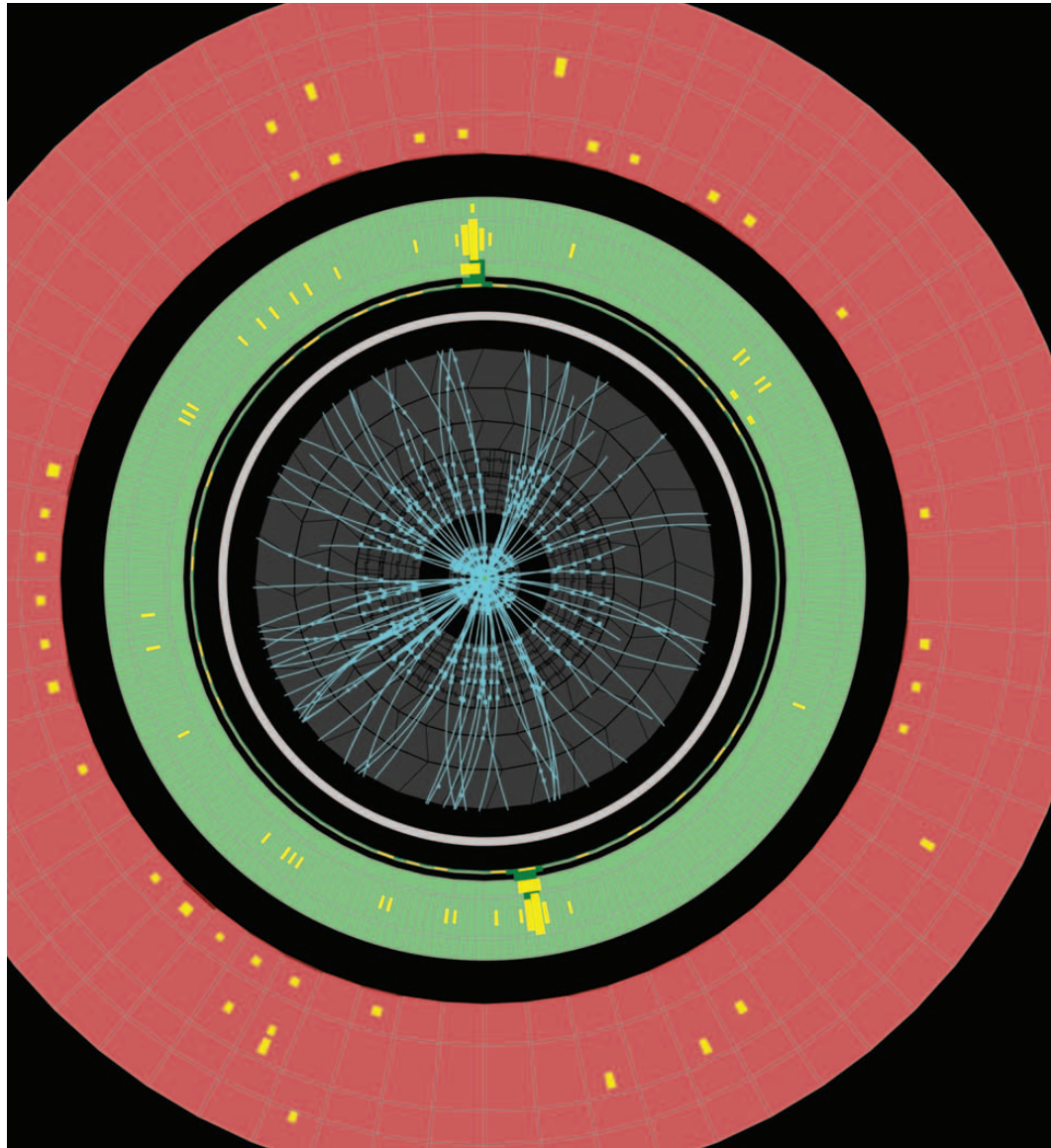


- Auf diese Weise entsteht eine Kaskade aus Photonen und  $e^+e^-$ -Paaren, ein **elektromagnetischer Schauer**.
- Nach jeder Strahlungslänge **verdoppelt** sich in etwa die Teilchenanzahl.



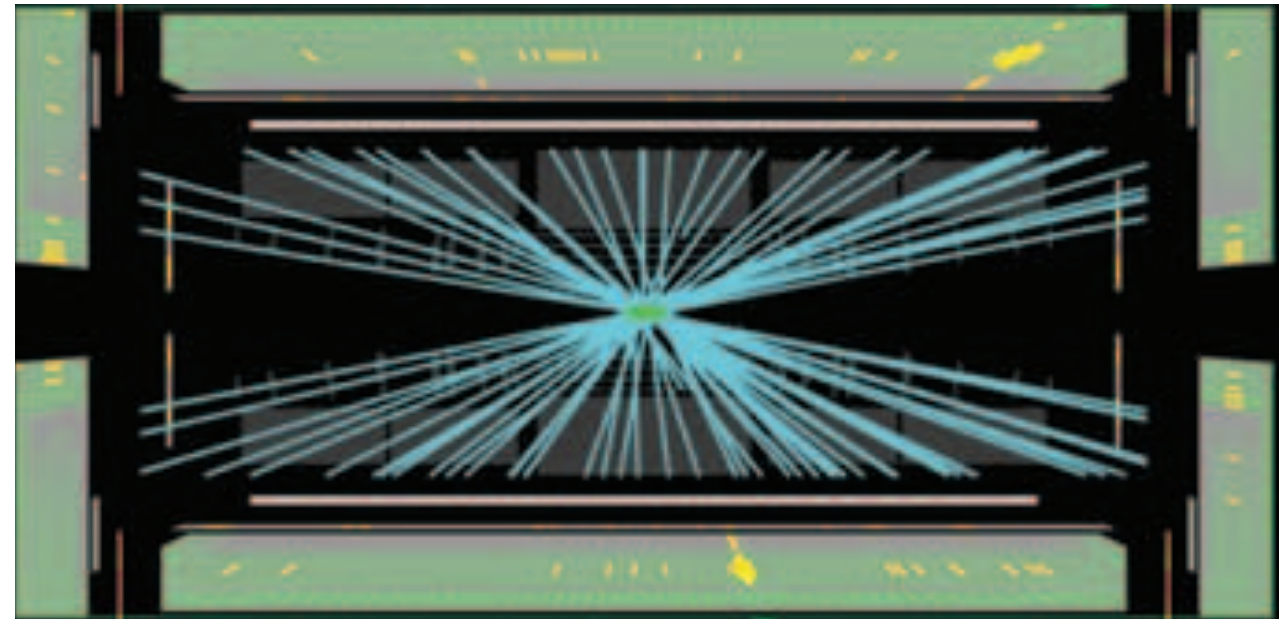
**Photon-induzierter** Schauer in einer Nebelkammer.

- Die schwarzen Bereiche sind Blei-Platten.
- Senkrecht zur Bildebene wirkt ein Magnetfeld.



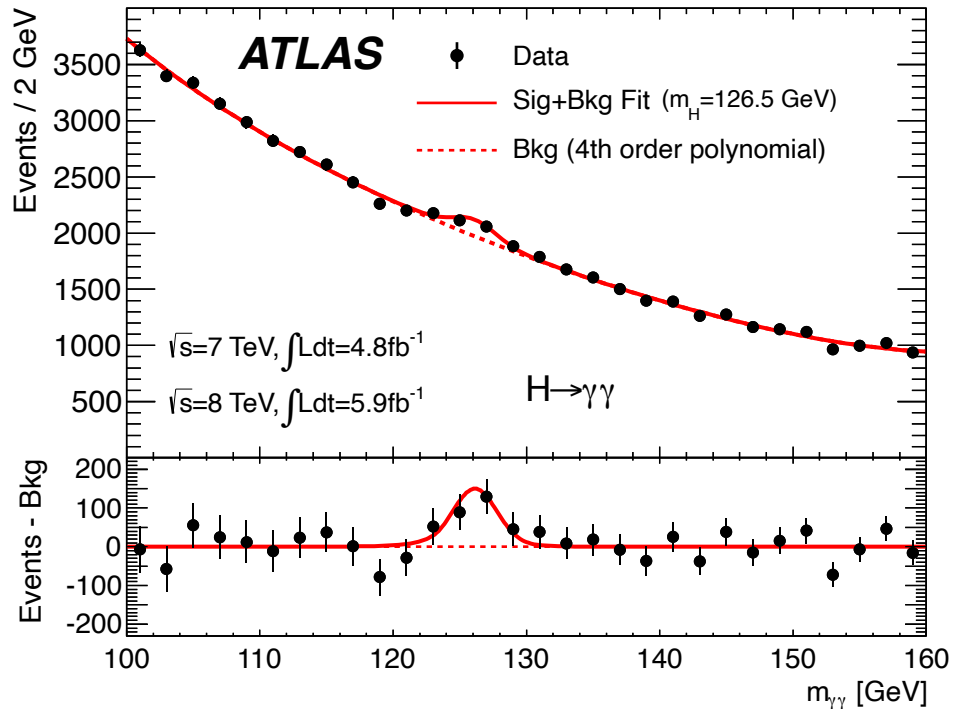
Transversalebene ( $x$ - $y$ -Ebene)

$z$ - $x$ -Ebene entlang des Strahls



Ein Kandidatenereignis im  $H \rightarrow \gamma\gamma$  Kanal.  
Science, Vol. 338 no. 6114 pp. 1576-1582

# Das $H \rightarrow \gamma\gamma$ Signal

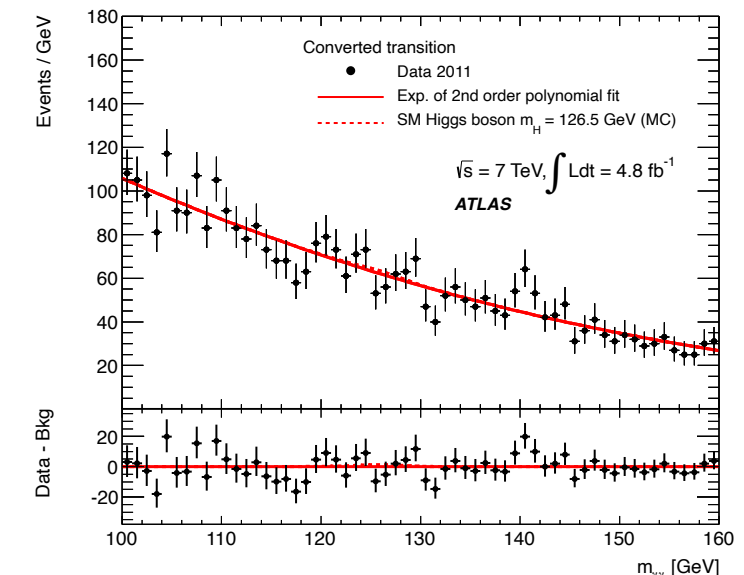
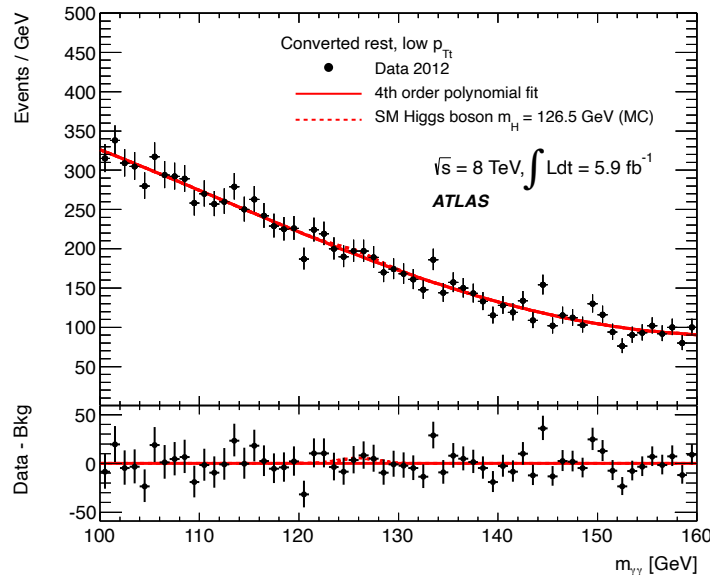
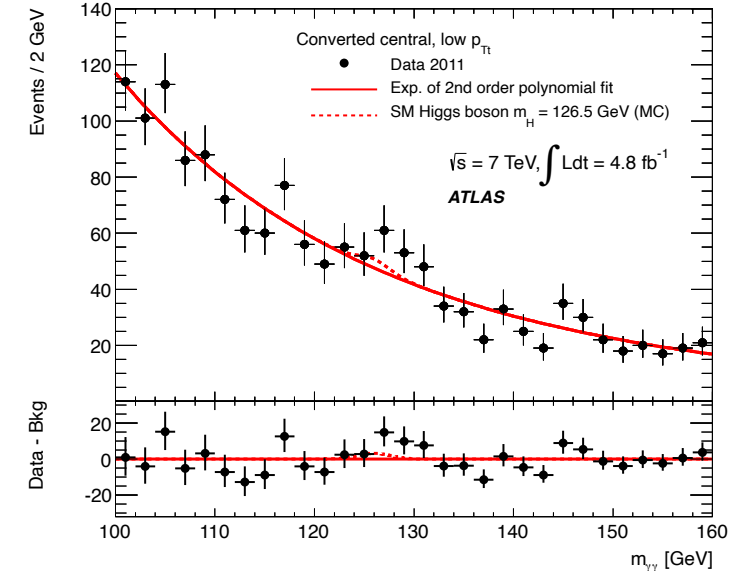
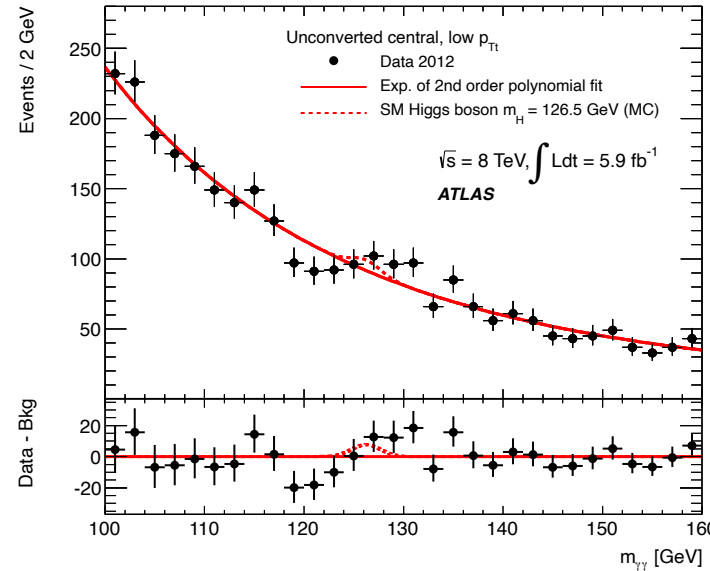


- Messung der **Photonenergie**, des **Azimuthwinkels  $\phi$**  und der **Pseudorapidität** im Kalorimeter.
- Position des **Kollisionspunktes** (Primärvertex)
- Rekonstruktion von  $m_{\gamma\gamma}$
- Die Zahl der Untergrundereignisse unter dem Signal wird mit einem Fit an die Gesamtverteilung von  $m_{\gamma\gamma}$  bestimmt.
- Annahme über Verlauf der Form des Untergrunds: Polynom 4ten Grades.

- Es werden Daten der Jahre 2011 und 2012 verwendet (unterschiedliche Schwerpunktsenergien).
- 10 verschiedene **Kategorien** von Zwei-Photon-Ereignissen.
  - Unterschiede im Signal-zu-Untergrundverhältnis und in der Massenauflösung

# Kategorien von Zwei-Photon-Ereignissen

- Konvertiert / Unkonvertiert
- Niedriges  $p_T$  / hohes  $p_T$  des Zweiphotonsystems
- Zentral / vorwärts (großes  $\eta$ )
- Extra Jets



# Ereigniszahlen der einzelnen Kategorien



$\sqrt{s}$	7 TeV		8 TeV		FWHM [GeV]
$\sigma \times B(H \rightarrow \gamma\gamma)$ [fb]	39		50		
Category	$N_D$	$N_S$	$N_D$	$N_S$	
Unconv. central, low $p_{Tt}$	2054	10.5	2945	14.2	3.4
Unconv. central, high $p_{Tt}$	97	1.5	173	2.5	3.2
Unconv. rest, low $p_{Tt}$	7129	21.6	12 136	30.9	3.7
Unconv. rest, high $p_{Tt}$	444	2.8	785	5.2	3.6
Conv. central, low $p_{Tt}$	1493	6.7	2015	8.9	3.9
Conv. central, high $p_{Tt}$	77	1.0	113	1.6	3.5
Conv. rest, low $p_{Tt}$	8313	21.1	11 099	26.9	4.5
Conv. rest, high $p_{Tt}$	501	2.7	706	4.5	3.9
Conv. transition	3591	9.5	5140	12.8	6.1
2-jet	89	2.2	139	3.0	3.7
All categories (inclusive)	23 788	79.6	35 251	110.5	3.9

Ca. 190 Signalereignisse



# 3.2 Der $H \rightarrow ZZ^*$ Kanal



## Z DECAY MODES

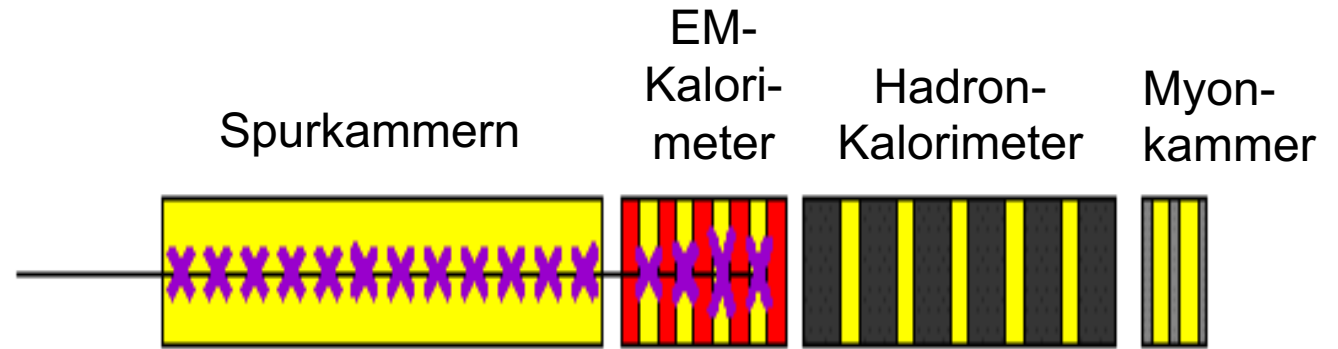
Mode	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level
$\Gamma_1$ $e^+ e^-$	[a] ( 3.3632 ± 0.0042 ) %	
$\Gamma_2$ $\mu^+ \mu^-$	[a] ( 3.3662 ± 0.0066 ) %	
$\Gamma_3$ $\tau^+ \tau^-$	[a] ( 3.3696 ± 0.0083 ) %	
$\Gamma_4$ $\ell^+ \ell^-$	[a,b] ( 3.3658 ± 0.0023 ) %	
$\Gamma_5$ $\ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$	[c] ( 3.5 ± 0.4 ) × 10 <sup>-6</sup>	S=1.7
$\Gamma_6$ invisible	[a] ( 20.000 ± 0.055 ) %	
$\Gamma_7$ hadrons	[a] ( 69.911 ± 0.056 ) %	
$\Gamma_8$ $(u\bar{u} + c\bar{c})/2$	( 11.6 ± 0.6 ) %	
$\Gamma_9$ $(d\bar{d} + s\bar{s} + b\bar{b})/3$	( 15.6 ± 0.4 ) %	
$\Gamma_{10}$ $c\bar{c}$	( 12.03 ± 0.21 ) %	
$\Gamma_{11}$ $b\bar{b}$	( 15.12 ± 0.05 ) %	
$\Gamma_{12}$ $b\bar{b}b\bar{b}$	( 3.6 ± 1.3 ) × 10 <sup>-4</sup>	

Hadronische Z-Zerfälle  
= Zerfälle in Quarks  $Z \rightarrow q\bar{q}$

- Schlechte Massenauflösung
- Hoher Untergrund
- Daher Nachweis in  $Z \rightarrow e^+e^-$  und  $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$

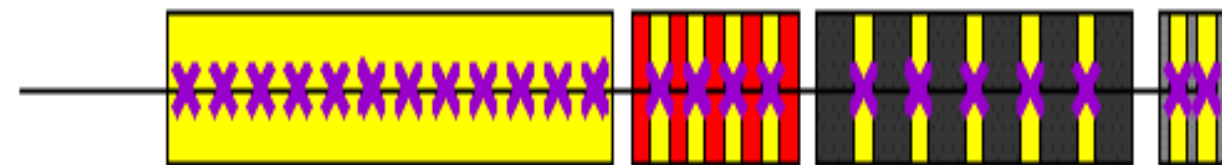
- Aber: kleines Verzweigungsverhältnis:  $\mathcal{B}(Z \rightarrow e^+e^-) + \mathcal{B}(Z \rightarrow \mu^+\mu^-) = 6.72\%$
- $\mathcal{B}(H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+\ell^-) = 2.62\% \times 6.72\% \times 6.72\% = 1.18 \times 10^{-4} < 0.1 \times \mathcal{B}(H \rightarrow \gamma\gamma)$
- Gute **Massenauflösung**: 1.7 – 2.3 GeV/c<sup>2</sup>

Elektronen und Positronen



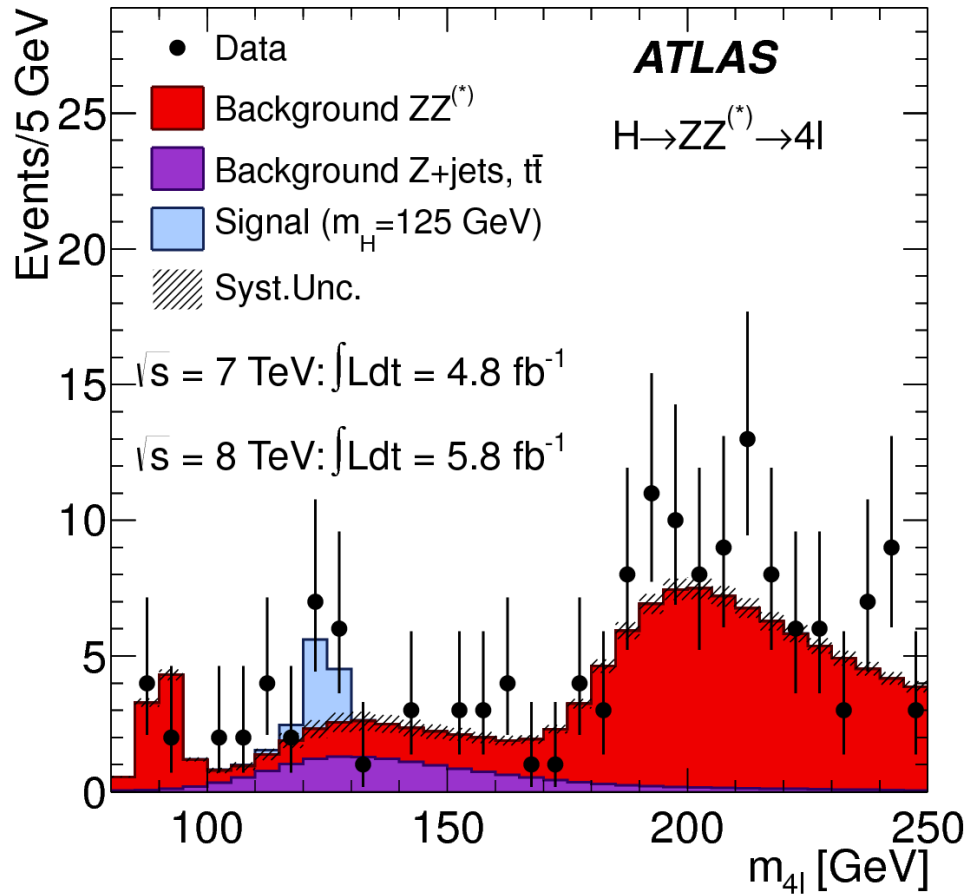
- Signale in den Spurkammern.
- Vollständige Energiedeposition im elektromagnetischen Kalorimeter durch Kaskaden von Bremsstrahlung und  $e^-e^+$  Paarproduktion.

Myonen



- Signale in den Spurkammern.
- Energiedeposition durch Ionisation in den Kalorimetern.
- Signale in den Myonkammern.

# Beobachtete $m_{4l}$ Verteilung und Ereigniszahlen



Erwartete und beobachtete Ereigniszahlen im Intervall  $120 \text{ GeV}/c^2 < m_{4l} < 130 \text{ GeV}/c^2$

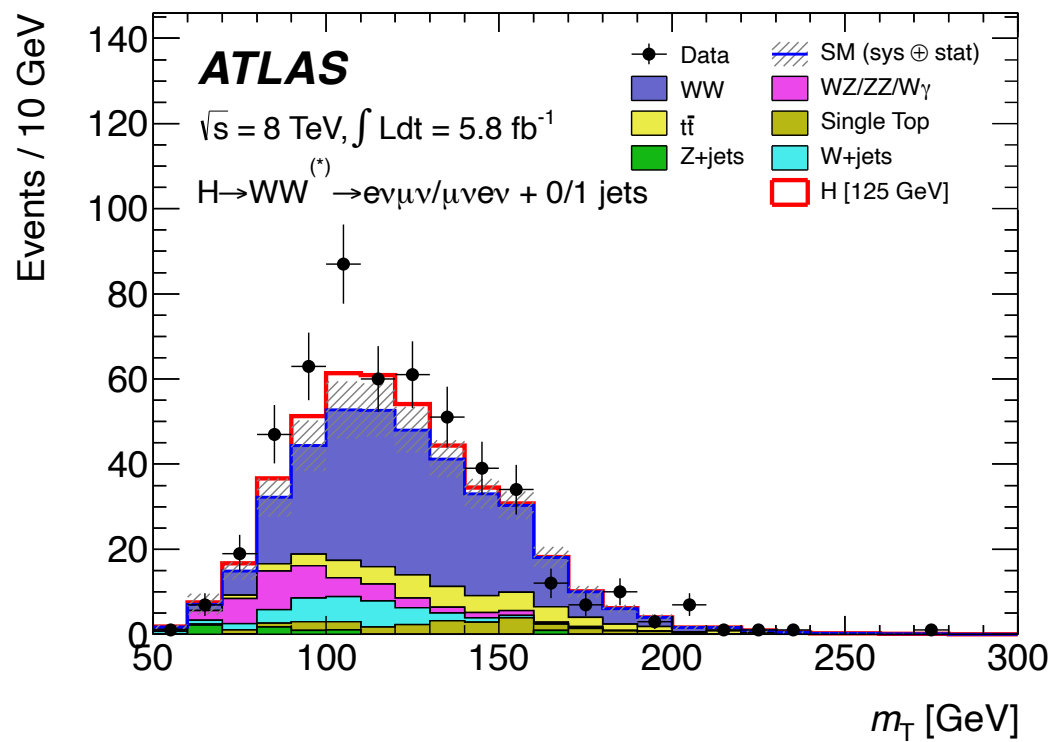
	Signal	$ZZ^{(*)}$	$Z + \text{jets}, t\bar{t}$	Observed
$4\mu$	$2.09 \pm 0.30$	$1.12 \pm 0.05$	$0.13 \pm 0.04$	6
$2e2\mu/2\mu2e$	$2.29 \pm 0.33$	$0.80 \pm 0.05$	$1.27 \pm 0.19$	5
$4e$	$0.90 \pm 0.14$	$0.44 \pm 0.04$	$1.09 \pm 0.20$	2



# 3.3 Der $H \rightarrow W^\pm W^\mp \nu \nu$ Kanal

- Nutze nur den Kanal  $H \rightarrow W^\pm W^\mp \nu \nu \rightarrow e^\pm \mu^\mp \nu \nu$ , da in  $ee$  und  $\mu\mu$  Kanälen der Untergrund von Z-Produktion zu groß ist.
- Neutrinos können nur als **fehlender Transversalimpuls** nachgewiesen werden.
- Rekonstruktion der transversalen Masse:

$$m_T = \sqrt{(E_T^{ll} + E_T^{\text{miss}})^2 - |\mathbf{p}_T^{ll} + \mathbf{E}_T^{\text{miss}}|^2}$$

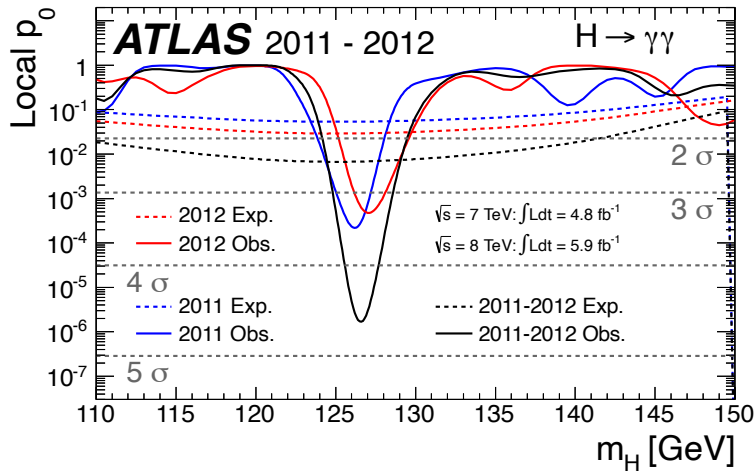


	0-jet	1-jet	2-jet
Signal	$20 \pm 4$	$5 \pm 2$	$0.34 \pm 0.07$
WW	$101 \pm 13$	$12 \pm 5$	$0.10 \pm 0.14$
WZ <sup>(*)</sup> /ZZ/W $\gamma$ <sup>(*)</sup>	$12 \pm 3$	$1.9 \pm 1.1$	$0.10 \pm 0.10$
$t\bar{t}$	$8 \pm 2$	$6 \pm 2$	$0.15 \pm 0.10$
$tW/tb/tqb$	$3.4 \pm 1.5$	$3.7 \pm 1.6$	-
Z/ $\gamma^*$ + jets	$1.9 \pm 1.3$	$0.10 \pm 0.10$	-
W + jets	$15 \pm 7$	$2 \pm 1$	-
Total background	$142 \pm 16$	$26 \pm 6$	$0.35 \pm 0.18$
Observed	185	38	0

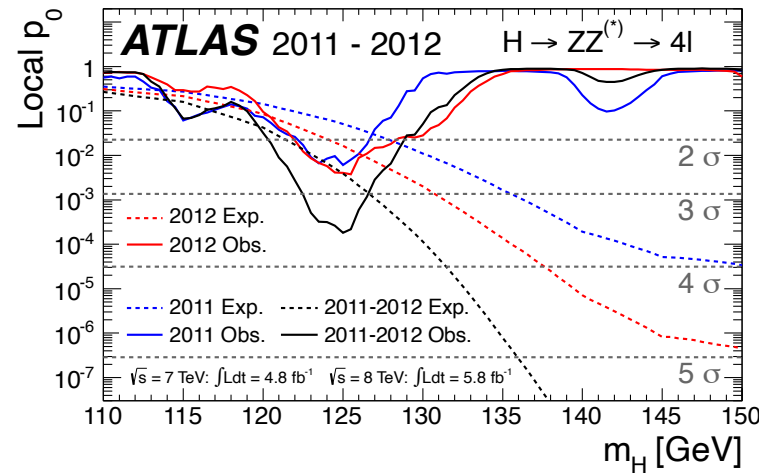
# Statistische Kombination aller Kanäle



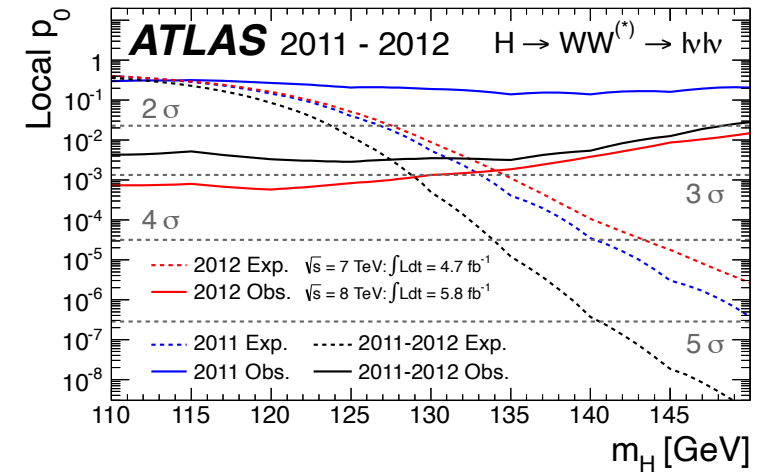
$H \rightarrow \gamma\gamma$



$H \rightarrow ZZ^*$

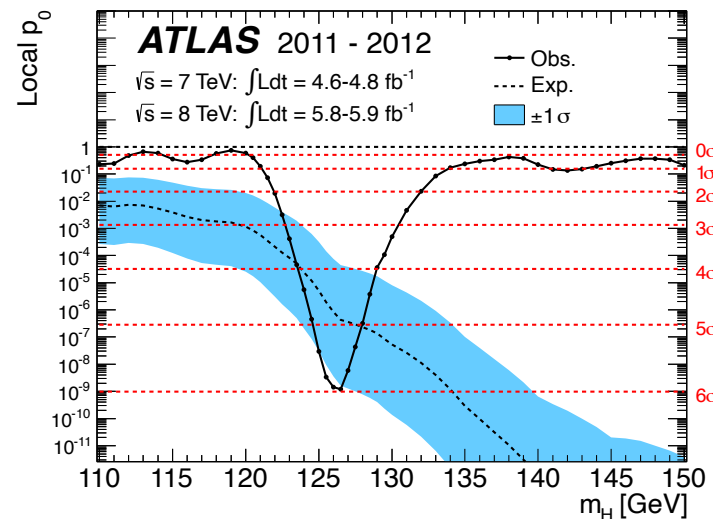


$H \rightarrow W^\pm W^\mp^*$



Kombination

Die Signifikanz des beobachteten Signals beträgt **6.0 Standardabweichungen.**



Der **p-Wert** gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, ein so großes Signal wie das beobachtete als Fluktuation des Untergrunds zu erhalten.

- Die Entdeckung des Higgs-Bosons am CERN im Jahr 2012 markierte das Ende einer **50-jährigen Suche**.
- Das Standardmodell ist damit **komplett**.
- Es ist die fundamentale Theorie der kleinsten Bausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen untereinander.
- Ohne das Higgs-Boson wäre die Theorie unvollständig und nicht konsistent.
- Mit der Entdeckung des Higgs-Bosons wurde die Tür zu genaueren Untersuchungen des Standardmodells aufgestoßen.
- Mit dem Higgs-Boson lässt sich auch sehr gut nach **Erweiterungen des Standardmodells** suchen.

