

# Teilchenphysik Masterclasses

Das Leben, das Universum und der ganze Rest



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



NETZWERK  
TEILCHENWELT





## "Wir haben es!" CERN feiert Durchbruch bei Higgs-Suche

04.07.2012 | 11:02 | von Daniel Breuss (DiePresse.com)

Das Higgs-Boson verleiht den Bausteinen des Universums ihre Masse. Seit Jahrzehnten suchen Forscher das Elementarteilchen. Nun wurde am Teilchenbeschleuniger LHC ein neues Teilchen gefunden, das ihm entspricht.

30.11.2009

LHC

Teilchenbeschleuniger knackt Energie-Weltrekord

# Teil 1: Einführung

Warum Teilchenphysik?

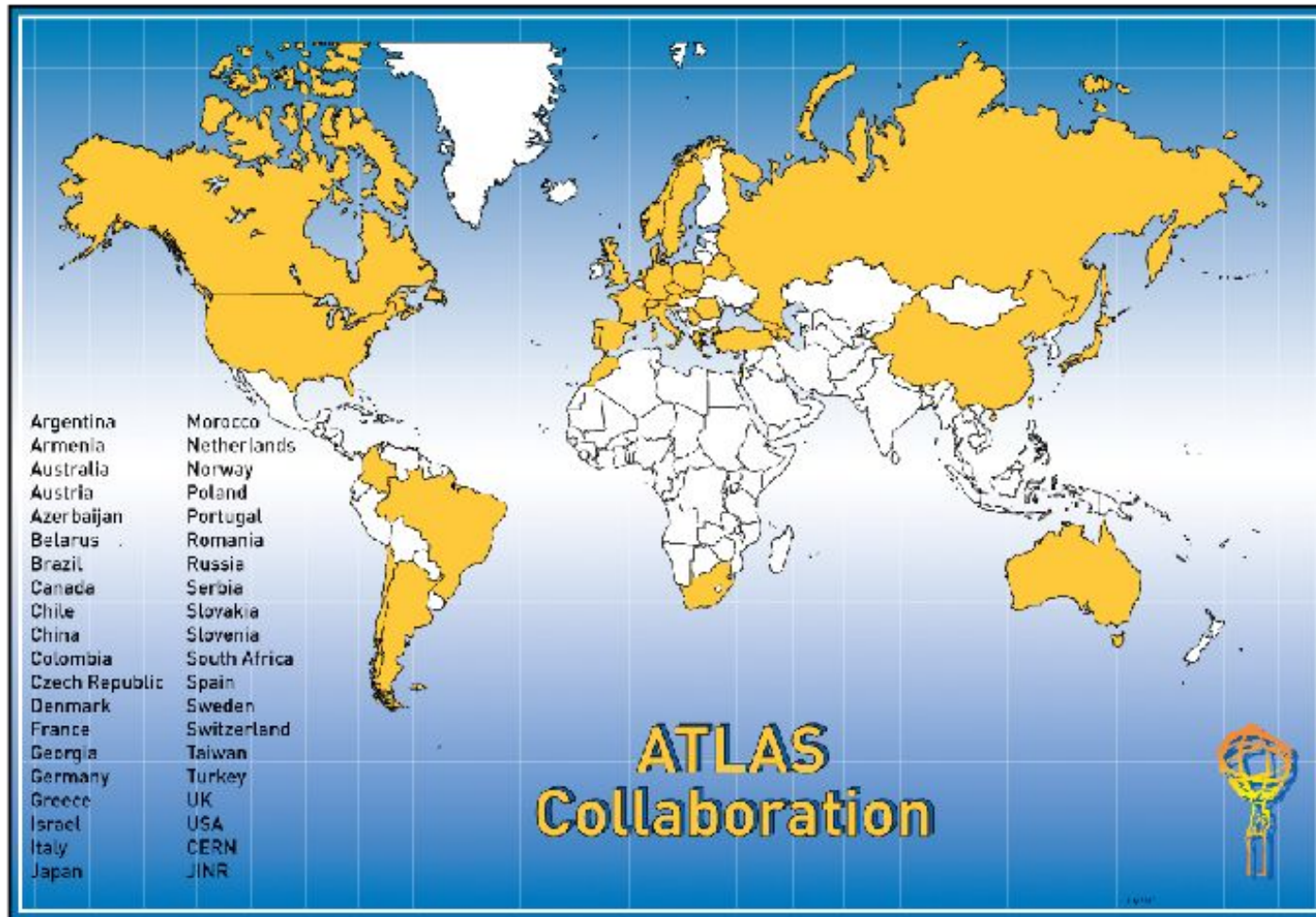


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Wer ist ATLAS?



42 Länder

182 Institute

3000 Wissenschaftler



# Warum Teilchenphysik?

- ▶ Erkenntnisgewinn!
  - ...z.B. über die Geschichte, Funktionsweise und den Aufbau des Universums

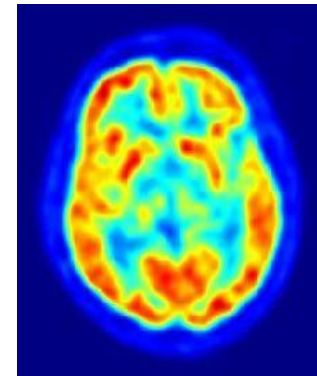
# Warum Teilchenphysik?

- ▶ Erkenntnisgewinn!
  - ...z.B. über die Geschichte, Funktionsweise und den Aufbau des Universums
- ▶ Anwendungen:
  - World Wide Web



# Warum Teilchenphysik?

- ▶ Erkenntnisgewinn!
  - ...z.B. über die Geschichte, Funktionsweise und den Aufbau des Universums
- ▶ Anwendungen:
  - World Wide Web
  - Medizin: Tumorthherapie, PET
  - Weiterentwicklung von Technologien für Computerchips, Detektoren, Magneten und vieles mehr







# Wie forschen Teilchenphysiker?

# Wie forschen Teilchenphysiker?



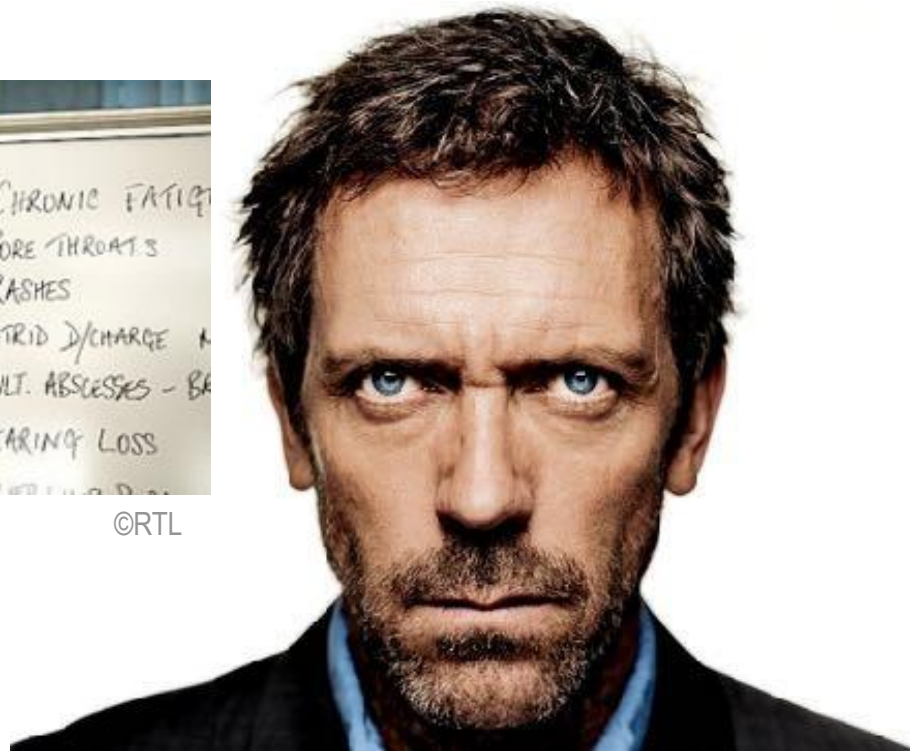
©RTL

# Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Analogie zur Medizin:
  - Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome



©RTL



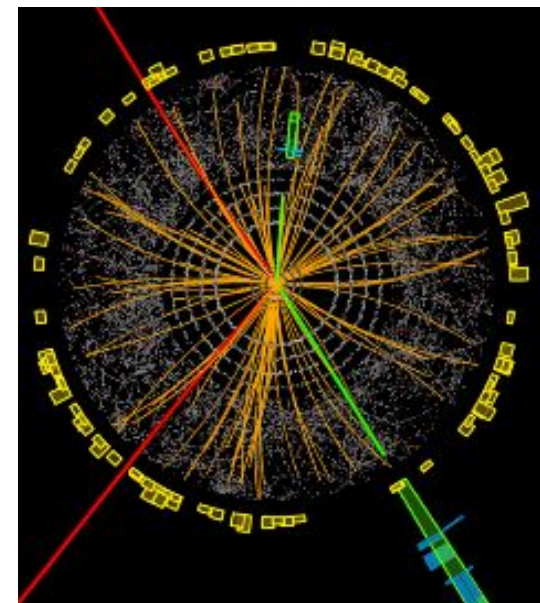
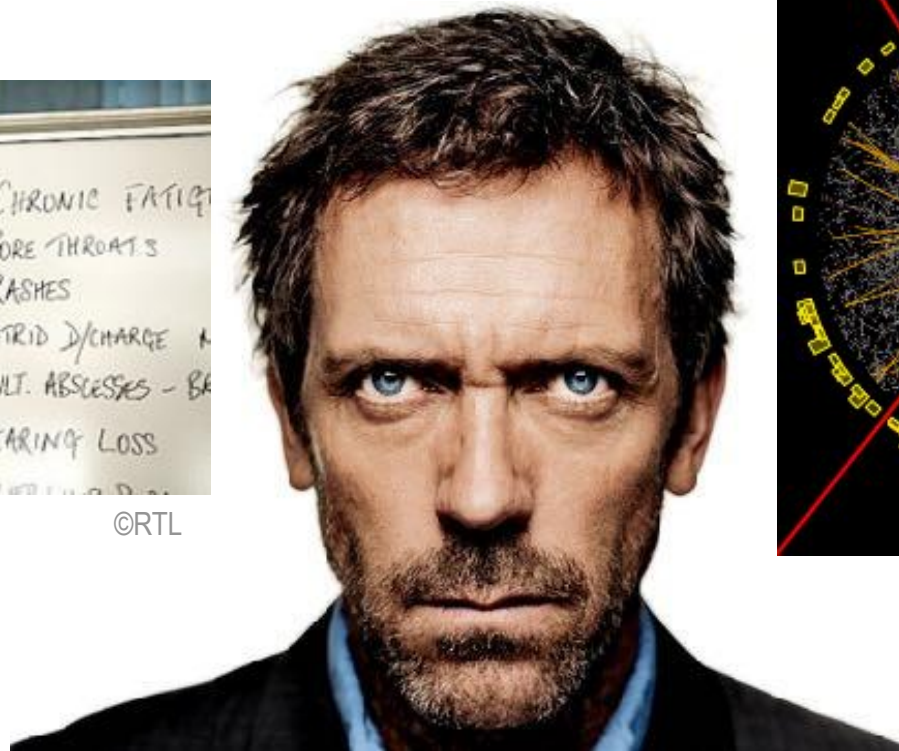
# Wie forschen Teilchenphysiker?

## ► Analogie zur Medizin:

- Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome
- Teilchenphysik: Interaktion von Teilchen nicht direkt beobachtbar, nur sog. Endzustände



©RTL



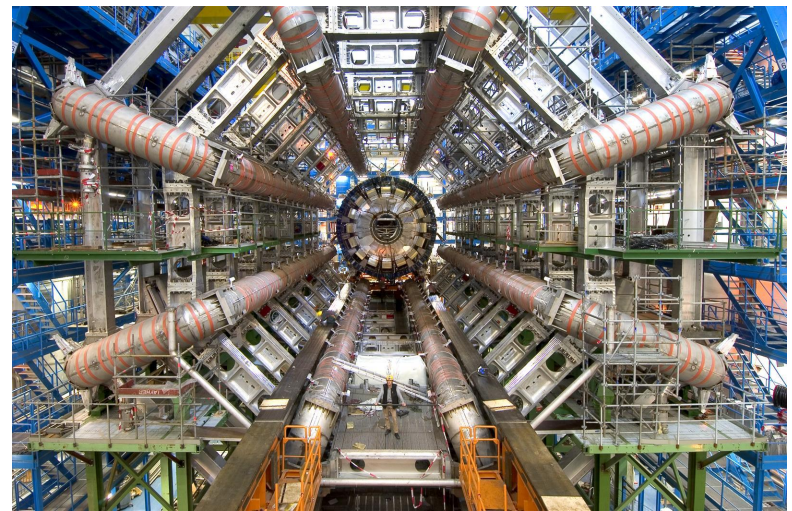
©CERN

# Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig



© Klinik Augustinum München



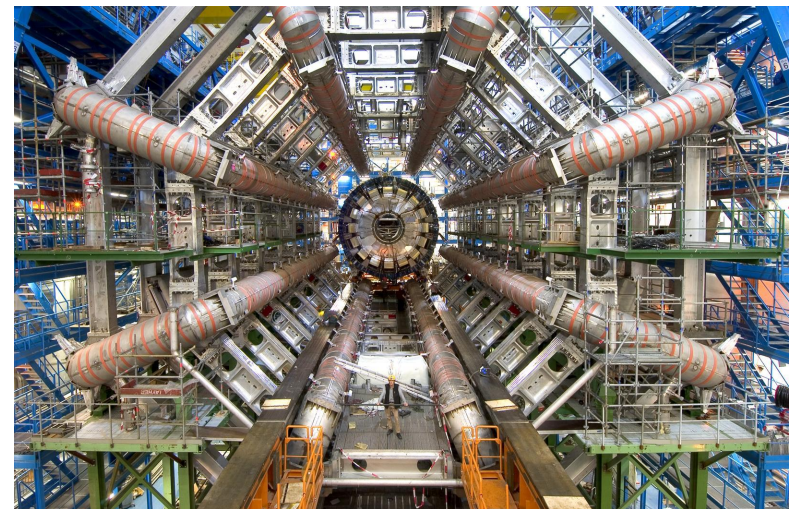
©CERN

# Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig
- ▶ Teilchenphysik: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig



© Klinik Augustinum München



©CERN

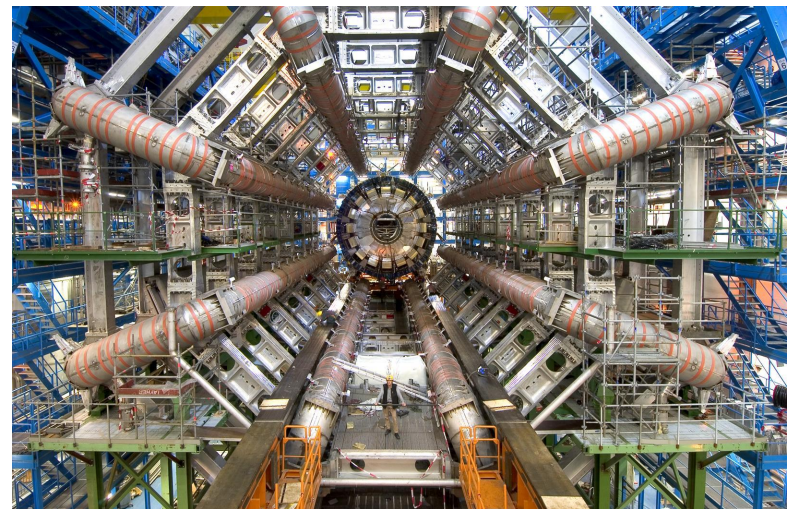
# Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig
- ▶ Teilchenphysik: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig

\$1.5 Millionen



© Klinik Augustinum München



©CERN

# Wie forschen Teilchenphysiker?

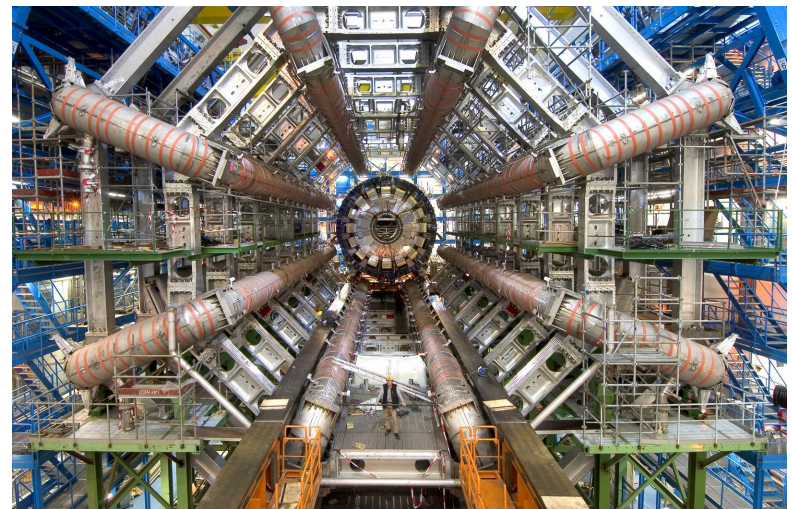
- ▶ Medizin: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig
- ▶ Teilchenphysik: aufwendige Forschung mit hochkomplexen Maschinen notwendig

\$1.5 Millionen



© Klinik Augustinum München

\$450 Millionen



©CERN



# Konkret in der Teilchenphysik

Theorie



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

## Standardmodell der Teilchenphysik

- Macht Vorhersagen über:
- Art wie Teilchen wechselwirken
- Häufigkeiten dieser Wechselwirkungen

# Konkret in der Teilchenphysik

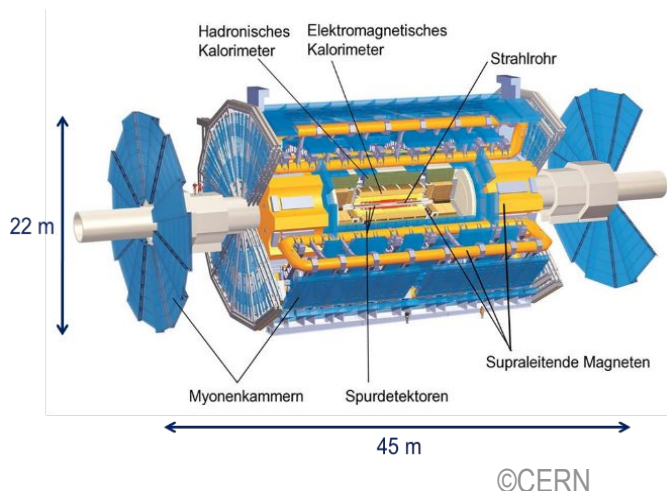
Theorie



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

## Standardmodell der Teilchenphysik

- Macht Vorhersagen über:
- Art wie Teilchen wechselwirken
- Häufigkeiten dieser Wechselwirkungen



## z.B. ATLAS und CMS am LHC

- prüft, ob die Vorhersagen der Theorie stimmen
- Aufnahme von Teilchenkollisionen
- Vergleich der erhaltenen Daten mit den Vorhersagen der Theorie



# Kann man Theorien beweisen?

# Kann man Theorien beweisen?



# Kann man Theorien beweisen?



- ▶ Vermutete Pokerregeln → Theorie
- ▶ Beobachtung von Pokerspielen → Experiment

# Kann man Theorien beweisen?

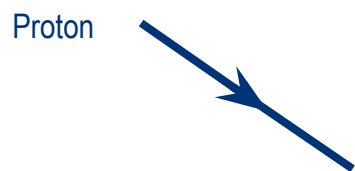


- ▶ Vermutete Pokerregeln → Theorie
- ▶ Beobachtung von Pokerspielen → Experiment
- ◀ Nein, man kann Theorien nur widerlegen!



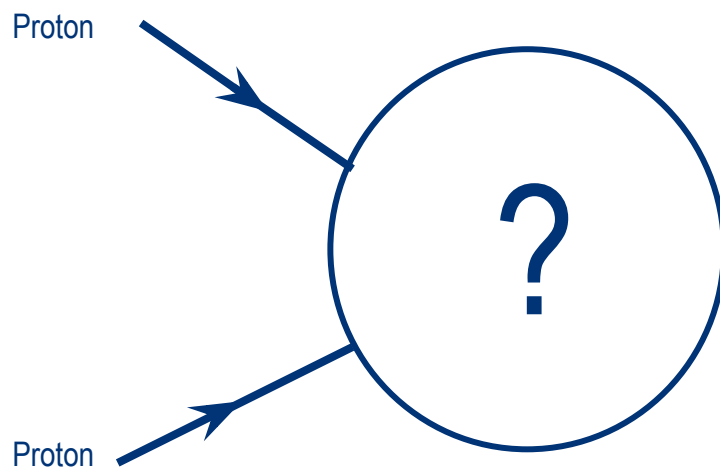
# Wie forschen Teilchenphysiker?

# Wie forschen Teilchenphysiker?

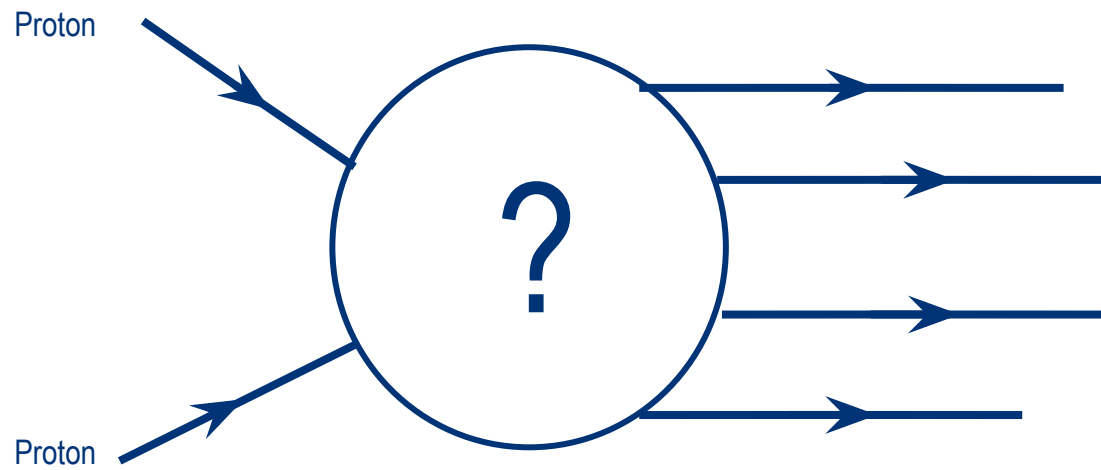




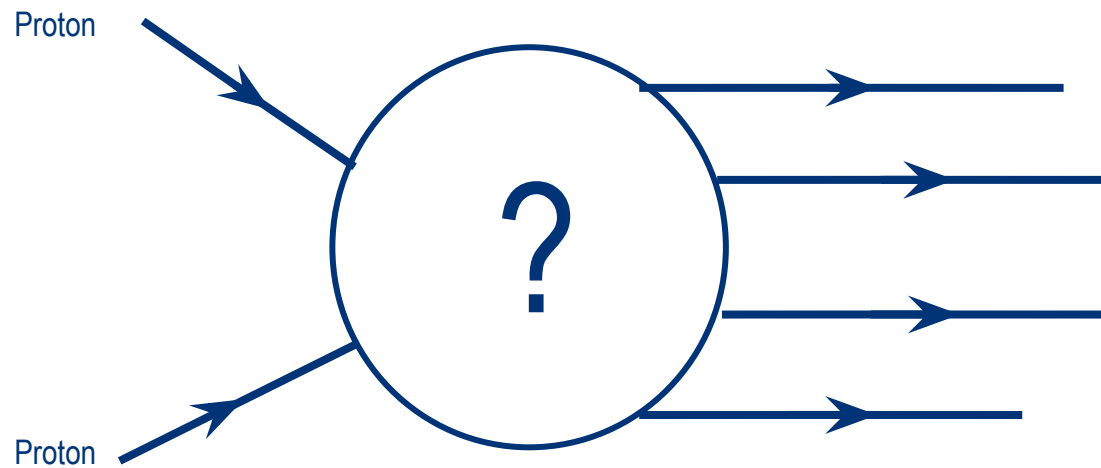
# Wie forschen Teilchenphysiker?



# Wie forschen Teilchenphysiker?



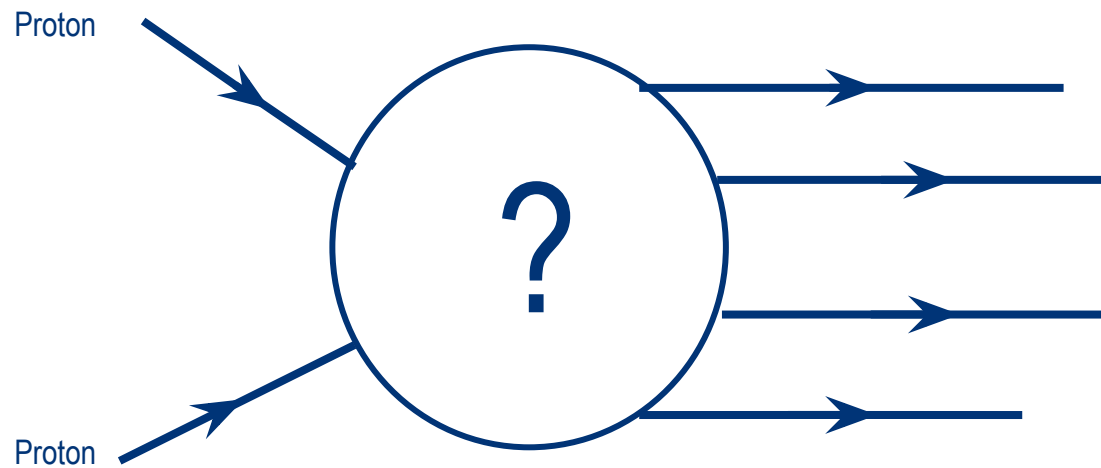
# Wie forschen Teilchenphysiker?



©CERN

## Beschleuniger

# Wie forschen Teilchenphysiker?



©CERN

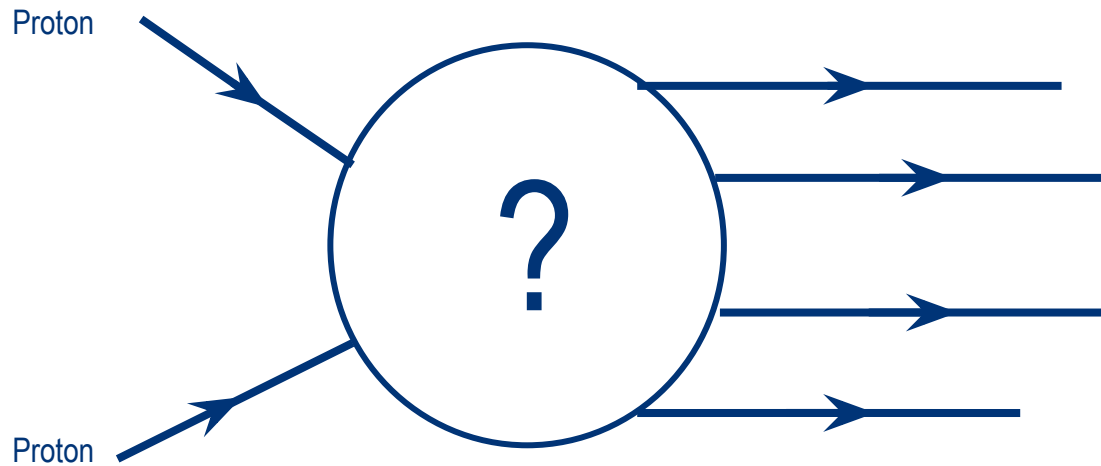
## Beschleuniger



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

## Theorie

# Wie forschen Teilchenphysiker?



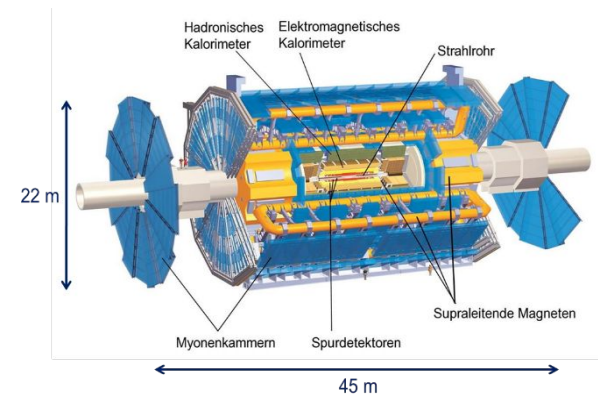
©CERN

## Beschleuniger



<https://wallhere.com/de/wallpaper/255309>

## Theorie



©CERN

## Detektor

# Teil 2: Theoretisches

Wie Physiker sich die Welt vorstellen



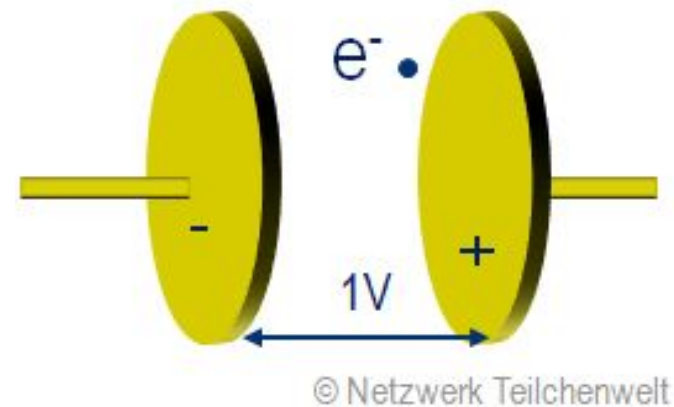
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Elektronenvolt

- ▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchfliegt.
- ▶  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$   
 $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$   
 $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$



# Elektronenvolt

- ▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchfliegt.

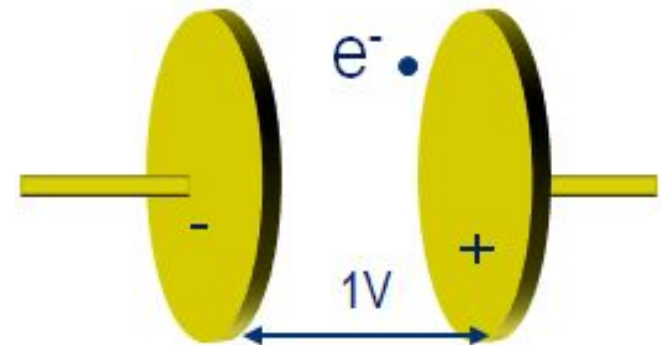
- ▶  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

- ▶ Beispiele:

- 6,5 TeV: Bewegungsenergie eines Protons im LHC,  $\approx$  Bewegungsenergie einer Mücke
- Man kann auch Massen in  $\text{eV}/c^2$  angeben! (wegen  $E=mc^2$ )
- $0,94 \text{ GeV}/c^2$ : Masse eines Protons



© Netzwerk Teilchenwelt



# Bekannte Wechselwirkung



# Bekannte Wechselwirkung

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

# Bekannte Wechselwirkung

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Warum „halten“ die Protonen im Atomkern zusammen,  
obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

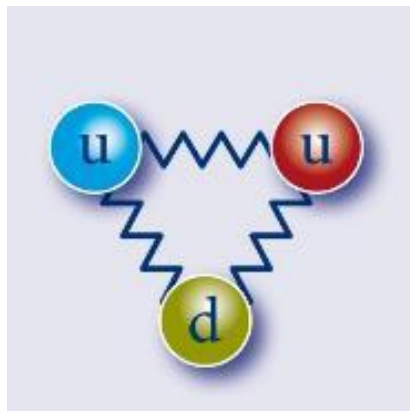
# Was ist Teilchenphysik?

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Starke  
Wechselwirkung



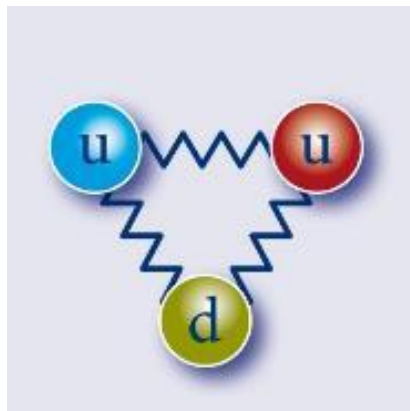
# Was ist Teilchenphysik?

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Starke  
Wechselwirkung



Warum scheint die Sonne seit  
nunmehr über vier Milliarden Jahren?  
Umwandlung:  $p \rightarrow n$

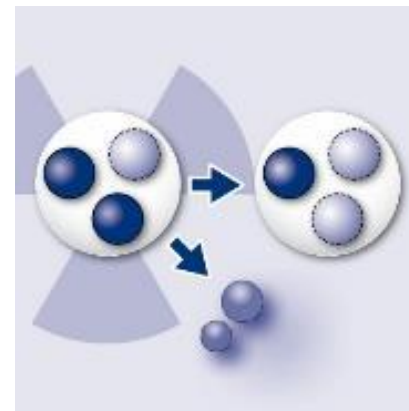
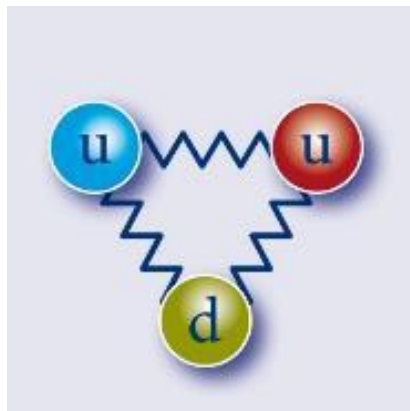
# Was ist Teilchenphysik?

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Starke  
Wechselwirkung



Schwache WW

# Was ist Teilchenphysik?

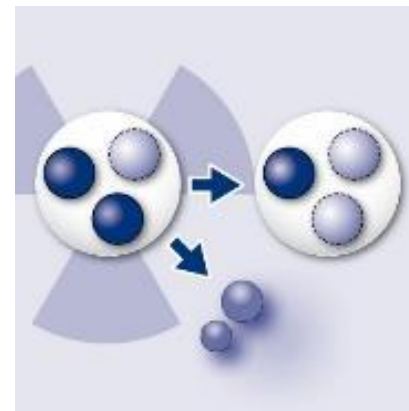
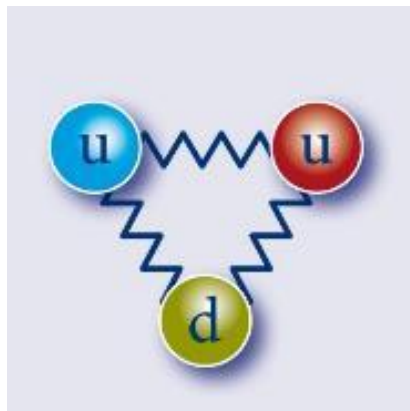
- ▶ Lehre von den **Wechselwirkungen** zwischen den fundamentalen Bausteinen der Natur.

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Starke  
Wechselwirkung



Schwache WW

# Wechselwirkungen

- ▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?
  - Jemand telefoniert mit dem Handy
  - Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um
  - Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen
  - Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
  - Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein
  - Ein Glas fällt vom Tisch
  - Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor



# Wechselwirkungen

## ▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy
- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um
- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

# Wechselwirkungen

## ▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um
- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

# Wechselwirkungen

## ▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen

- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus

- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein

- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

# Wechselwirkungen

## ▶ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus

- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein

- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

# Wechselwirkungen

## ► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein

- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

# Wechselwirkungen

## ► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein



- Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

# Wechselwirkungen

## ► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine Beta-Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein



- Ein Glas fällt vom Tisch



- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor



# Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!





# Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!
- ▶ Coulombsches Gesetz:

# Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!
- ▶ Coulombsches Gesetz:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

# Die fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!
- ▶ Coulombsches Gesetz:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

Elektrische Ladungszahl ist wesentliche Einflussgröße der elektromagnetischen Wechselwirkung und auf die durch diese hervorgerufenen Kräfte



# Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

# Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$



Elektrische Ladung

# Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung

Elektrische  
Ladungszahl

# Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

# Elektrische Ladung und Ladungszahl



Bsp.: Elektron

$$Q_{\text{Elektron}} = -1 \cdot e$$



# Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

Bsp.: Elektron

$$Q_{\text{Elektron}} = (-1) \cdot e$$

Beschränkung auf elektrische Ladungszahl  $Z$   
als charakteristische Teilcheneigenschaft



# Erweiterung: Konzept der Ladung



# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ Einführung: Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung



# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ Einführung: Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften

# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften
- ▶ Bekannt:
  - Elektrische Ladung

elektrische Ladungszahl

*Z*

# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften

- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

- ▶ Neu:

- Schwache Ladung
- Starke (Farb-)Ladung

elektrische Ladungszahl  $Z$

schwache Ladungszahl  $I$

starker Farbladungsvektor  $\vec{C}$

# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften

- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

- ▶ Neu:

- Schwache Ladung
- Starke (Farb-)Ladung

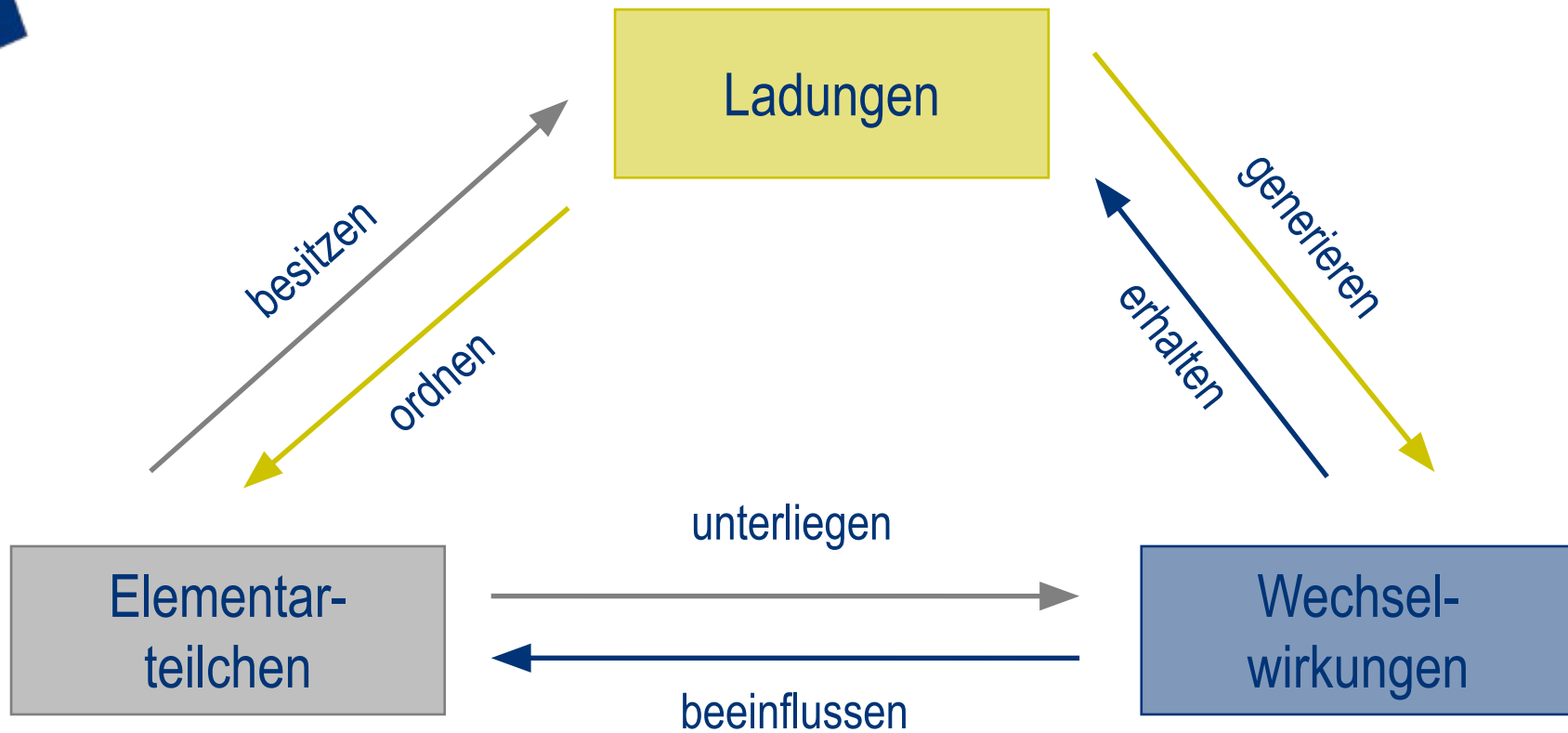
elektrische Ladungszahl  $Z$

schwache Ladungszahl  $I$

starker Farbladungsvektor  $\vec{C}$

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

# Die drei Grundpfeiler des Standardmodells





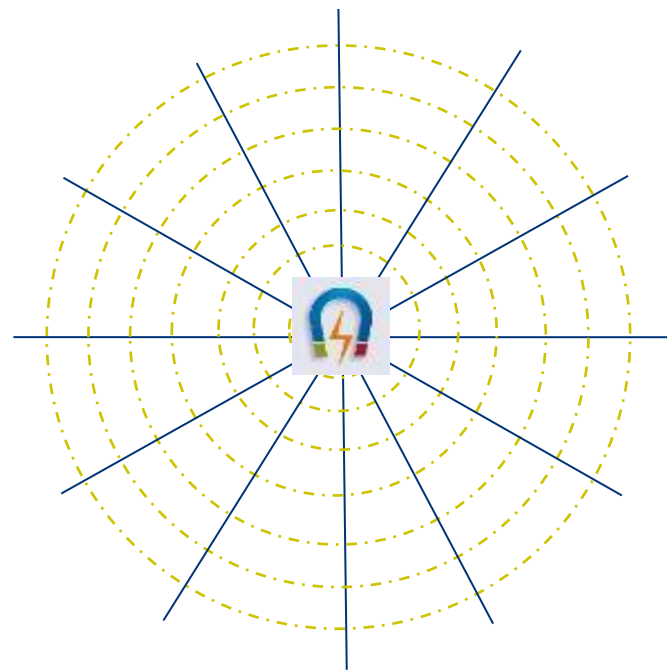
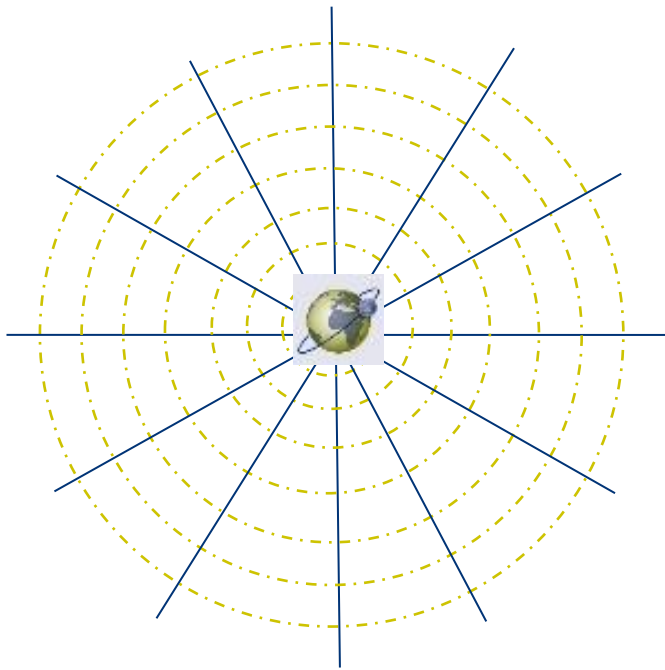


# Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Nur 2 der 4 fundamentalen Wechselwirkungen besitzen eine unendliche Reichweite:

# Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

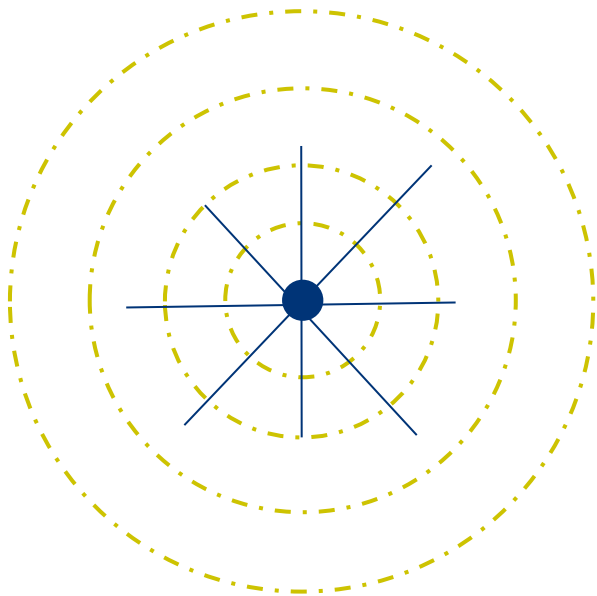
- ▶ Nur 2 der 4 fundamentalen Wechselwirkungen besitzen eine unendliche Reichweite:
  - Gravitation und elektromagnetische Wechselwirkungen



© Netzwerk Teilchenwelt

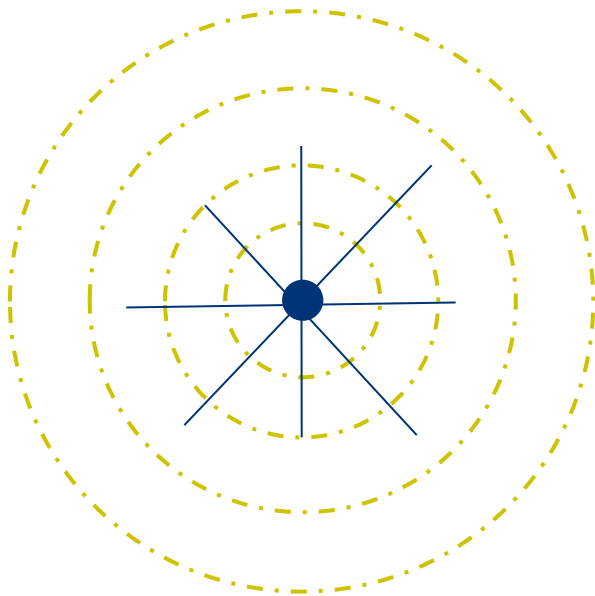
# Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Reichweiten der starken und der schwachen Wechselwirkung sind auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

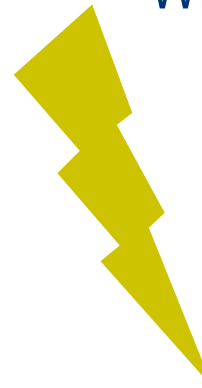


# Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Reichweiten der starken und der schwachen Wechselwirkung sind auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

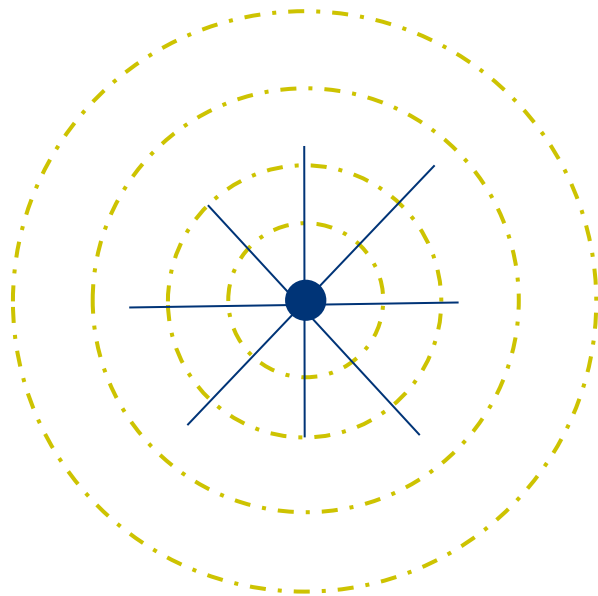


Widerspruch zum Feldlinienmodell

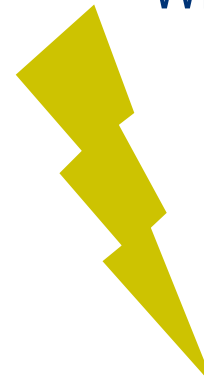


# Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Reichweiten der starken und der schwachen Wechselwirkung sind auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

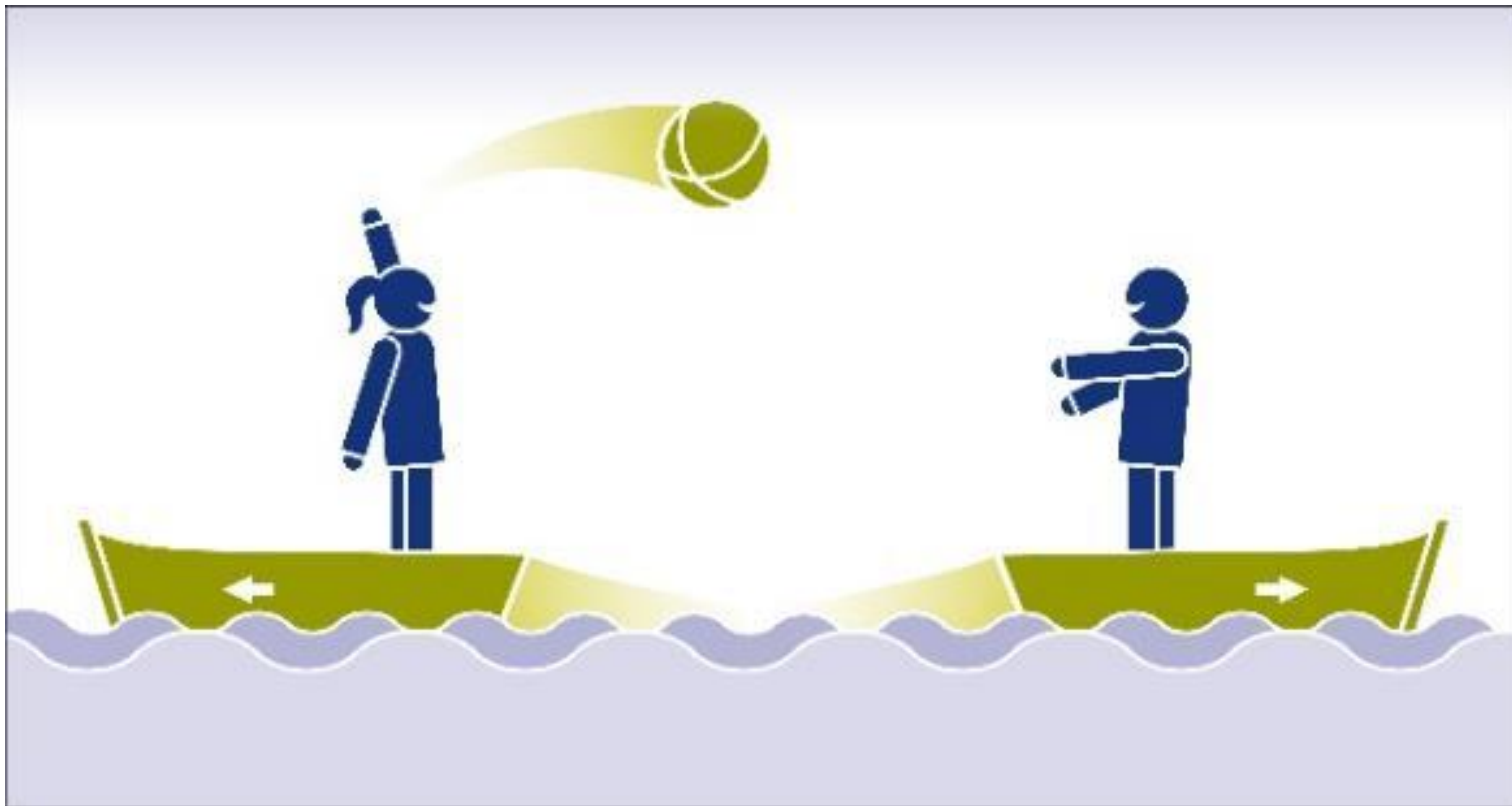


Widerspruch zum Feldlinienmodell



Neues Modell notwendig!

# Botenteilchen als Vermittler der Wechselwirkungen



© Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ Die elementaren Materieteilchen “kommunizieren” miteinander, indem sie **Botenteilchen** aussenden bzw. einfangen.

# Die Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung

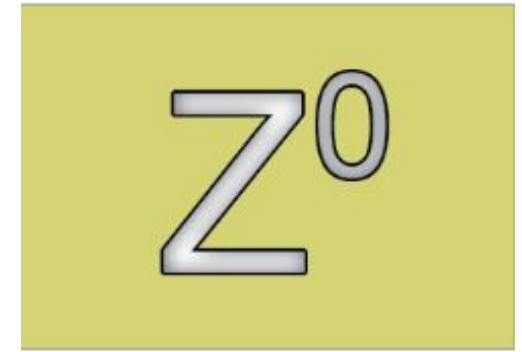
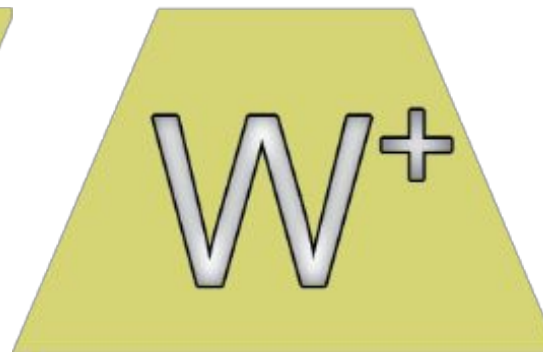
- ▶ Photonen („Lichtteilchen“)



- besitzen keine Masse ( $m_\gamma = 0$ )
- besitzen unendliche Reichweite

# Die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung

- ▶ W- und Z-Teilchen

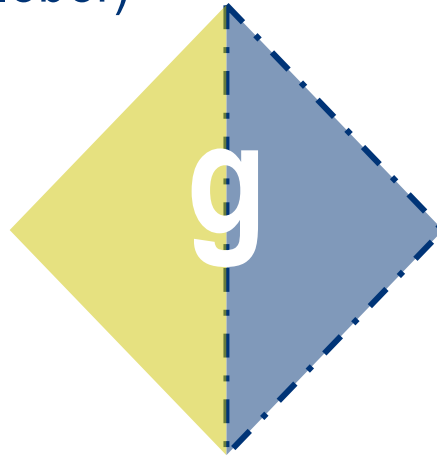


- besitzen sehr große Massen ( $m_W \approx 85 \cdot m_{\text{Proton}}$ )
- aus Quantenmechanik folgt → haben geringe Reichweite



# Die Botenteilchen der starken Wechselwirkung

▶ Gluonen (engl.: glue=Kleber)



- besitzen keine Masse ( $m_{\text{gluon}} = 0$ )
- **Aber:** besitzen selbst starke Ladung(en)
  - Gluonen können selbst Gluonen abstrahlen
  - Sie wechselwirken miteinander
  - Starke Wechselwirkung hat begrenzte Reichweite

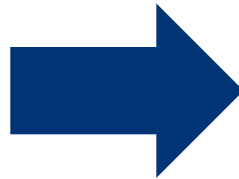


# Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt

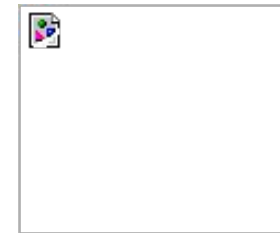
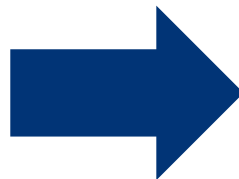
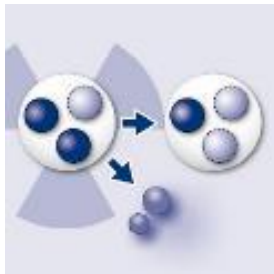
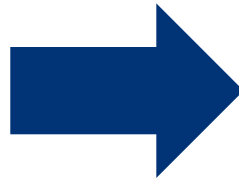
# Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt



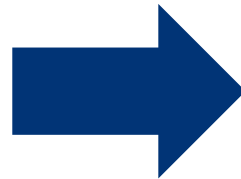
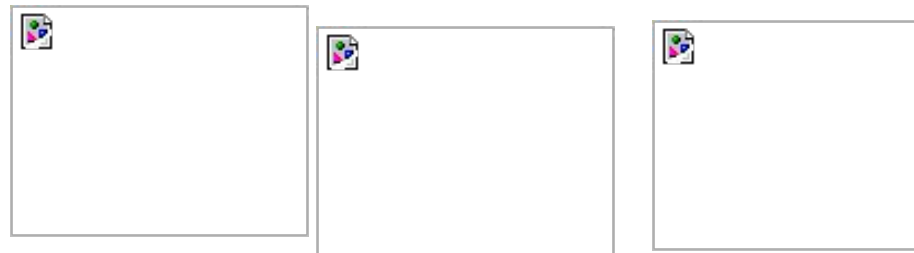
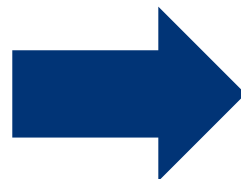
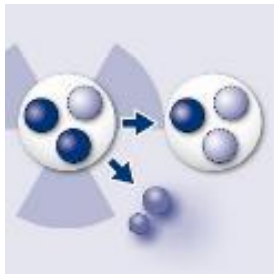
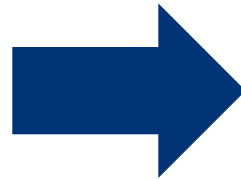
# Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt



# Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt







© Netzwerk Teilchenwelt

# Elementarteilchen sortieren

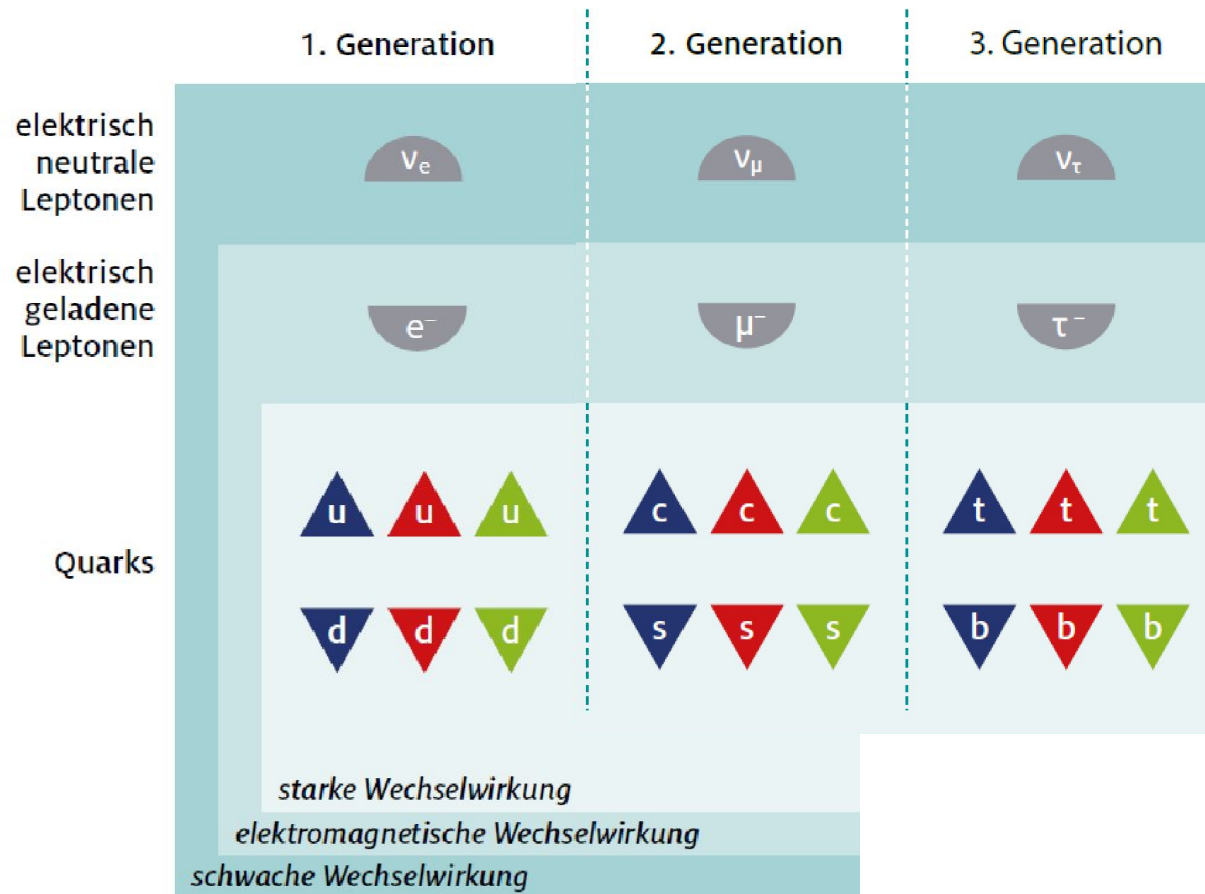
- ▶ Bringt Ordnung in die Elementarteilchen!  
Dabei helfen euch die Teilchen-Steckbriefe.



# Anordnung von Teilchen in Generationen

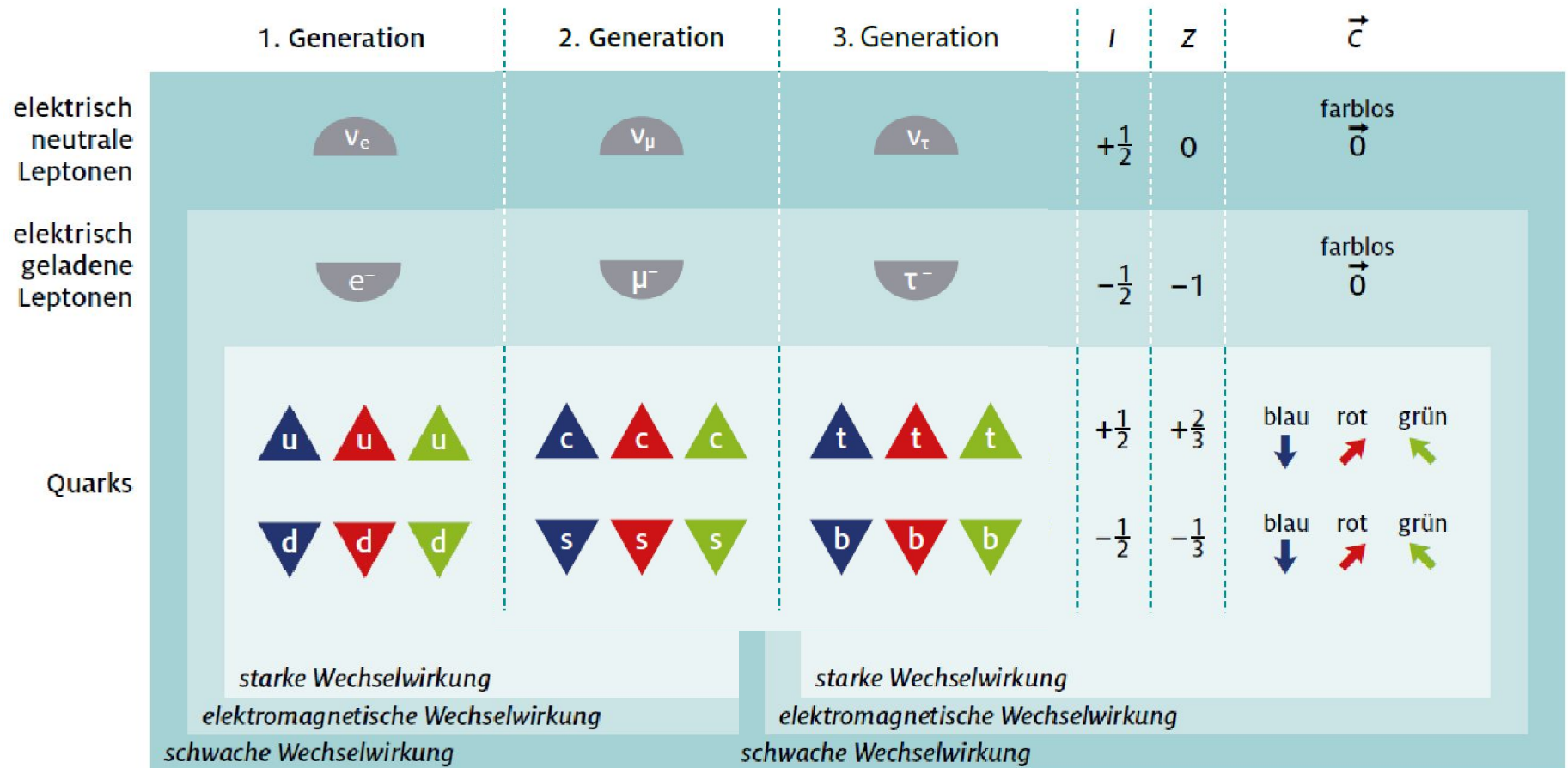
	1. Generation	I	Z	
elektrisch neutrale Leptonen		$+\frac{1}{2}$	0	
elektrisch geladene Leptonen		$-\frac{1}{2}$	-1	
Quarks		$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau ↓
		$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau ↓
	starke Wechselwirkung			
	elektromagnetische Wechselwirkung			
	schwache Wechselwirkung			

# Anordnung von Teilchen in Generationen





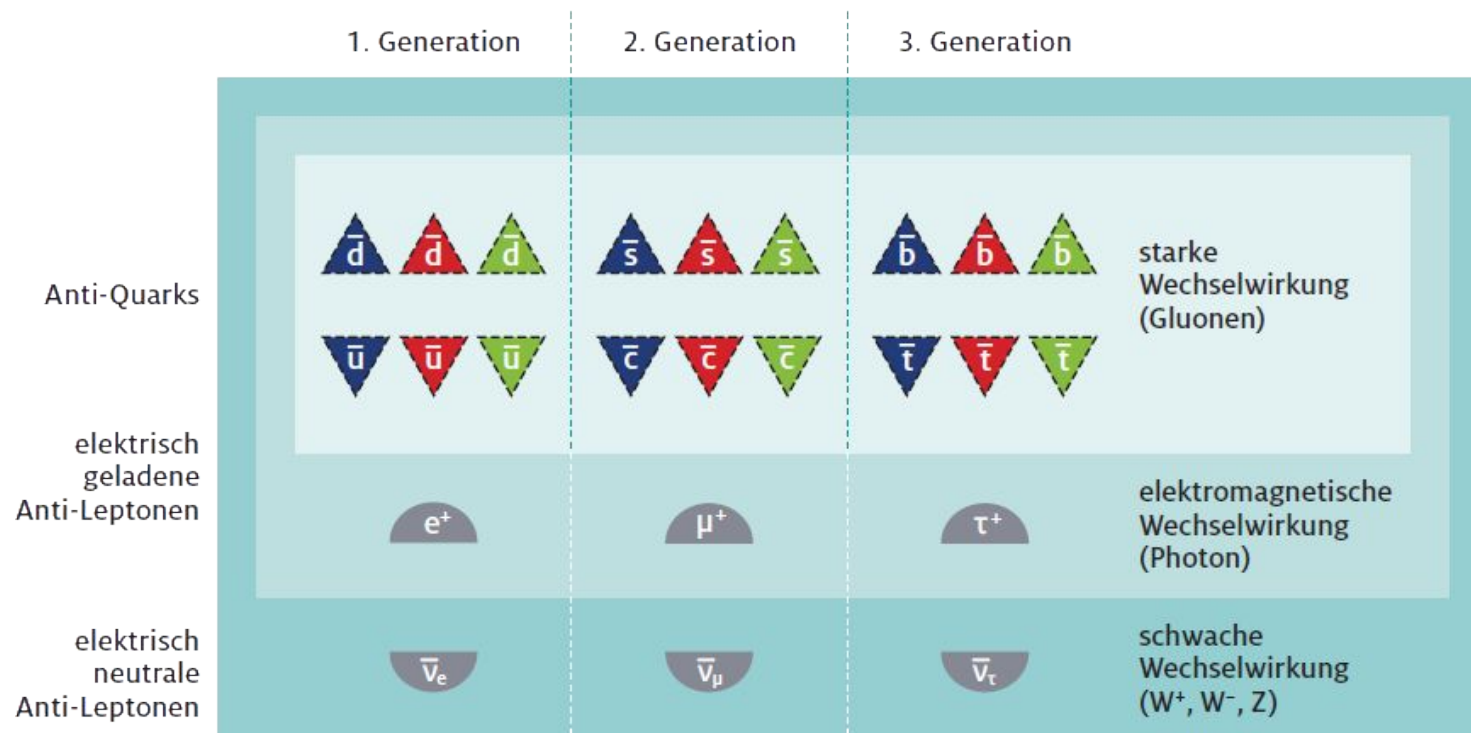
# Anordnung von Teilchen in Generationen



© Netzwerk Teilchenwelt

# Anti-Materieteilchen

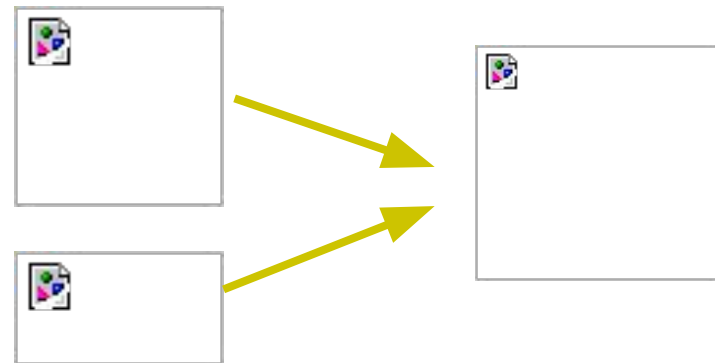
- Zu jeder Materieteilchensorte gibt es eine Anti-Teilchensorte mit gleicher Masse und entgegengesetzten Ladungen.



© Netzwerk Teilchenwelt

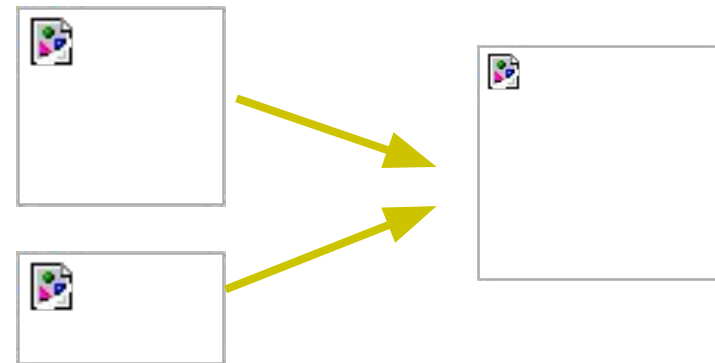
# Anti-Materie

- ▶ Trifft ein Materieteilchen auf sein Anti-Teilchen, so „vernichten“ sie sich, d.h. aus der vorhandenen Energie entstehen Photonen (oder andere Botenteilchen):

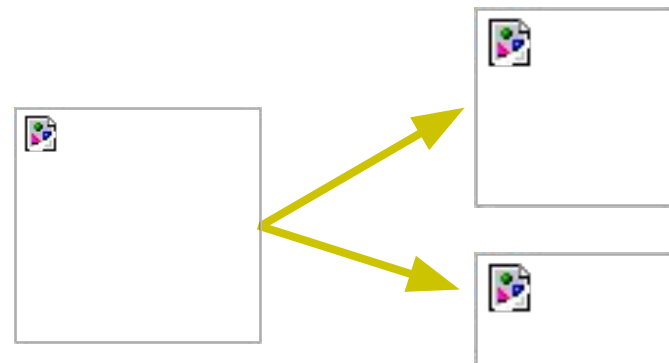


# Anti-Materie

- ▶ Trifft ein Materieteilchen auf sein Anti-Teilchen, so „vernichten“ sie sich, d.h. aus der vorhandenen Energie entstehen Photonen (oder andere Botenteilchen):



- ▶ Umgekehrt kann aus Botenteilchen ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar entstehen:



# Quarks

- ▶ Man findet Quarks nie einzeln, sondern nur als „Hadronen“
  - Kombination aus 3 Quarks
  - Paar aus Quark und Anti-Quark



# Feynman-Diagramme



<https://youtu.be/HKTSaezB4p8>

# Feynman-Diagramme

... veranschaulichen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen. Jedes Teilchen wird durch eine Linienart dargestellt:

Materieteilchen



Antimaterieteilchen



W- oder Z-Boson,  
Photon



Gluon



# Feynman - Diagramme

... zeigen:

- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind

$e^+$

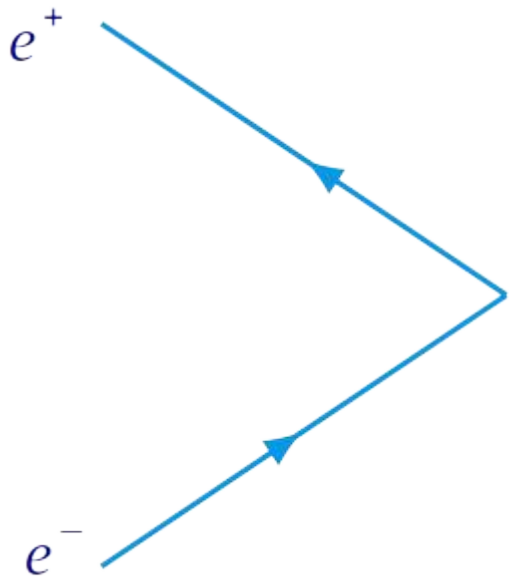
$e^-$



# Feynman - Diagramme

... zeigen:

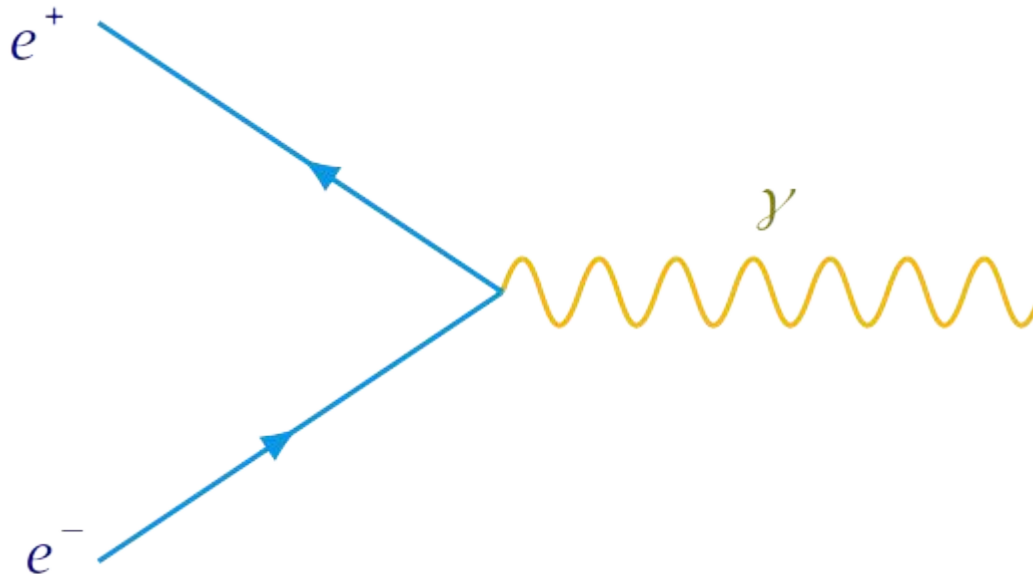
- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- ▶ wie sie wechselwirken (Botenteilchen)



# Feynman - Diagramme

... zeigen:

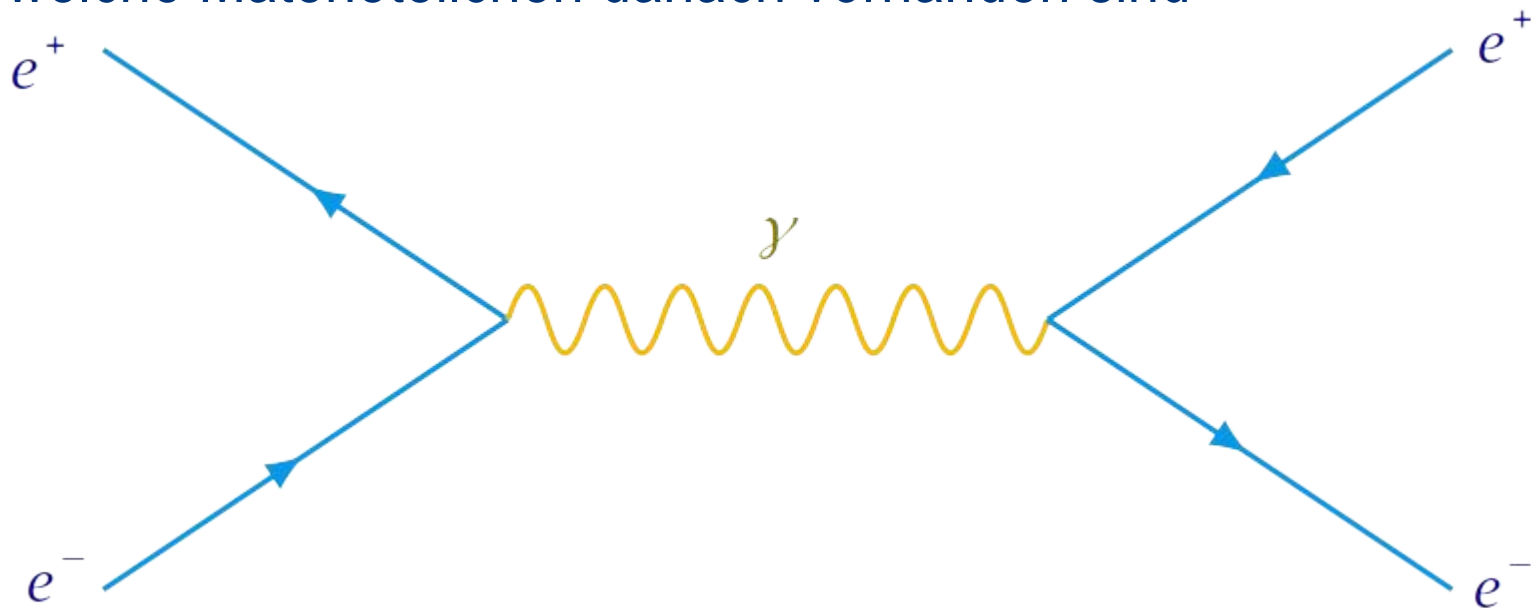
- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- ▶ wie sie wechselwirken (Botenteilchen)



# Feynman - Diagramme

... zeigen:

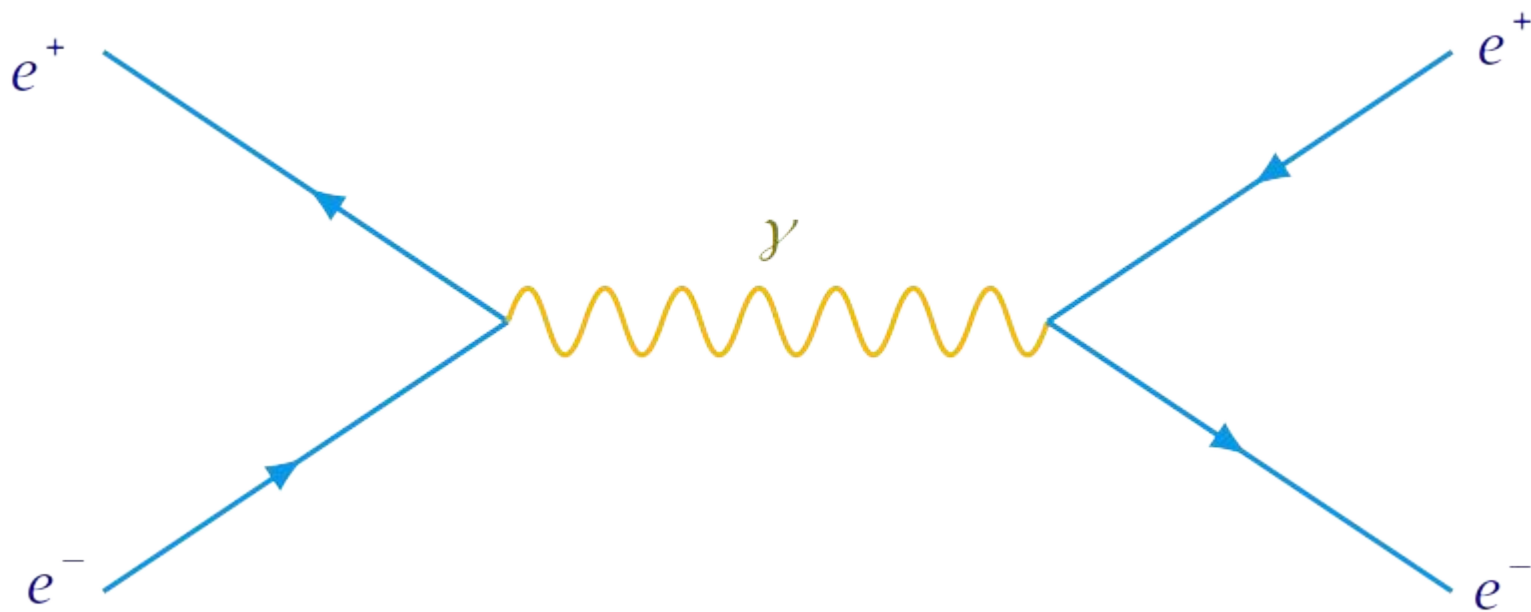
- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- ▶ wie sie wechselwirken (Botenteilchen)
- ▶ welche Materieteilchen danach vorhanden sind



# Feynman - Diagramme

Beispiele:

► Streuung von Elektron und Positron

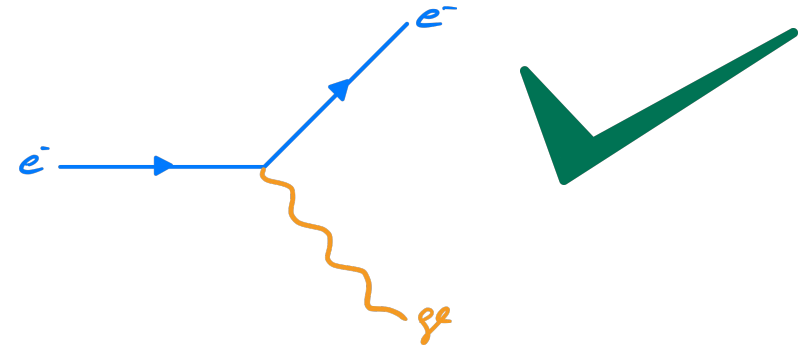
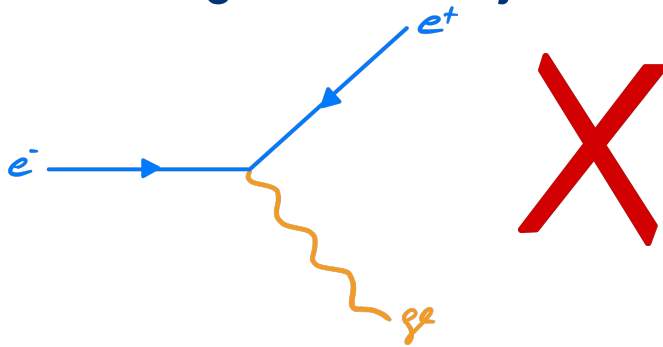


# Feynman - Vertex - Regeln

- ▶ Ladungserhalt an jedem Vertex
- ▶ Nur Kopplung an entsprechender Ladung
- ▶ Wechsel des Fermiontyps nur durch W Bosonen

# Feynman - Vertex - Regeln

- ▶ Ladungserhalt an jedem Vertex

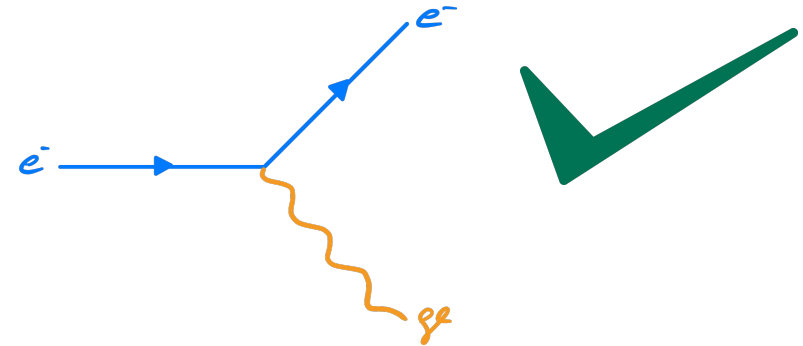
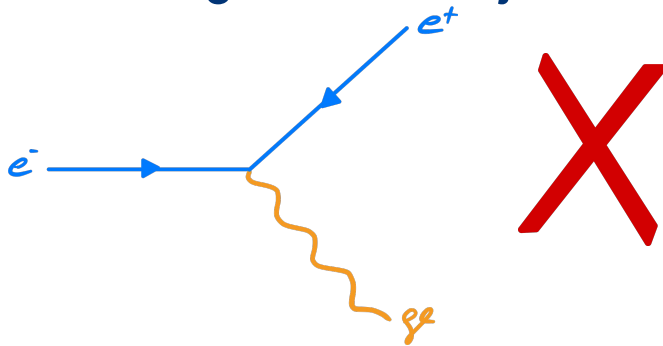


- ▶ Nur Kopplung an entsprechender Ladung

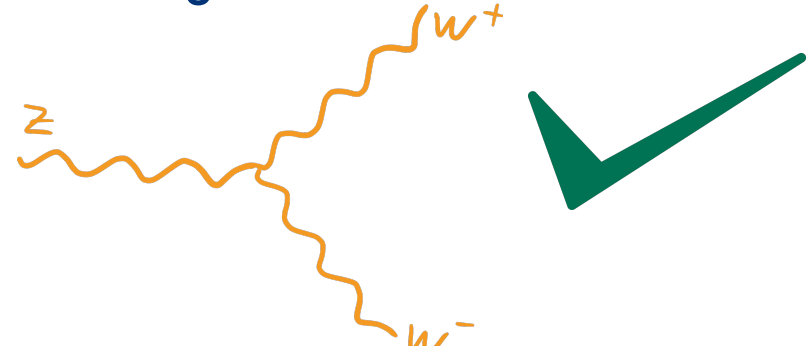
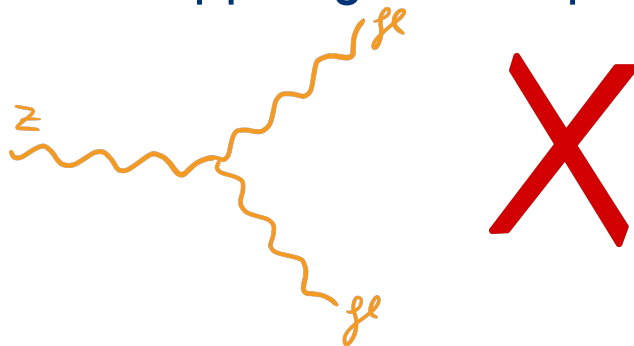
- ▶ Wechsel des Fermiontyps nur durch W Bosonen

# Feynman - Vertex - Regeln

- ▶ Ladungserhalt an jedem Vertex



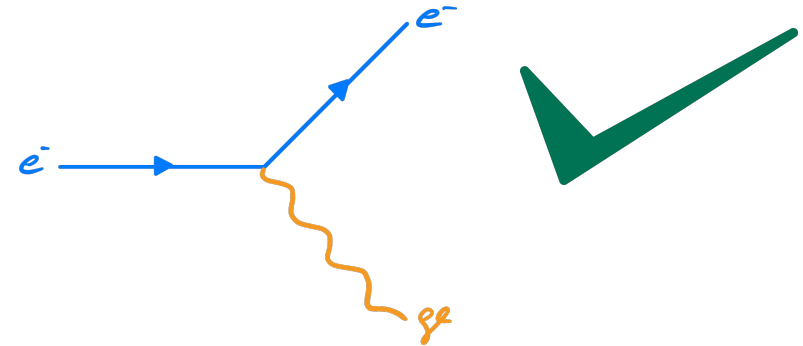
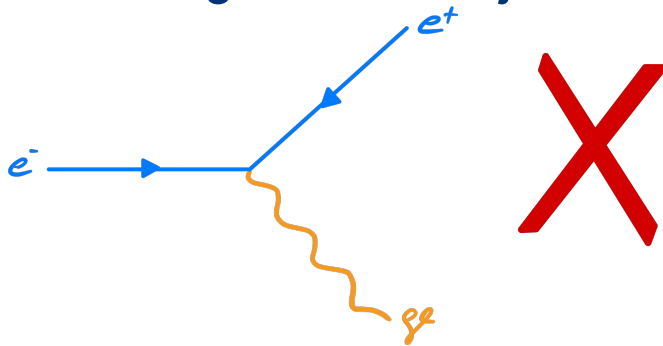
- ▶ Nur Kopplung an entsprechender Ladung



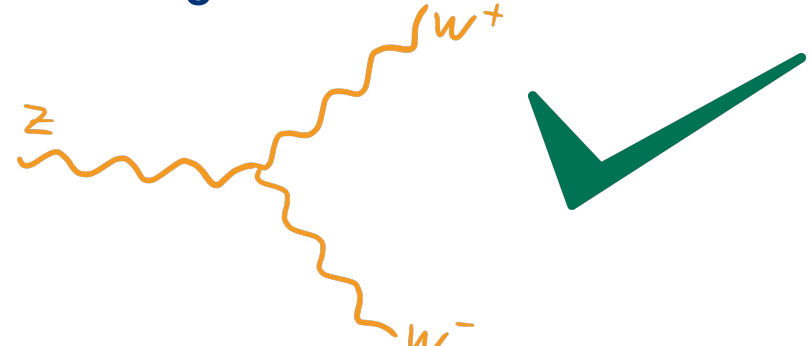
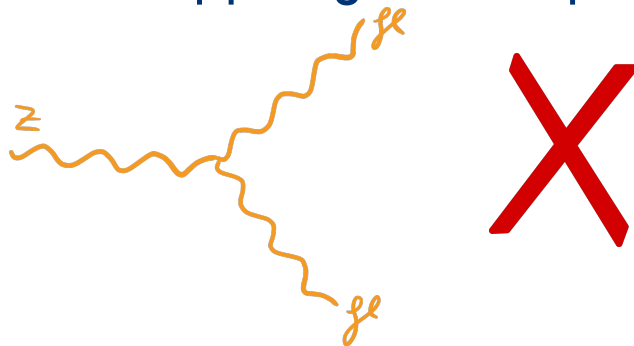
- ▶ Wechsel des Fermiontyps nur durch W Bosonen

# Feynman - Vertex - Regeln

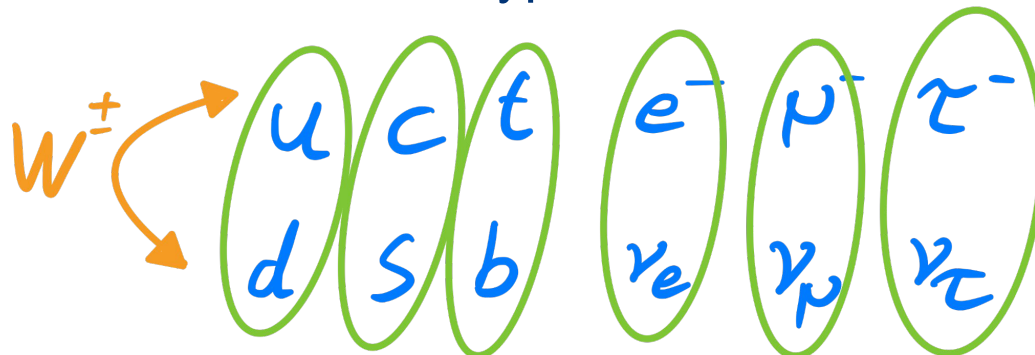
- ▶ Ladungserhalt an jedem Vertex



- ▶ Nur Kopplung an entsprechender Ladung



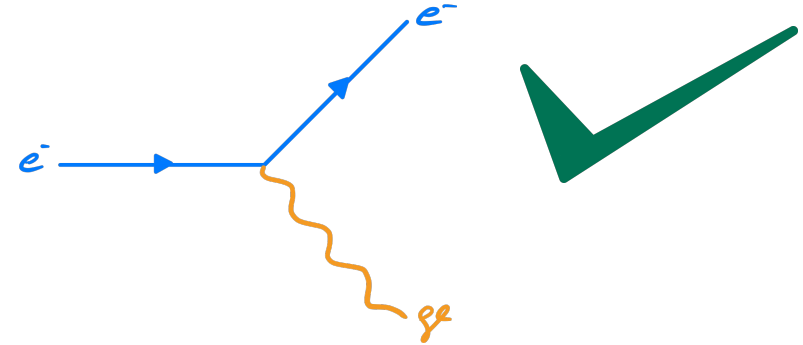
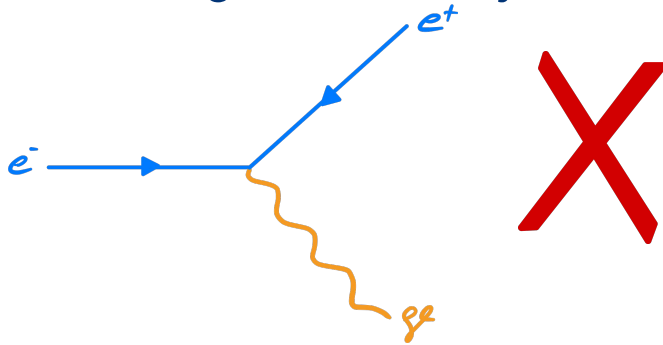
- ▶ Wechsel des Fermiontyps nur durch W Bosonen



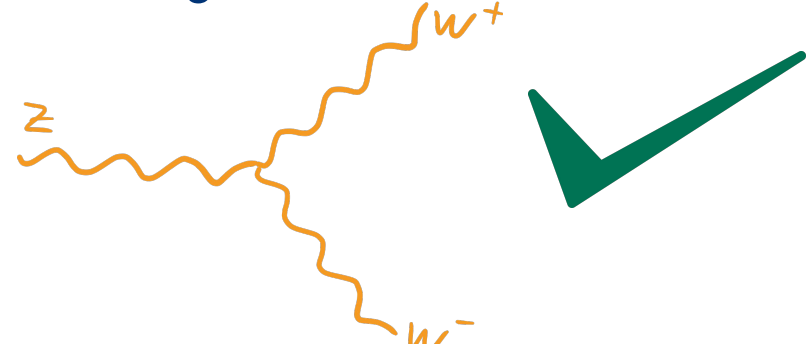
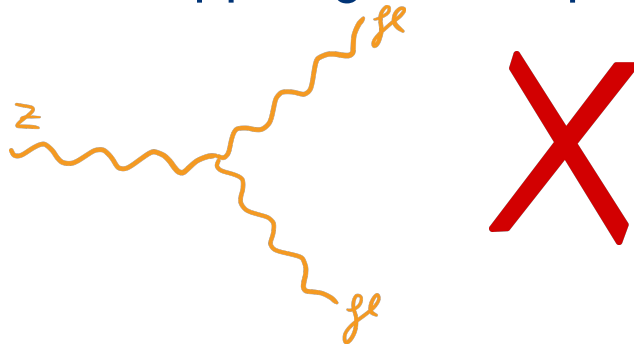


# Feynman - Vertex - Regeln

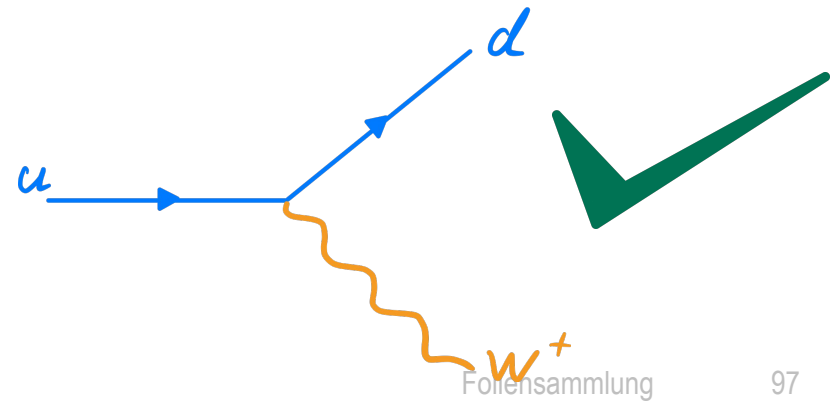
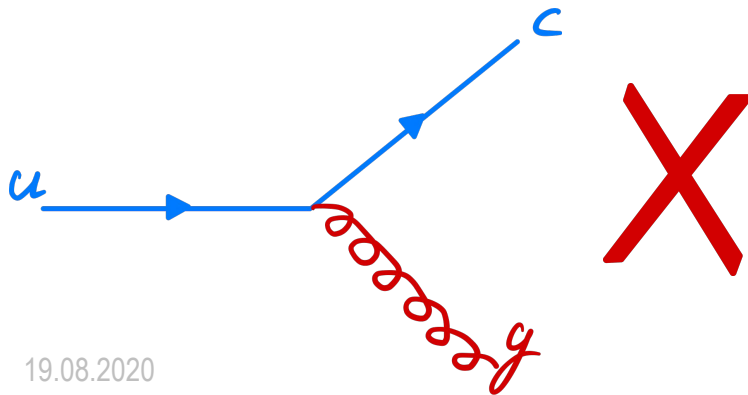
- ▶ Ladungserhalt an jedem Vertex



- ▶ Nur Kopplung an entsprechender Ladung



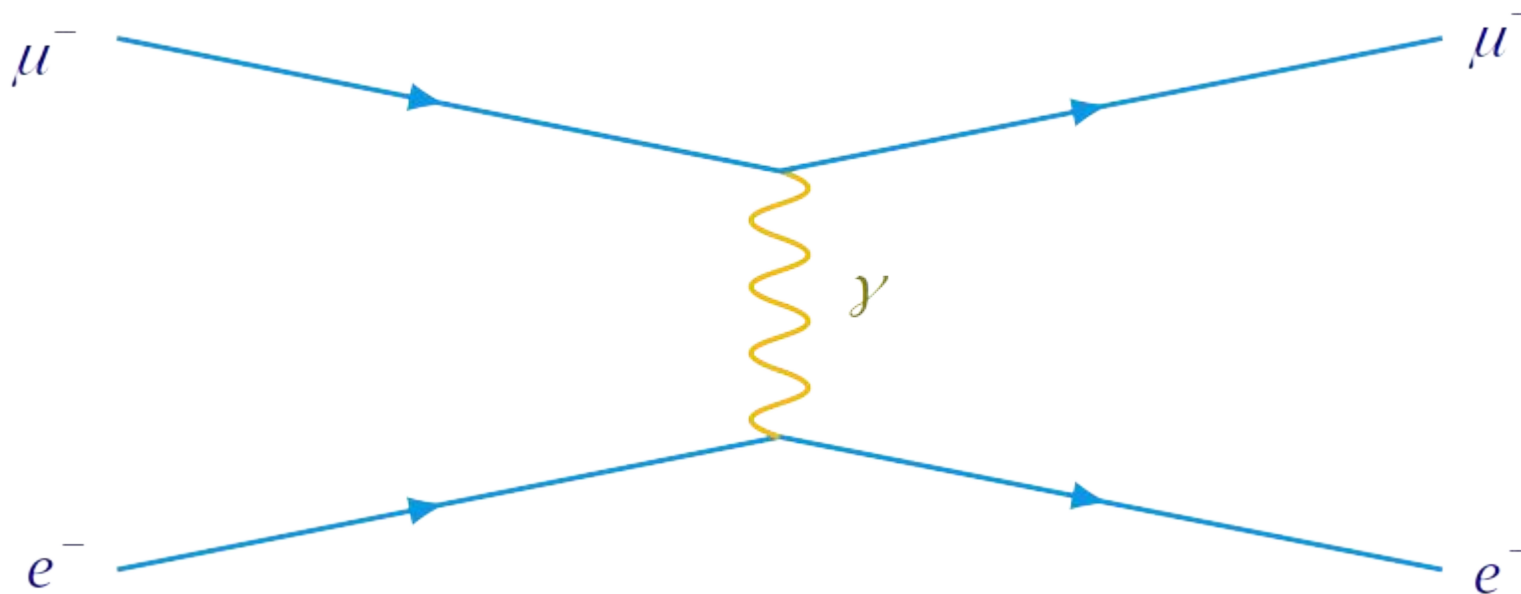
- ▶ Wechsel des Fermiontyps nur durch W Bosonen



# Feynman - Diagramme

Beispiele:

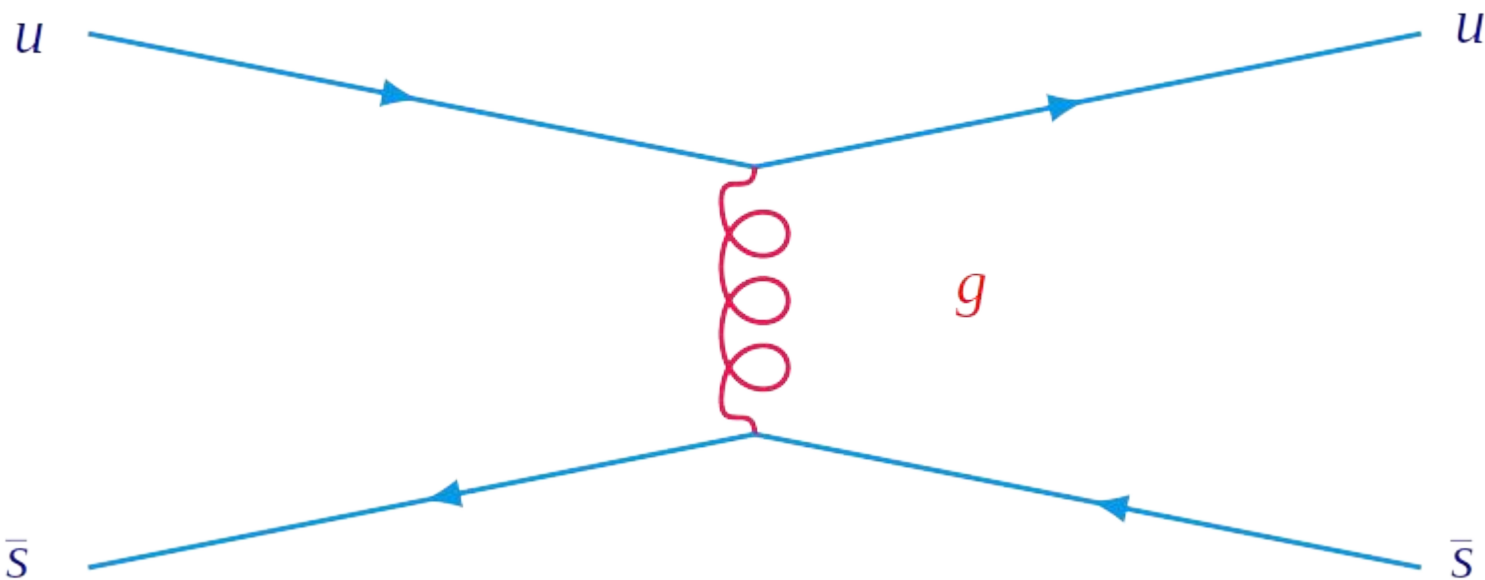
- ▶ Streuung von Elektron und Myon



# Feynman - Diagramme

Beispiele:

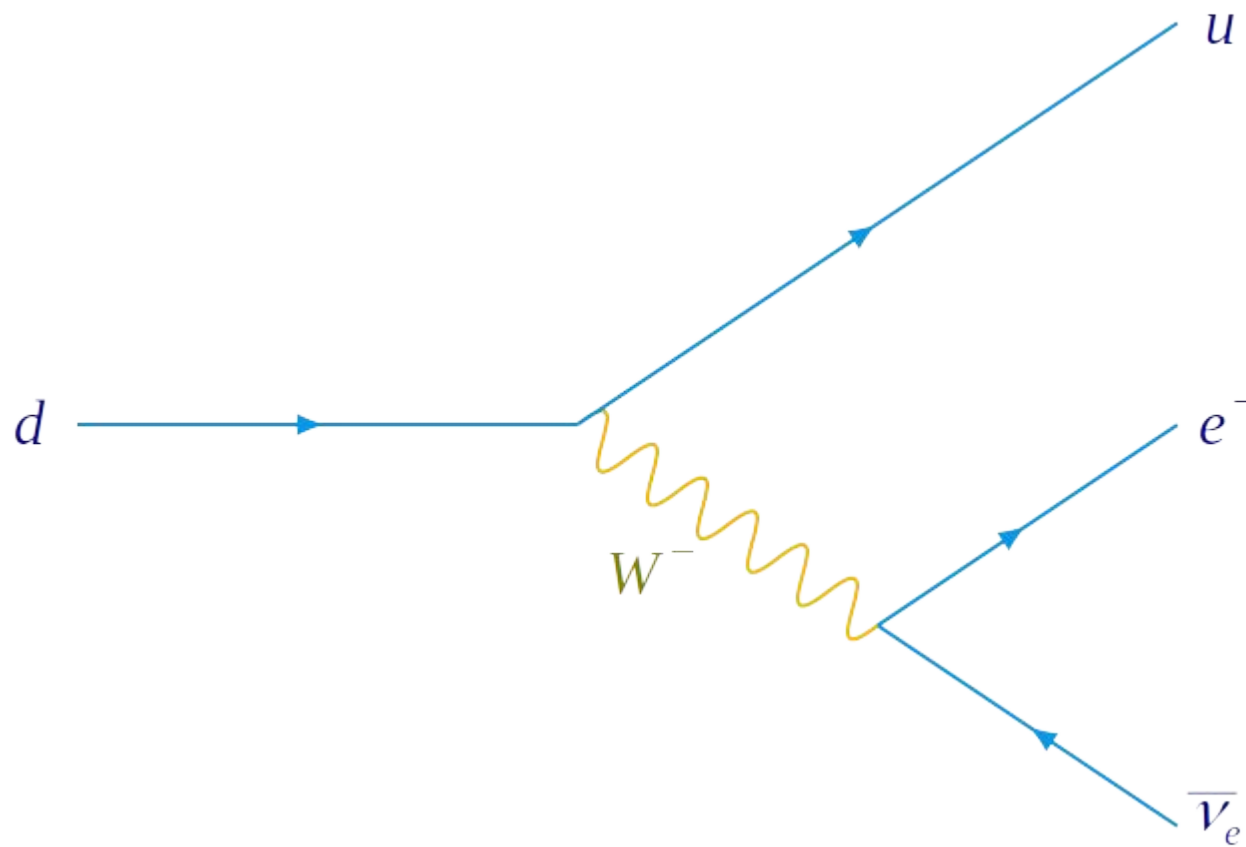
- ▶ Streuung von Up-Quark und Anti-Strange-Quark



# Feynman - Diagramme

Beispiele:

- ▶ Umwandlung eines Down-Quarks in ein Up-Quark

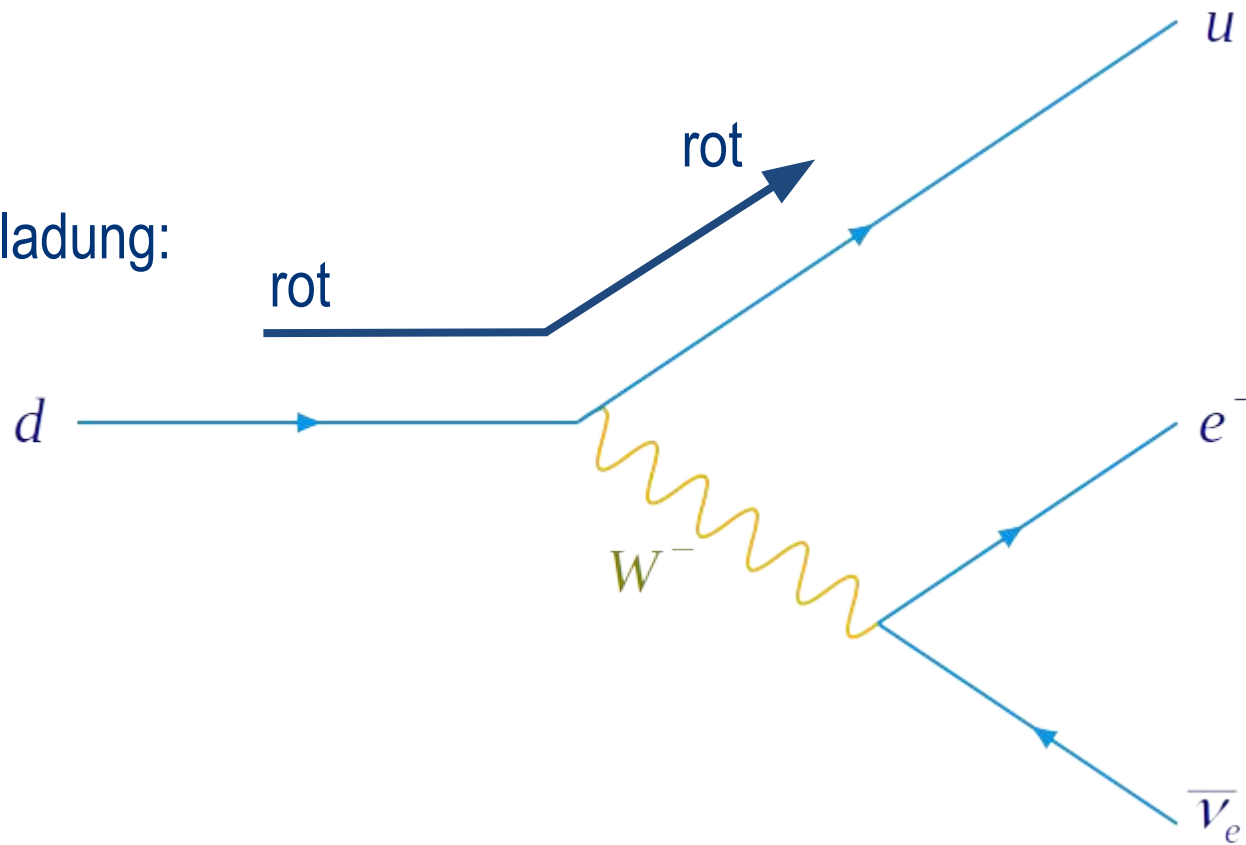


# Feynman - Diagramme

Beispiele:

- ▶ Umwandlung eines Down-Quarks in ein Up-Quark

Starke Farbladung:

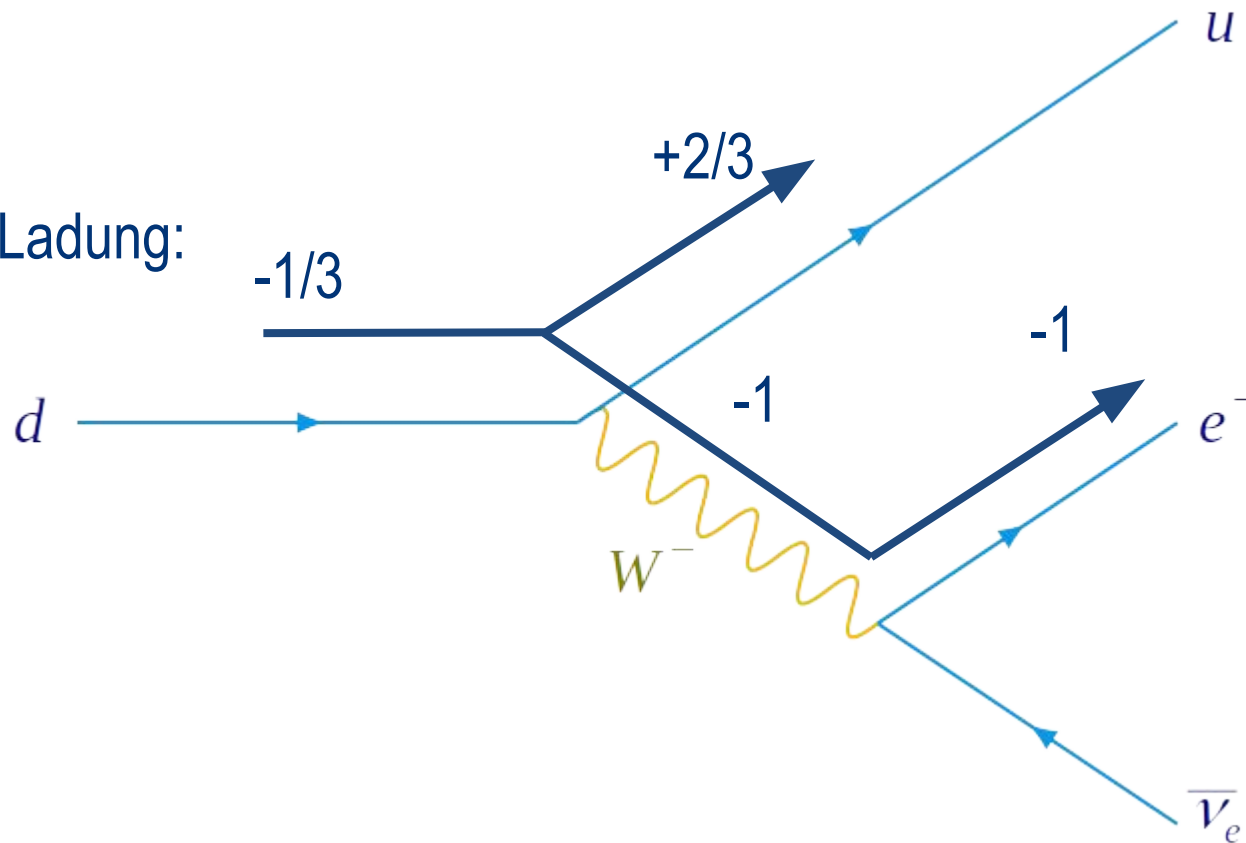


# Feynman - Diagramme

Beispiele:

- ▶ Umwandlung eines Down-Quarks in ein Up-Quark

Elektrische Ladung:

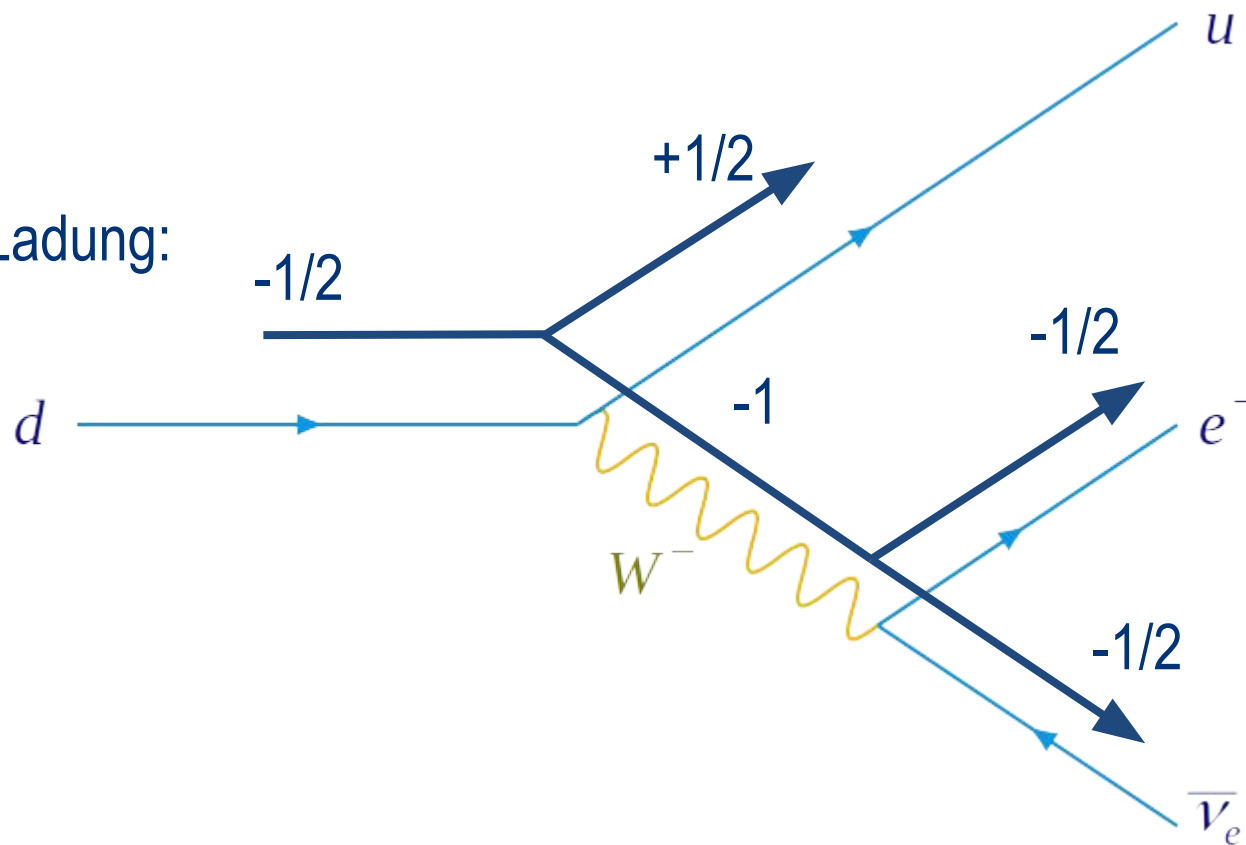


# Feynman - Diagramme

Beispiele:

- Umwandlung eines Down-Quarks in ein Up-Quark

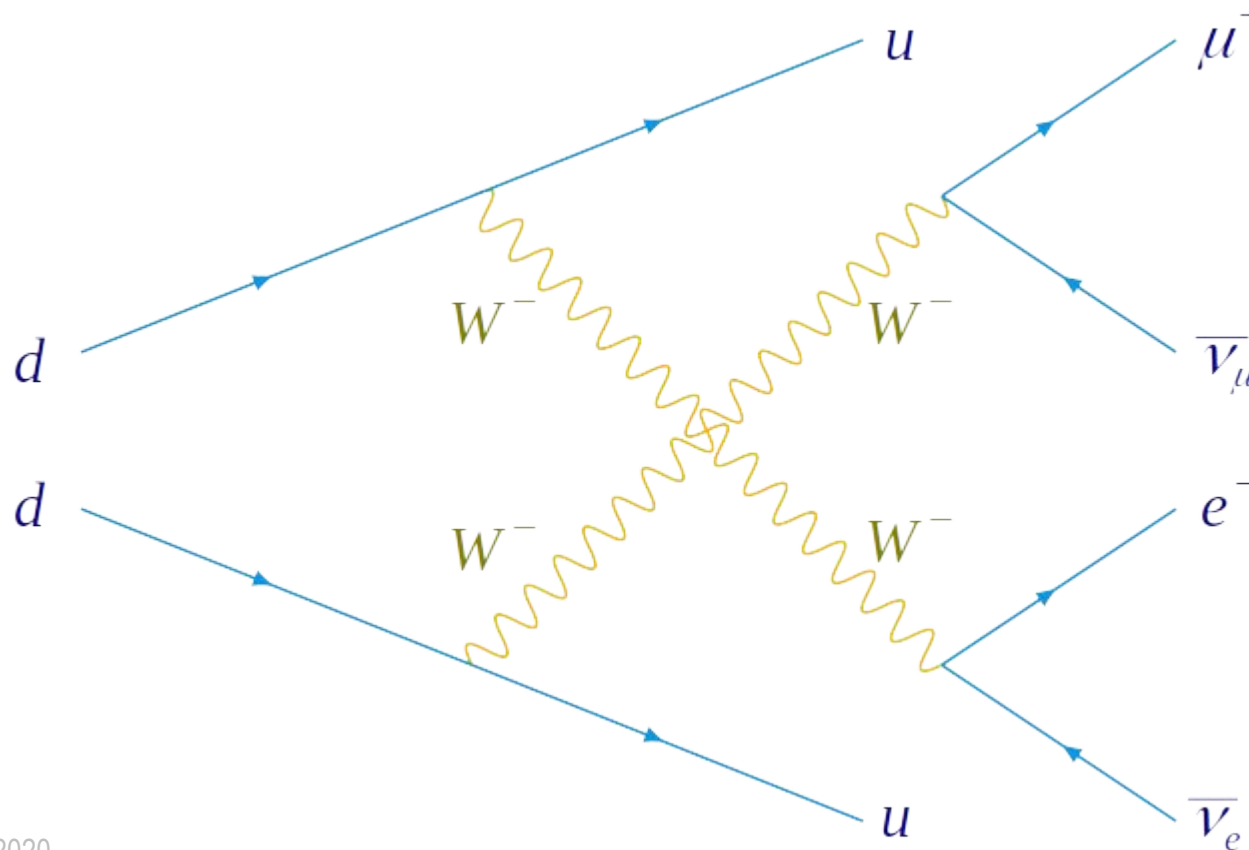
Schwache Ladung:



# Feynman - Diagramme

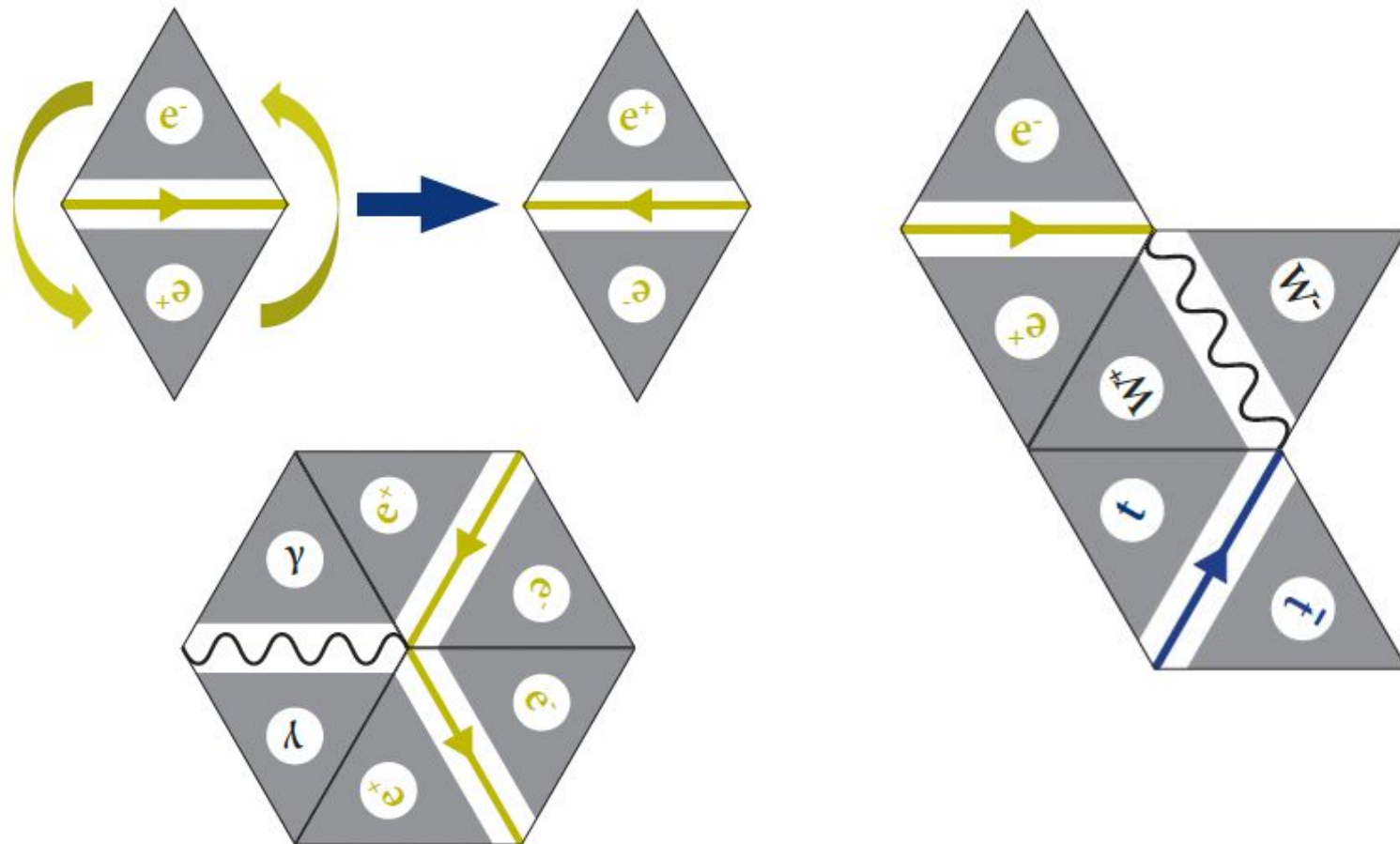
Beispiele:

► Streuung zweier  $W^-$  Bosonen





# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

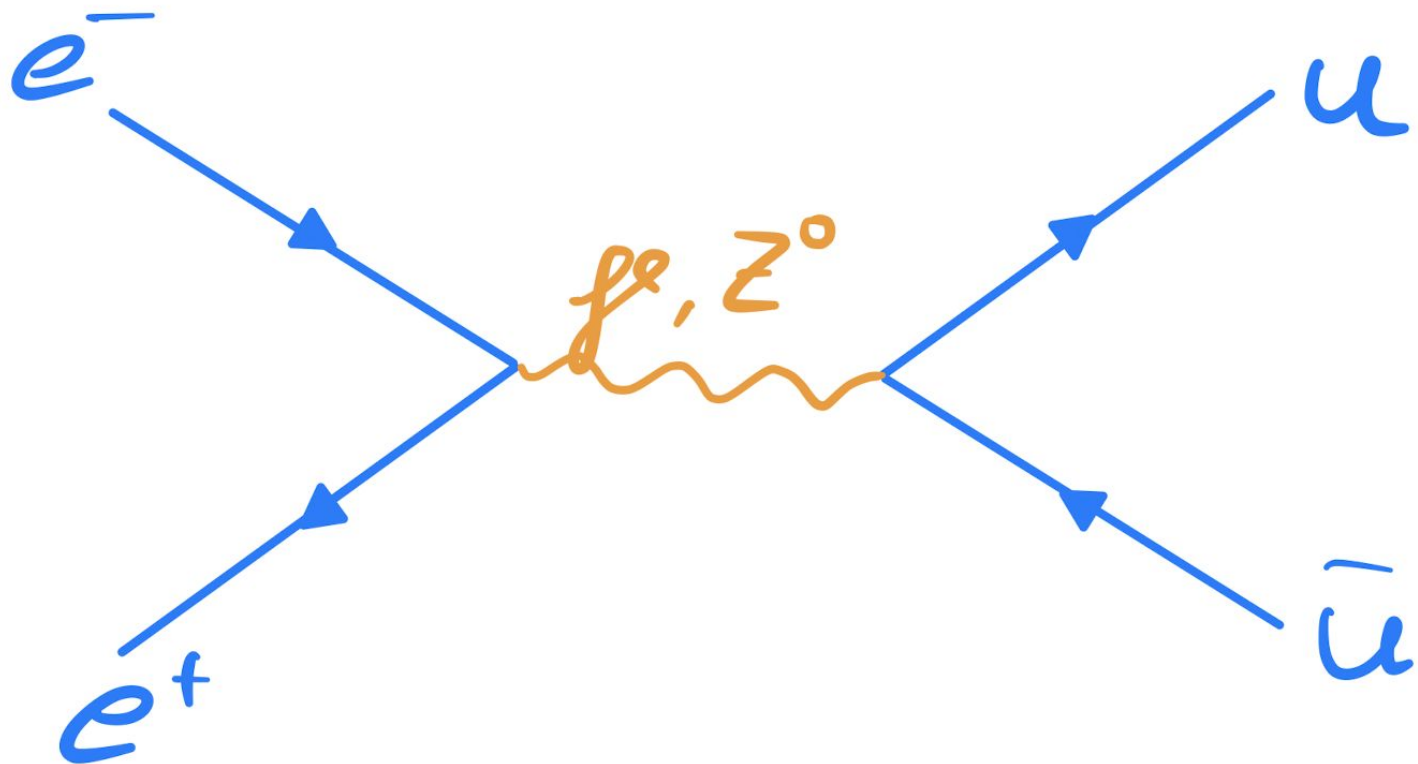


# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$e^+e^- \rightarrow u\bar{u}$$

# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$e^+e^- \rightarrow u\bar{u}$$

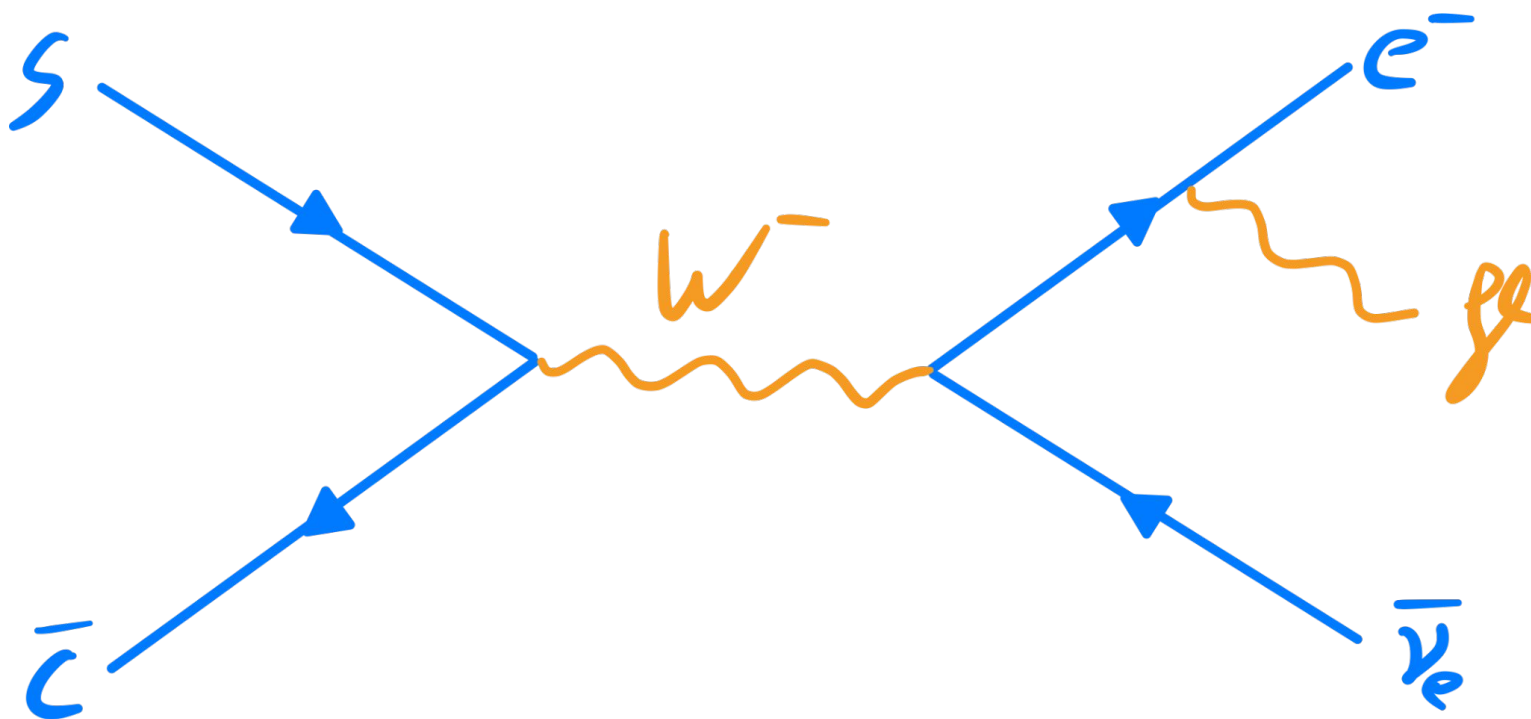


# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$s \bar{c} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \not{f}$$

# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$s \bar{c} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \gamma$$

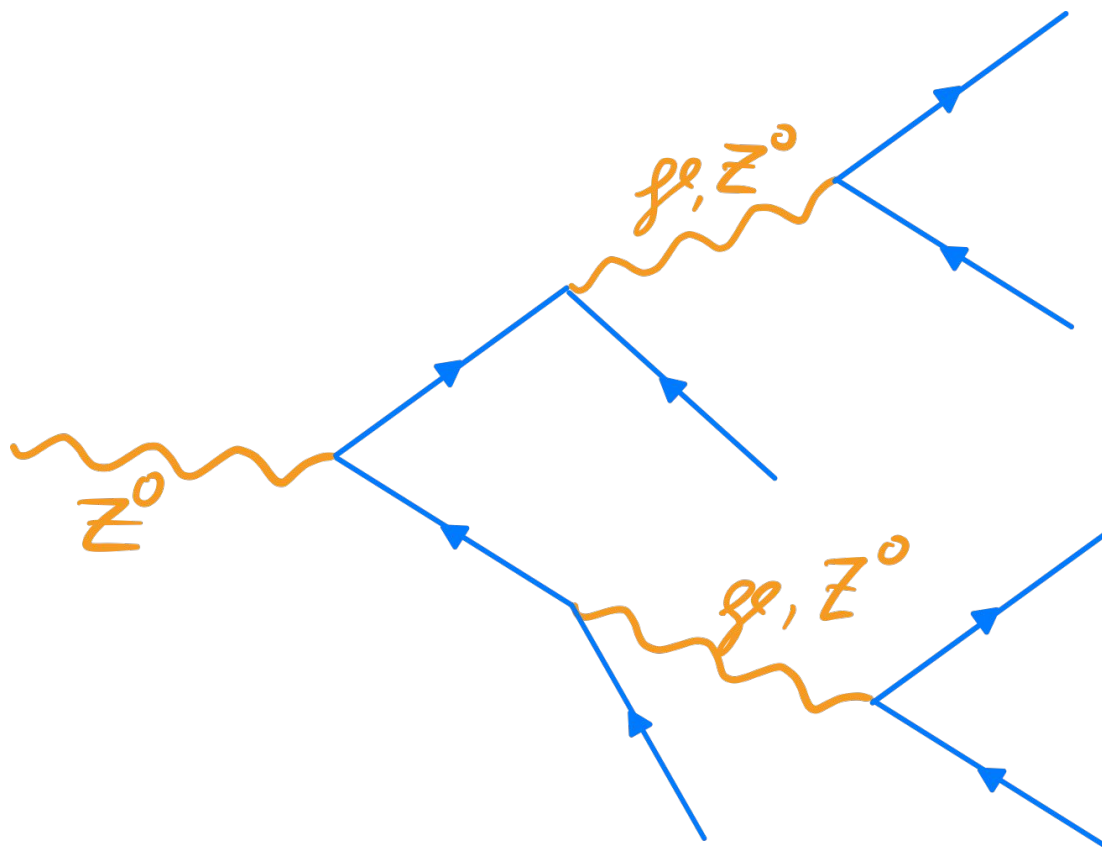


# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$Z^0 \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^- \tau^+ \tau^-$$

# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$Z^0 \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^- \tau^+ \tau^-$$



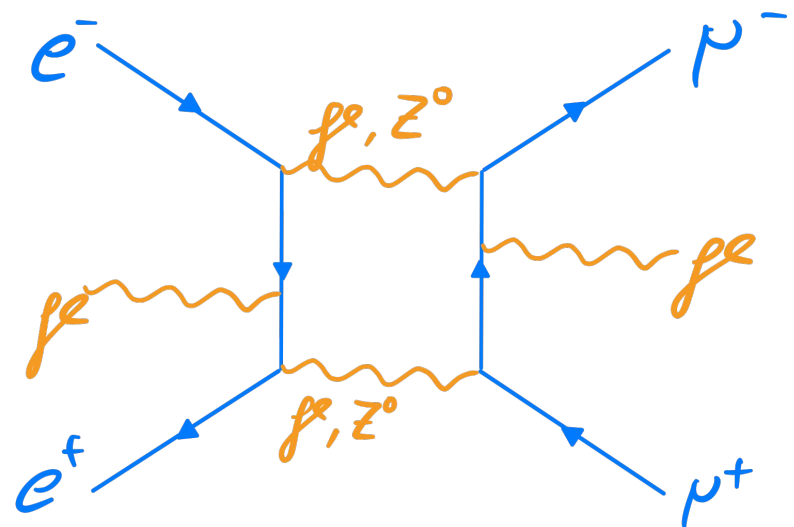
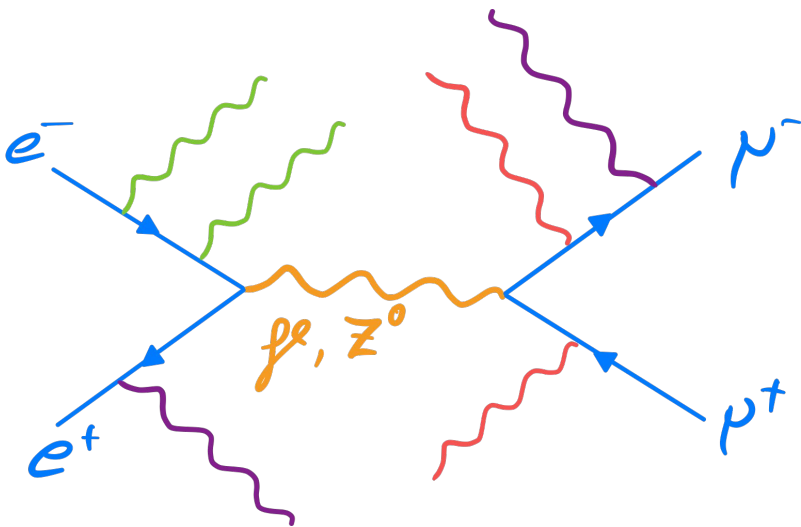
# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- f\bar{f}$$



# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- f\bar{f}f\bar{f}$$

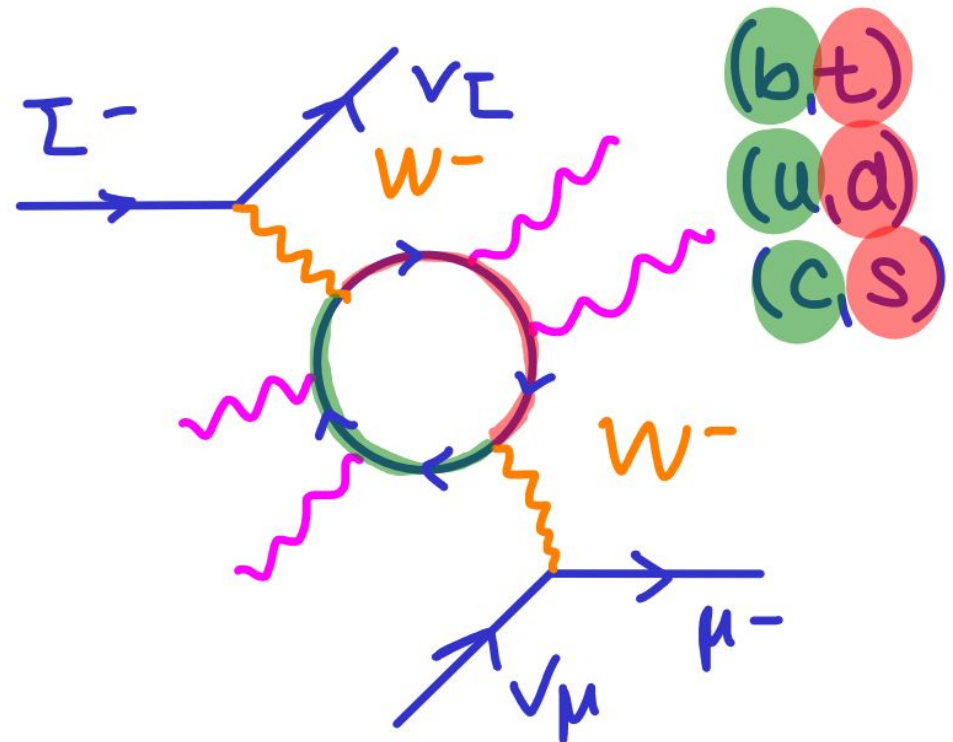
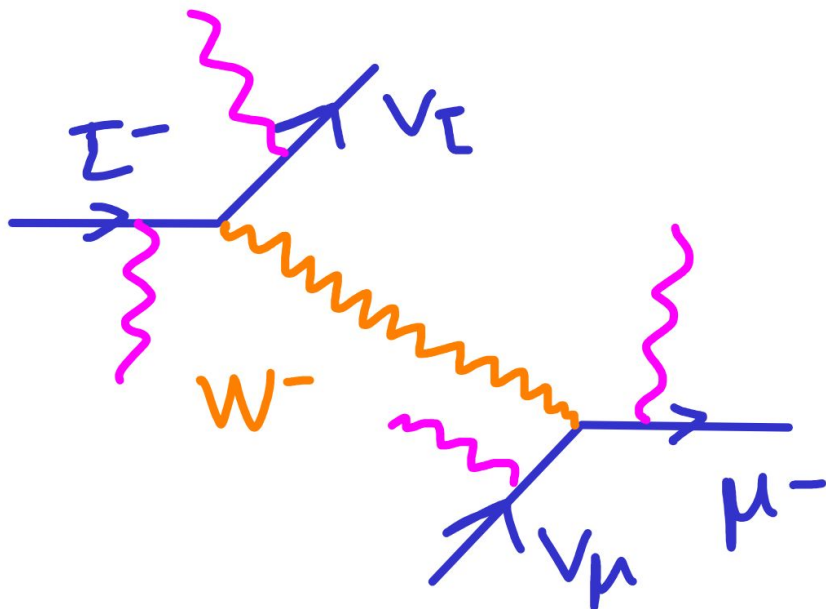


# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu \gamma \gamma \gamma \gamma$$

# Feynman - Diagramme – Nun seid ihr dran!

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu \gamma \gamma \gamma \gamma$$





# Was ist das Higgs Teilchen?



# Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben



# Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar



# Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- ▶ Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens



# Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- ▶ Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- ▶ fehlendes Puzzle-Teil → Higgs-Teilchen



# Was ist das Higgs Teilchen?

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- ▶ Higgs-Mechanismus ermöglicht dies, bedingt Existenz des Higgs-Teilchens
- ▶ fehlendes Puzzle-Teil → Higgs-Teilchen



$$m_{\text{Higgs}} \approx 125 \text{ GeV}/c^2 \approx 134 \cdot m_{\text{Proton}}$$



**Gibt es Fragen soweit?**

?

?

?

?

?

# Teil 3: Wie findet man das Higgs?



# Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- ▶ Teilchenbeschleuniger → Erzeugung massereicher Teilchen
- ▶  $E = mc^2$  → Masse ist eine Form von Energie!
- ▶ Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

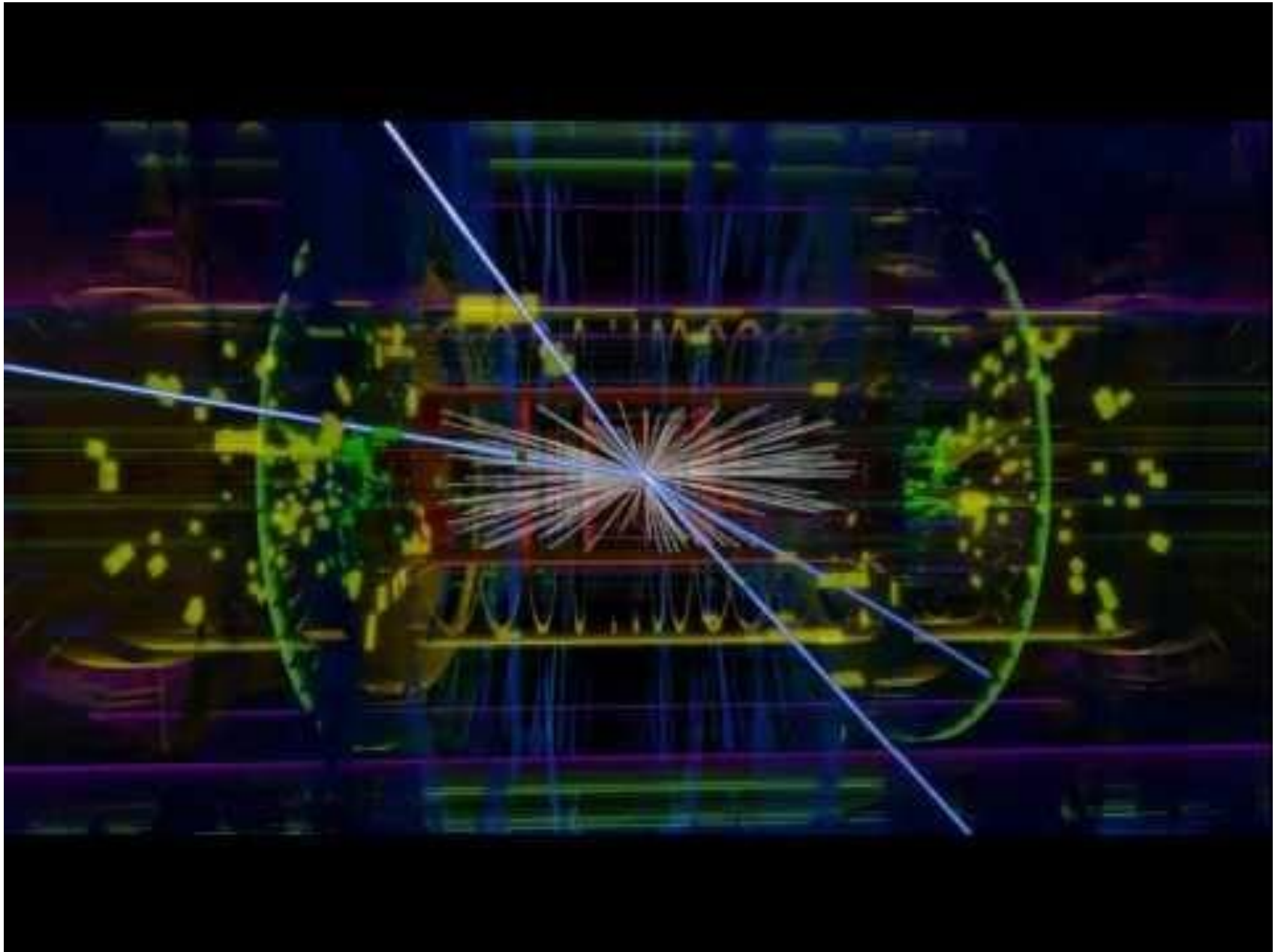
# Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- ▶ Teilchenbeschleuniger → Erzeugung massereicher Teilchen
- ▶  $E = mc^2$  → Masse ist eine Form von Energie!
- ▶ Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.
  
- ▶ Beispiel:
  - Kernspaltung im Kraftwerk!
  - (Masse → Wärme → elektrische Energie)

# Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- ▶ Teilchenbeschleuniger → Erzeugung massereicher Teilchen
- ▶  $E = mc^2$  → Masse ist eine Form von Energie!
- ▶ Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.
  
- ▶ Beispiel:
  - Kernspaltung im Kraftwerk!
  - (Masse → Wärme → elektrische Energie)
  - Teilchenkollisionen!
  - (Bewegungsenergie → Masse)

# Wie sieht eine Kollision aus?



# Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

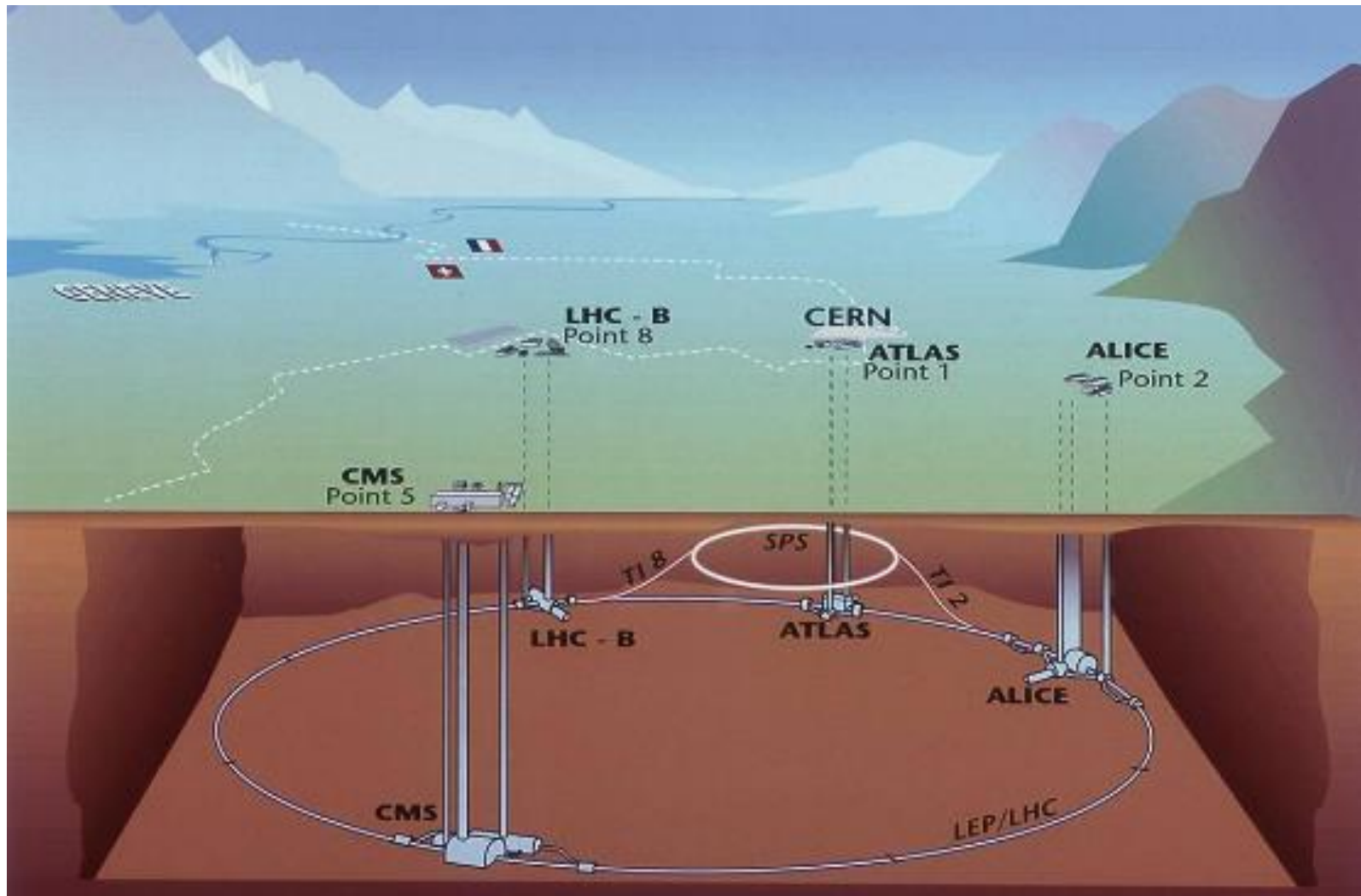


© CERN





# Der LHC (Large Hadron Collider)





# Was geschieht am LHC?

# Was geschieht am LHC?

- ▶ Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 6.5 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- ▶ Wenn Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist

# Was geschieht am LHC?

- ▶ Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 6.5 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- ▶ Wenn Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist

## Aber von Anfang an:

Es beginnt mit einer Flasche voller Wasserstoff...



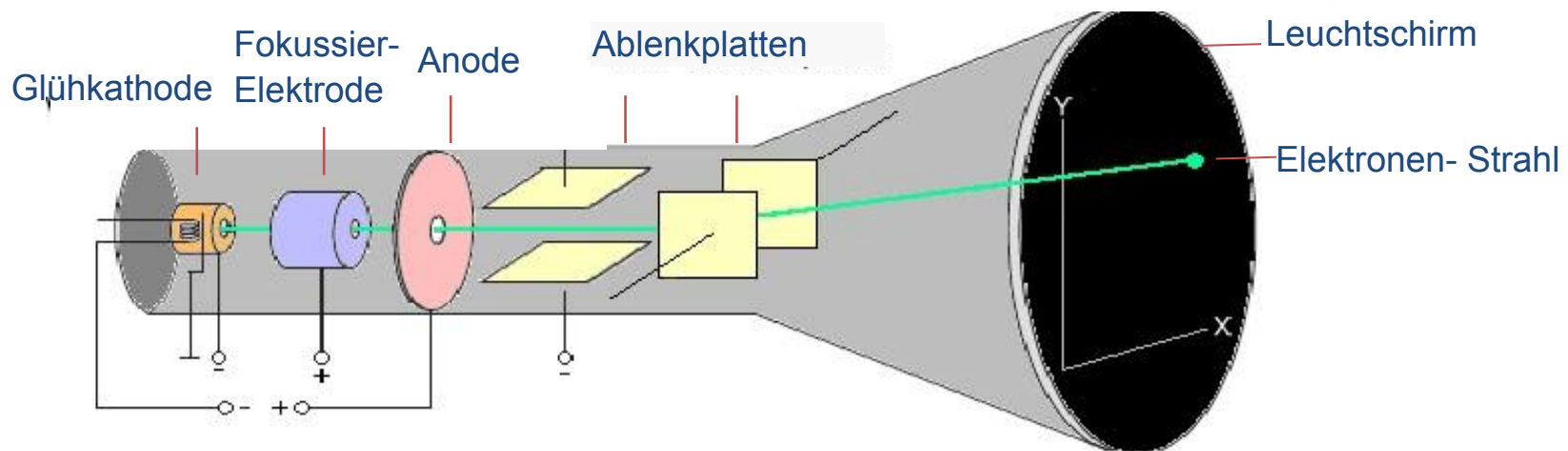
# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

- ▶ Der einfachste Beschleuniger:
- ▶ Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre!)
  - Elektronen erzeugen: Glühkathode
  - ... beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
  - ... ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

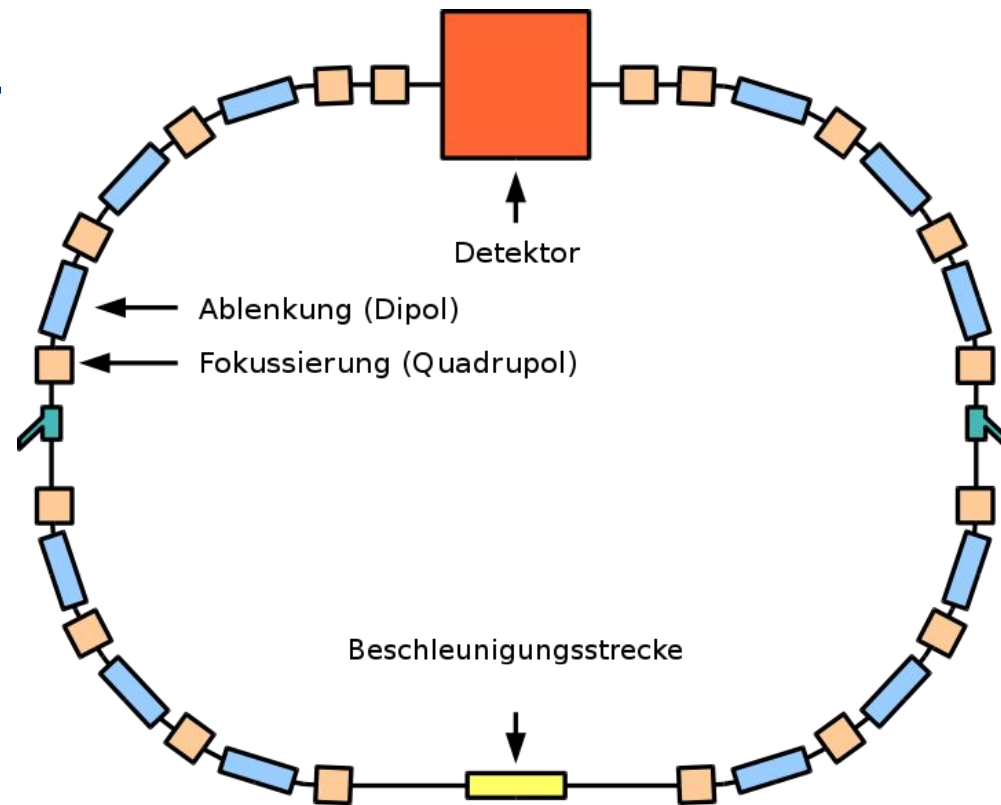
- ▶ Der einfachste Beschleuniger:
- ▶ Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre!)
  - Elektronen erzeugen: Glühkathode
  - ... beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
  - ... ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



# Wie funktioniert der LHC?

► Im LHC durchlaufen Pakete (Bunches) eine kreisförmige Bahn, auf der sie ...

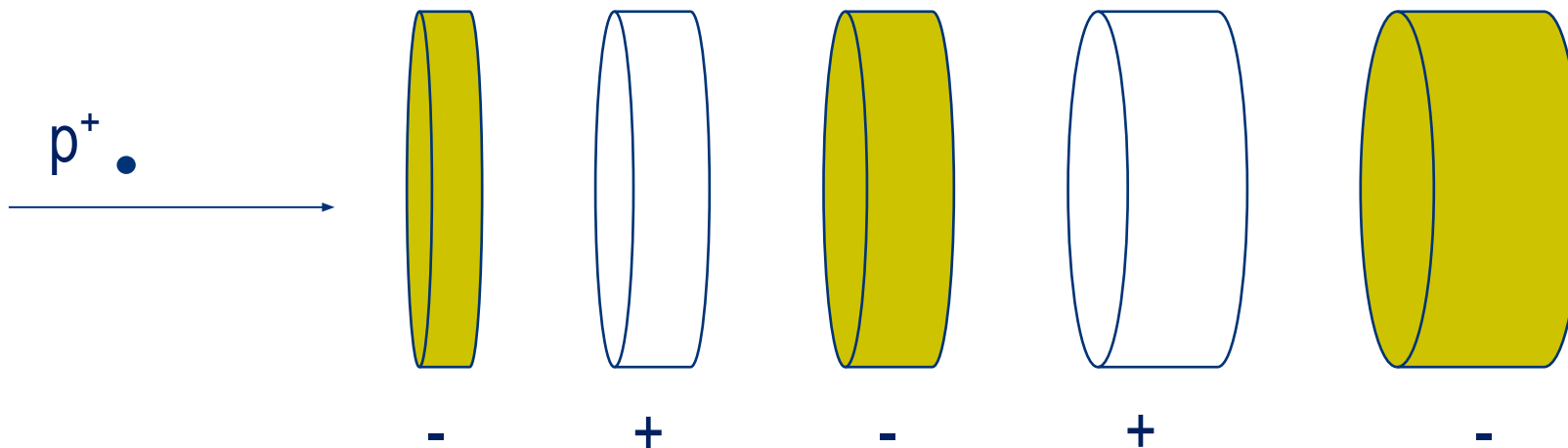
- ... **beschleunigt** werden,...  
(elektrisches Wechselfeld)
- ...**abgelenkt** werden...  
(Dipol-Magnete)
- ...und **fokussiert** werden.  
(Quadropol-Magnete)





# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

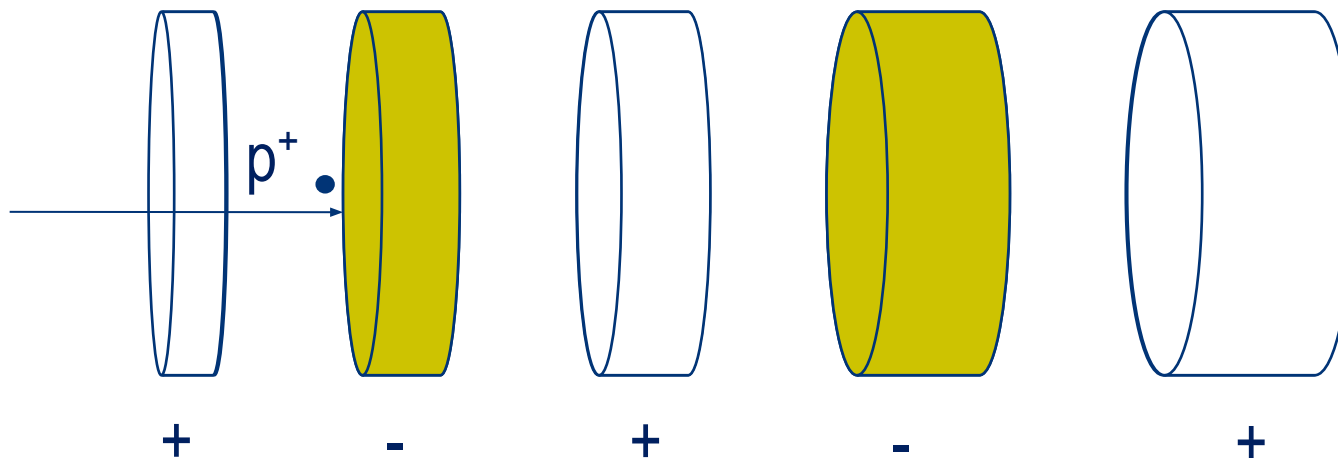
- ▶ Um in Teilchenbeschleunigern höhere Energien zu erreichen, durchlaufen die geladenen Teilchen ein elektrisches Wechselfeld:



- ▶ Wird die Polung des elektrischen Feldes im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.

# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

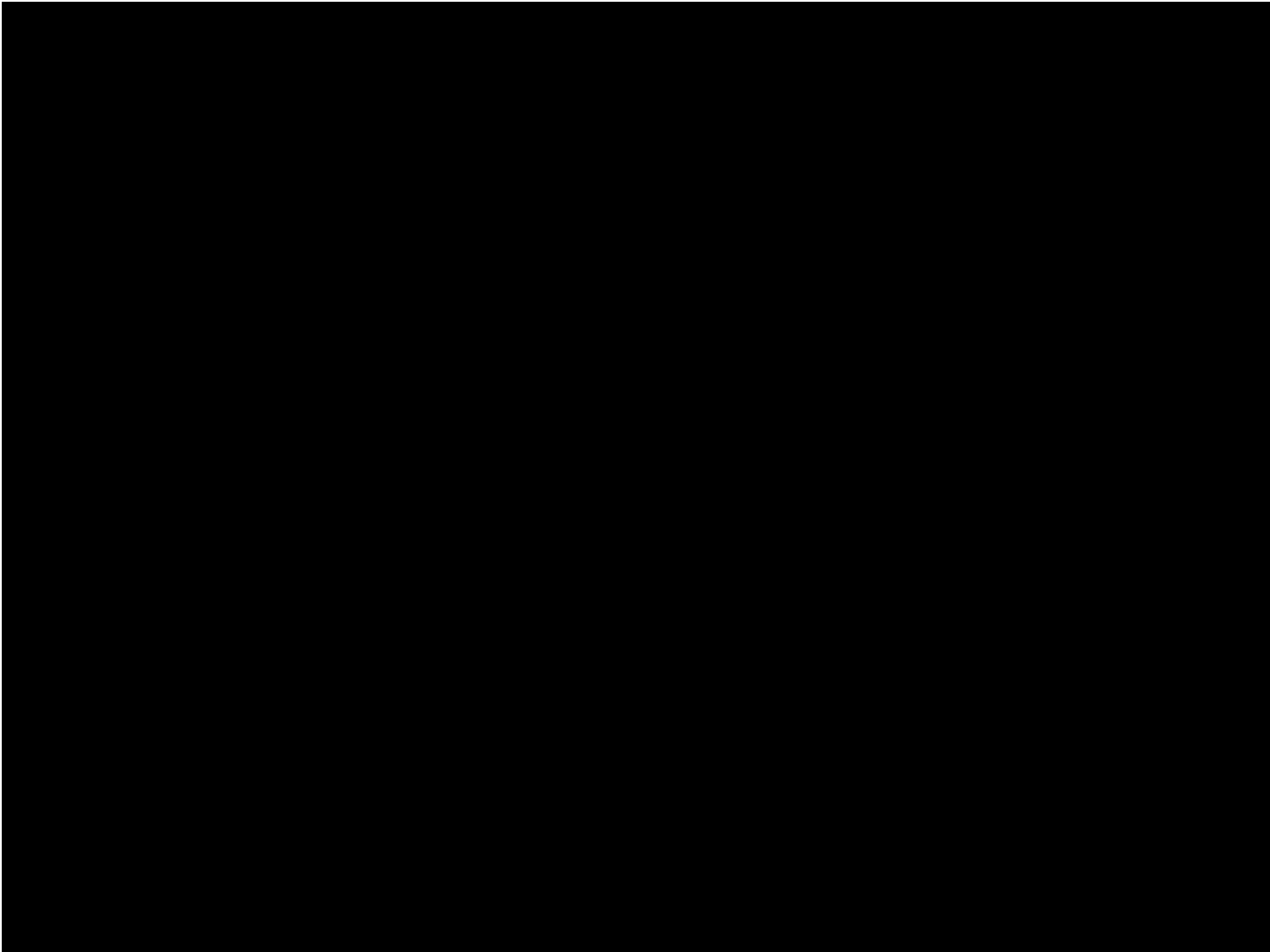
- ▶ Um in Teilchenbeschleunigern höhere Energien zu erreichen, durchlaufen die geladenen Teilchen ein elektrisches Wechselfeld:



- ▶ Wird die Polung des elektrischen Feldes im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.

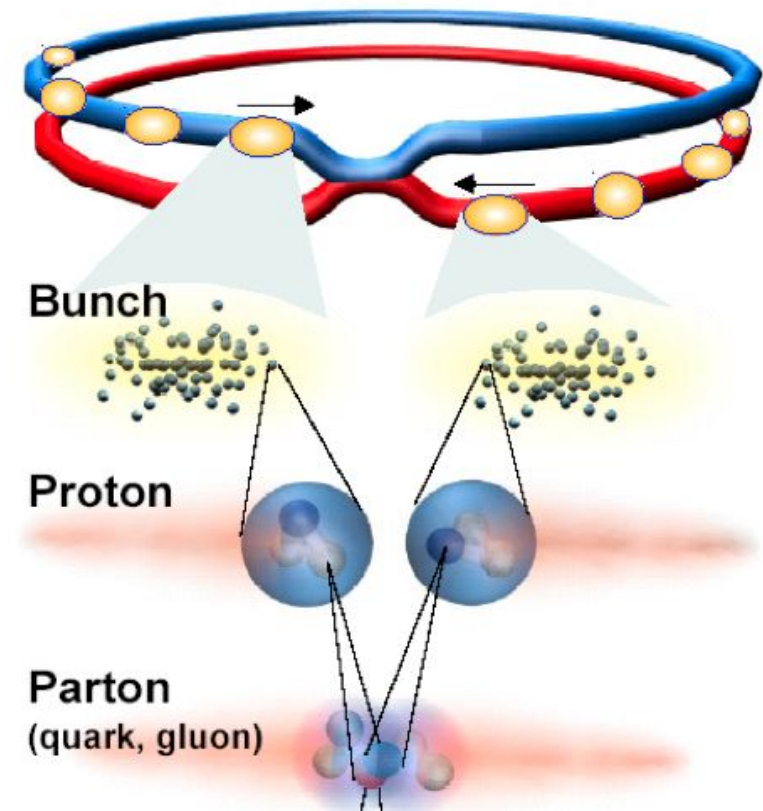


# Hohlraumresonatoren des LHC



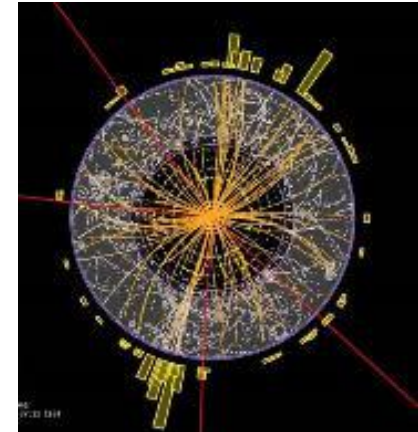
# Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 2 gegenläufige Protonenstrahlen
  - ▶ mit je 2808 Teilchenpaketen
  - ▶ 120 Milliarden Protonen pro Paket
  - ▶ 1 Paket-Kreuzung alle 25 ns
  - ▶ Mit je etwa 40 Proton-Proton-Kollisionen
- 1.6 Milliarden Kollisionen pro Sekunde!



# Teilchenkollisionen im LHC

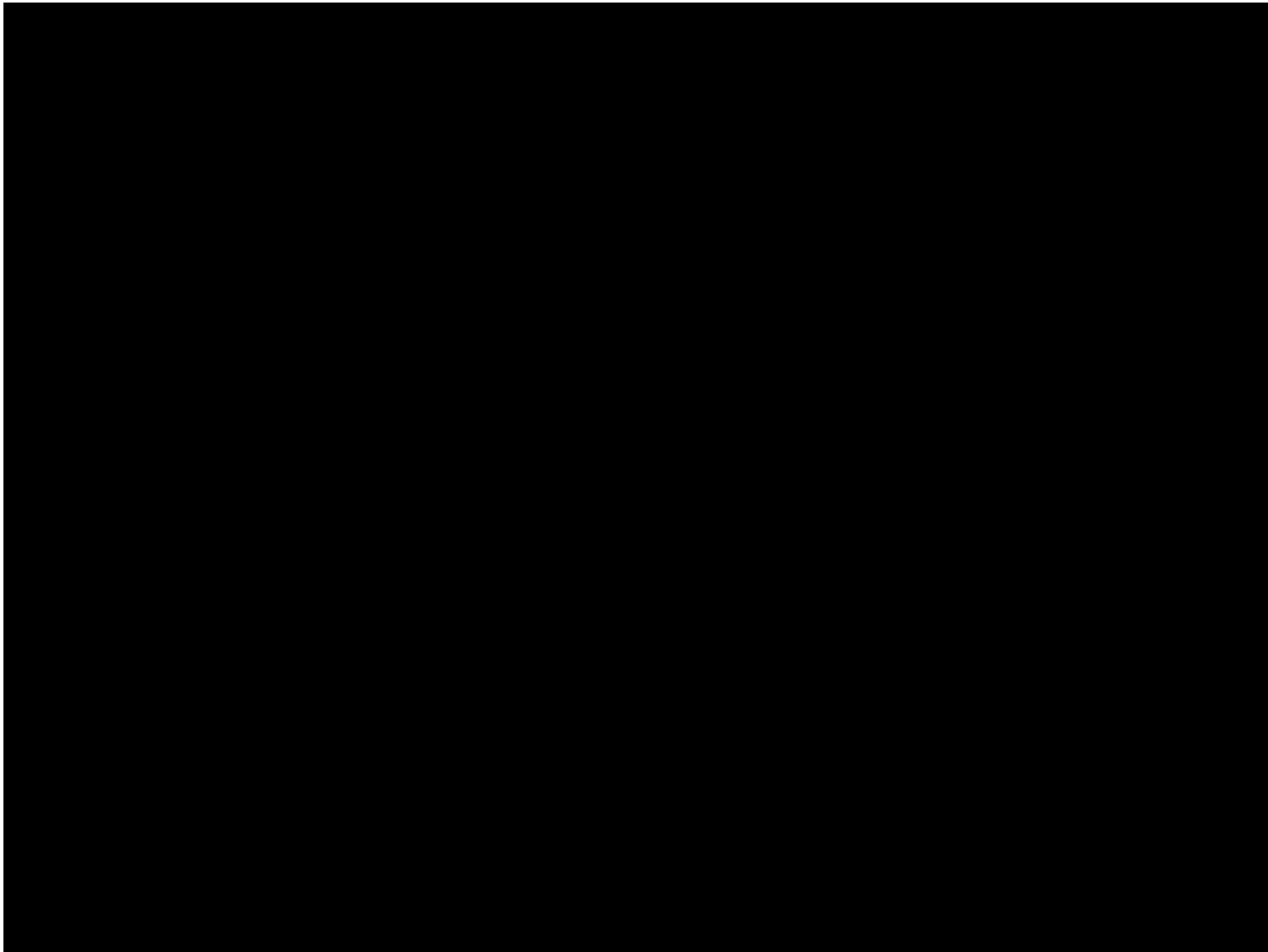
- ▶ 1,6 Milliarden Kollisionen pro Sekunde! Warum?
  - „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1x pro  $10^{10}$  Kollisionen!
  - Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist vom Zufall bestimmt
  - Man kann nur vorhersagen, wie häufig welche Teilchenkombinationen vorkommen werden
- ▶ Vergleich der Messergebnisse mit Vorhersagen aus dem Standardmodell und anderen Theorien



© CERN



# Teilchenkollisionen im LHC



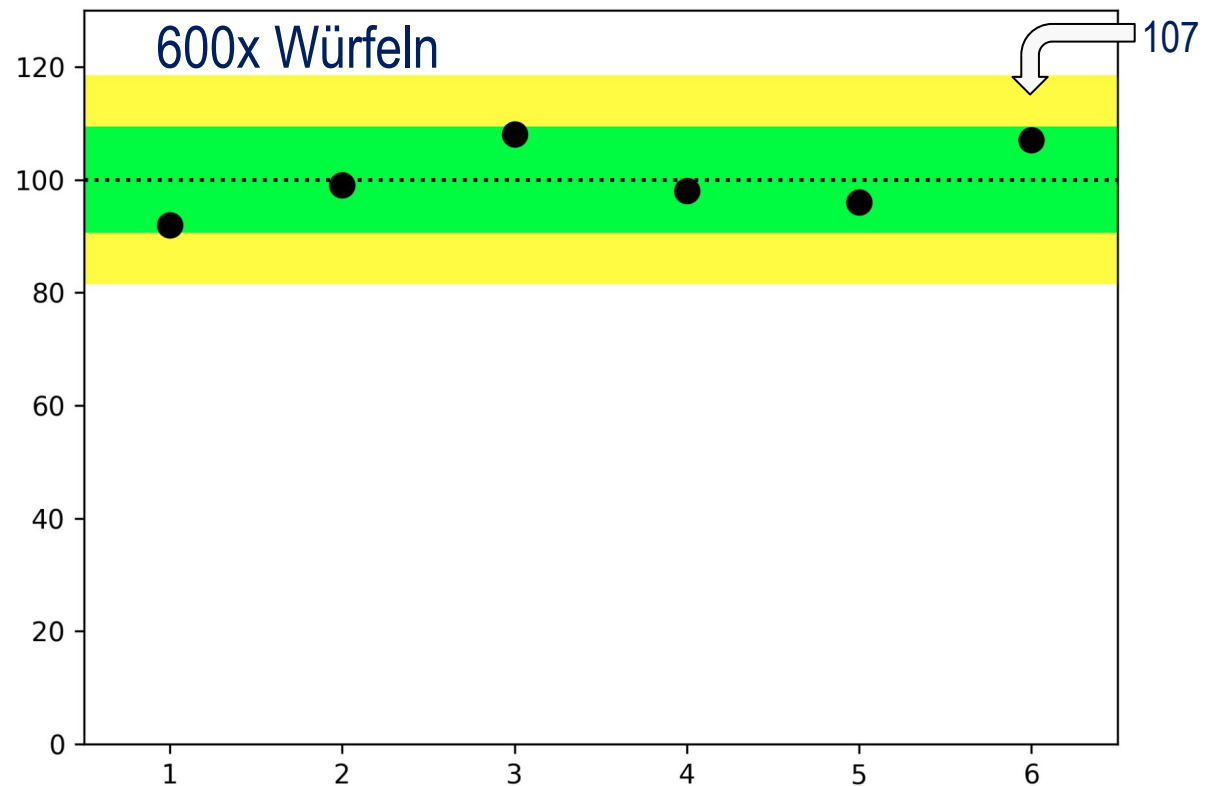
# Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Unsicherheiten einer Messung
- ▶ Beispiel: Ist der Würfel manipuliert oder nicht?
  - Erwartung: Jede Augenseite ist gleich wahrscheinlich
  - Test: Würfeln

----- Erwartungswert

68,3%  $1\sigma$

95,4%  $2\sigma$



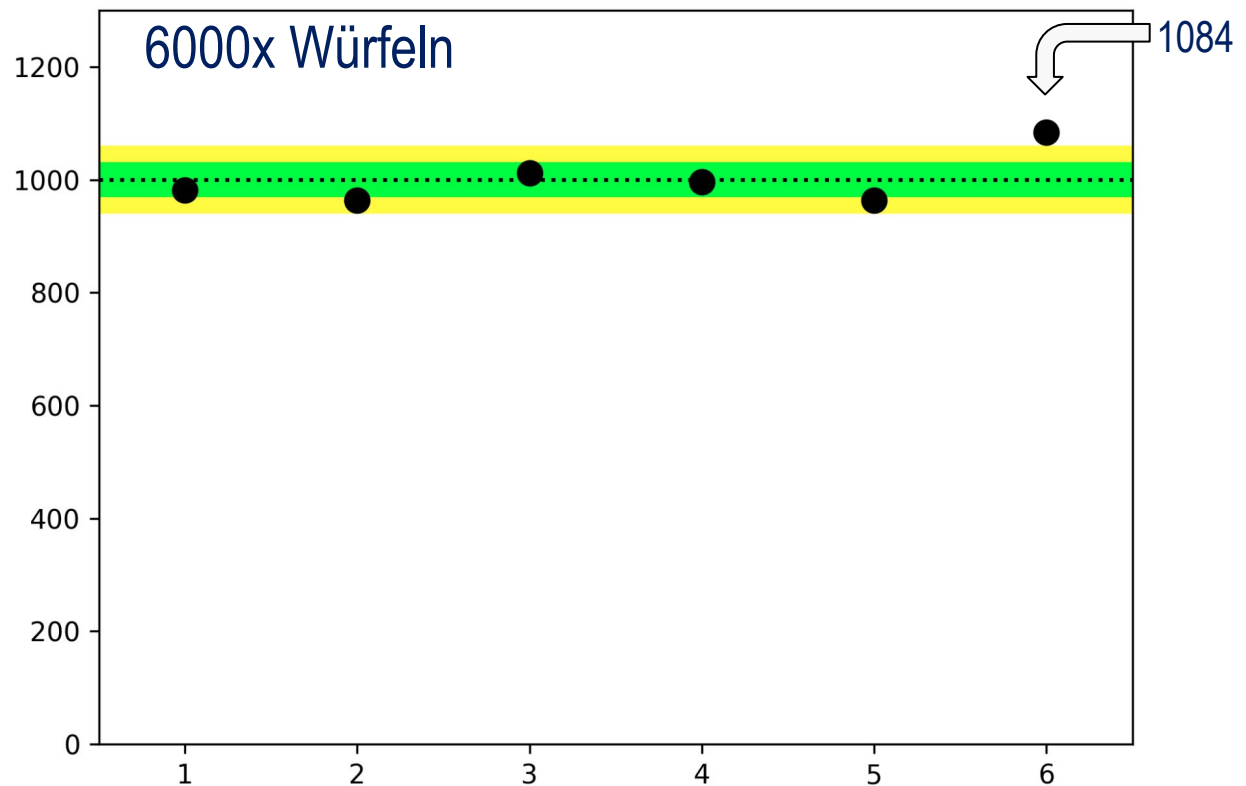
# Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Unsicherheiten einer Messung
- ▶ Beispiel: Ist der Würfel manipuliert oder nicht?
  - Erwartung: Jede Augenseite ist gleich wahrscheinlich
  - Test: Würfeln

--- Erwartungswert

68,3%  $1\sigma$

95,4%  $2\sigma$





# Warum so viele Kollisionen?

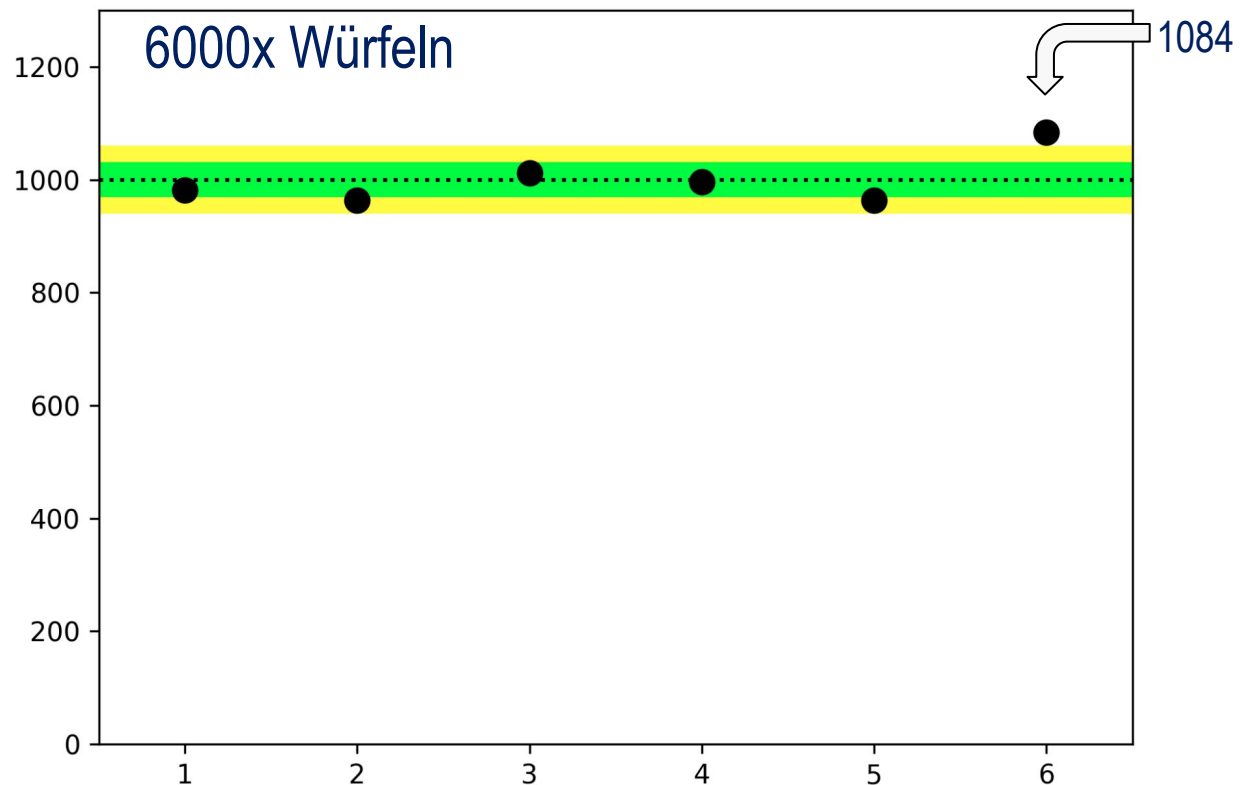
- ▶ Unsicherheiten einer Messung
- ▶ Beispiel: Ist der Würfel manipuliert oder nicht?
  - Erwartung: Jede Augenseite ist gleich wahrscheinlich
  - Test: Würfeln

--- Erwartungswert

68,3%  $1\sigma$

95,4%  $2\sigma$

Die Wahrscheinlichkeit das die hohe Anzahl an 6en Zufall ist, liegt bei etwa 0.4%.

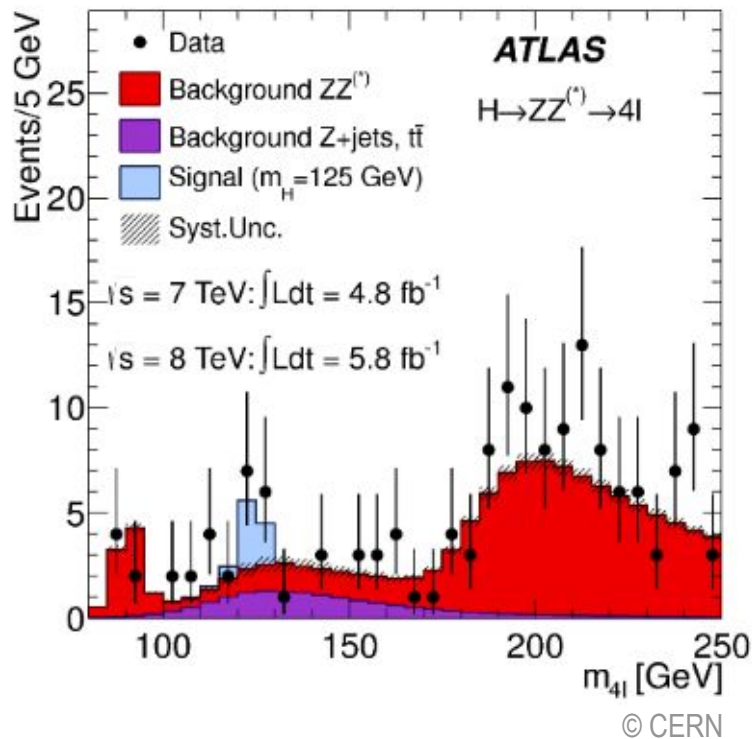


# Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Existiert das Higgs-Teilchen oder nicht?
  - Sind die gemessenen Daten zufällig überhöht?
  - Messung des Higgs mit  $5\sigma$
  - Die Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation liegt bei  $< 0.0001\%$

# Warum so viele Kollisionen?

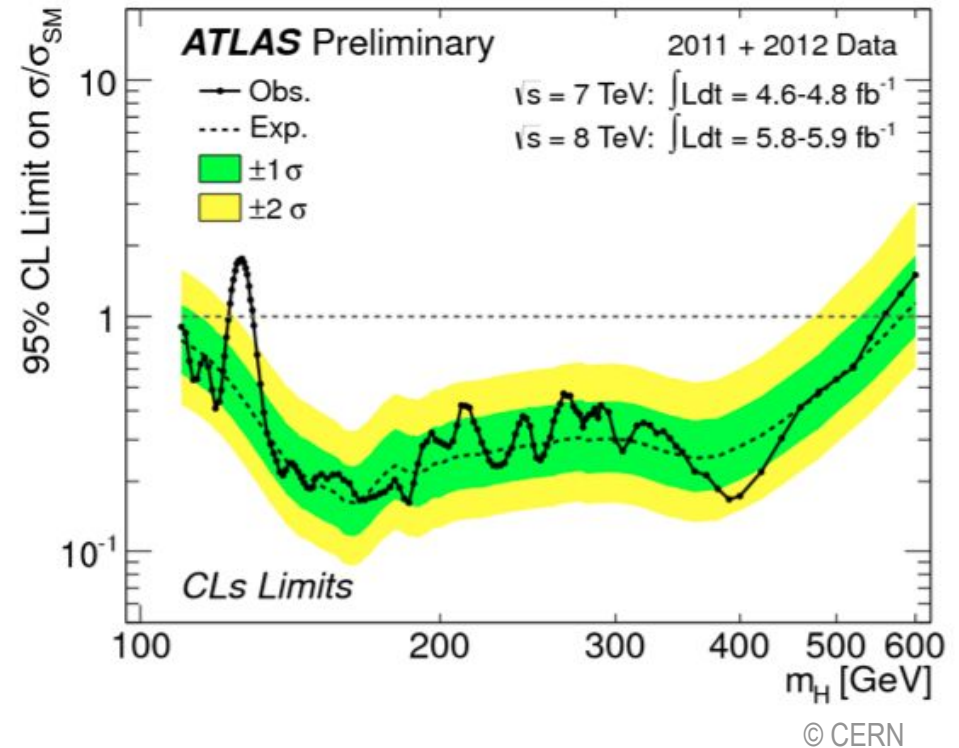
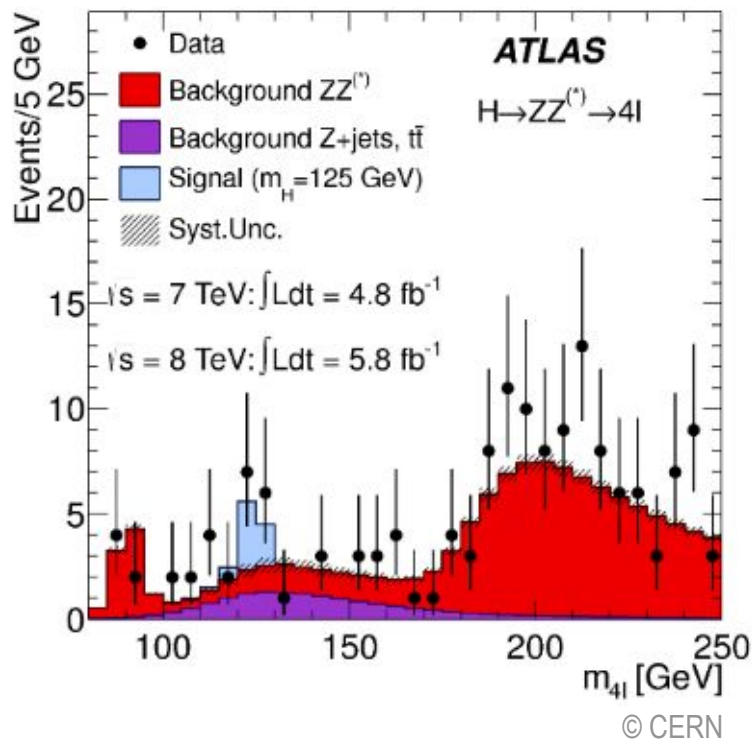
- ▶ Existiert das Higgs-Teilchen oder nicht?
  - Sind die gemessenen Daten zufällig überhöht?
  - Messung des Higgs mit  $5\sigma$
  - Die Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation liegt bei  $< 0.0001\%$



# Warum so viele Kollisionen?

- ▶ Existiert das Higgs-Teilchen oder nicht?
  - Sind die gemessenen Daten zufällig überhöht?
  - Messung des Higgs mit  $5\sigma$
  - Die Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation liegt bei  $< 0.0001\%$

- - - Erwartung  
■  $\pm 1\sigma$   
■  $\pm 2\sigma$



# Analyse von Teilchenspuren im ATLAS Detektor





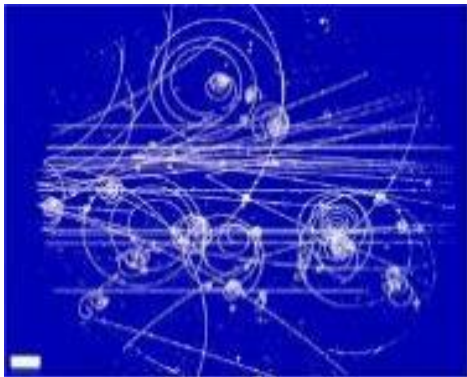
# Wie weist man Elementarteilchen nach?

- ▶ Bildgebende Detektoren

# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ► Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

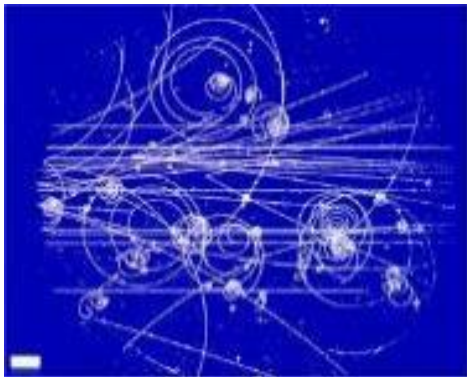


© CERN

# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ► Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



© CERN

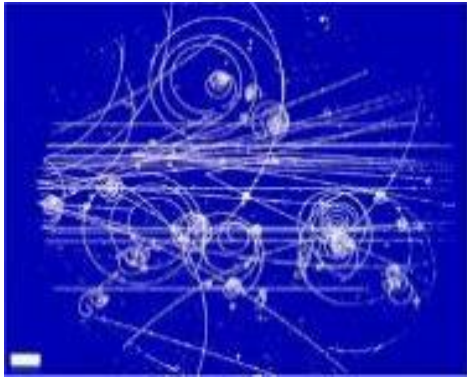
- sichtbare Teilchenspuren



# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ► Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



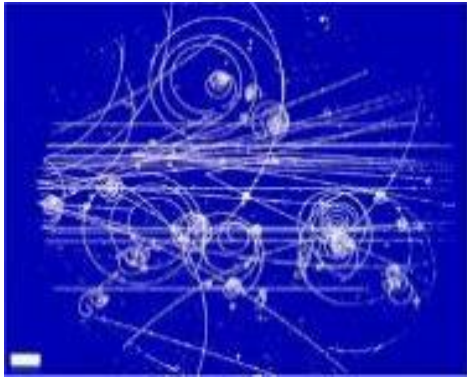
© CERN

- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ▶ Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



© CERN

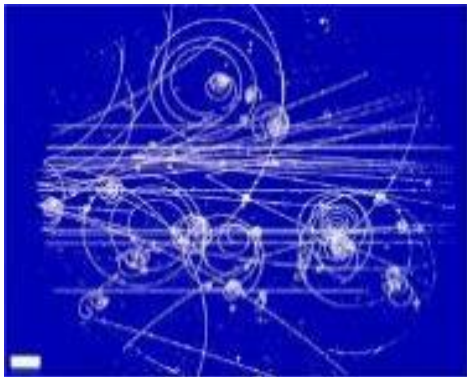
- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

## ▶ Elektronische Detektoren

# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ▶ Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

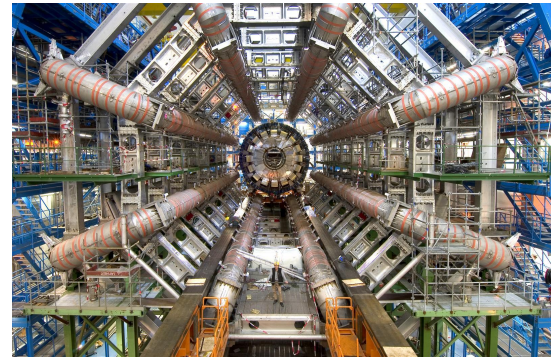


© CERN

- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

## ▶ Elektronische Detektoren

- z.B.: ATLAS-Detektor, Geigerzähler

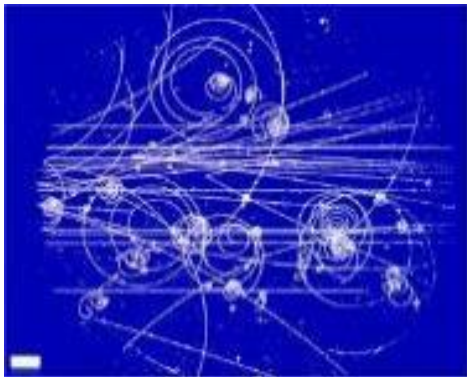


© CERN

# Wie weist man Elementarteilchen nach?

## ▶ Bildgebende Detektoren

- z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

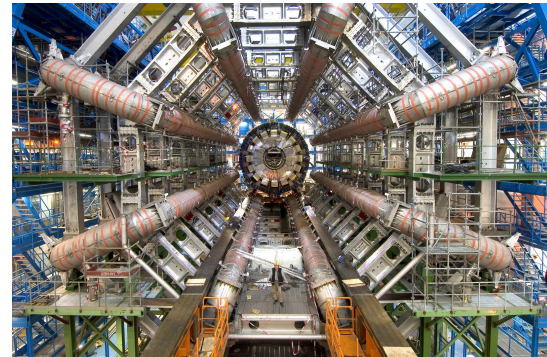


© CERN

- sichtbare Teilchenspuren
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

## ▶ Elektronische Detektoren

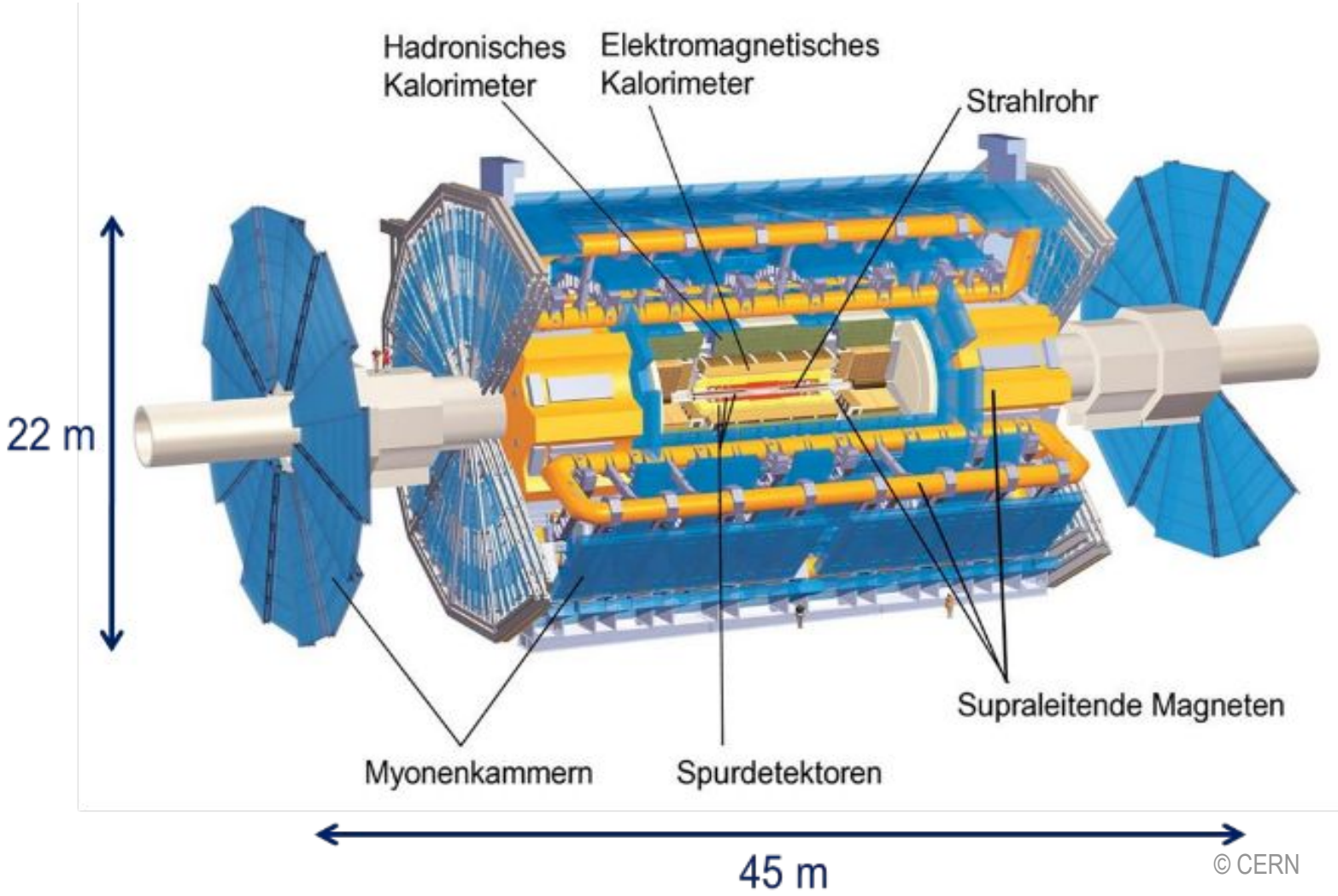
- z.B.: ATLAS-Detektor, Geigerzähler



© CERN

- elektrische Signale
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

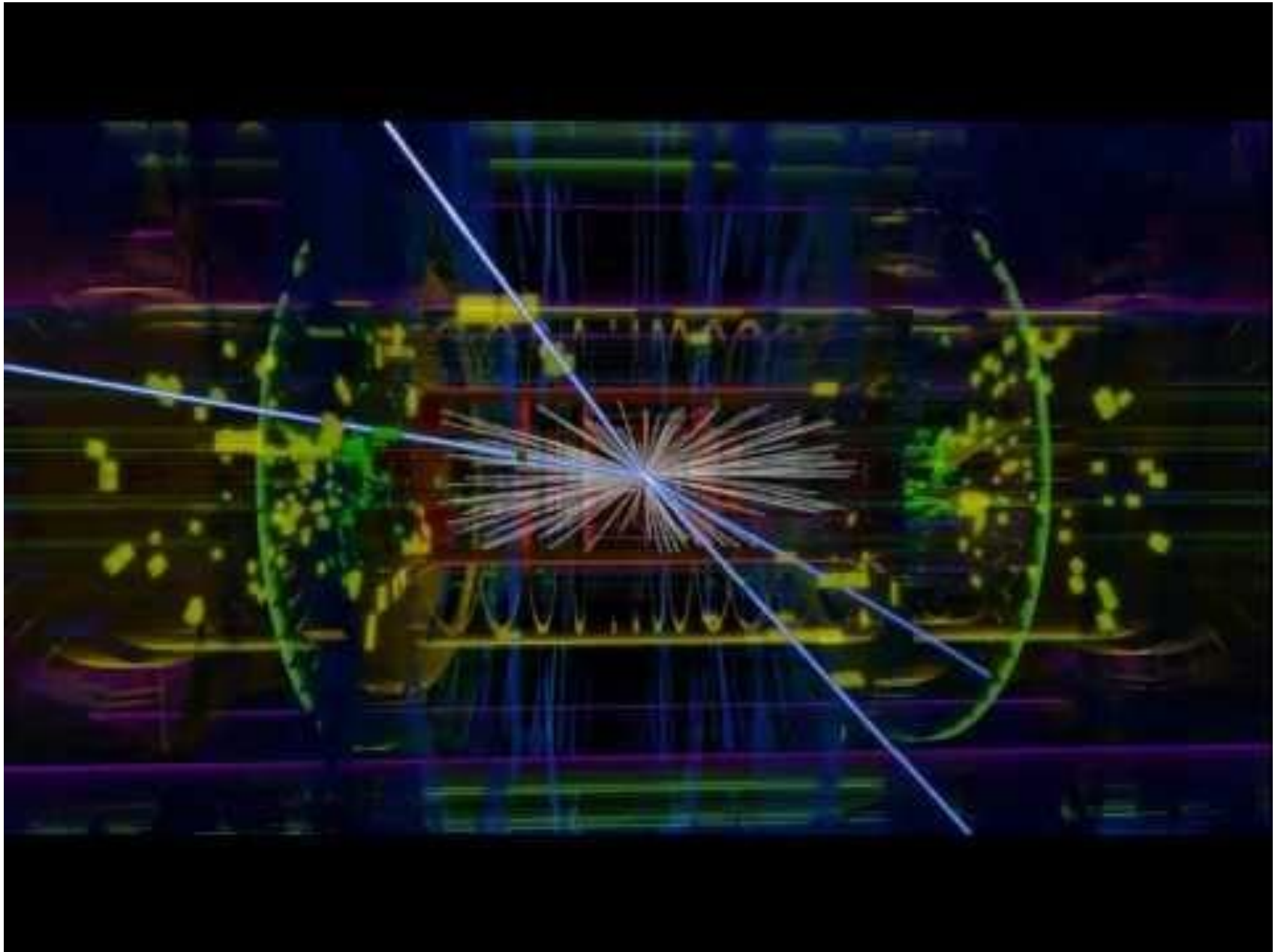
# Der ATLAS-Detektor



# Der ATLAS-Detektor

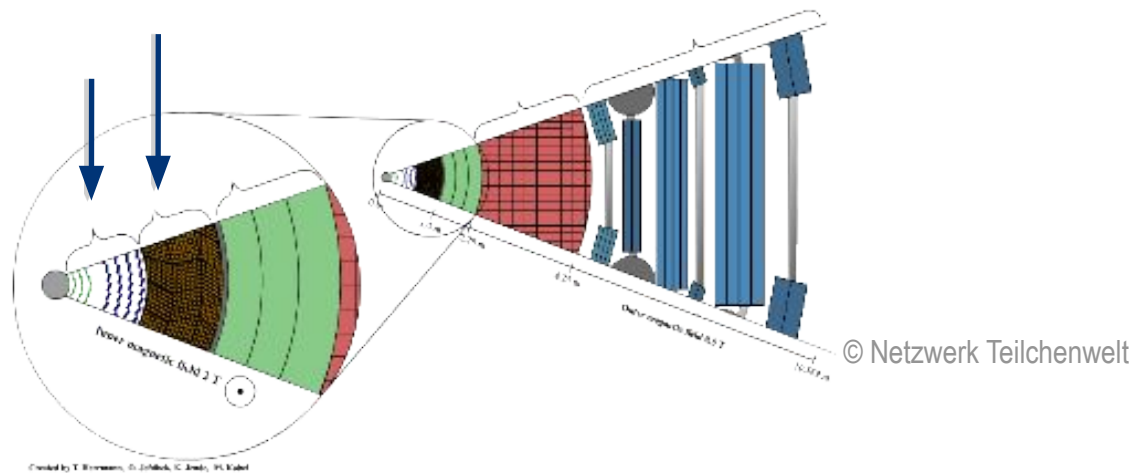


# Wie sieht eine Kollision aus?



# Der ATLAS-Detektor

- ▶ Spurdetektoren
  - ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen

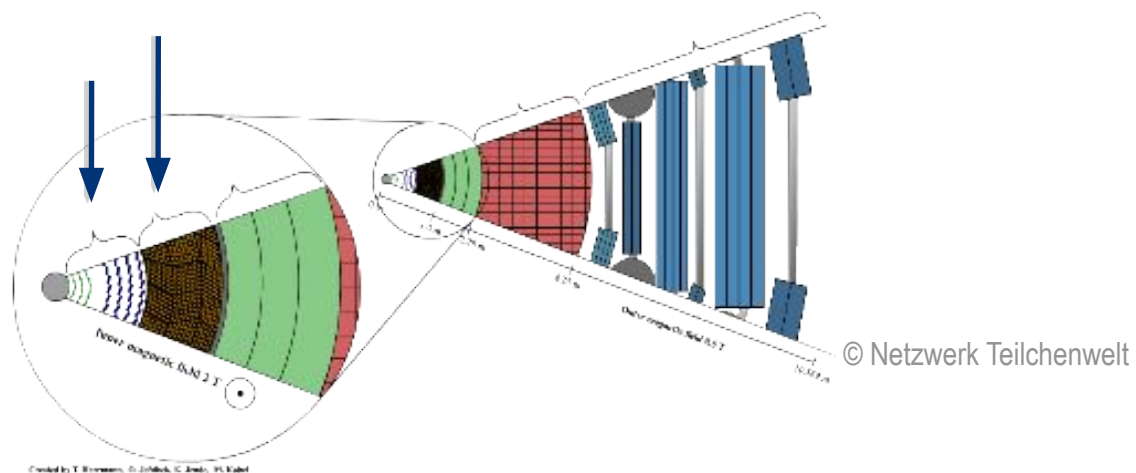




# Der ATLAS-Detektor

## ▶ Spurdetektoren

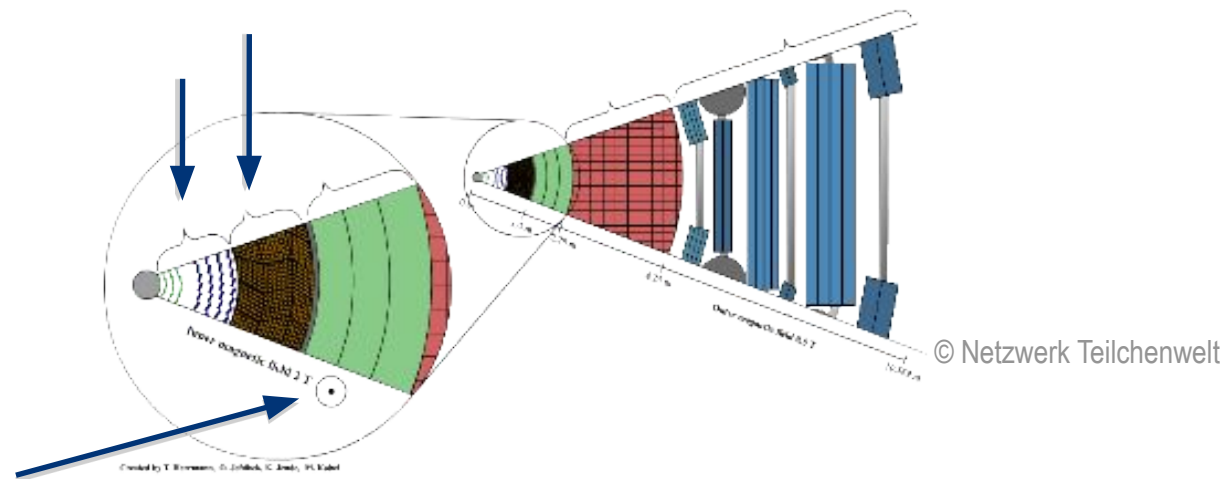
- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld



# Der ATLAS-Detektor

## ▶ Spurdetektoren

- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld



## ▶ Elektromagnetisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen

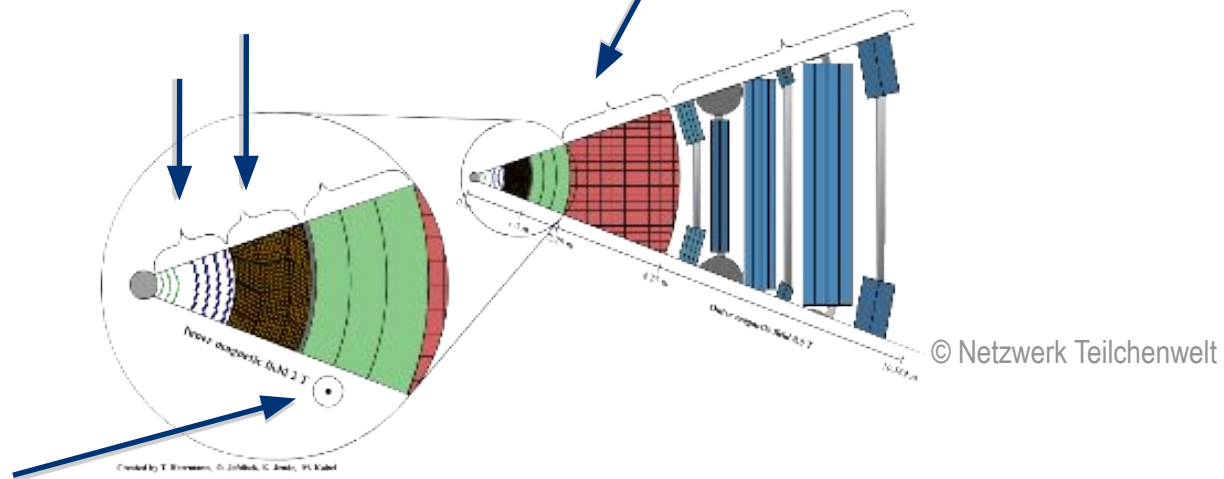
# Der ATLAS-Detektor

## ▶ Spurdetektoren

- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld

## ▶ Hadronisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Hadronen (= aus Quarks bestehende Teilchen)



## ▶ Elektromagnetisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen

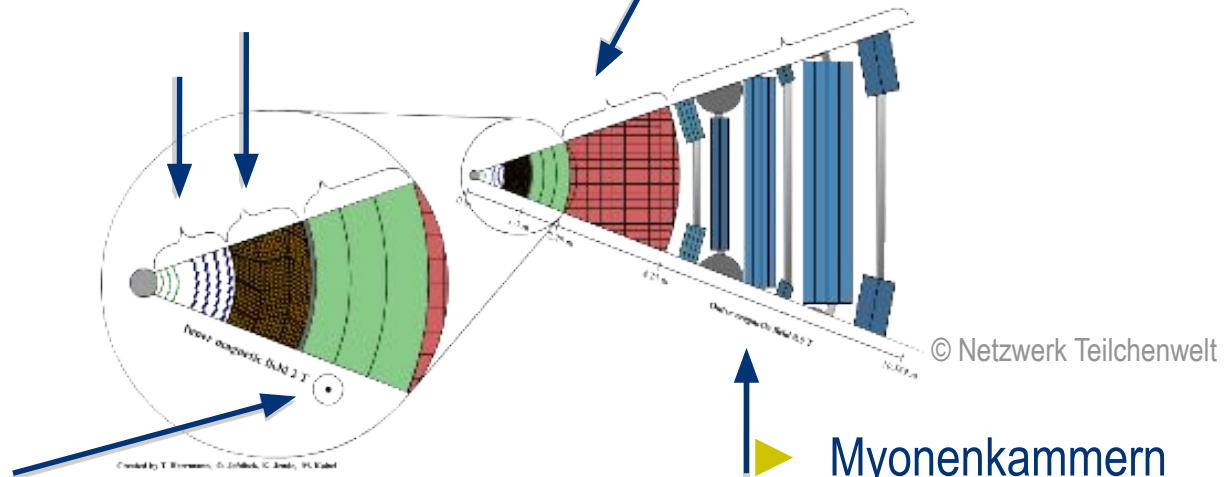
# Der ATLAS-Detektor

## ▶ Spurdetektoren

- ... messen die Spuren und Impulse von elektrisch geladenen Teilchen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld

## ▶ Hadronisches Kalorimeter

- ... misst die Energie von Hadronen (= aus Quarks bestehende Teilchen)



## ▶ Elektromagnetisches Kalorimeter

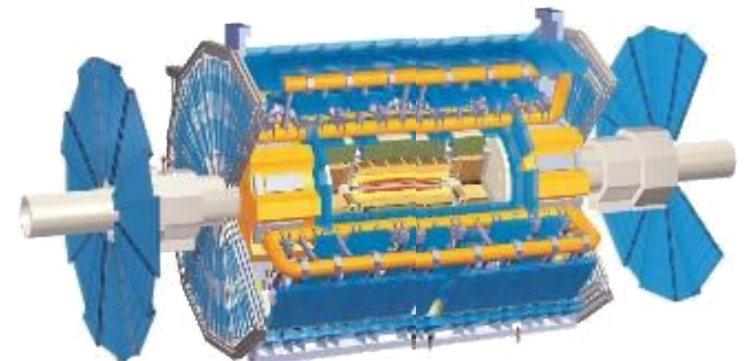
- ... misst die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen

## ▶ Myonenkammern

- ... messen die Spuren und Impulse von Myonen
- ... befinden sich in einem Magnetfeld

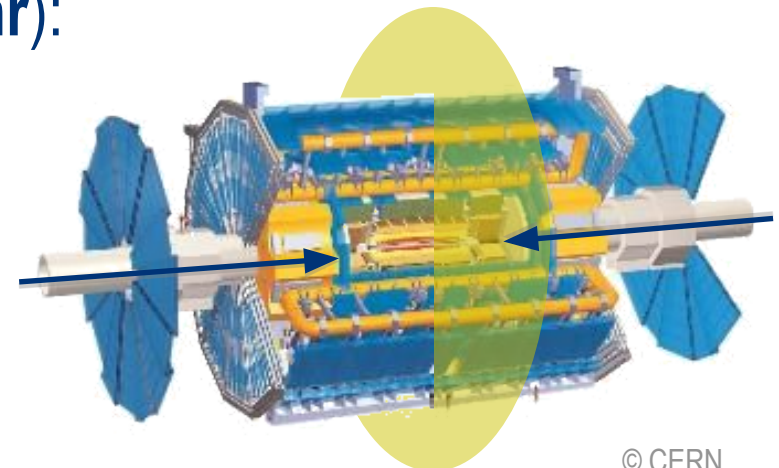
# Was misst ATLAS?

- ▶ Spurdetektoren:
  - **Spur**
  - **Impuls** und Vorzeichen der **elektrischen Ladung**
- ▶ Kalorimeter:
  - **Energie**
- ▶ Besonders wichtig sind die **transversalen Anteile** von Impuls und Energie (**senkrecht zum Strahlrohr**):
  - $E_T$ : transversale Energie
  - $P_T$ : transversaler Impuls



# Was misst ATLAS?

- ▶ Spurdetektoren:
  - **Spur**
  - **Impuls** und Vorzeichen der **elektrischen Ladung**
- ▶ Kalorimeter:
  - **Energie**
- ▶ Besonders wichtig sind die **transversalen Anteile** von Impuls und Energie (**senkrecht zum Strahlrohr**):
  - $E_T$ : transversale Energie
  - $P_T$ : transversaler Impuls



# Transversaler Impuls?

## ► Impuls:

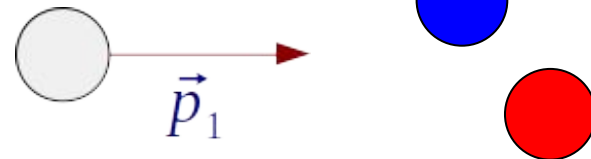
- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße

# Transversaler Impuls?

## ► Impuls:

- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße
- Bsp: Billard

Vor Stoß:



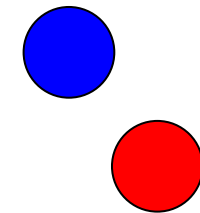
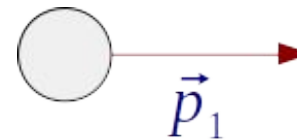


# Transversaler Impuls?

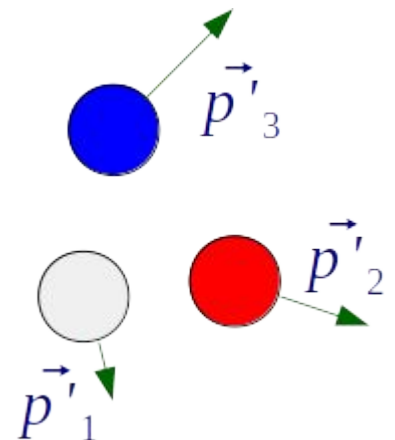
## ► Impuls:

- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße
- Bsp: Billard

Vor Stoß:



Nach Stoß:

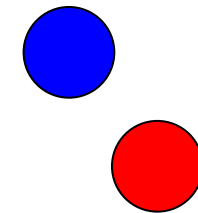
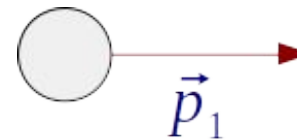


# Transversaler Impuls?

## ► Impuls:

- Produkt aus Masse und Geschwindigkeit  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Impuls ist ein Vektor (richtungsabhängig)
- Gesamt-Impuls ist wie Energie eine Erhaltungsgröße
- Bsp: Billard

Vor Stoß:

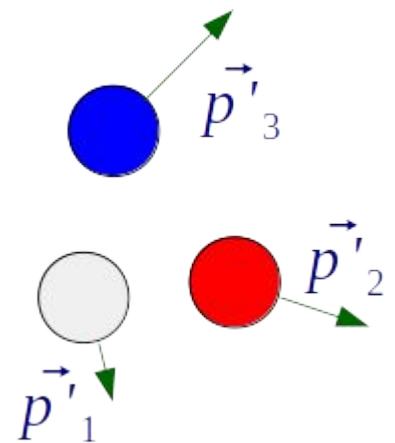


Impulserhaltung:

$$\vec{p}_1 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 + \vec{p}'_3$$

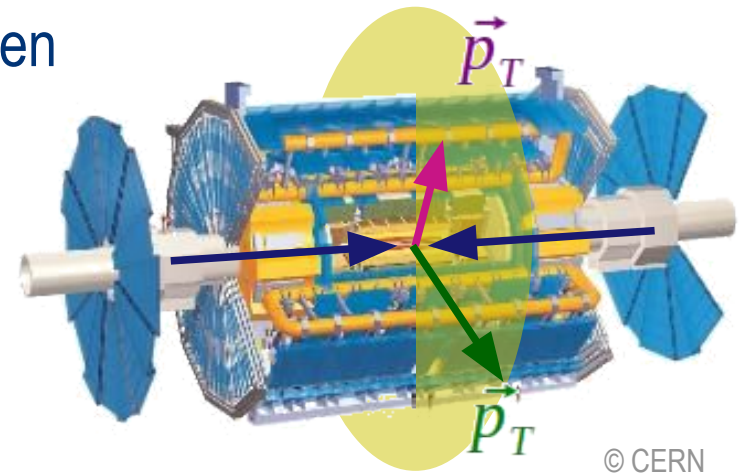
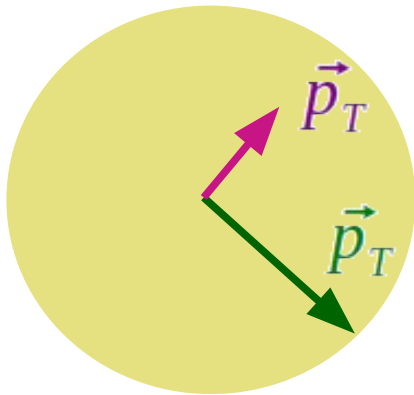


Nach Stoß:



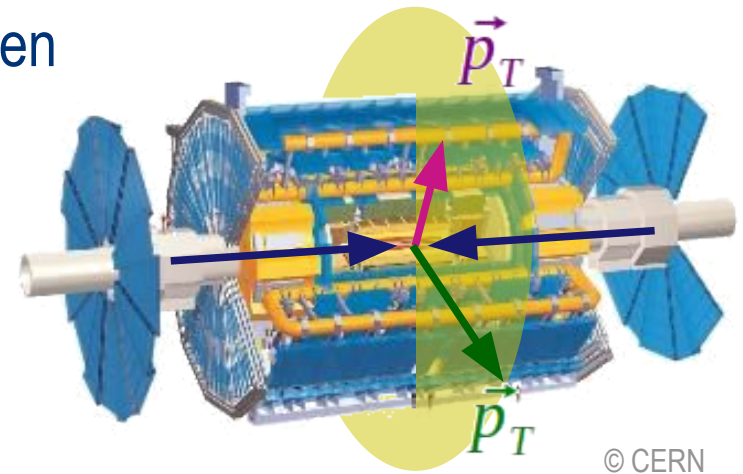
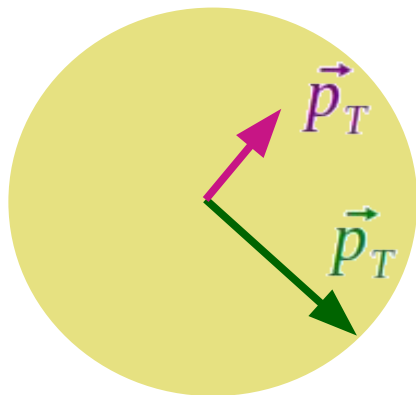
# Transversaler Impuls?

- Betrachte den Impuls in der Ebene senkrecht zur Strahlachse
- Bsp: zwei Teilchen werden gemessen
- Transversale Impulse:  $\vec{p}_T$  und  $\vec{p}_T$



# Transversaler Impuls?

- Betrachte den Impuls in der Ebene senkrecht zur Strahlachse
- Bsp: zwei Teilchen werden gemessen
- Transversale Impulse:  $\vec{p}_T$  und  $\vec{p}_T$



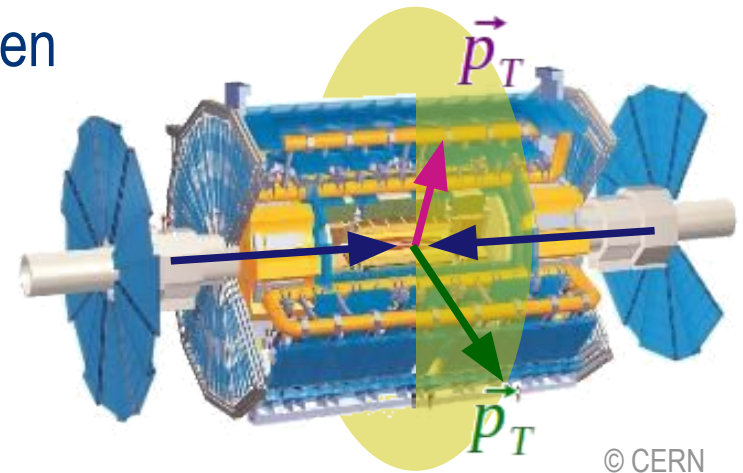
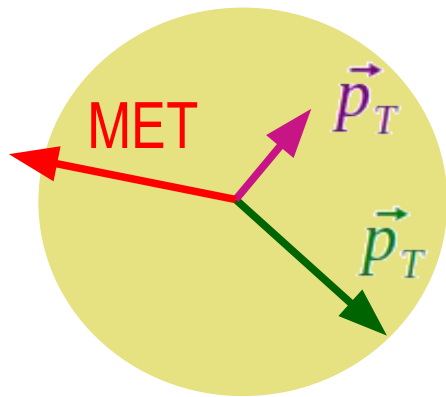
$$= \vec{p}_T + \vec{p}_T \neq \vec{0}$$

## ► Problem:

- Vor Kollision war der Impuls senkrecht zur Strahlachse exakt  $\vec{0}$   
Impulserhaltung scheint verletzt

# Transversaler Impuls?

- Betrachte den Impuls in der Ebene senkrecht zur Strahlachse
- Bsp: zwei Teilchen werden gemessen
- Transversale Impulse:  $\vec{p}_T$  und  $\vec{p}_T$



$$= \vec{p}_T + \vec{p}_T + MET = \vec{0}$$

## ► Fehlender transversaler Impuls:

- Mindestens ein Teilchen mit  $P_T = MET$  konnte nicht gemessen werden
- Welche Teilchen kommen dafür in Frage?

# Komm zum Netzwerk Teilchenwelt :)



Urknall?  
Elementarteilchen?  
Dunkle Materie?

Deine Möglichkeiten im Netzwerk Teilchenwelt

Netzwerk  
TEILCHENWELT

The illustration shows a woman with blonde hair and glasses sitting at a blue desk. Behind her is a large screen displaying a world map and several circular icons: a purple cone with stars, a circle with 'u', 'd', and 'a' letters, a blue and white circular pattern, and a purple spiral. To the left of the woman is a white box with the text 'Urknall?', 'Elementarteilchen?', and 'Dunkle Materie?'. To the right is a logo for 'Netzwerk TEILCHENWELT' featuring a circular arrangement of colorful dots. At the bottom of the screen is a white box with the text 'Deine Möglichkeiten im Netzwerk Teilchenwelt'.

Morgen geht es weiter :)





**Jetzt seid ihr dran!**

▶ Fragen soweit?

▶ Teilchenidentifikation zum Verstehen und Ausprobieren

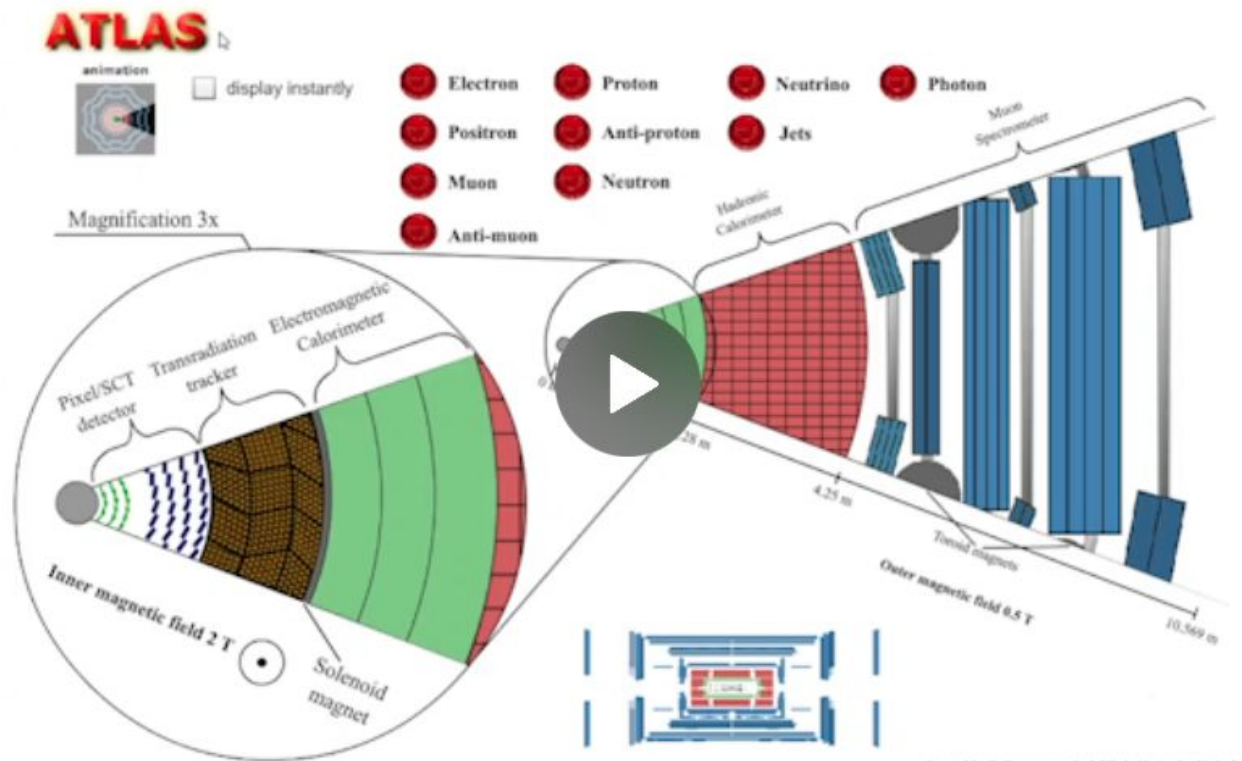
[Teilchenidentifikation](#)



# Teilchenidentifikation

[https://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath\\_teilchenid1.htm](https://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm)

→ Teilchenidentifikation



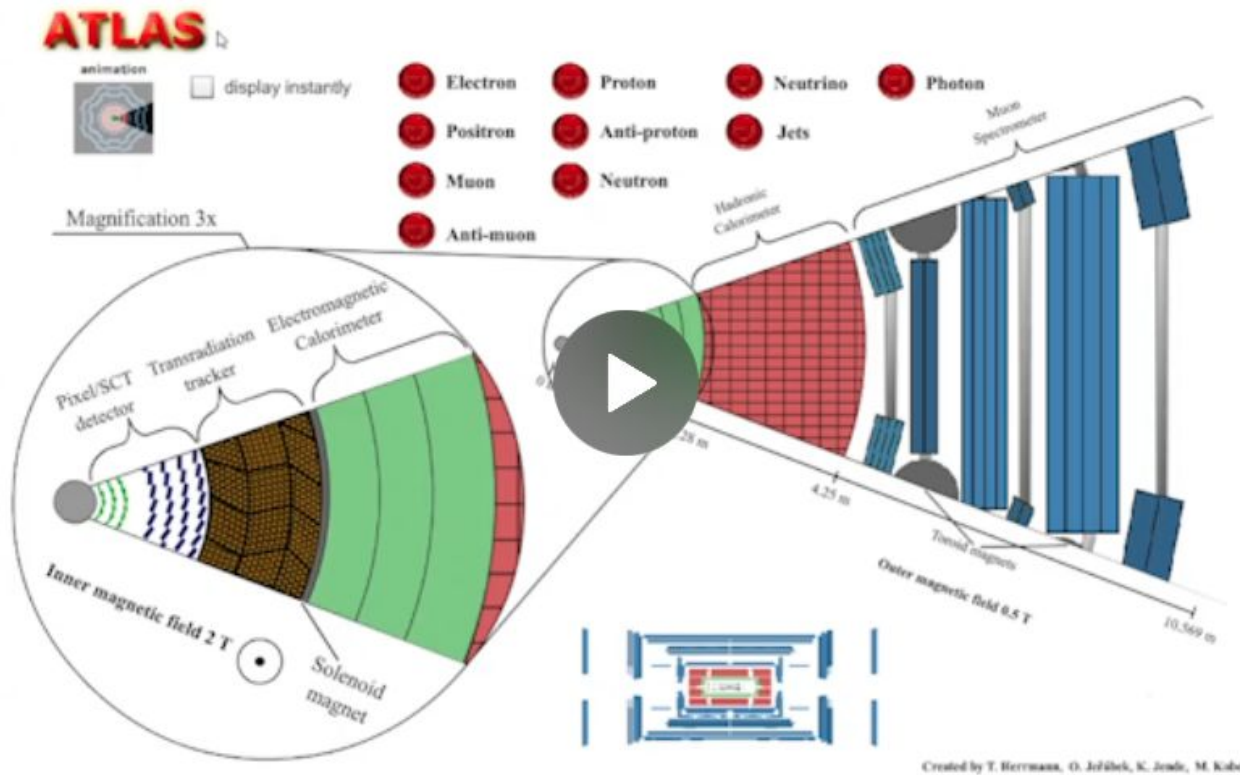
Antimuon
Antiproton
Electron
Jets
Muon
Neutrino
Neutron
Photon
Positron
Proton

# Teilchenidentifikation

[https://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath\\_teilchenid1.htm](https://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm)

→ Teilchenidentifikation

Auswahl des Teilchens



- Antimuon
- Antiproton
- Electron
- Jets
- Muon
- Neutrino
- Neutron
- Photon
- Positron
- Proton

# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron				
Positron				
Photon				
Myon				
Anti-Myon				
Jet				
Neutrino				

# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron	✓	✓	X	X
Positron				
Photon				
Myon				
Anti-Myon				
Jet				
Neutrino				

# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron	✓	✓	X	X
Positron	✓	✓	X	X
Photon				
Myon				
Anti-Myon				
Jet				
Neutrino				

# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron	✓	✓	X	X
Positron	✓	✓	X	X
Photon	X	✓	X	X
Myon				
Anti-Myon				
Jet				
Neutrino				

# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron	✓	✓	X	X
Positron	✓	✓	X	X
Photon	X	✓	X	X
Myon	✓	✓ (schwach)	✓ (schwach)	✓
Anti-Myon				
Jet				
Neutrino				

# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron	✓	✓	X	X
Positron	✓	✓	X	X
Photon	X	✓	X	X
Myon	✓	✓ (schwach)	✓ (schwach)	✓
Anti-Myon	✓	✓ (schwach)	✓ (schwach)	✓
Jet				
Neutrino				



# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron	✓	✓	X	X
Positron	✓	✓	X	X
Photon	X	✓	X	X
Myon	✓	✓ (schwach)	✓ (schwach)	✓
Anti-Myon	✓	✓ (schwach)	✓ (schwach)	✓
Jet	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	X
Neutrino				

# Teilchenidentifikation

	Spurdetektor	Elektromagn. Kalorimeter	Hadron. Kalorimeter	Myonen-kammern
Elektron	✓	✓	X	X
Positron	✓	✓	X	X
Photon	X	✓	X	X
Myon	✓	✓ (schwach)	✓ (schwach)	✓
Anti-Myon	✓	✓ (schwach)	✓ (schwach)	✓
Jet	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	X
Neutrino	X	X	X	X



**Gibt es Fragen soweit?**

?

?

?

?

?

# Teil 4: Vor der Messung

Alle Zutaten um selbst als Teilchendetektiv tätig zu werden!



# Die Hauptdarsteller heute: W-Teilchen



- ▶ Mit ihrer Hilfe werdet ihr den Aufbau von Protonen erforschen...
- ▶ ...und erfahren, wie Physiker nach dem Higgs-Teilchen suchen.



**W<sup>-</sup>-BOSON**  
NACHWEIS: 1983

**AUSTAUSCHTEILCHEN**

Masse:	80 400 MeV/c <sup>2</sup>
Elektrische Ladung:	-1
Starke Ladung:	-
Schwache Ladung:	-1
Mittlere Lebensdauer:	~ 3 · 10 <sup>-25</sup> s
Reichweite:	~ 10 <sup>-18</sup> m

**W<sup>+</sup>-BOSON**  
NACHWEIS: 1983

**AUSTAUSCHTEILCHEN**

Masse:	80 400 MeV/c <sup>2</sup>
Elektrische Ladung:	+1
Starke Ladung:	-
Schwache Ladung:	+1
Mittlere Lebensdauer:	~ 3 · 10 <sup>-25</sup> s
Reichweite:	~ 10 <sup>-18</sup> m

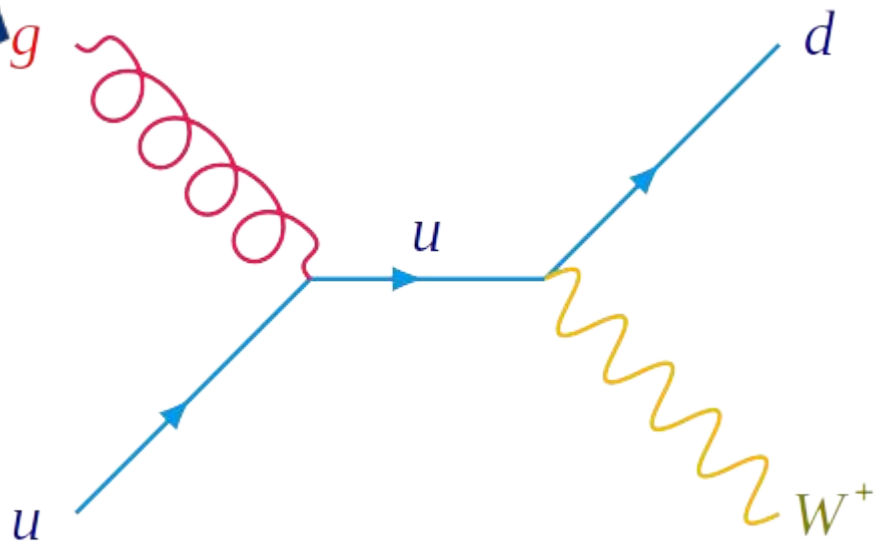
# W-Teilchen...

- ▶ sind Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung
- ▶ sind elektrisch geladen:  $W^+$ ,  $W^-$
- ▶ gehören zu den massereichsten Teilchen die wir kennen ( $80,4 \text{ GeV}/c^2$  ! )
- ▶ wandeln sich nach ca.  $10^{-25} \text{ s}$  in leichtere Teilchen um (kurze Reichweite)

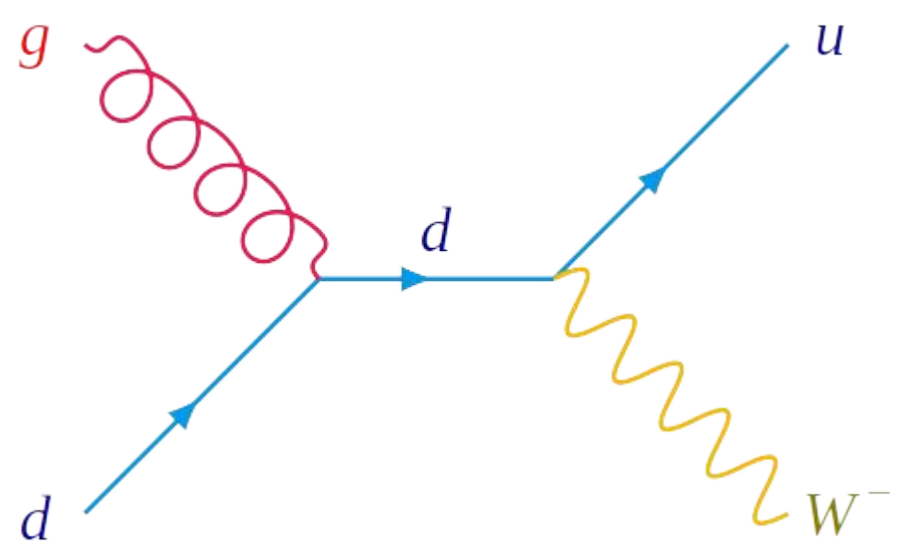
Daher können wir sie nicht direkt im Detektor beobachten, sondern erkennen sie anhand ihrer Umwandlungsprodukte!

# Wie entstehen W-Teilchen?

► Kollision von Protonen im LHC:



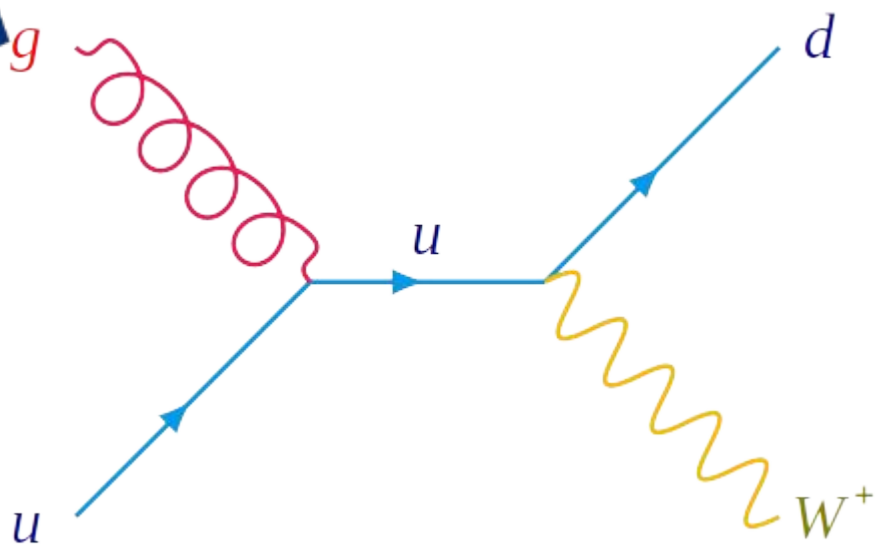
$$u + g \rightarrow W^+ + d$$



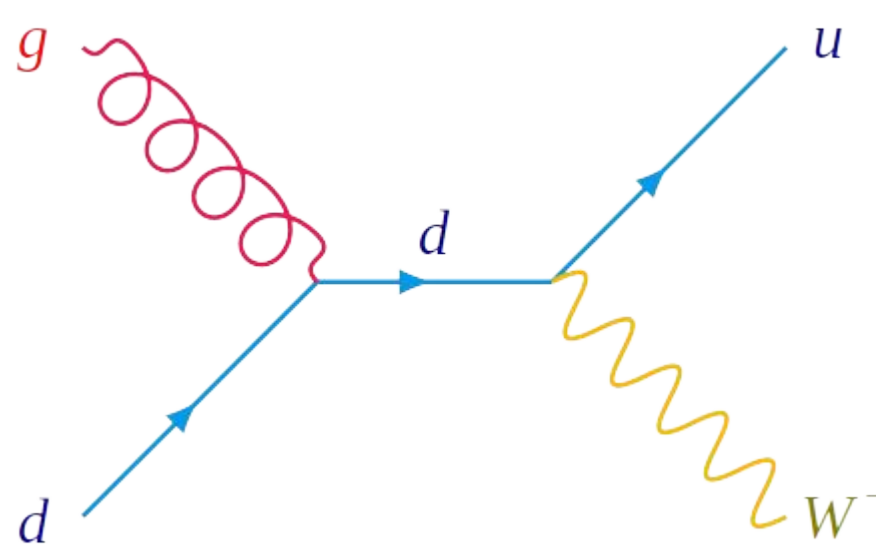
$$d + g \rightarrow W^- + u$$

# Wie entstehen W-Teilchen?

► Kollision von Protonen im LHC:



$$u + g \rightarrow W^+ + d$$



$$d + g \rightarrow W^- + u$$

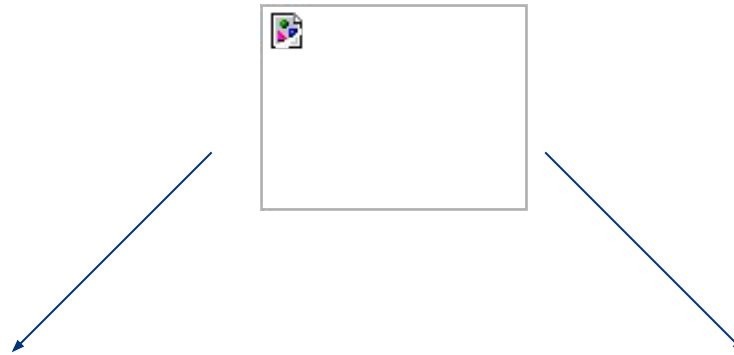
1. Messaufgabe:

In welchem Verhältnis entstehen  $W^+$ - und  $W^-$ -Teilchen im LHC?



# Wie findet man W-Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



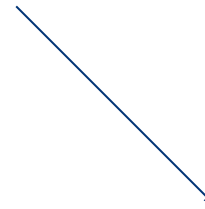
# Wie findet man W-Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann

Beliebiges  
Quark – Antiquark Paar

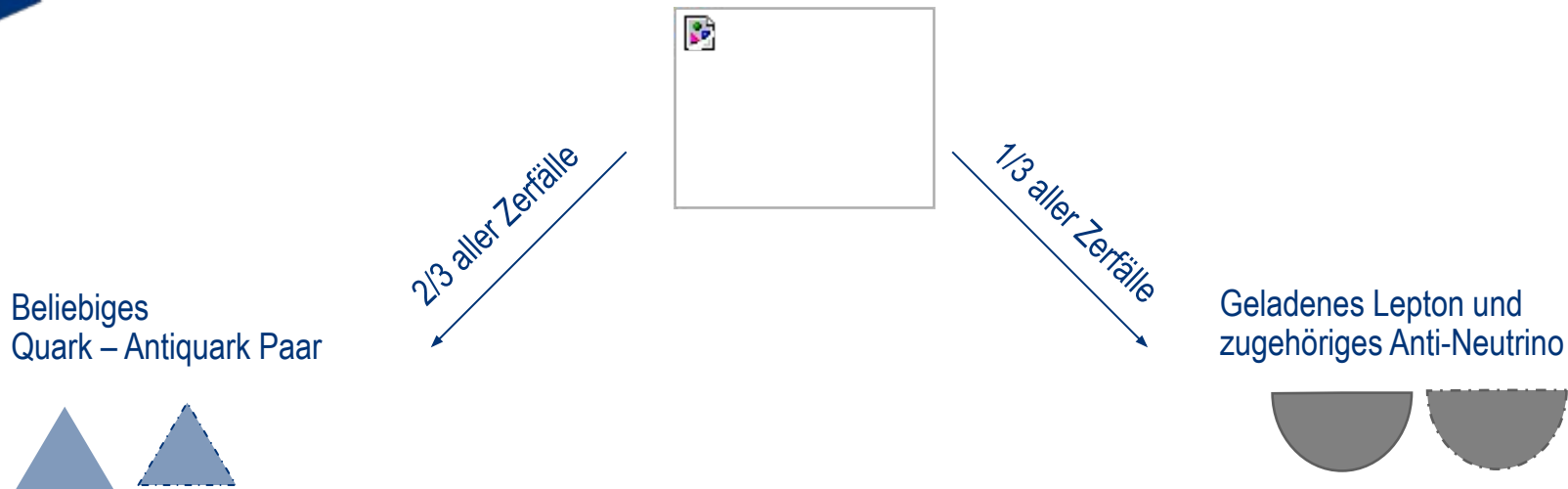


$\frac{2}{3}$  aller Zerfälle



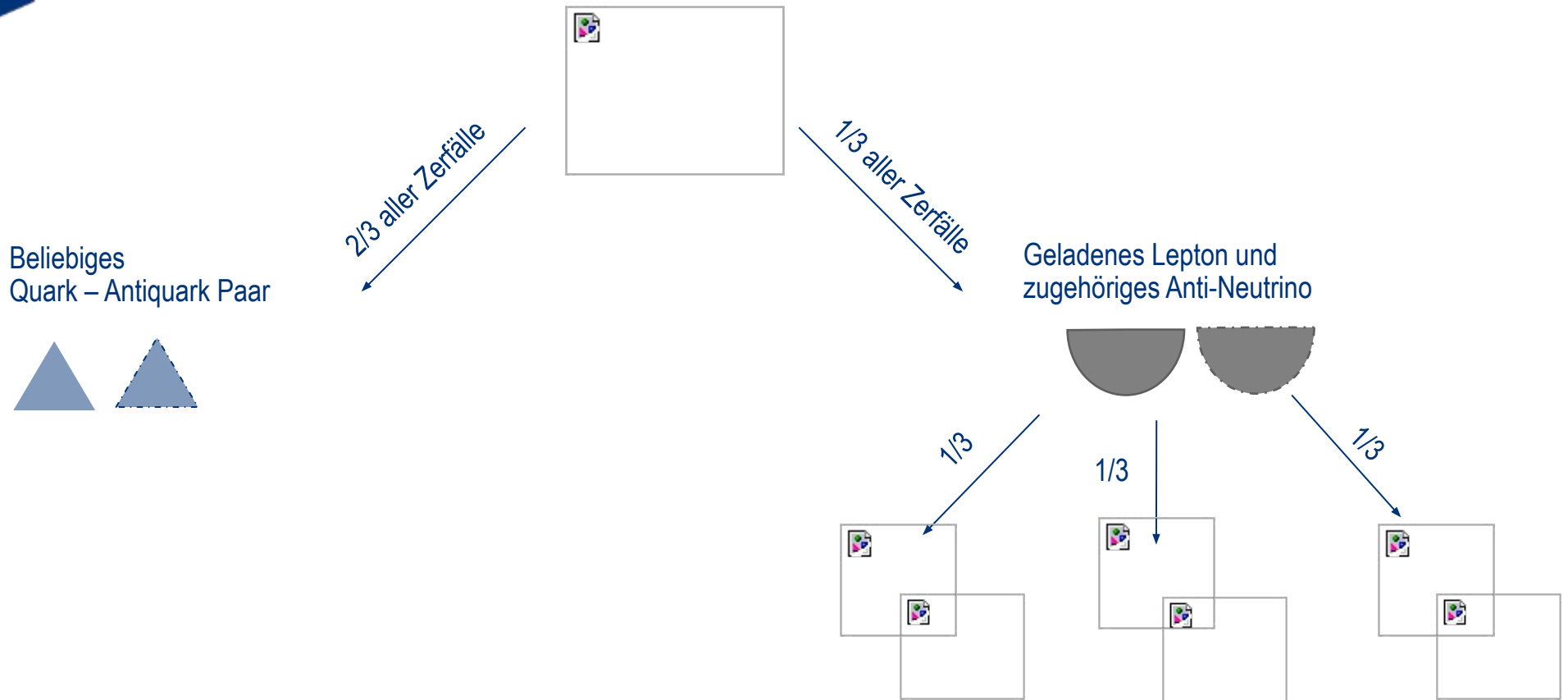
# Wie findet man W-Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



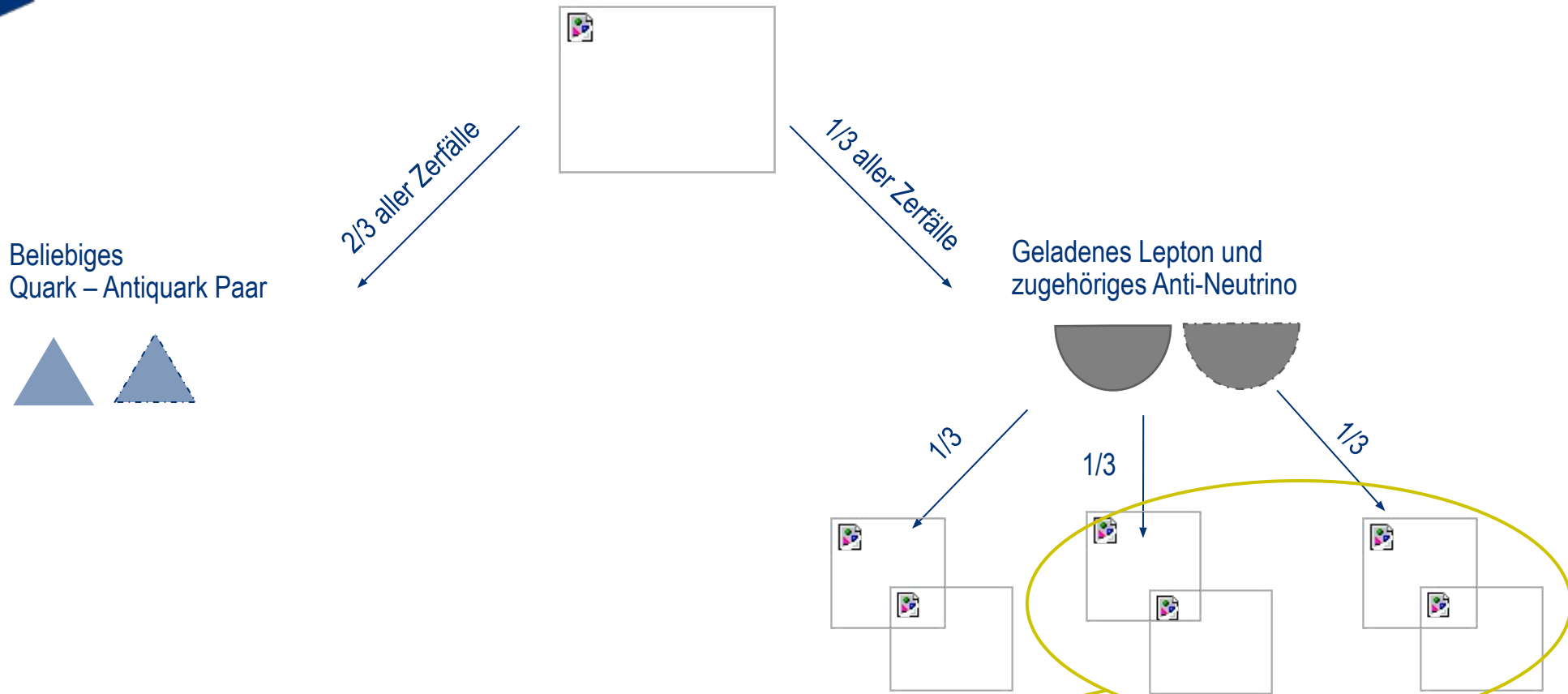
# Wie findet man W-Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



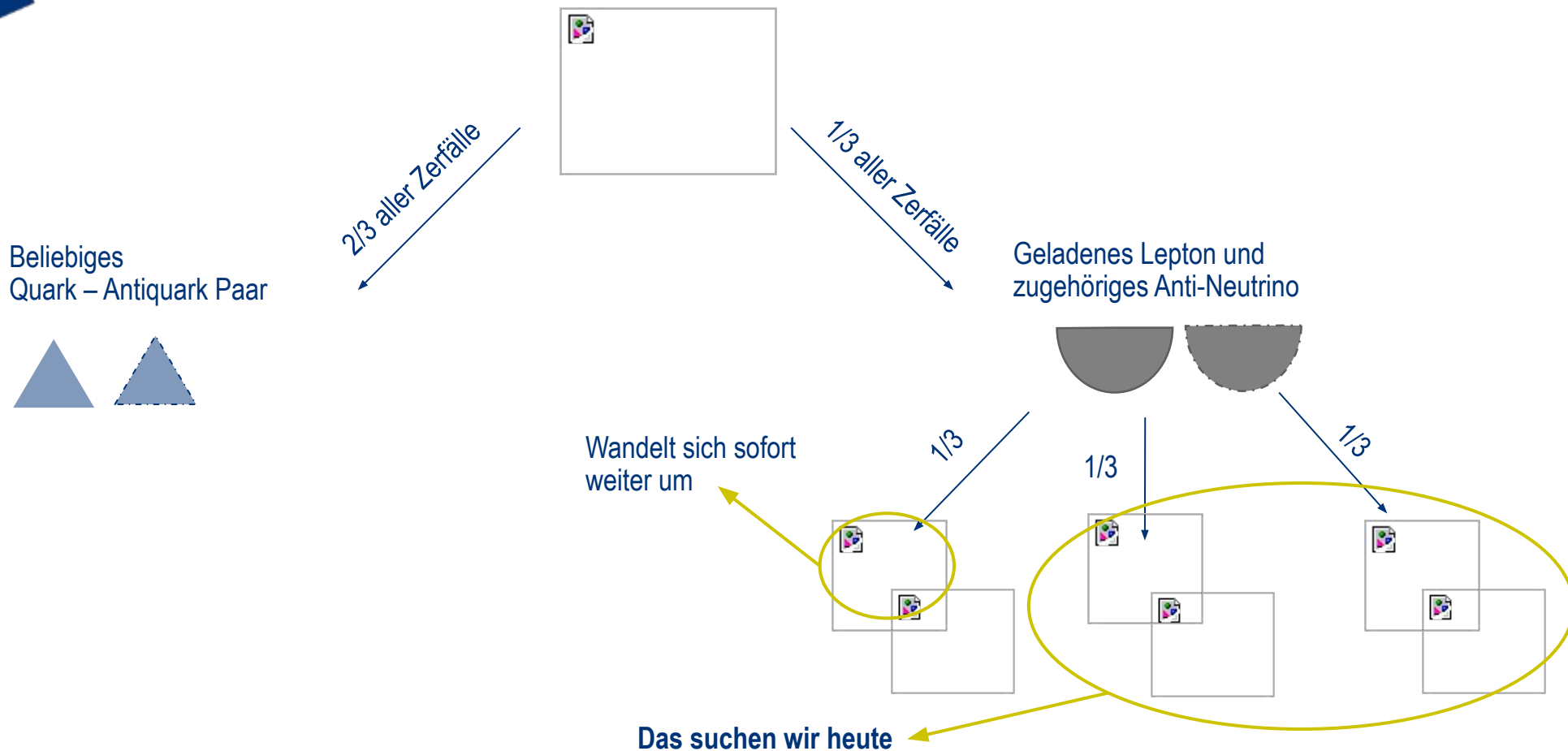
# Wie findet man W-Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



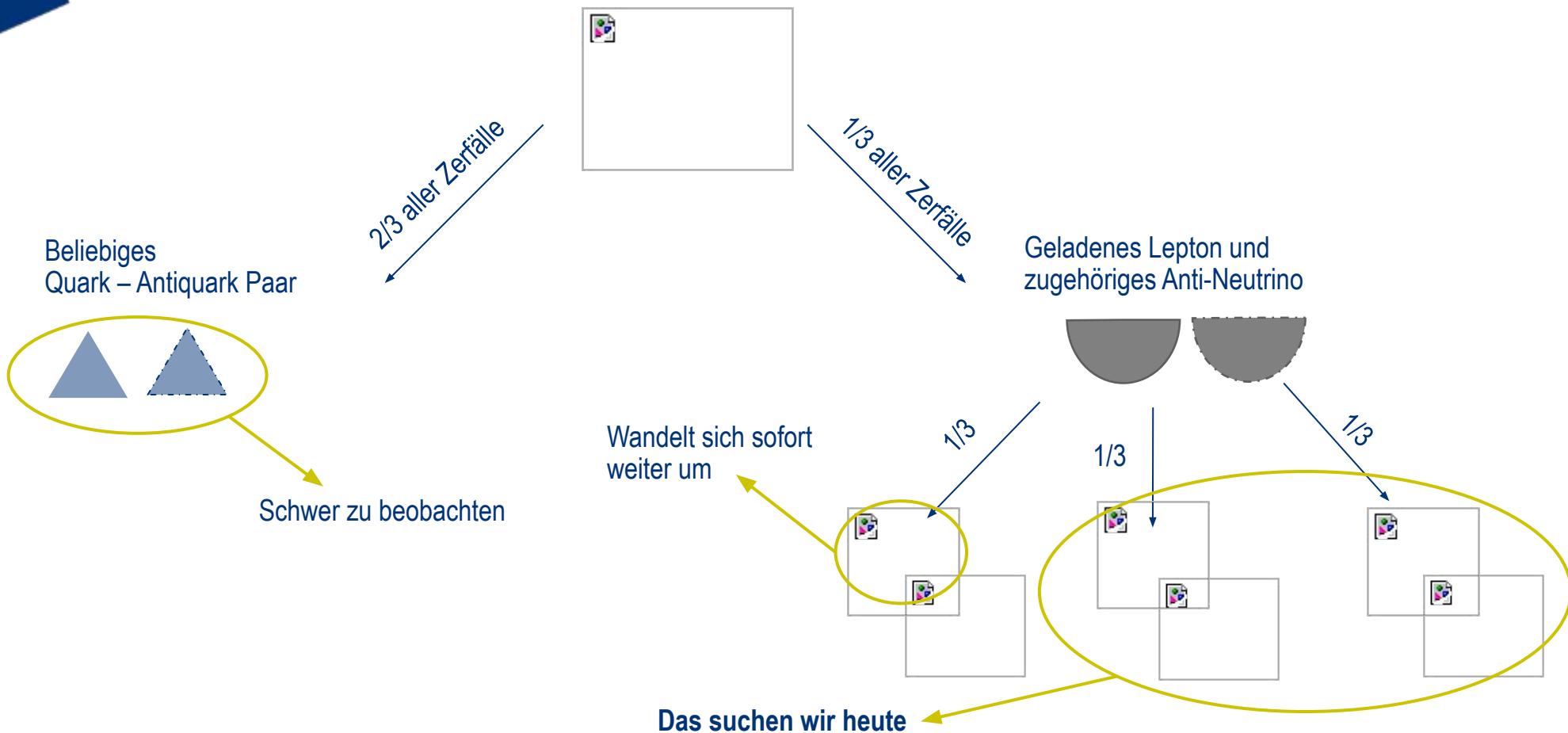
# Wie findet man W-Teilchen?

- Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



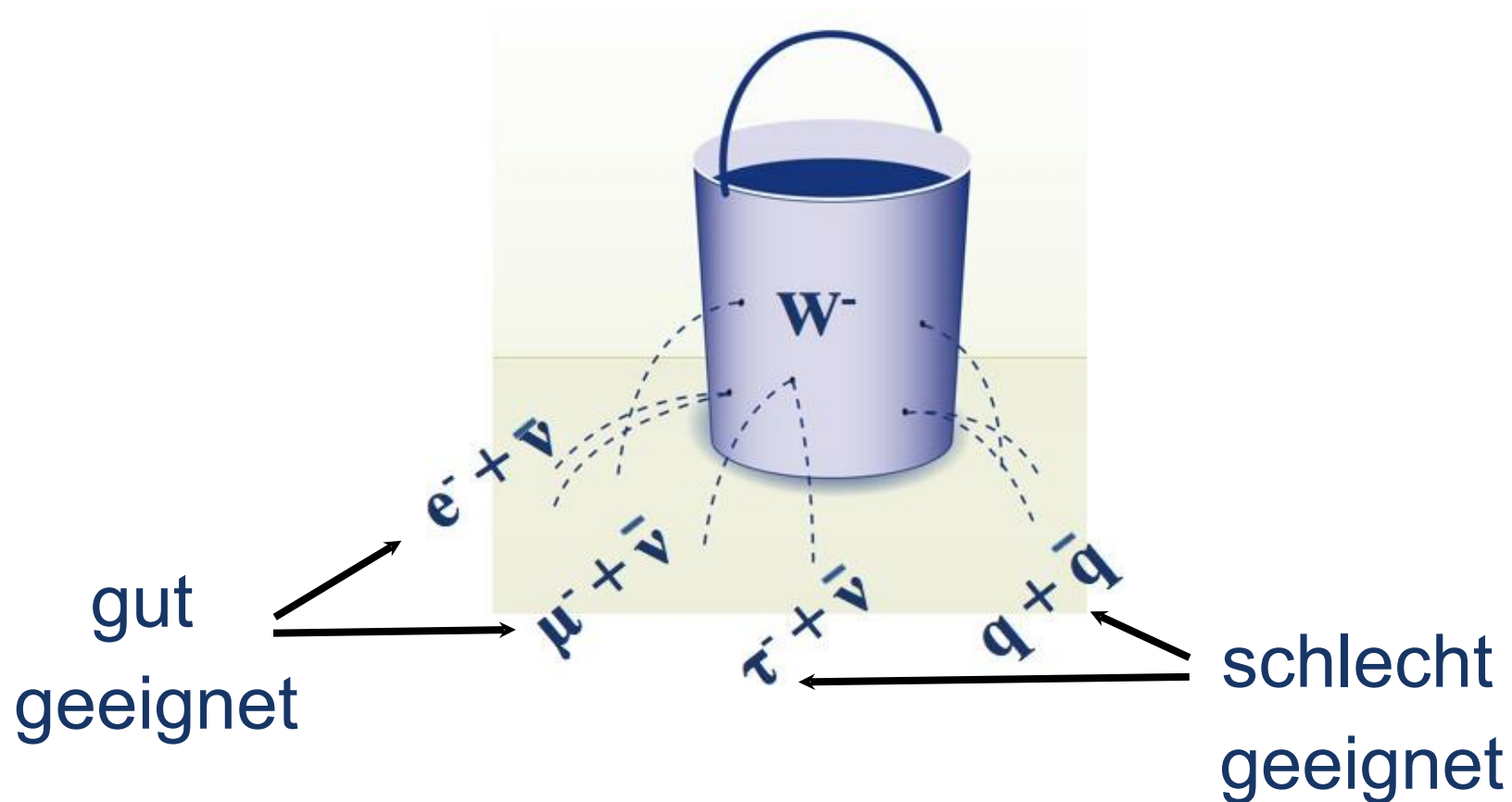
# Wie findet man W-Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



# Wie findet man $W^-$ -Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann

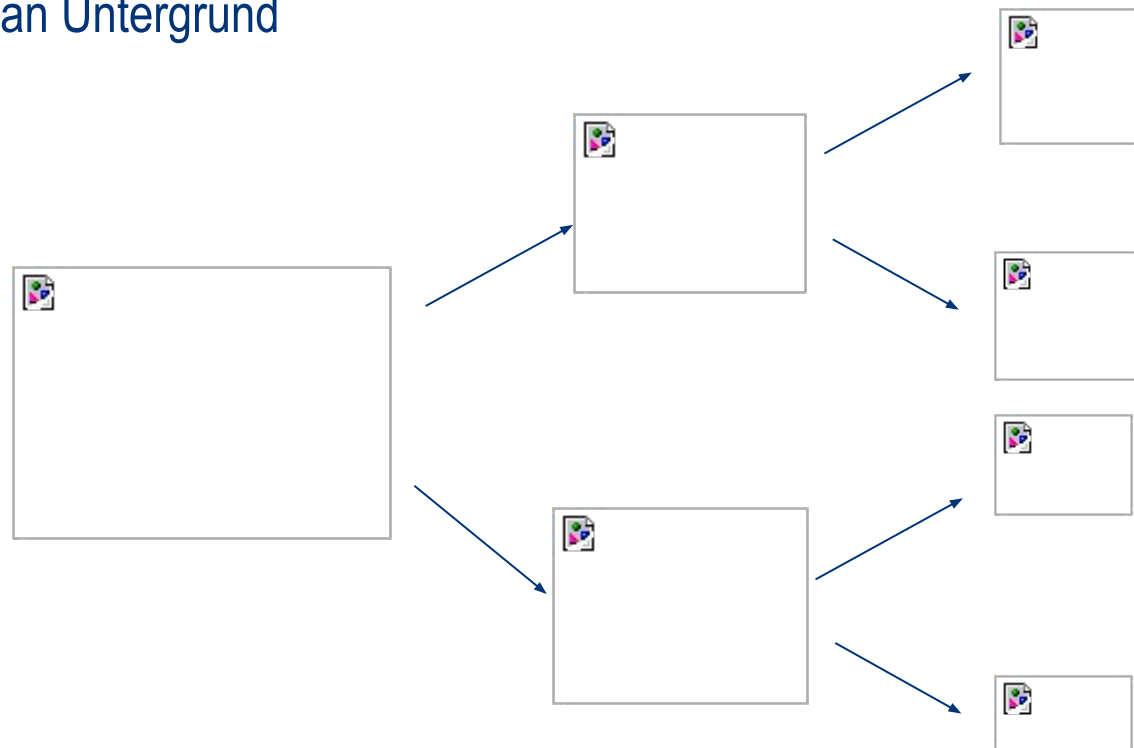






# Die Suche nach dem Higgs-Teilchen

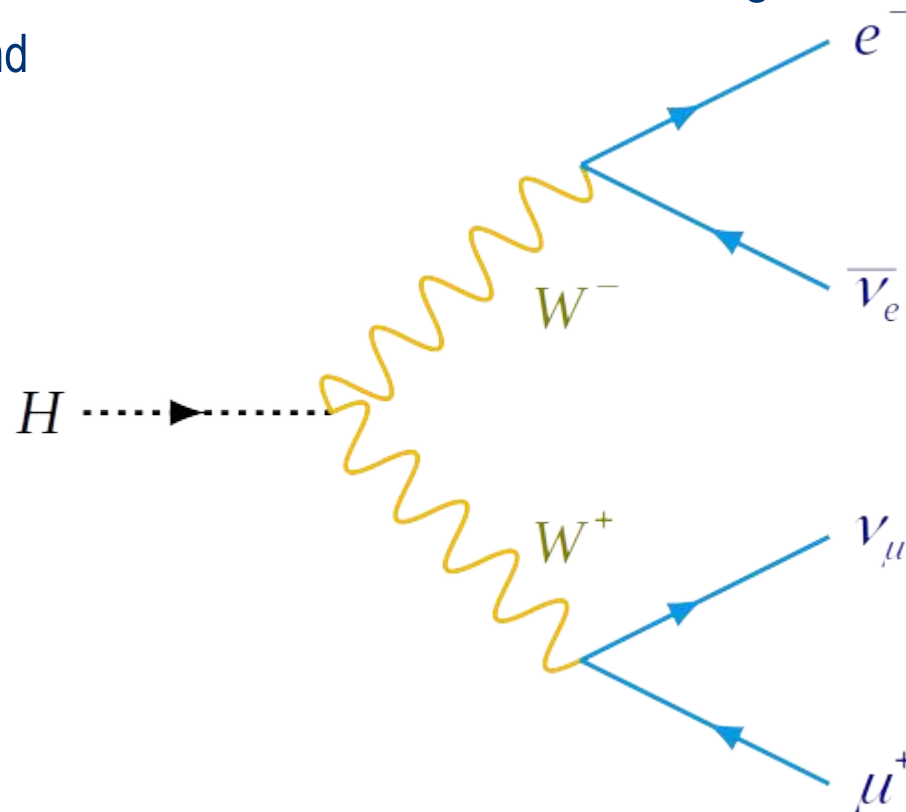
- ▶ Umwandlung des Higgs-Teilchens in 2 W-Teilchen
- ▶ W-Teilchen wandeln sich in Leptonen um
- ▶ Aber: Endprodukte können auch aus anderen Umwandlungen kommen
  - Dies nennt man Untergrund





# Die Suche nach dem Higgs-Teilchen

- ▶ Umwandlung des Higgs-Teilchens in 2 W-Teilchen
- ▶ W-Teilchen wandeln sich in Leptonen um
- ▶ Aber: Endprodukte können auch aus anderen Umwandlungen kommen
  - Dies nennt man Untergrund



# Higgs-Teilchen oder Untergrund?

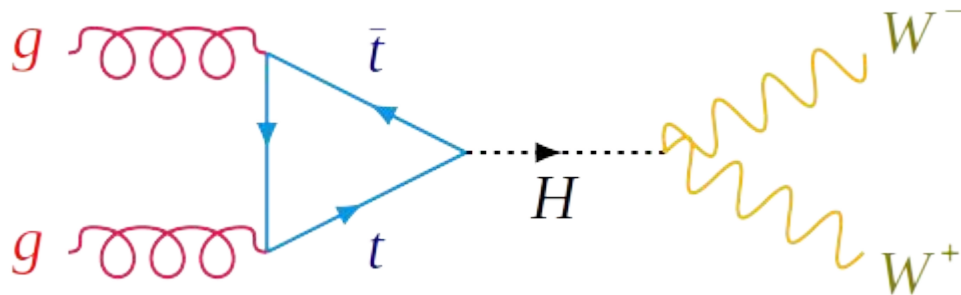
- ▶ Bei der Umwandlung eines Higgs-Teilchens in zwei W-Teilchen entstehen schließlich zwei elektrisch geladene Leptonen
- ▶ Diese bewegen unter einem bestimmten Winkel zueinander durch den Detektor
- ▶ Dieser Winkel liegt in einem charakteristischen Bereich
  - Messung des Winkels hilft Untergrundereignisse auszuschließen

## 2. Messaufgabe:

Suche nach W-Teilchen und Bestimmung des Winkels zwischen den detektierten Leptonen

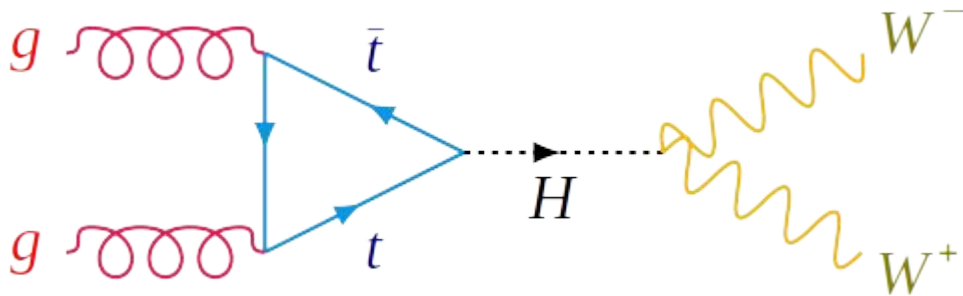
# Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:

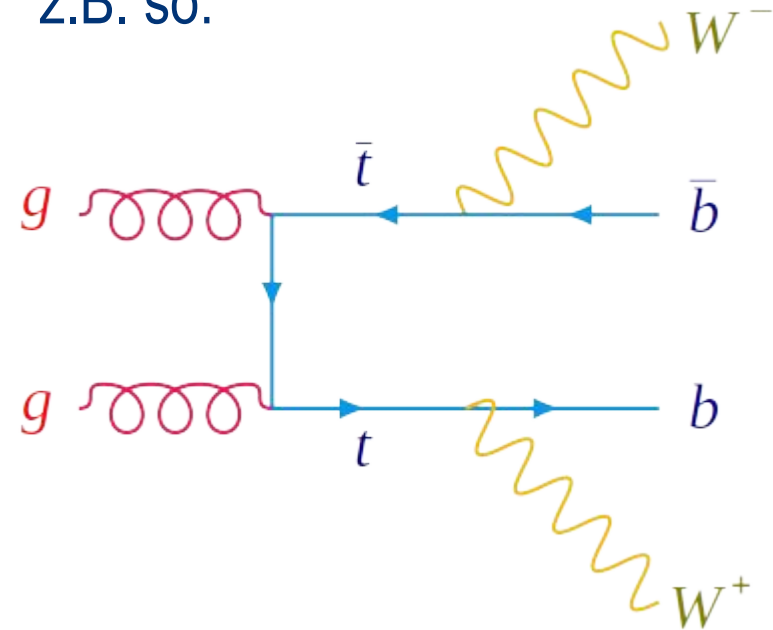


# Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:



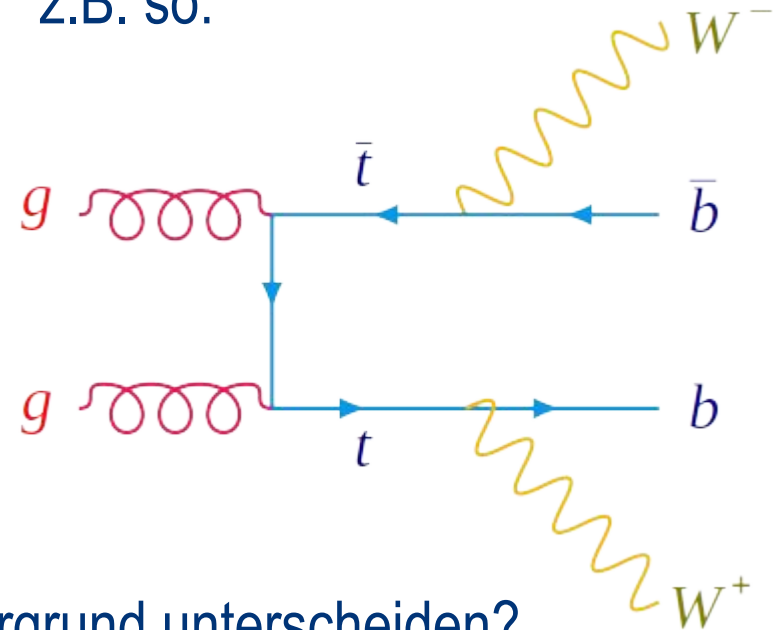
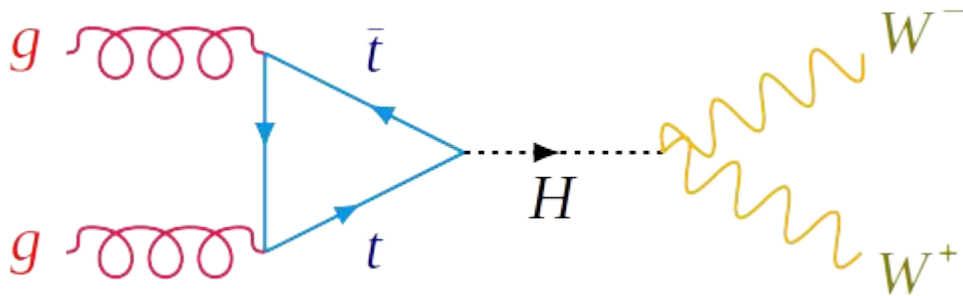
- ▶ ...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:



# Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:

- ▶ ...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:

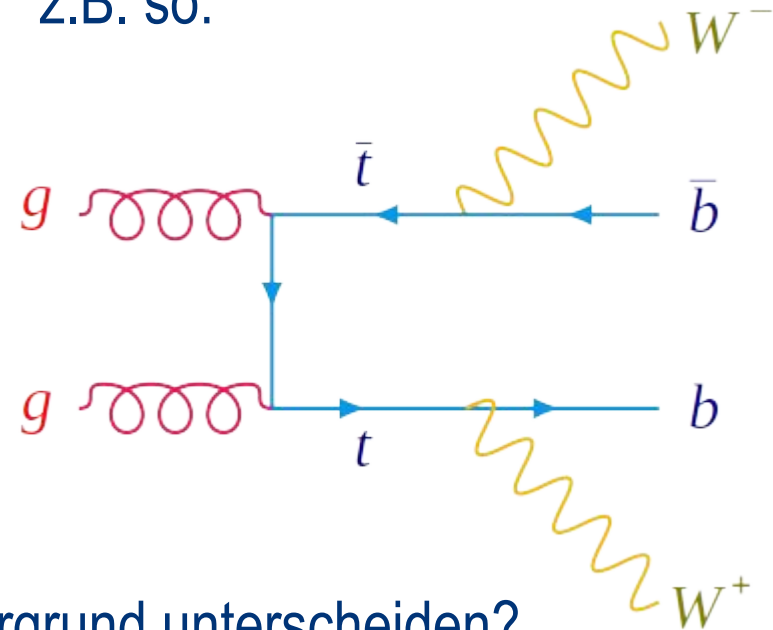
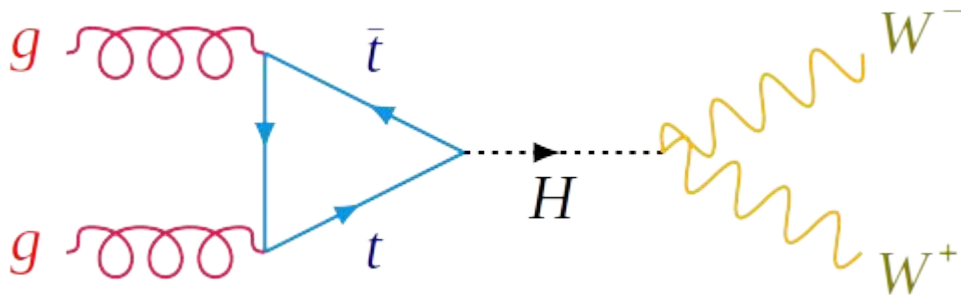


- ▶ Können wir Higgs-Teilchen von Untergrund unterscheiden?

# Higgs-Teilchen oder Untergrund?

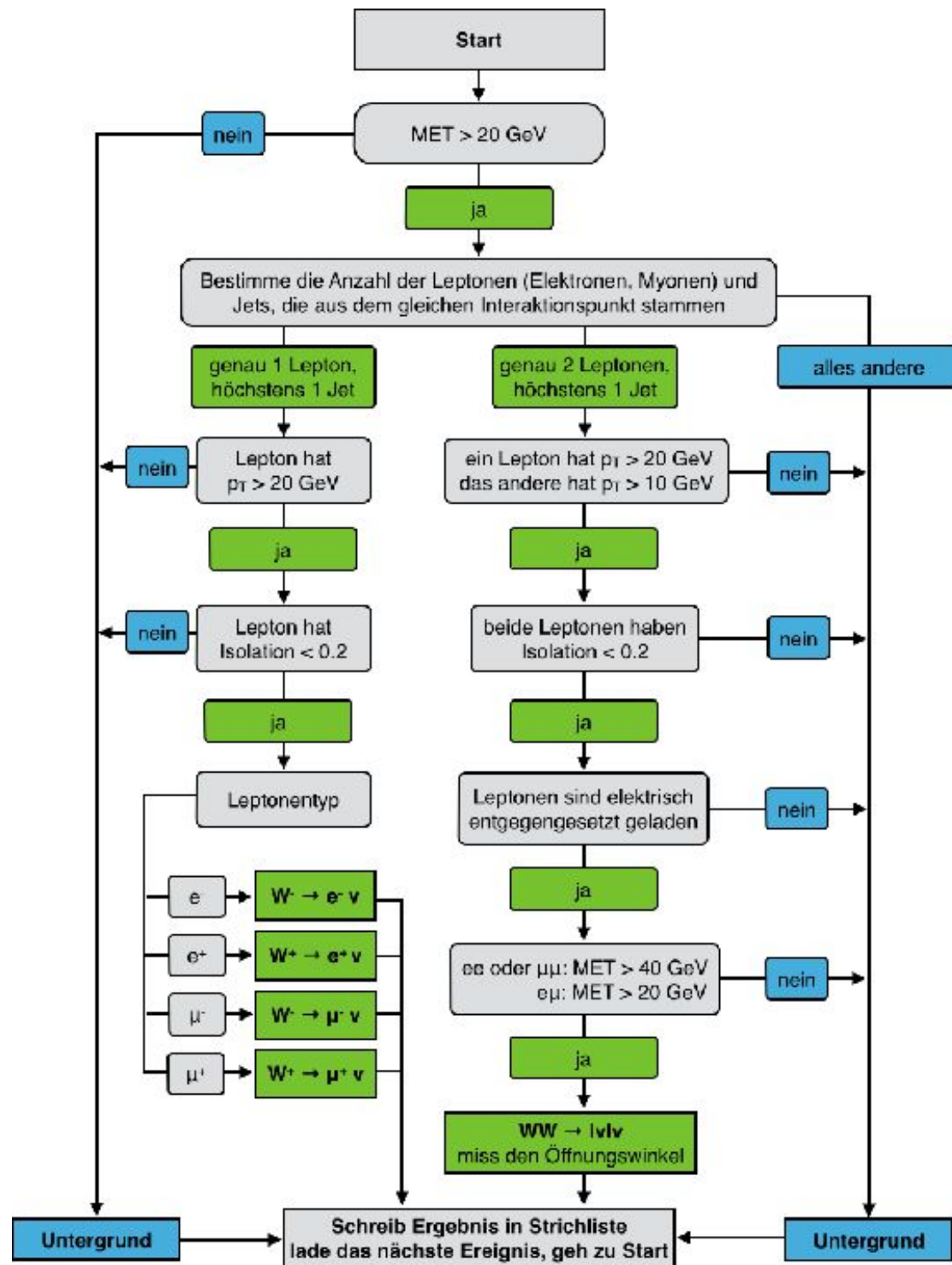
- ▶ Zwei W-Teilchen können von einem Higgs-Teilchen stammen:

- ▶ ...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:



- ▶ Können wir Higgs-Teilchen von Untergrund unterscheiden?
- ▶ Ja, durch Winkel  $\Delta\Phi$  zwischen den beiden Leptonen

2. Messaufgabe: Suche nach W-Bosonen und Bestimmen des Winkels!







**Gibt es Fragen soweit?**

?

?

?

?

?



## Aktiv werden!

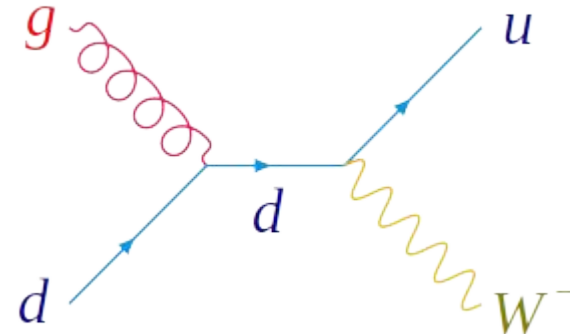
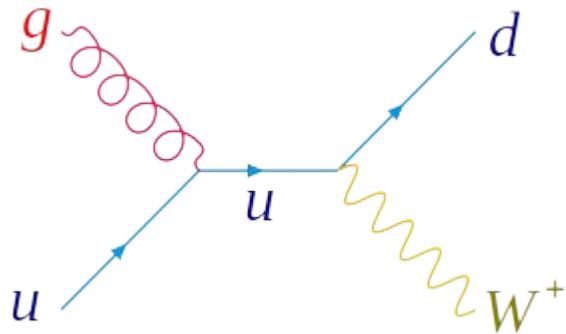
- ▶ Jedes Team erhält ein Datenpaket (Buchstabe A-T) mit Ereignisbildern aus 50 Kollisionen.
- ▶ Jedes Team durchsucht sein Datenpaket nach Signalereignissen für W- und WW-Zerfälle
- ▶ Strichliste nicht vergessen!

# Auswertung



# Das $W^+ / W^-$ -Verhältnis

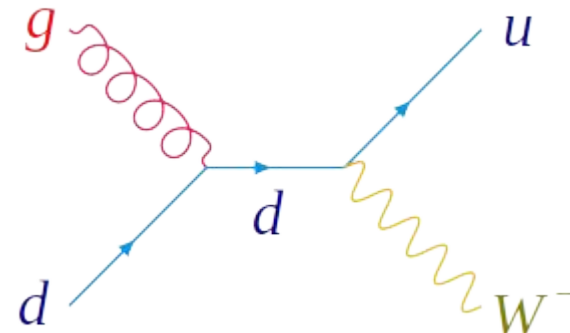
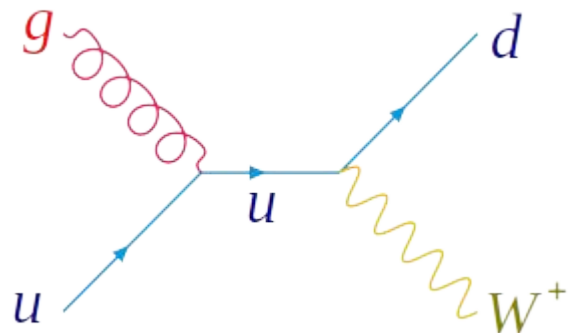
- ▶  $W^+$  und  $W^-$  Bosonen entstehen bei Quark-Gluon-Wechselwirkungen



- ▶ Erwartetes Verhältnis  $W^+ / W^- = 2 : 1$

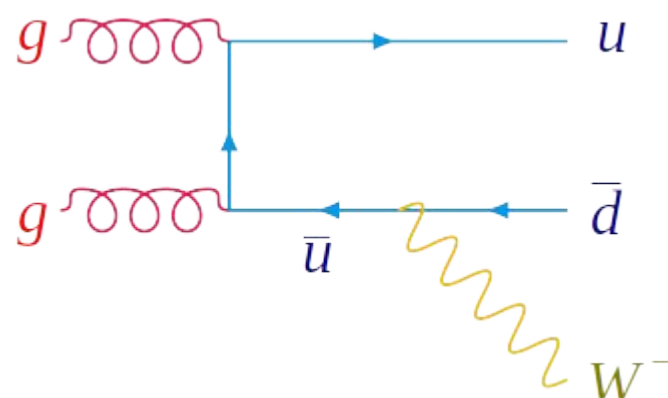
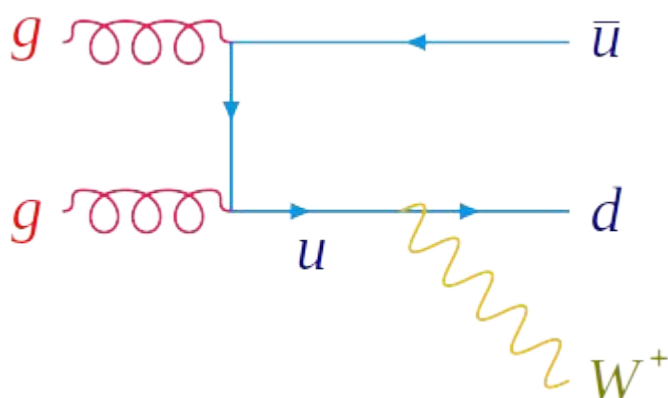
# Das $W^+ / W^-$ -Verhältnis

- ▶  $W^+$  und  $W^-$  Bosonen entstehen bei Quark-Gluon-Wechselwirkungen



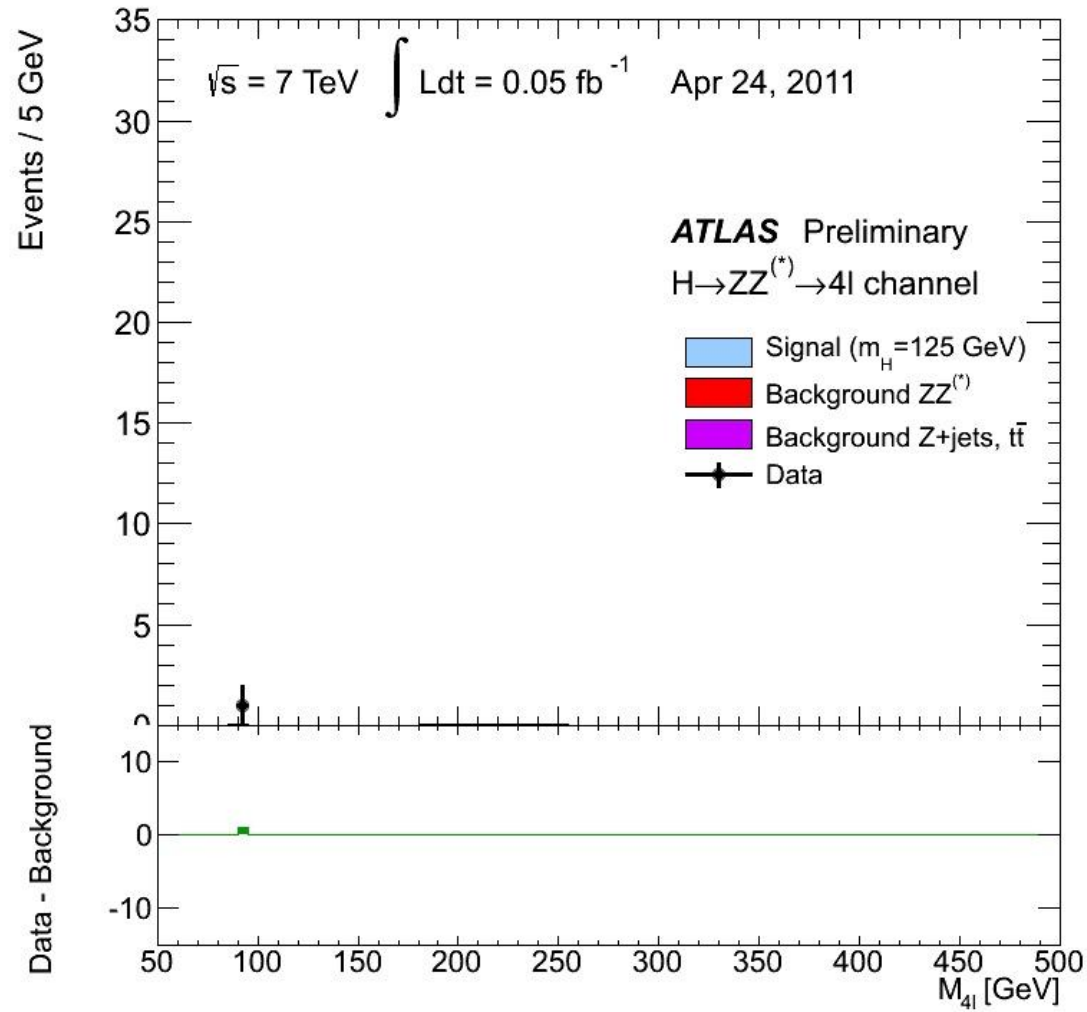
- ▶ Erwartetes Verhältnis  $W^+ / W^- = 2 : 1$

- ▶ Doch  $W$  Bosonen entstehen auch bei Quark Wechselwirkungen

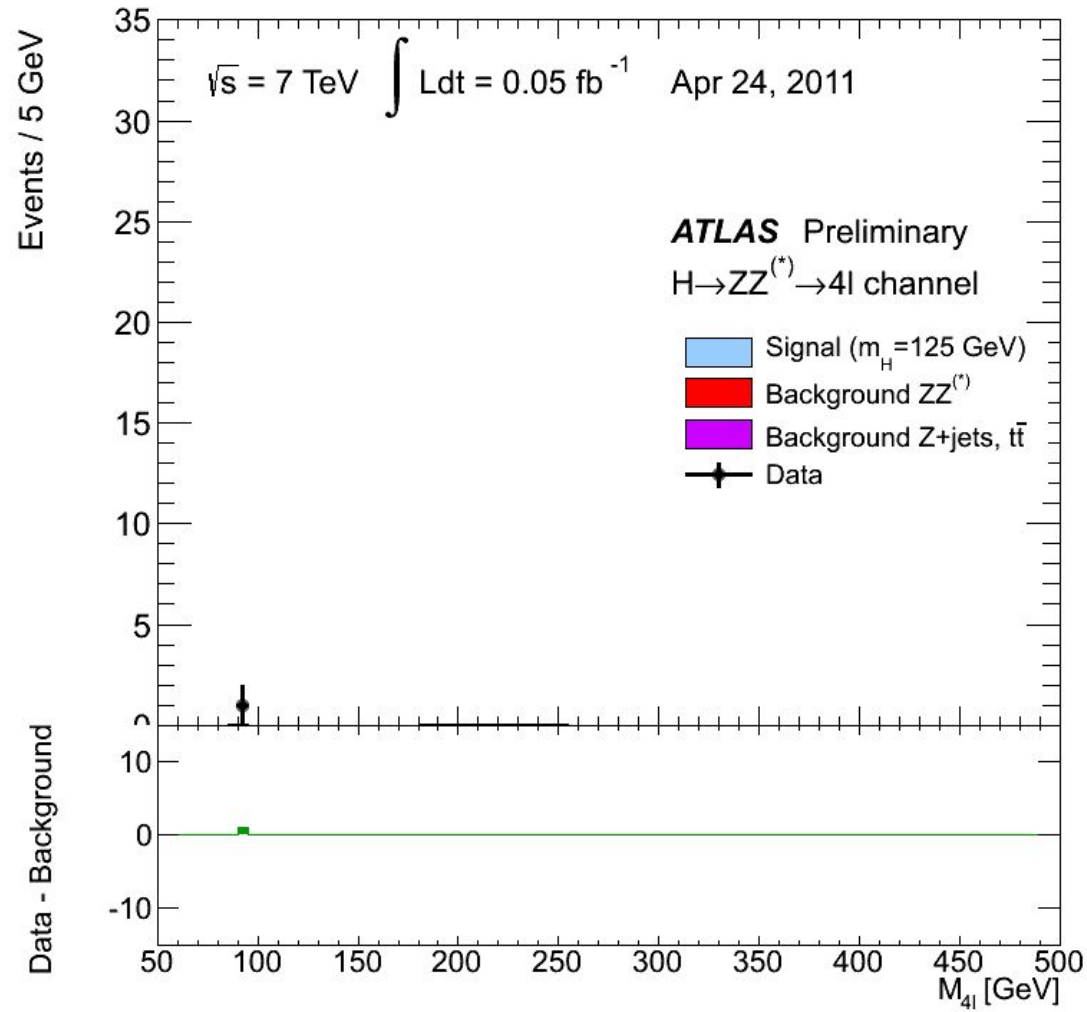


- ▶  $W^+$  und  $W^-$  entstehen dabei gleich häufig, was das Verhältnis verzerrt

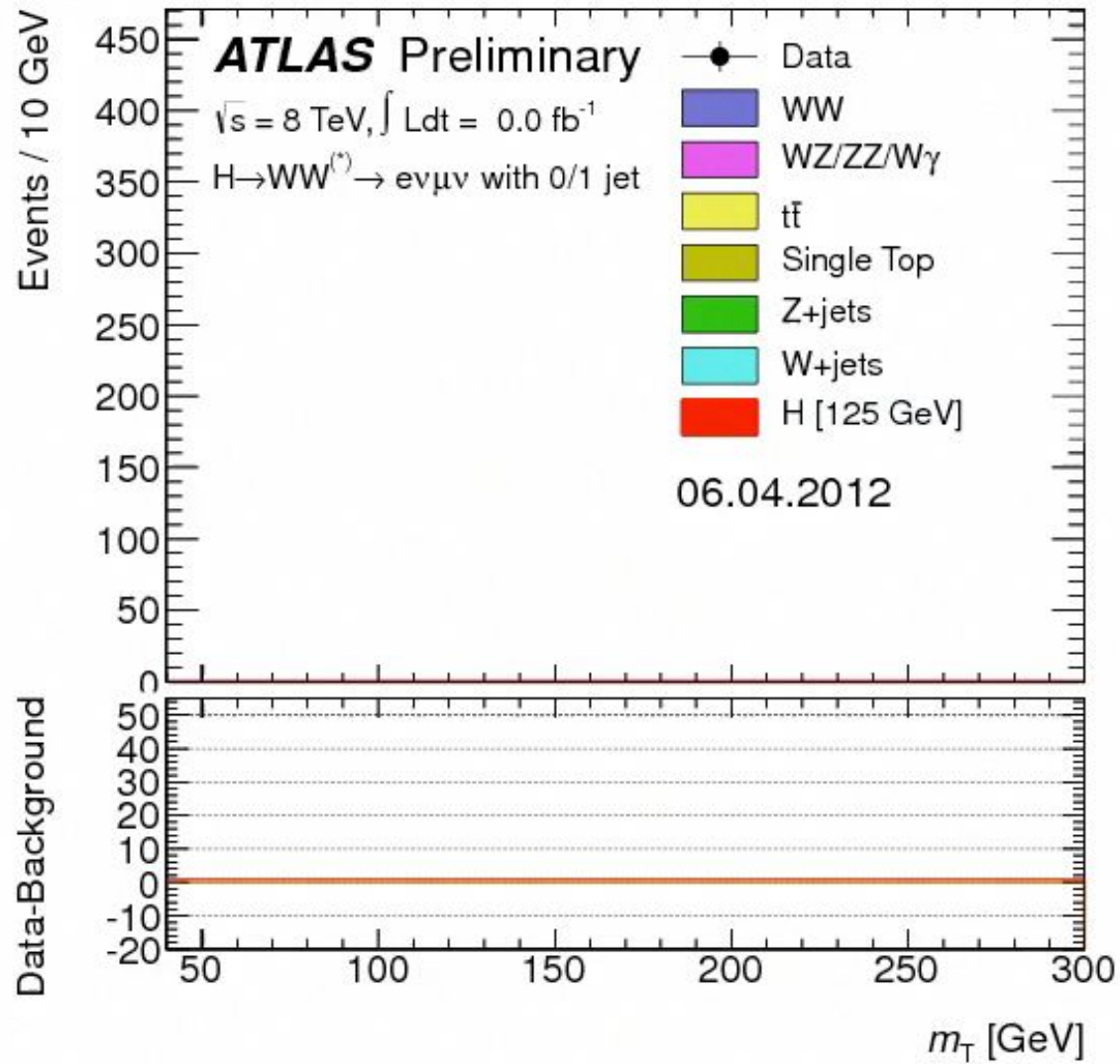
# Higgs Suche bei ATLAS



# Higgs Suche bei ATLAS

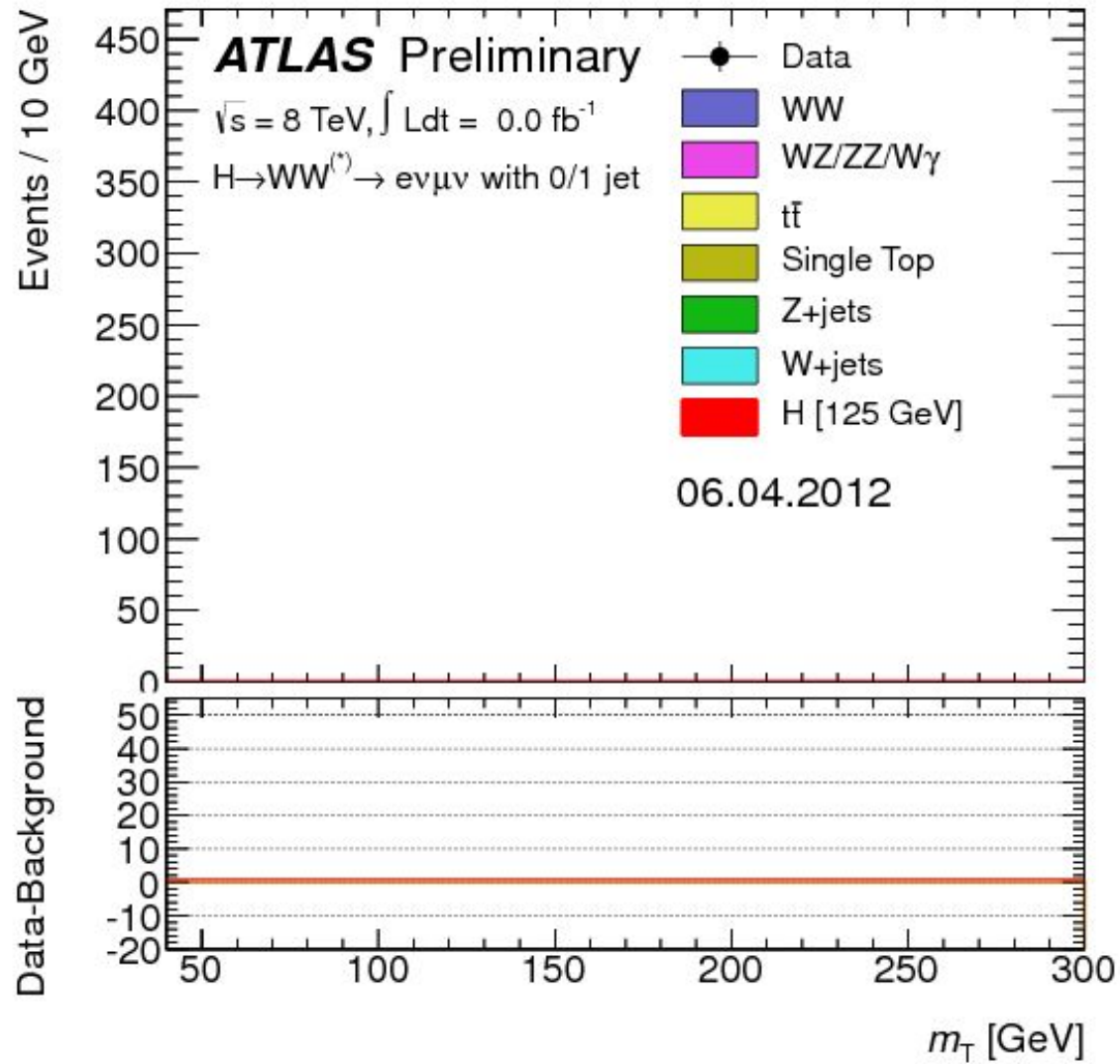


# Higgs Suche bei ATLAS



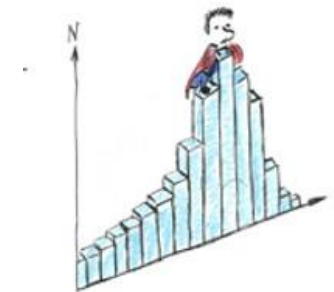


# Higgs Suche bei ATLAS



# Datenanalyse am CERN

- ▶ Auswahl „interessanter“ Kollisionen (Trigger)
- ▶ Zusammenfassung von benötigten Messgrößen (z.B. Winkel zwischen zwei Teilchen, Masse eines zerfallenen Teilchens...)
- ▶ ...oft in Histogramm (wie oft tritt ein bestimmter Wert auf?)
- ▶ Abschätzung von Messunsicherheiten
- ▶ Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und Simulationen
- ▶ ... das haben wir heute auch gemacht!



# Externe Bildnachweise

- CERN: 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 36, 38
- Wikipedia (Jens Maus): 5
- Wikipedia (Coolcaeser): 5
- FOX: 6,7
- The Nobel Prize in Physics 2008 © The Royal Swedish Academy of Sciences: 12
- Netzwerk Teilchenwelt: 13 - 60
- ATLAS: 35-51, 59, 63, 64
- <http://natronics.github.io/science-hack-day-2014/lhc-map/>: 37
- The Particle Zoo, [www.particlezoo.net](http://www.particlezoo.net): 54
- International Particle Physics Outreach Group, [www.physicsmasterclasses.org](http://www.physicsmasterclasses.org): 65



**Gibt es Fragen soweit?**

?

?

?

?

?