

Teilchenphysik Masterclasses

Das Leben, das Universum und der ganze Rest





"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?

Fundamentale Fragen

Wer?

Wie?

Wieviel?

Was?

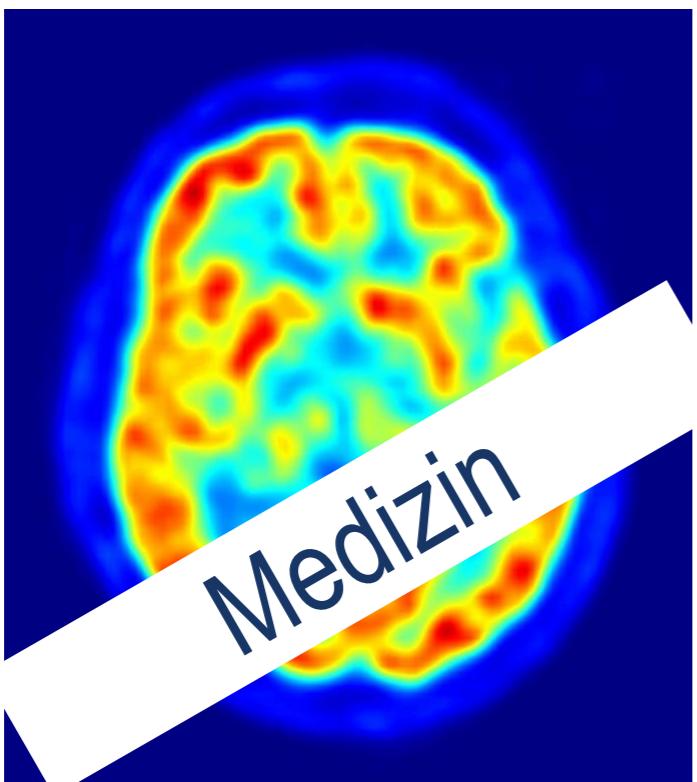
Wo?

Wann?

Warum?

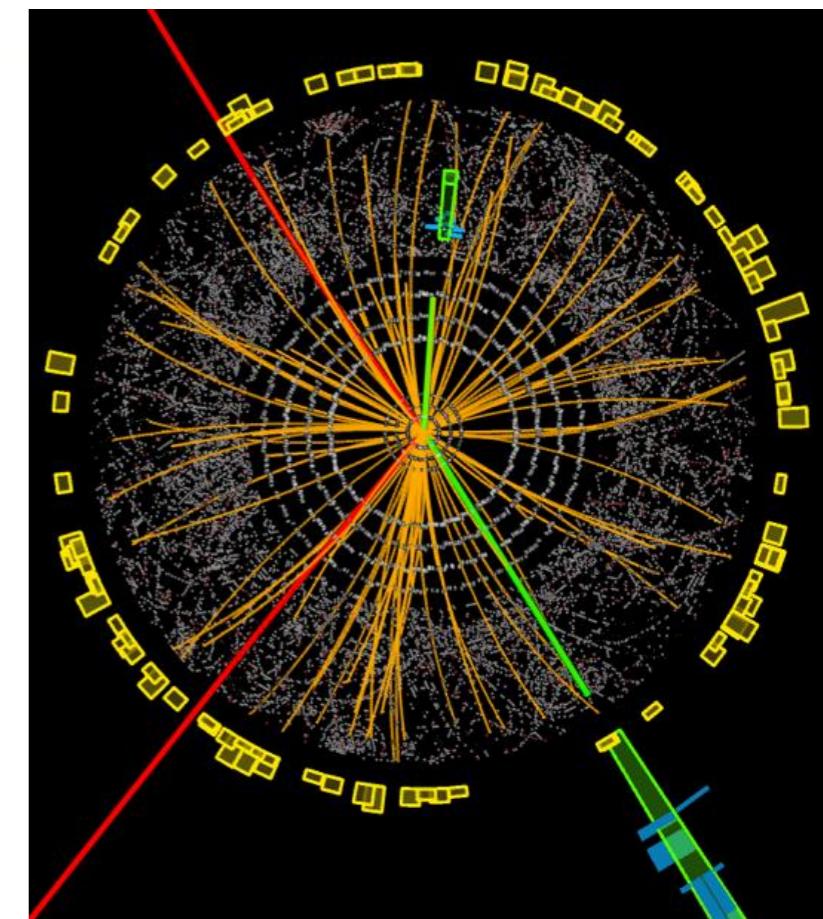
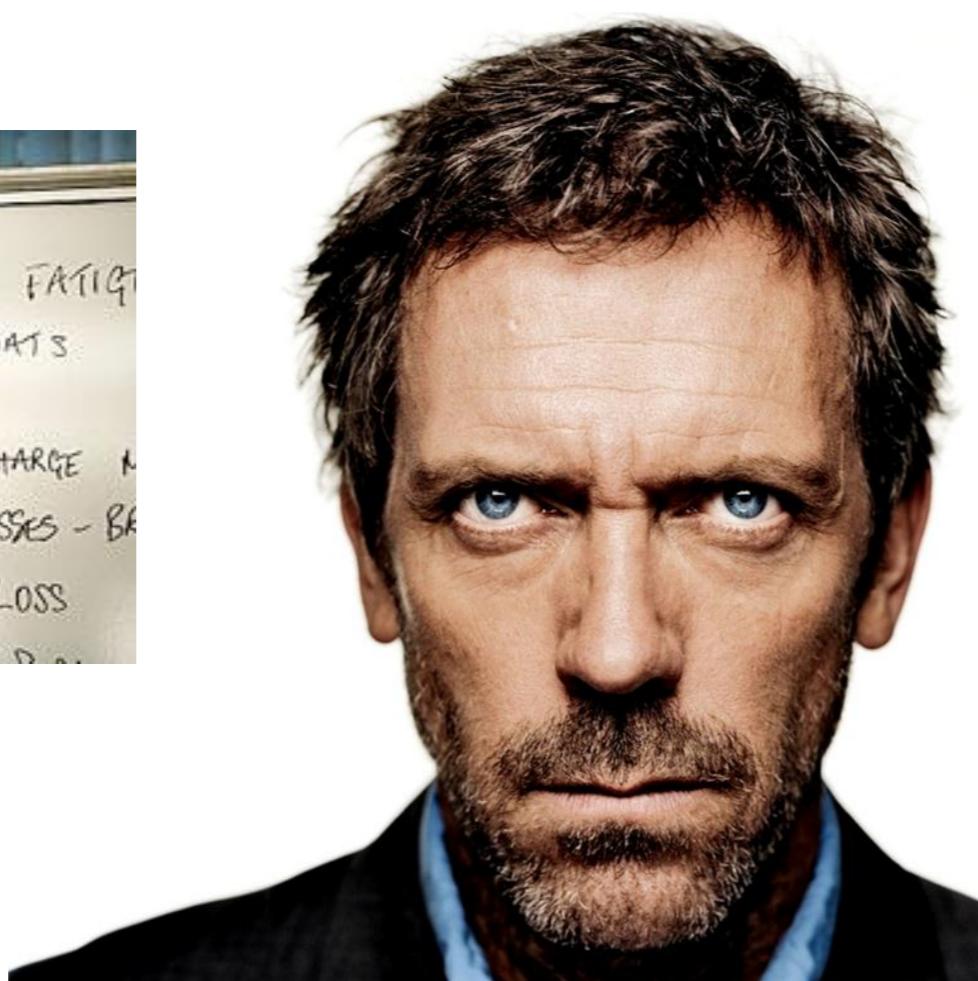
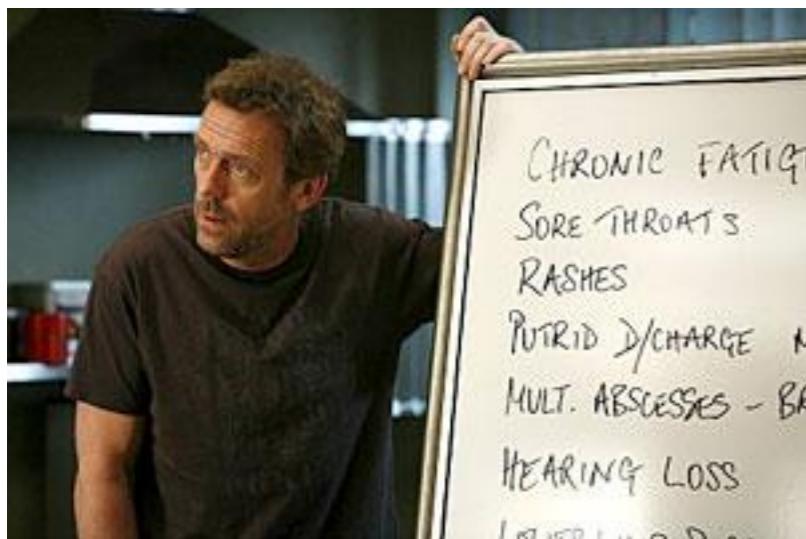
Warum Teilchenphysik?

- Interesse und Neugier!
- Weiterentwicklung von Technologien für Computerchips, Detektoren, Magnete uvm.



Wie forschen Teilchenphysiker?

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

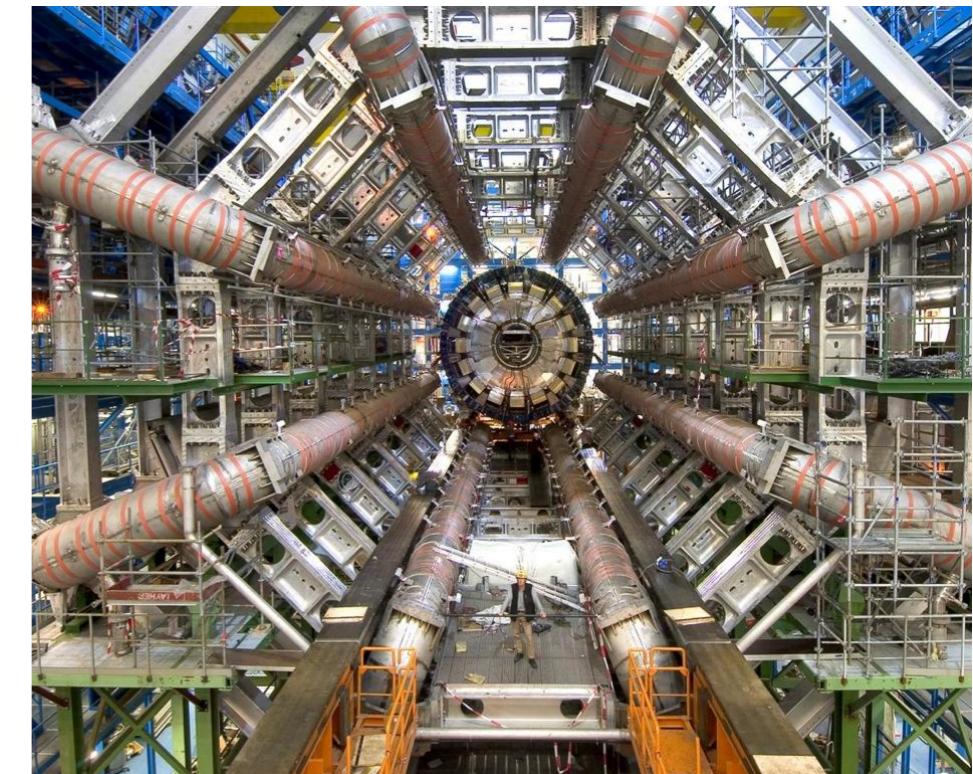


Wie forschen Teilchenphysiker?

- Medizin: teure, hochkomplexe Maschinen
- Teilchenphysik: teure, hochkomplexe Maschinen



\$1.5 Millionen



\$450 Millionen

Wie forschen Teilchenphysiker?

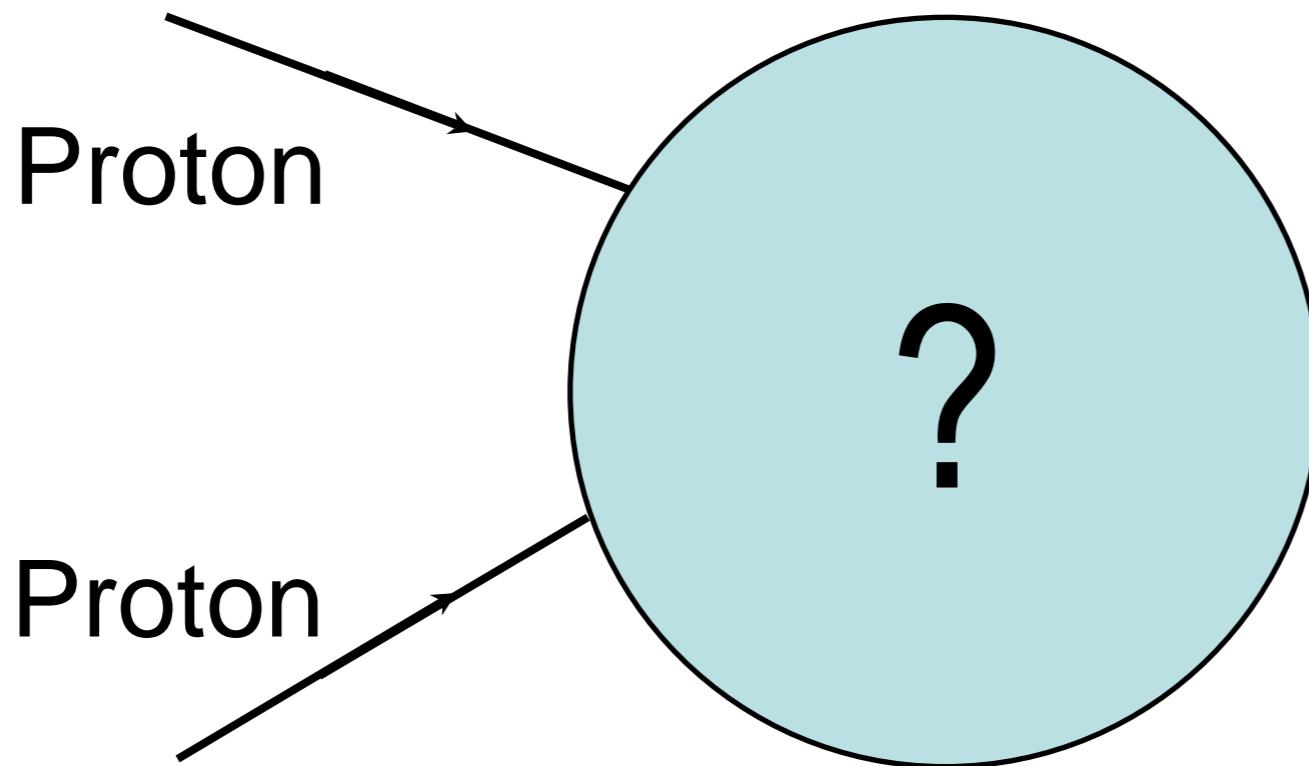
Proton

Proton

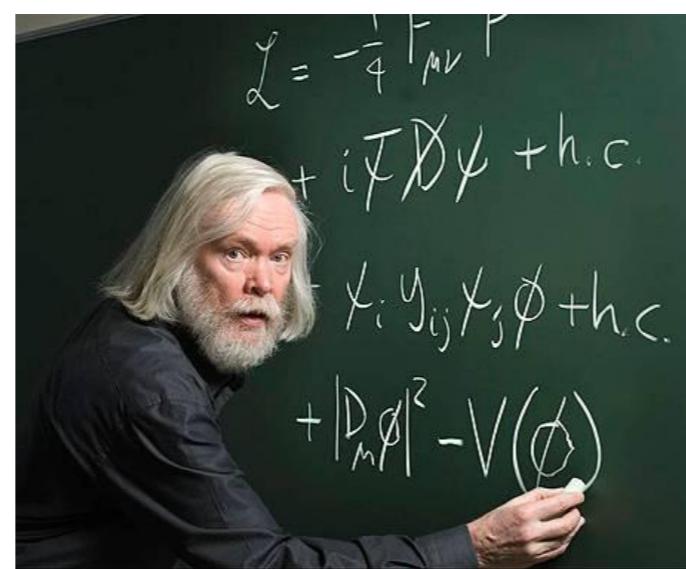


Beschleuniger

Wie forschen Teilchenphysiker?

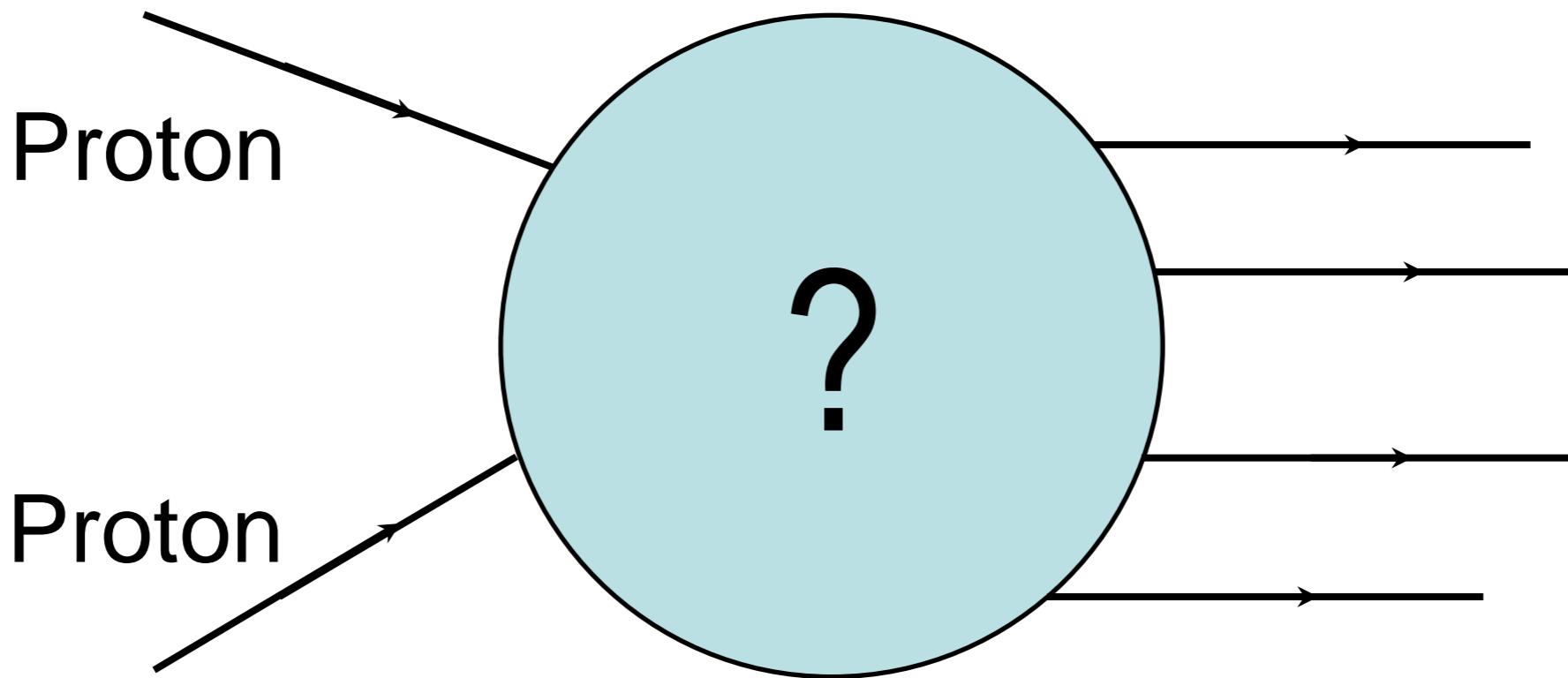


Beschleuniger

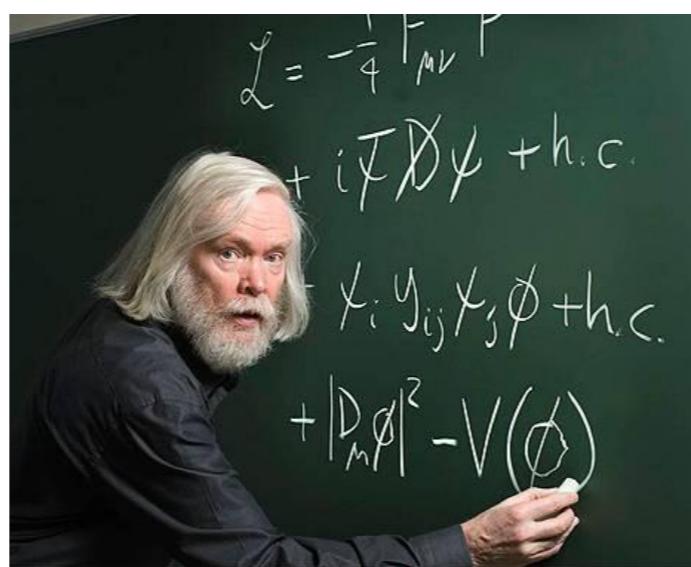


Theorie

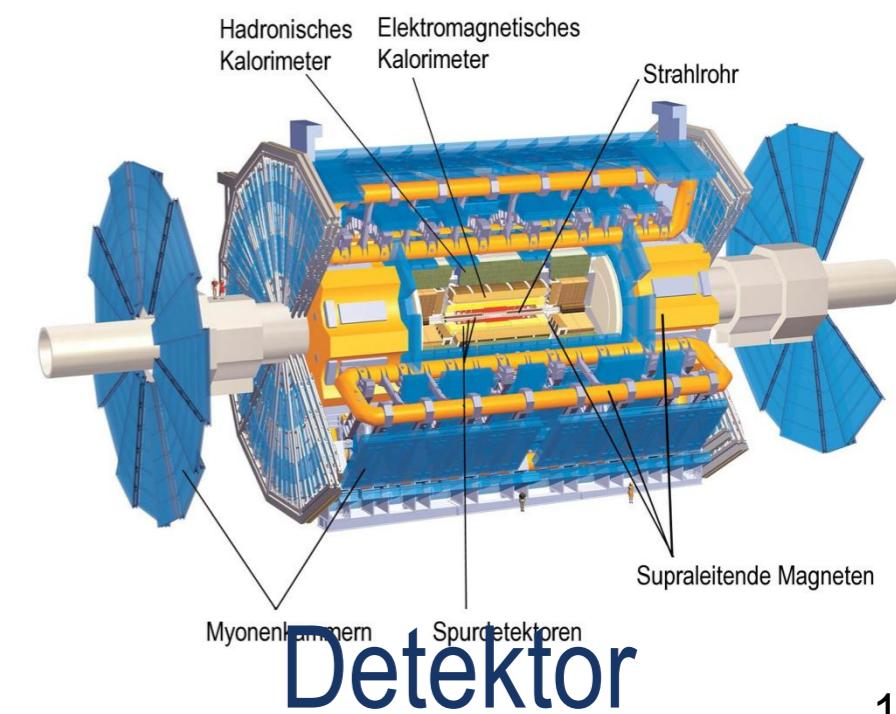
Wie forschen Teilchenphysiker?



Beschleuniger



Theorie



Detektor

Teil 2: Theoretisches

Wie Physiker sich die Welt vorstellen

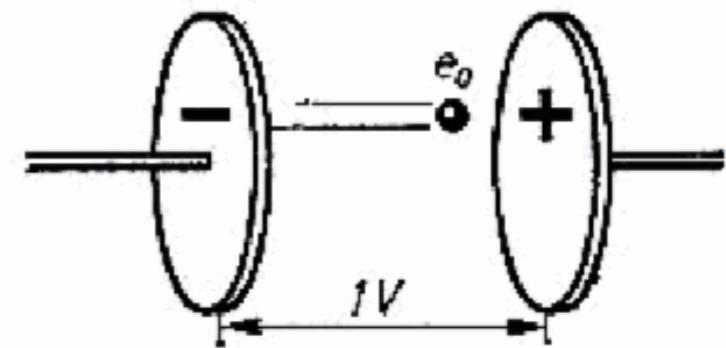
Elektronenvolt

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

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

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

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

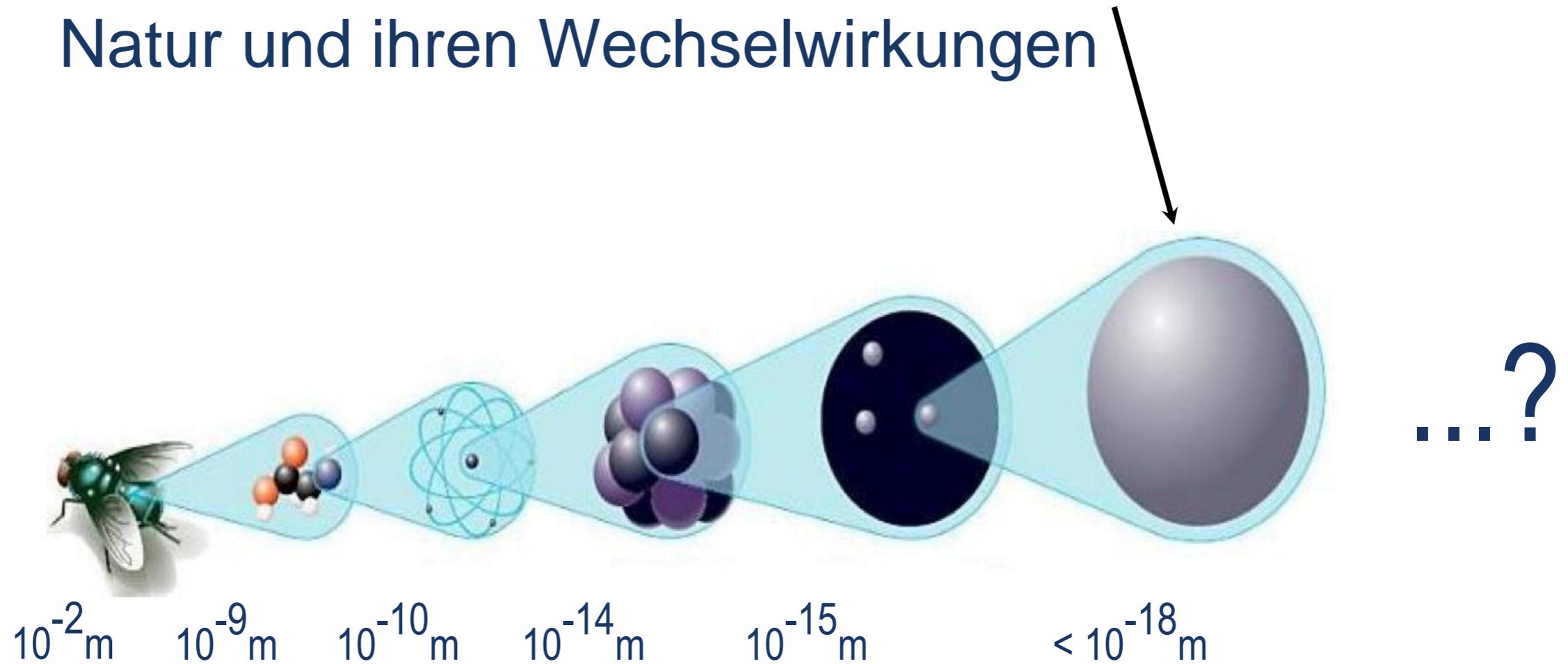


Teilchenphysiker \longrightarrow Lichtgeschwindigkeit $c = 1$

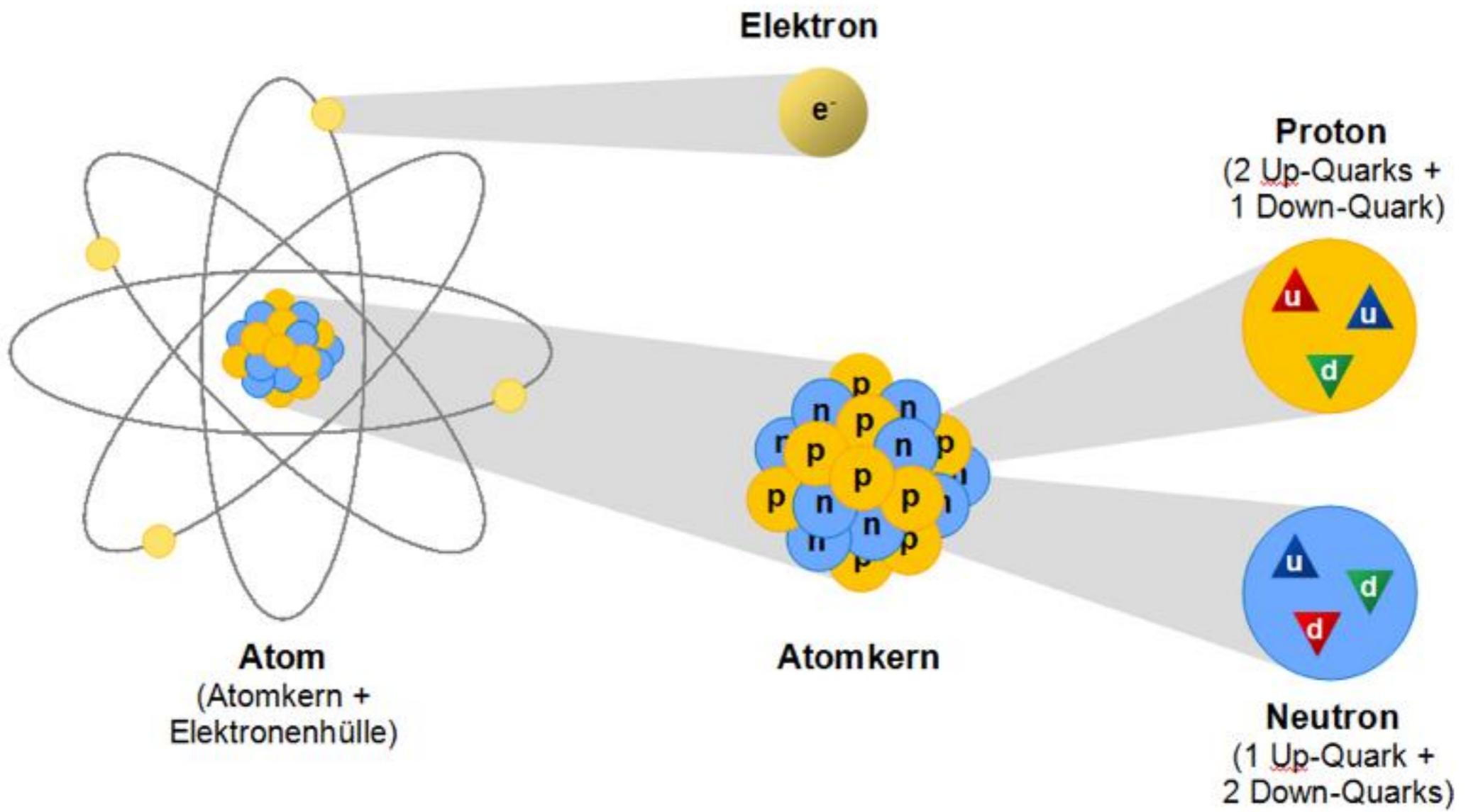
- Wegen $E=mc^2$ können Massen in eV angegeben werden!

Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen



Bausteine der Materie



- alle stabile Materie ist aufgebaut aus Elektronen und Up und Down Quarks

Bausteine der Materie

Auf ins Unbekannte!

1. Nehmt euch die Teilchensteckbriefe vor euch!
2. Sortiert euch nach den jeweiligen Massen eurer Teilchen!
3. Sortiert euch in Gruppen identischer elektrischer Ladung!
4. Sortiert euch in den jeweiligen Gruppen nach der Masse eurer Teilchen!

Bausteine der Materie

Drei Generationen der Materie (Fermionen)			
	I	II	III
Massen →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name →	u up	c charm	t top
Quarks	d down	s strange	b bottom
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	
<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	
0	0	0	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	

Bausteine der Materie

Bausteine aller
stabilen Materie

Drei Generationen der Materie (Fermionen)			
	I	II	III
Massen	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	up	charm	top
Quarks			
	d	s	b
Massen	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
Ladung	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	down	strange	bottom
Leptonen			
	e	μ	τ
Massen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
Ladung	-1	-1	-1
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	Elektron	Myon	Tau
	ν_e	ν_μ	ν_τ
Massen	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
Ladung	0	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	Elektron- Neutrino	Myon- Neutrino	Tau- Neutrino

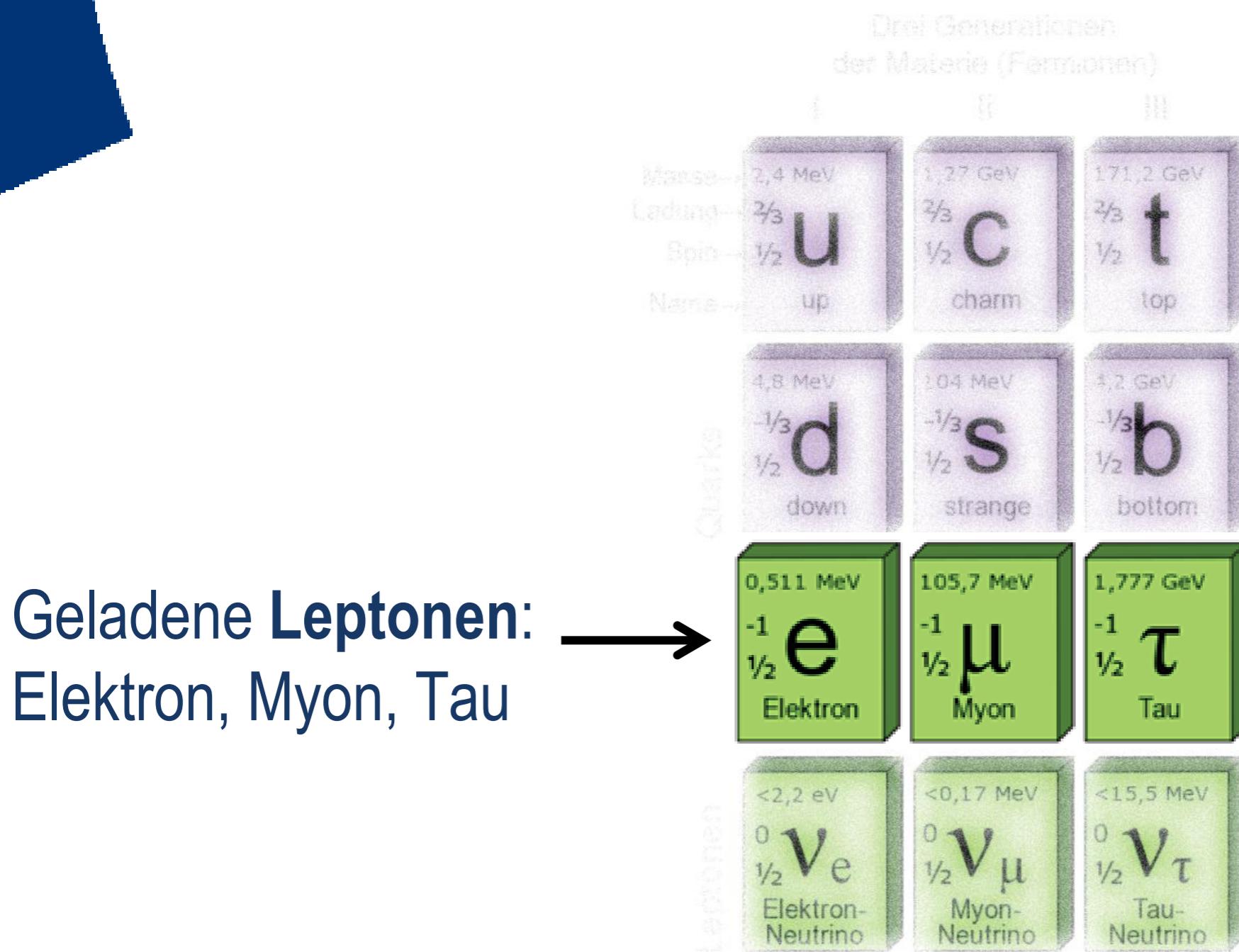
Bausteine der Materie

Bausteine aller
stabilen Materie

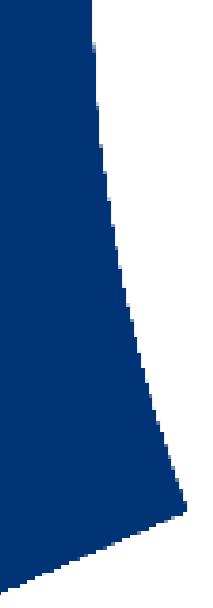
Drei Generationen der Materie (Fermionen)			
	I	II	III
Massen	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
Quarks	d down	s strange	b bottom
Leptonen			
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau
	$<2,2$ eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	$<0,17$ MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	$<15,5$ MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino

Schwerere
Kopien der ersten
Generation,
instabil

Bausteine der Materie



Bausteine der Materie



Geladene Leptonen: →
Elektron, Myon, Tau

Drei Gitterstellen der Materie (Fermionen)		
Quarks	u	c
Masse → 2,4 MeV Ladung → $\frac{2}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Name → up	2,27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ top
d	s	b
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ bottom
Leptonen		
e	μ	τ
0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ Tau
ν_e	ν_μ	ν_τ
<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ Elektron-Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ Myon-Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ Tau-Neutrino

- “leptos” griech für “klein”
→ leichte Teilchen
- elektrische Ladung = -1

Bausteine der Materie

Drei Gitterelemente der Materie (Fermionen)		
$m_u = 2,4 \text{ MeV}$ Ladung $\frac{2}{3}$ Spin $\frac{1}{2}$ Name up	$m_c = 1,27 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ charm	$m_t = 171,2 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ top
$m_d = 4,8 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ down	$m_s = 104 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ strange	$m_b = 4,2 \text{ GeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ bottom
$m_e = 0,511 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	$m_\mu = 105,7 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	$m_\tau = 1,777 \text{ GeV}$ -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau
$m_{\nu_e} < 2,2 \text{ eV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	$m_{\nu_\mu} < 0,17 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	$m_{\nu_\tau} < 15,5 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino

Neutrinos: zu jeder
Sorte Leptonen eine Art



Bausteine der Materie

Drei Gitterelemente der Materie (Fermionen)		
$m_u = 2,4 \text{ MeV}$ $Q_u = \frac{2}{3}$ $S_u = \frac{1}{2}$ $N_u = \text{up}$	$m_c = 1,27 \text{ GeV}$ $Q_c = \frac{2}{3}$ $S_c = \frac{1}{2}$ $N_c = \text{charm}$	$m_t = 171,2 \text{ GeV}$ $Q_t = \frac{2}{3}$ $S_t = \frac{1}{2}$ $N_t = \text{top}$
$m_d = 4,8 \text{ MeV}$ $Q_d = -\frac{1}{3}$ $S_d = \frac{1}{2}$ $N_d = \text{down}$	$m_s = 104 \text{ MeV}$ $Q_s = -\frac{1}{3}$ $S_s = \frac{1}{2}$ $N_s = \text{strange}$	$m_b = 4,2 \text{ GeV}$ $Q_b = -\frac{1}{3}$ $S_b = \frac{1}{2}$ $N_b = \text{bottom}$
$m_e = 0,511 \text{ MeV}$ $Q_e = -1$ $S_e = \frac{1}{2}$ $N_e = \text{Elektron}$	$m_\mu = 105,7 \text{ MeV}$ $Q_\mu = -1$ $S_\mu = \frac{1}{2}$ $N_\mu = \text{Myon}$	$m_\tau = 1,777 \text{ GeV}$ $Q_\tau = -1$ $S_\tau = \frac{1}{2}$ $N_\tau = \text{Tau}$
$m_{\nu_e} < 2,2 \text{ eV}$ $Q_{\nu_e} = 0$ $S_{\nu_e} = \frac{1}{2}$ $N_{\nu_e} = \text{Elektron-Neutrino}$	$m_{\nu_\mu} < 0,17 \text{ MeV}$ $Q_{\nu_\mu} = 0$ $S_{\nu_\mu} = \frac{1}{2}$ $N_{\nu_\mu} = \text{Myon-Neutrino}$	$m_{\nu_\tau} < 15,5 \text{ MeV}$ $Q_{\nu_\tau} = 0$ $S_{\nu_\tau} = \frac{1}{2}$ $N_{\nu_\tau} = \text{Tau-Neutrino}$

Neutrinos: zu jeder Sorte Leptonen eine Art

- “neutrino” für neutral
- elektrische Ladung = 0
- sehr kleine Massen
- wechselwirken kaum!

Bausteine der Materie

Quarks: einzigen stark
wechselwirkenden
Teilchen



Drei Gitterelemente der Materie (Fermionen)		
Quarks		
2,4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1,27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau
<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino

Bausteine der Materie

Quarks: einzigen stark
wechselwirkenden
Teilchen



Drei Gitterelemente der Materie (Fermionen)		
Quarks	Ladung	Massen
u	$\frac{2}{3}$	2,4 MeV
d	$\frac{1}{2}$	4,8 MeV
e	$\frac{1}{2}$	0,511 MeV
c	$\frac{2}{3}$	1,27 GeV
s	$\frac{1}{2}$	104 MeV
μ	$\frac{1}{2}$	105,7 MeV
t	$\frac{2}{3}$	171,2 GeV
b	$\frac{1}{2}$	4,2 GeV
τ	$\frac{1}{2}$	1,777 GeV
ν_e	$\frac{1}{2}$	<2,2 eV
ν_μ	$\frac{1}{2}$	<0,17 MeV
ν_τ	$\frac{1}{2}$	<15,5 MeV
up		
charm		
top		
down		
strange		
Tau		
Elektron		
Myon		
Tau-Neutrino		
Elektron-Neutrino		
Myon-Neutrino		

- elektrische Ladung **nicht** ganzzahlig!
- nur im Verbund zu beobachten

Elementarteilchen

- haben keine Ausdehnung (punktförmig), nicht weiter teilbar (nach gegenwärtigem Stand der Forschung)
- haben Eigenschaften: Masse, Ladung, Spin...
- jedes geladene Teilchen hat ein entgegengesetzt geladenes Anti-Teilchen (mit der gleichen Masse)

Was ist Teilchenphysik?

- Lehre von den fundamentalen Bausteinen der Natur und ihren Wechselwirkungen.

Gravitation



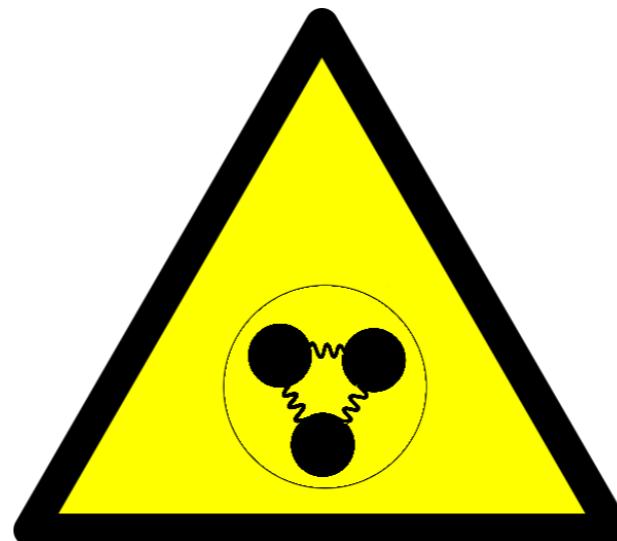
Elektro-
magnetismus



schwache
Kraft



starke
Kraft



Wechselwirkungen

- 4 Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene



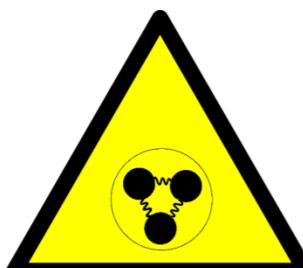
Planetenbewegung



Elektromagnetische Wellen, Zusammenhalt von Atomen, Chemie, Magnetismus



Kernzerfälle (Betazerfall), Kernfusion, Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie



Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen

Wechselwirkungen

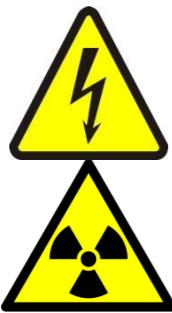
- Jemand telefoniert mit dem Handy
- Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um
- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

Wechselwirkungen



- Jemand telefoniert mit dem Handy
- Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um
- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

Wechselwirkungen



Jemand telefoniert mit dem Handy

Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um

- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen
- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

Wechselwirkungen



Jemand telefoniert mit dem Handy



Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um



Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen

- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus
- Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

Wechselwirkungen



Jemand telefoniert mit dem Handy



Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um



Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen



Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus

- Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein
- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

Wechselwirkungen



Jemand telefoniert mit dem Handy



Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um



Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen



Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein

- Ein Glas fällt vom Tisch
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

Wechselwirkungen



Jemand telefoniert mit dem Handy



Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um



Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen



Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein



Ein Glas fällt vom Tisch

- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

Wechselwirkungen



Jemand telefoniert mit dem Handy



Ein Atomkern wandelt sich durch Betazerfall in einen anderen um



Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich die Protonen untereinander abstoßen



Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



Zwei Atome gehen eine chemische Verbindung ein



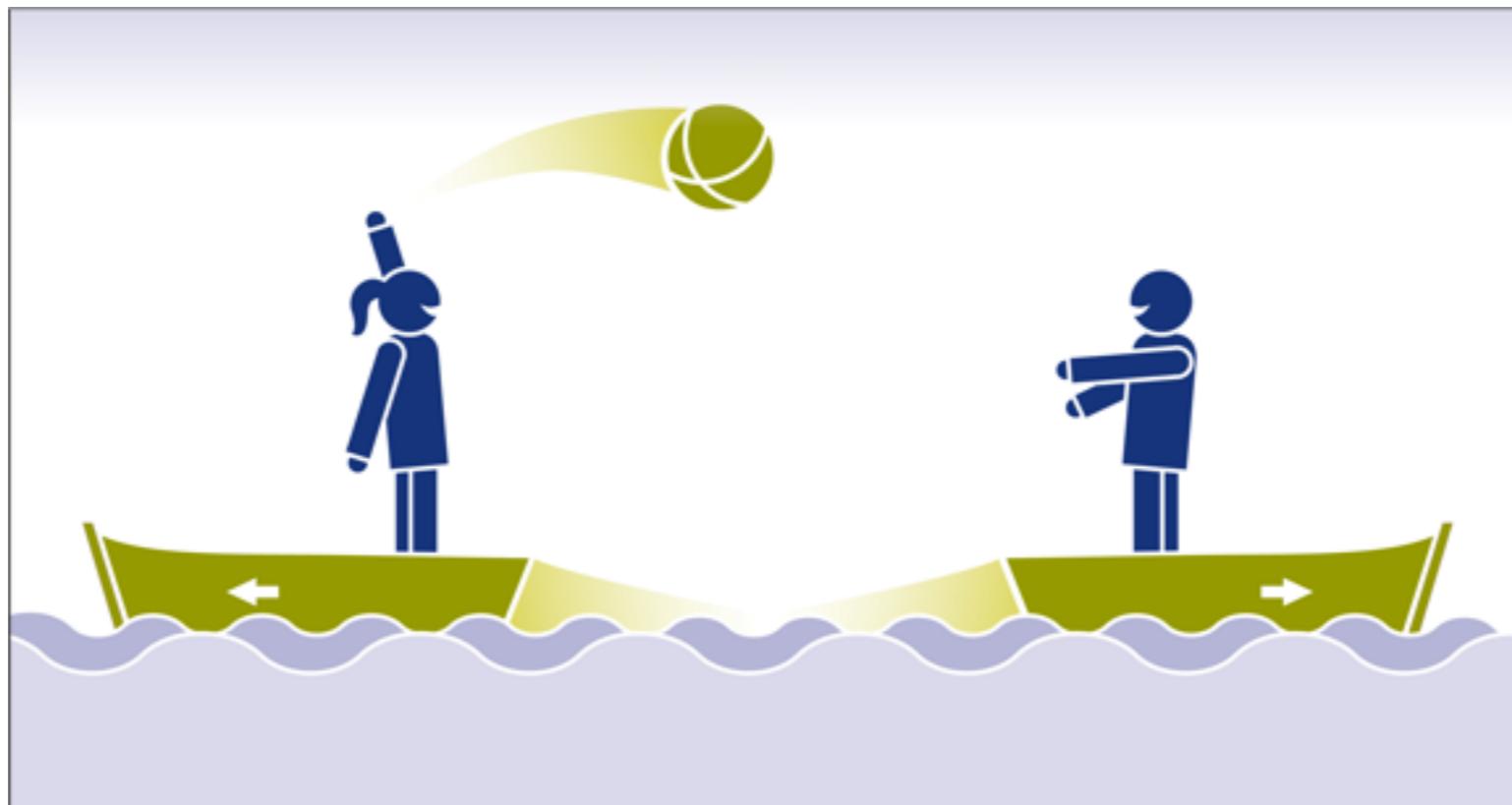
Ein Glas fällt vom Tisch



Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton

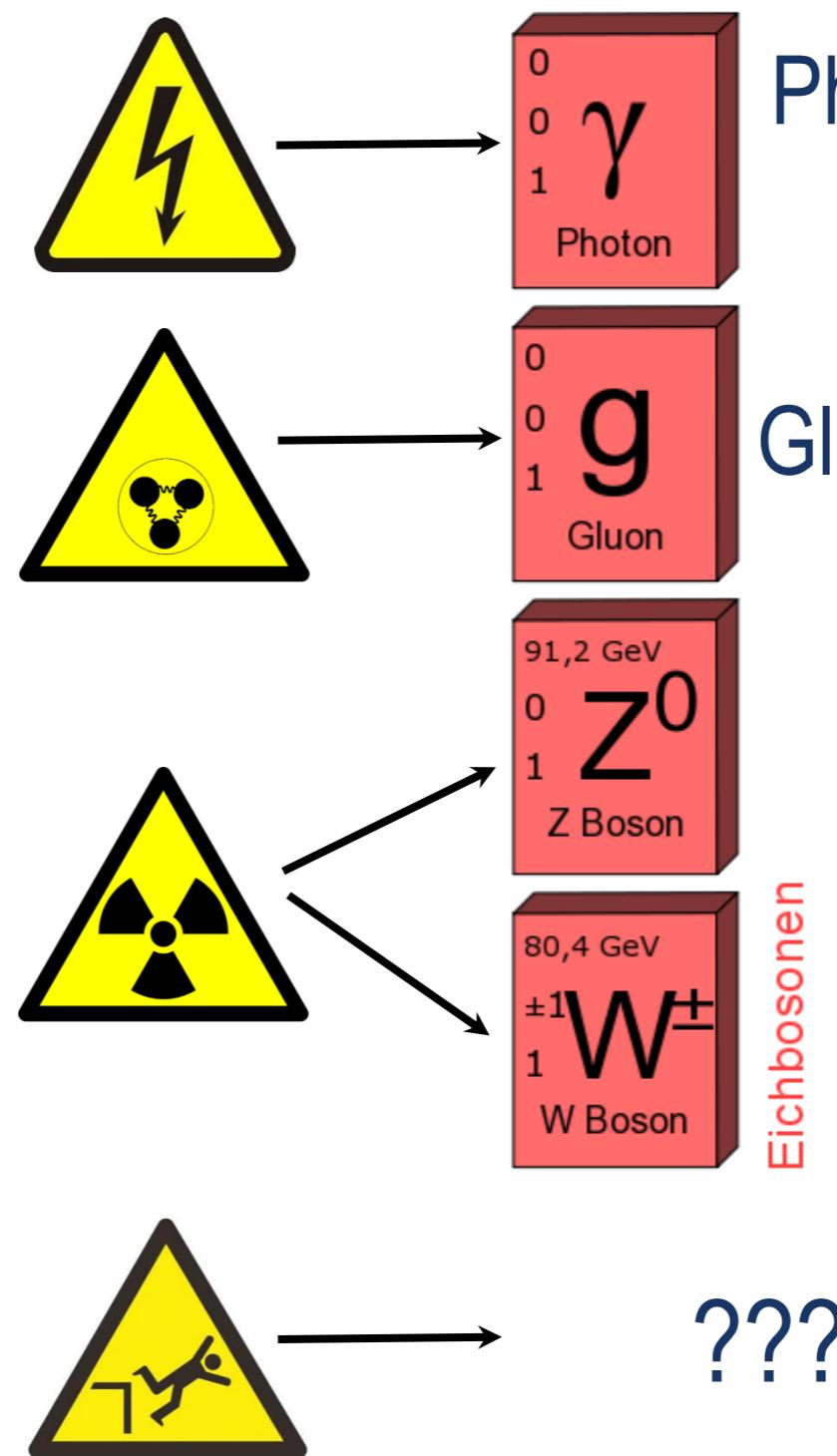
Wechselwirkungen, wie?

- durch Austauschteilchen



- Quarks und Leptonen “kommunizieren” untereinander indem sie **Austauschteilchen** aussenden/einfangen
- Dabei gelten gewisse Regeln: **Erhaltungssätze**

Wechselwirkungen, wer?



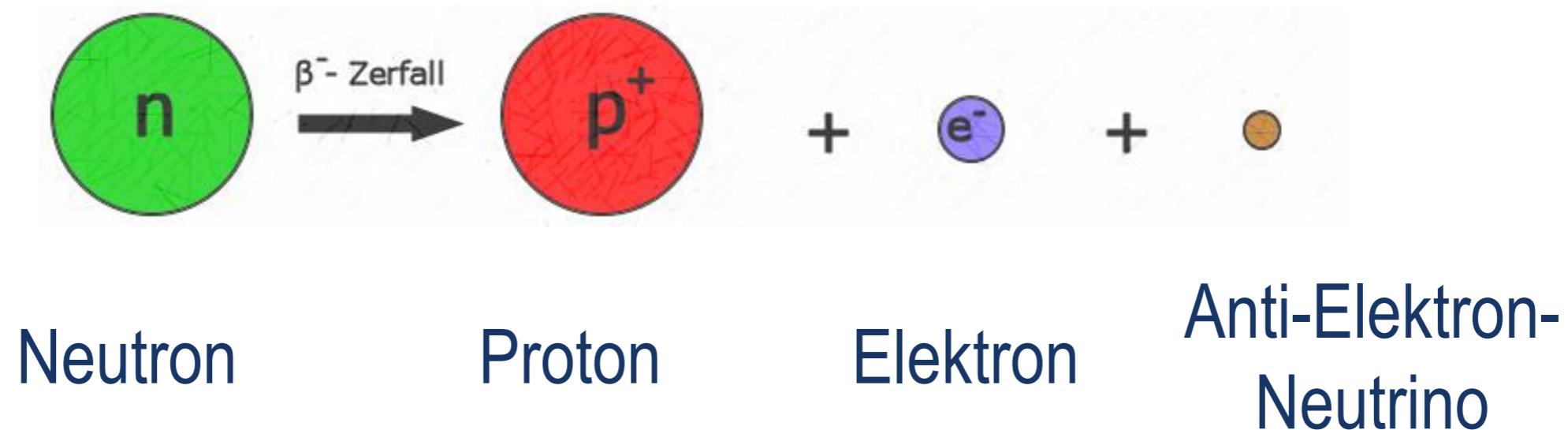
Photon: elektronmagnetische Wechselwirkung

Gluon: starke Wechselwirkung

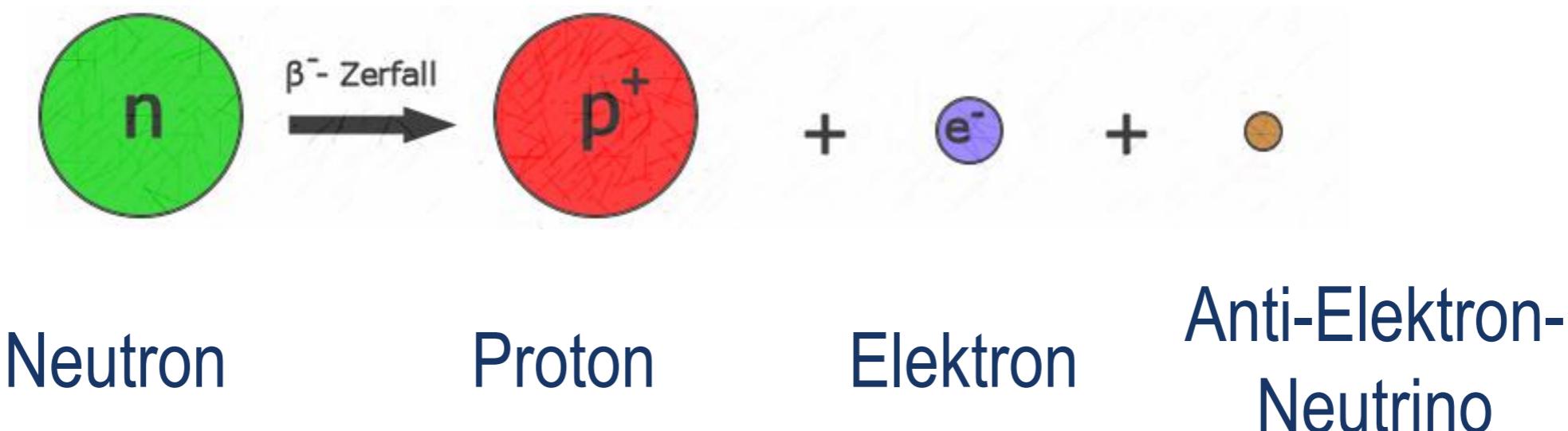
Z- und W-Bosonen:
schwache Wechselwirkung

???

Beispiel Betazerfall: das W-Boson & die schwache Wechselwirkung

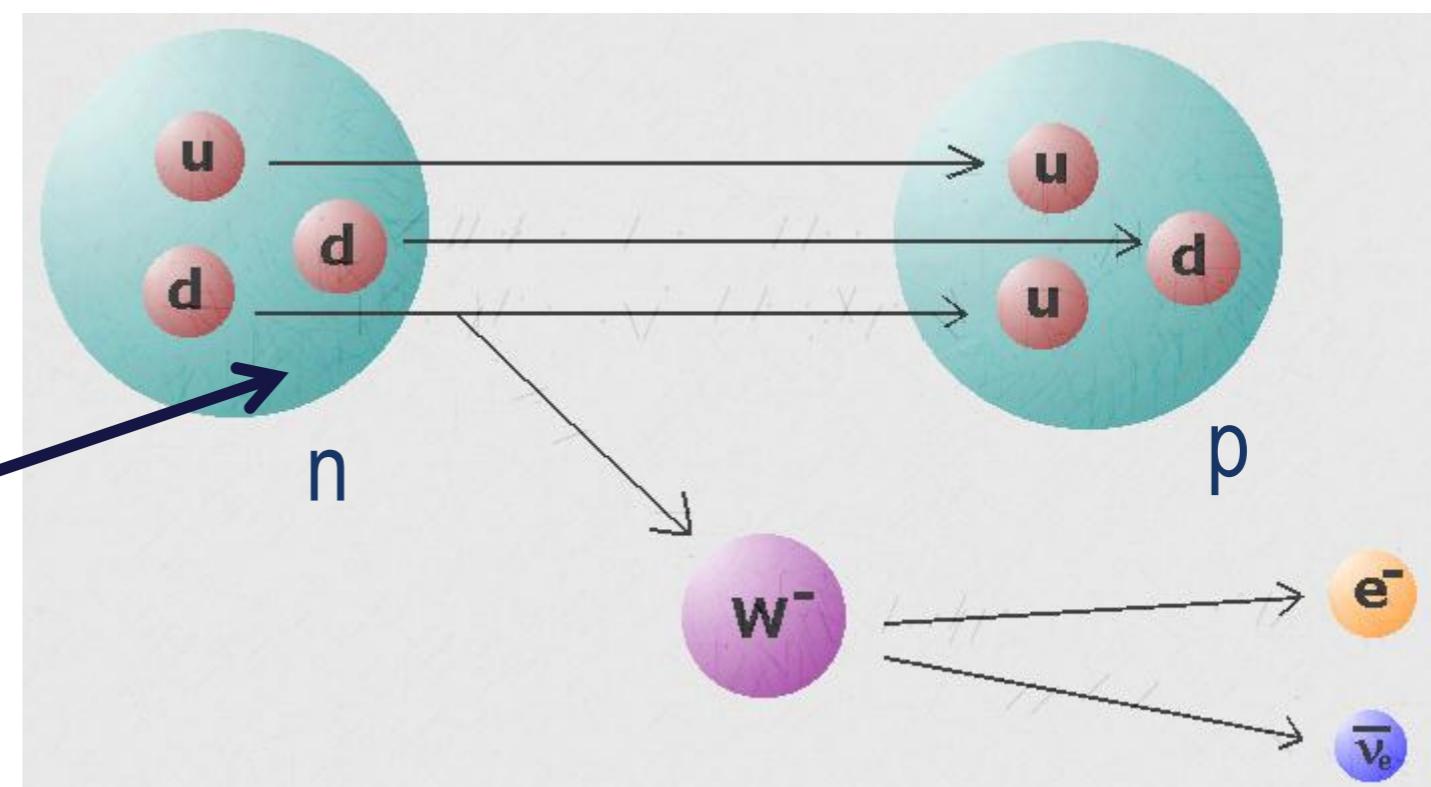


Beispiel Betazerfall: das W-Boson & die schwache Wechselwirkung

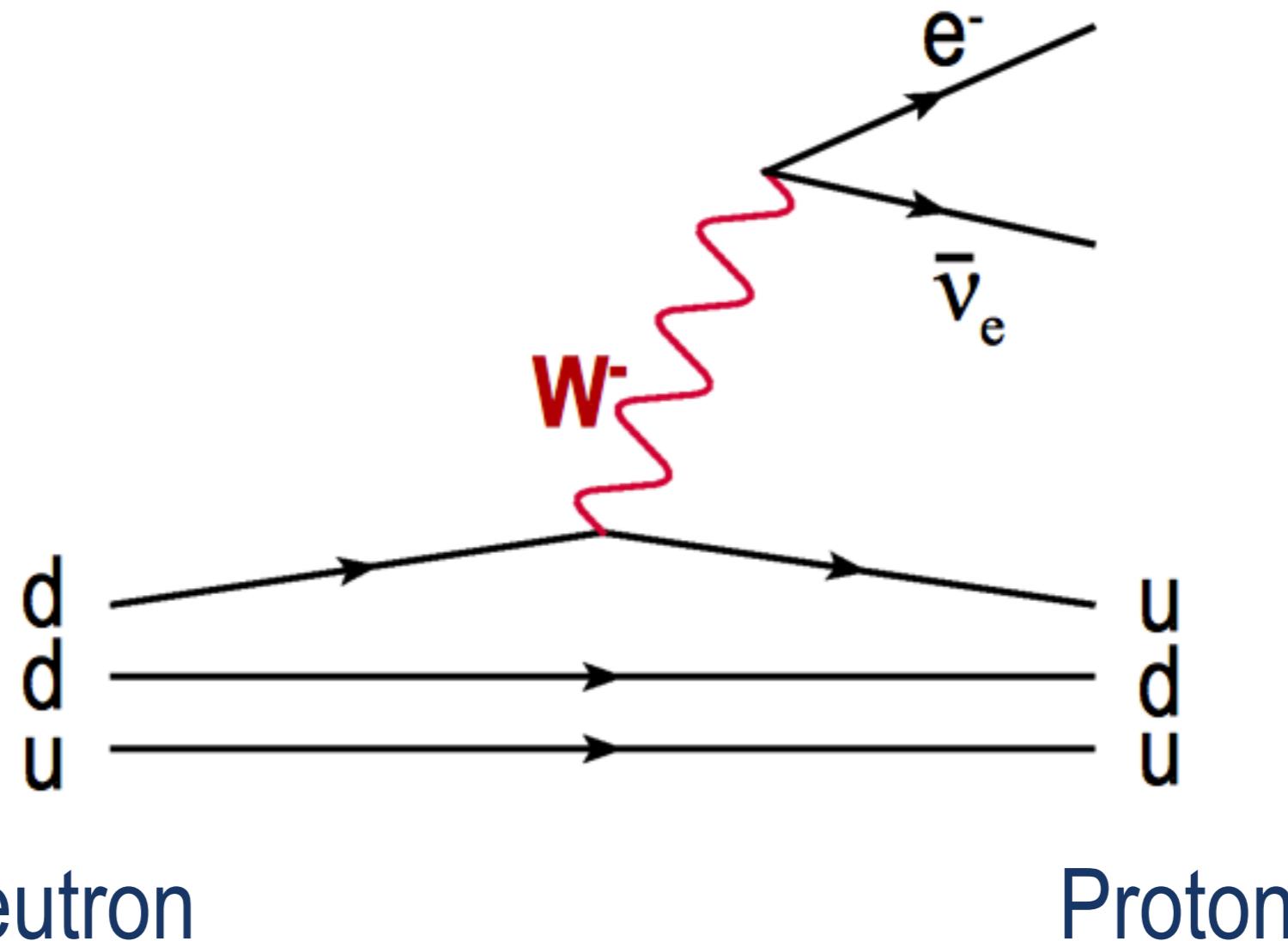


Schau genauer hin!

Im Neutron wandelt sich ein d-Quark in ein u-Quark um!
Ein **W-Teilchen** wird ausgesandt.



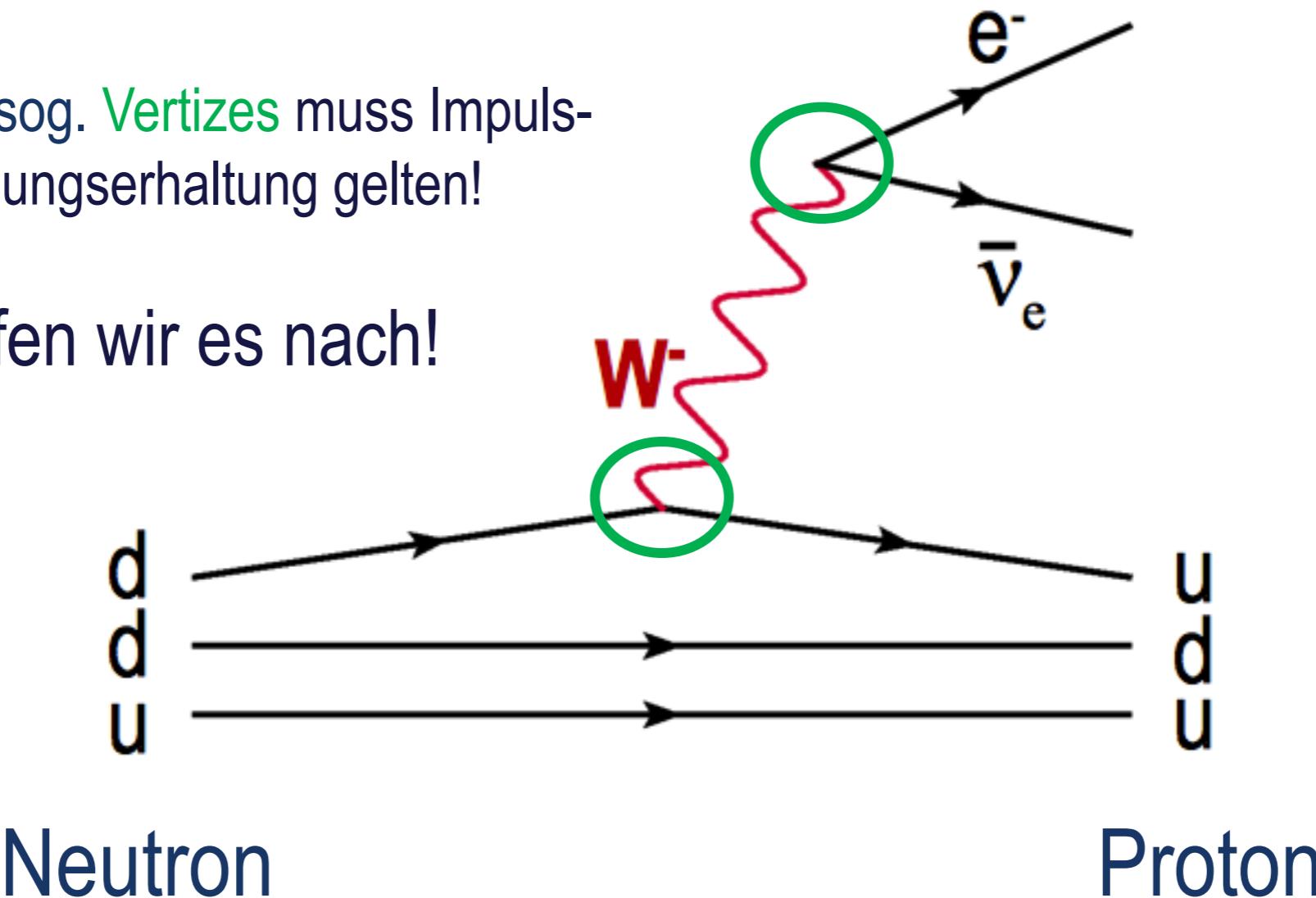
Betazerfall aus Physikersicht



Betazerfall aus Physikersicht

An den sog. **Vertizes** muss Impuls- und Ladungserhaltung gelten!

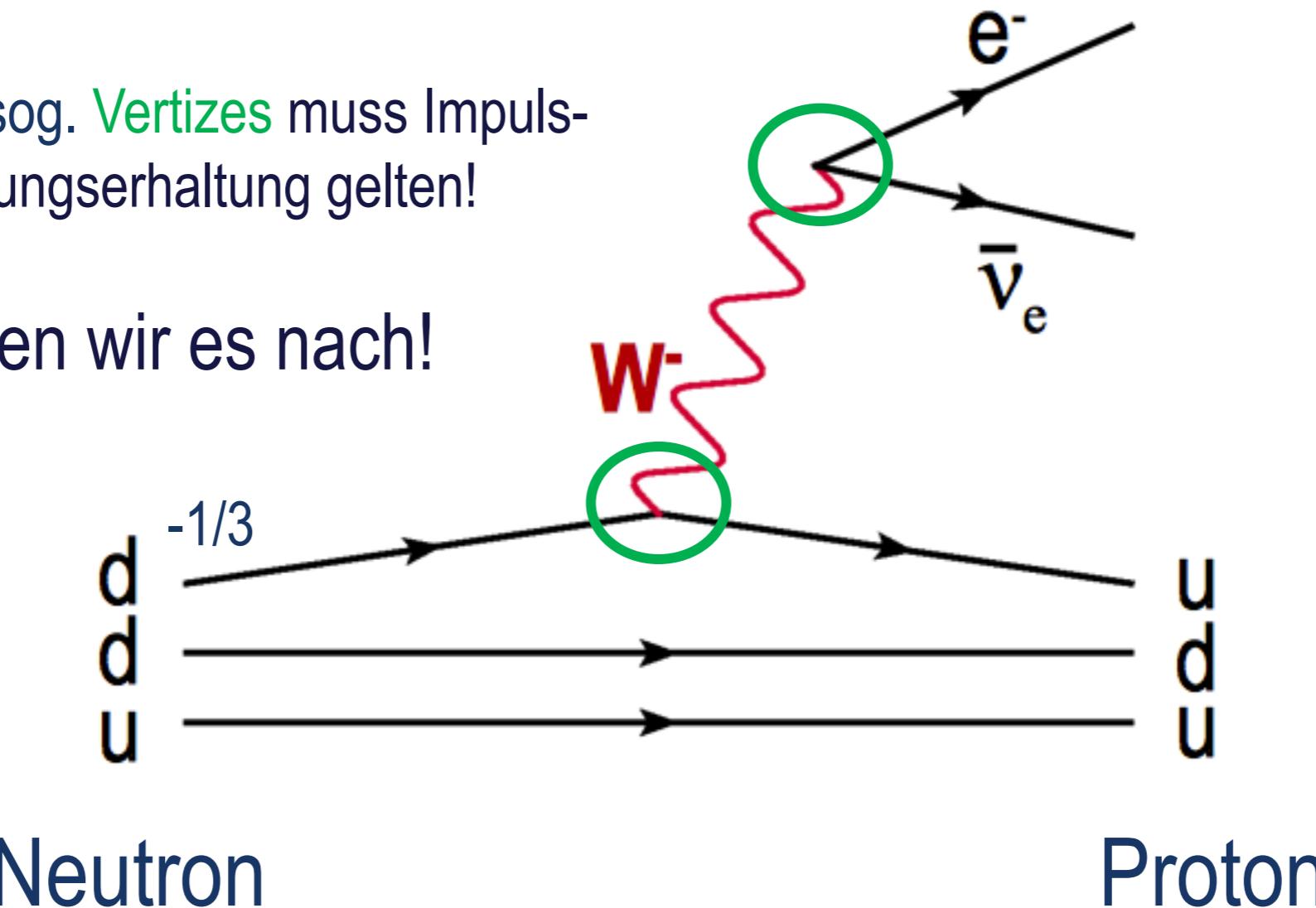
Prüfen wir es nach!



Betazerfall aus Physikersicht

An den sog. **Vertizes** muss Impuls- und Ladungserhaltung gelten!

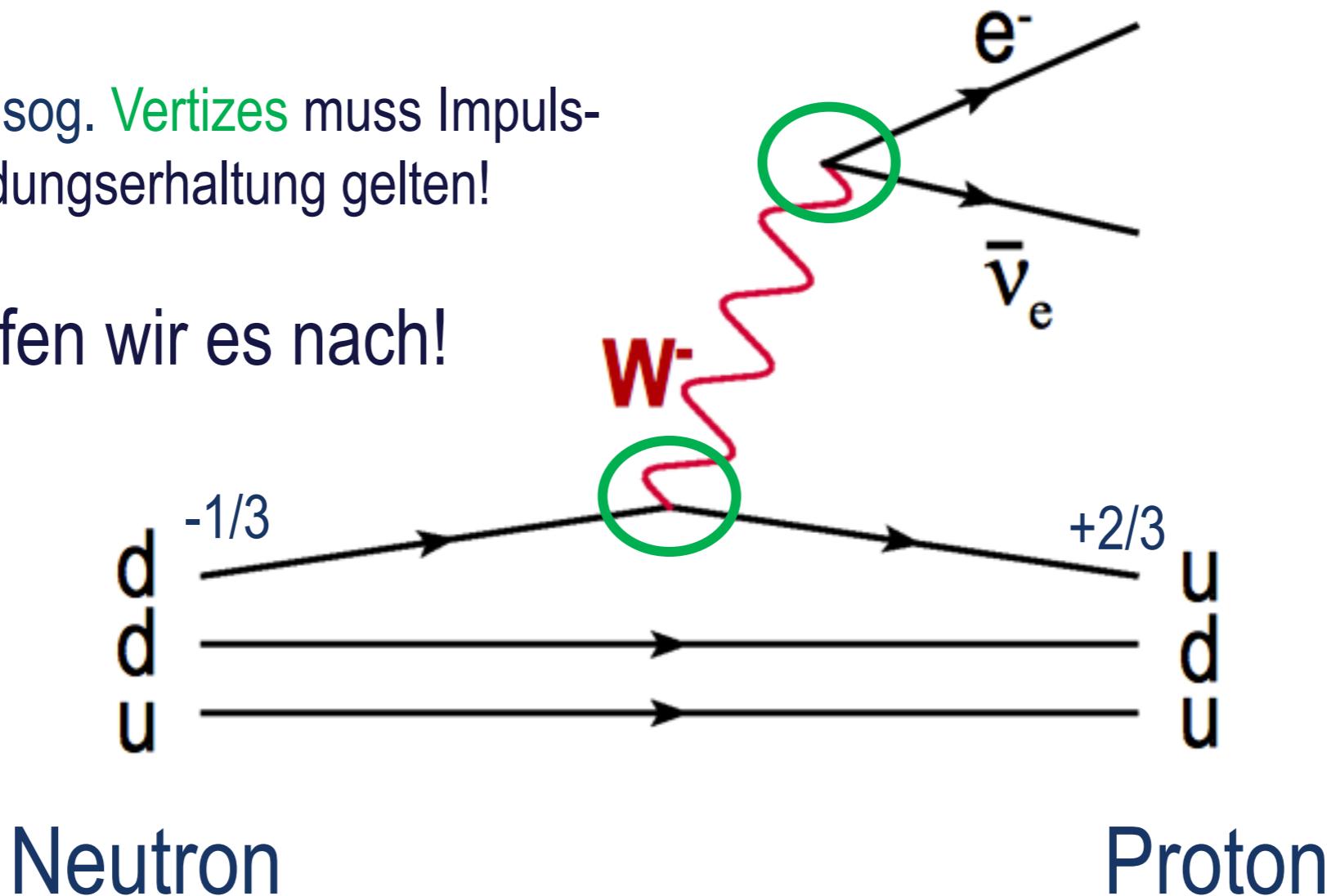
Prüfen wir es nach!



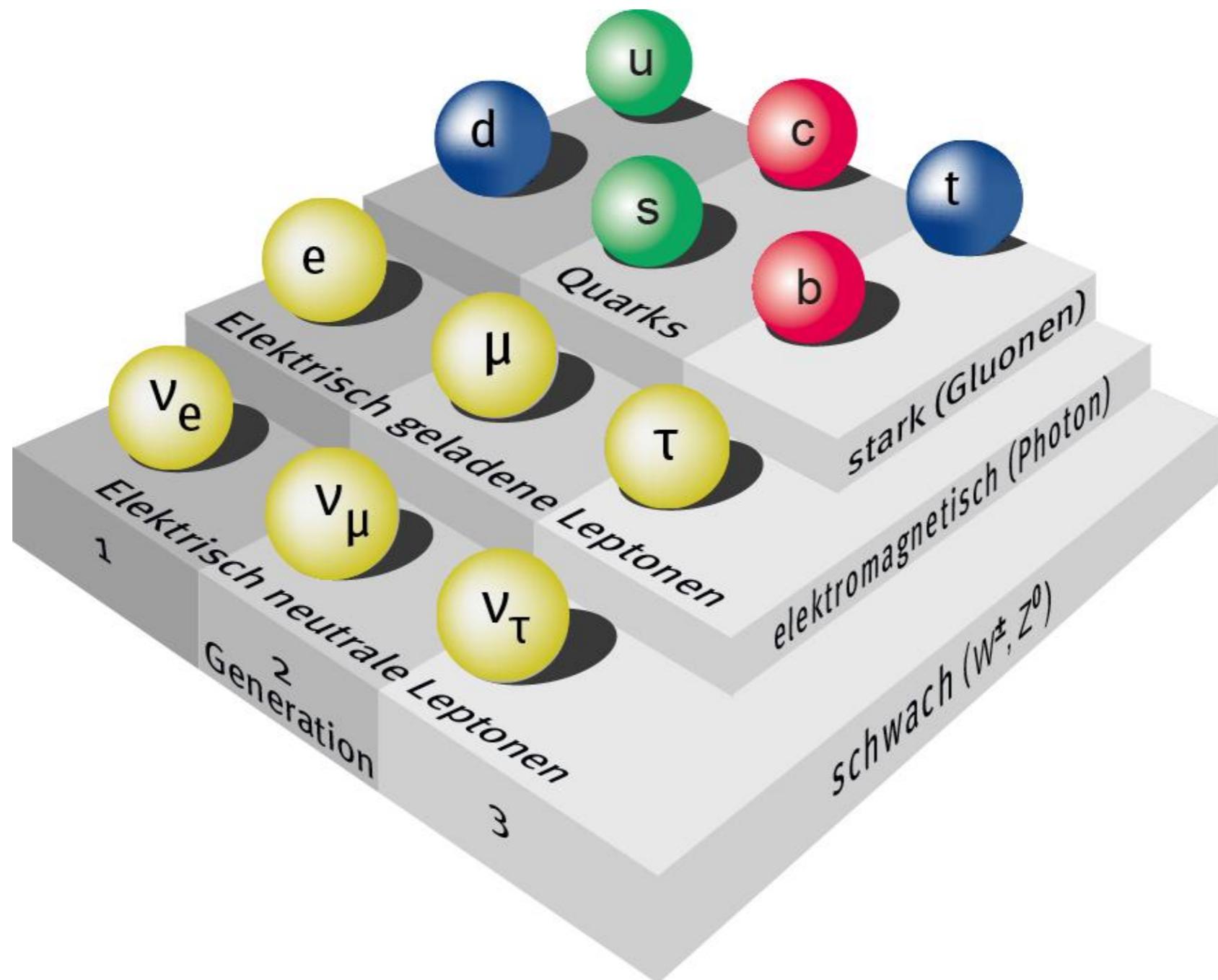
Betazerfall aus Physikersicht

An den sog. **Vertizes** muss Impuls- und Ladungserhaltung gelten!

Prüfen wir es nach!

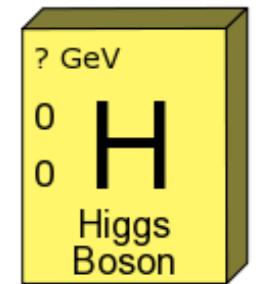


Wer wechselwirkt wie?

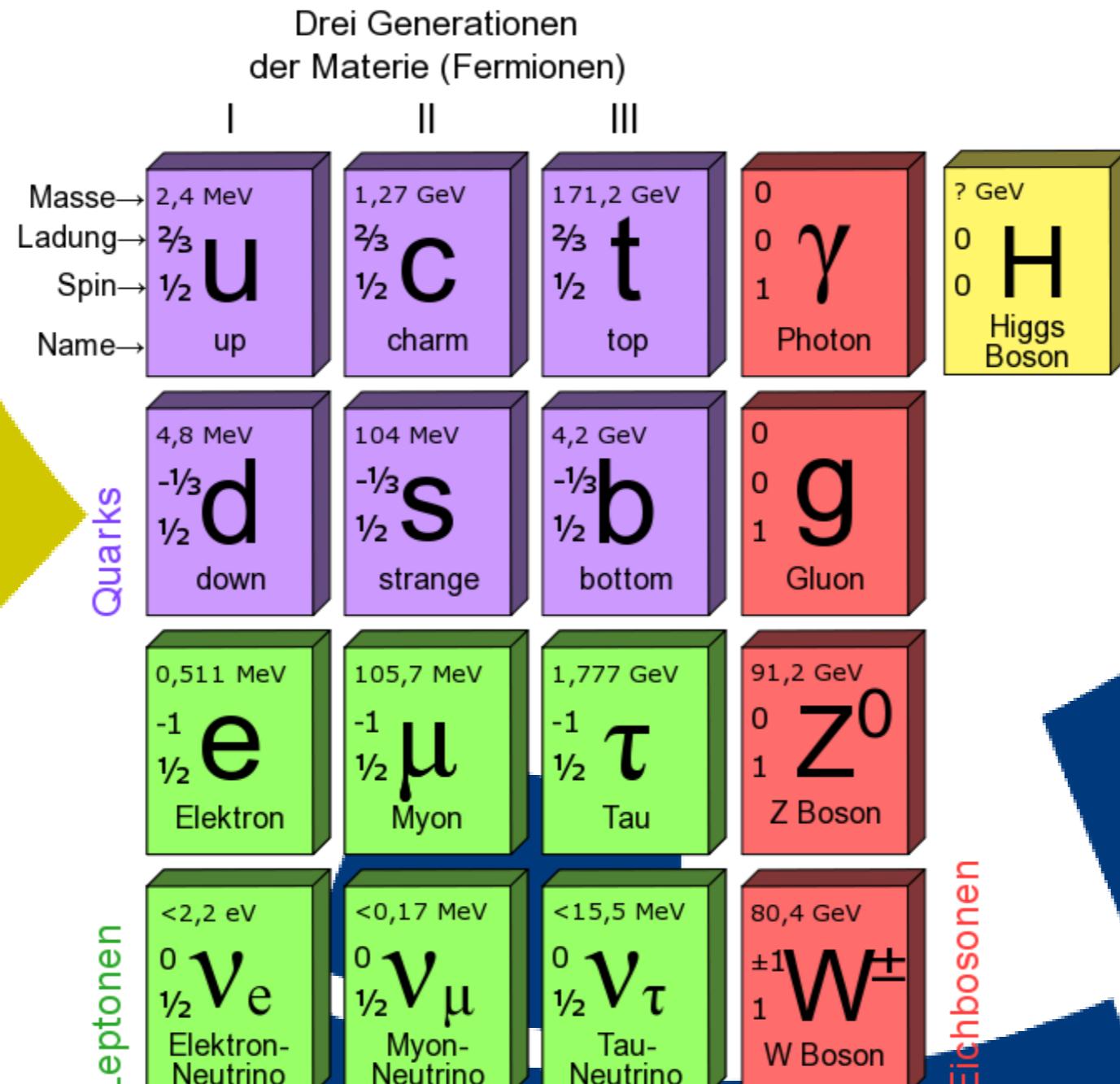


Das Higgs: Warum brauchen wir es?

- Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht einföhrbar ohne Theorie zu zerstören
- Idee: Alle Teilchen bewegen sich durch ein neu eingeführtes Feld (Higgs-Feld) -> erhalten so Masse
- Anregungen des Feldes sind die Higgs-Teilchen



Ende Teil 2



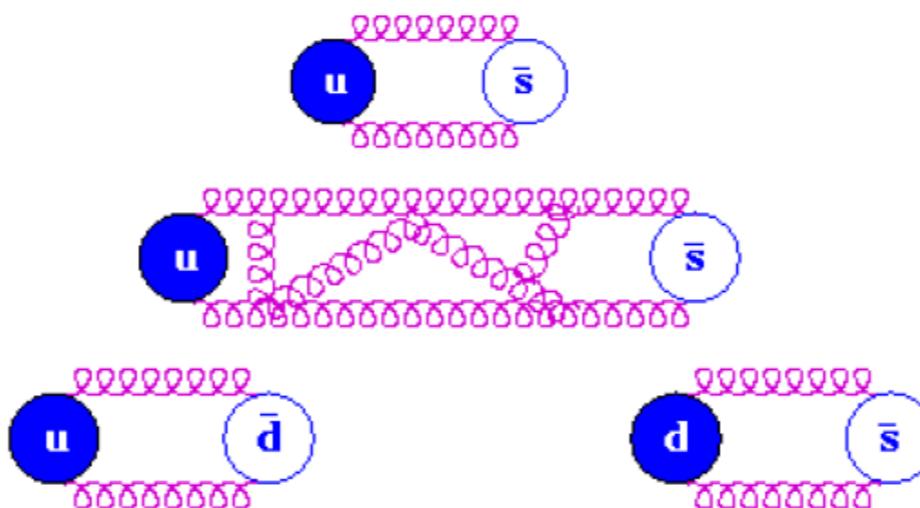
Quarks & und die starke Wechselwirkung

Quarks:

- ...sind die einzigen Teilchen, die stark wechselwirken
- ...kommen nur im Verband vor!!

Bsp: Proton $|uud\rangle$ und Neutron $|udd\rangle$

Zwischen den Quarks werden ständig, **Gluonen**, die Boten der starken Wechselwirkung ausgetauscht, um sie zusammenzuhalten. Dabei können auch neue Quarks entstehen.

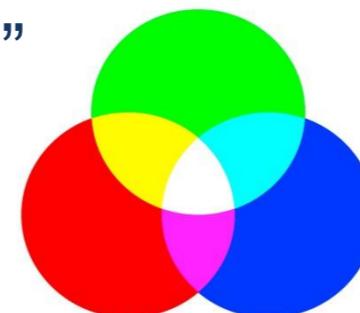


Quarks & und die starke Wechselwirkung

Quarks:

- ...sind die einzigen Teilchen, die stark wechselwirken
- ...kommen nur im Verband vor!!
Bsp: Proton |uud> und Neutron |udd>
- ...tragen zusätzliche Ladung: “Farbe”

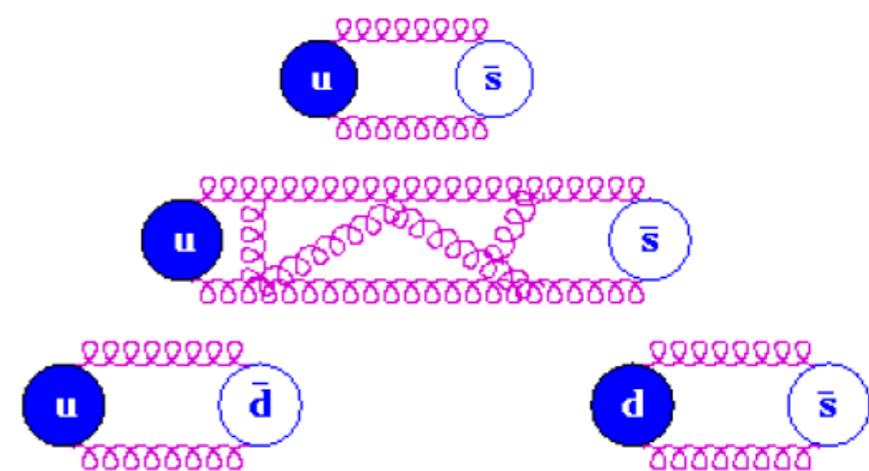
rot, grün, blau



Starke Wechselwirkung:

- ...lässt nur farbneutrale Objekte zu!

Zwischen den Quarks werden ständig, **Gluonen**, die Boten der starken Wechselwirkung ausgetauscht, um alle farbigen Teilchen zusammenzuhalten.





Teil 3: Wie findet man das Higgs?

Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



- Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich

- 20 EU-Staaten, ca 8000 Wissenschaftler
- 700 Mio. Euro (20% aus Deutschland)



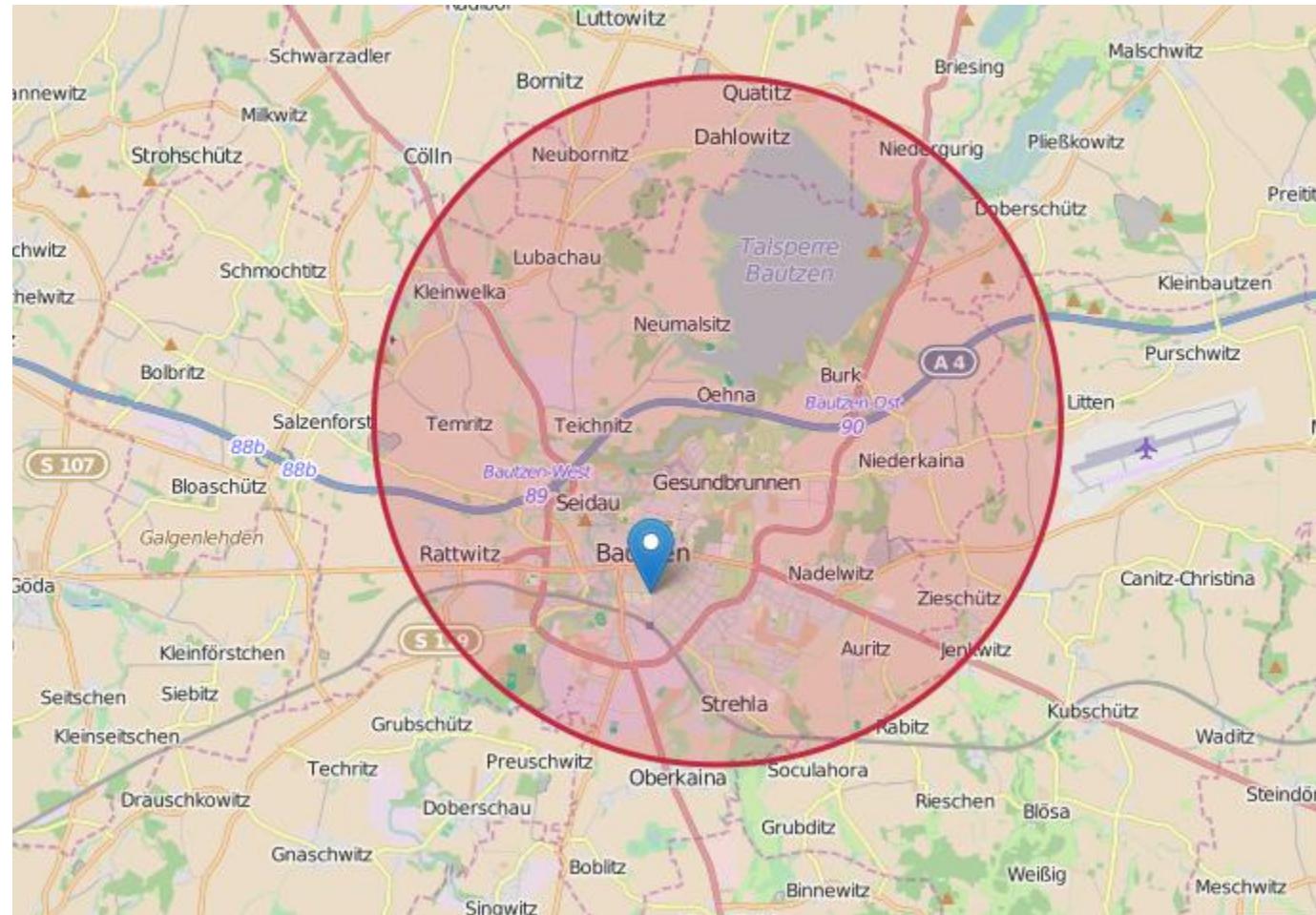
Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

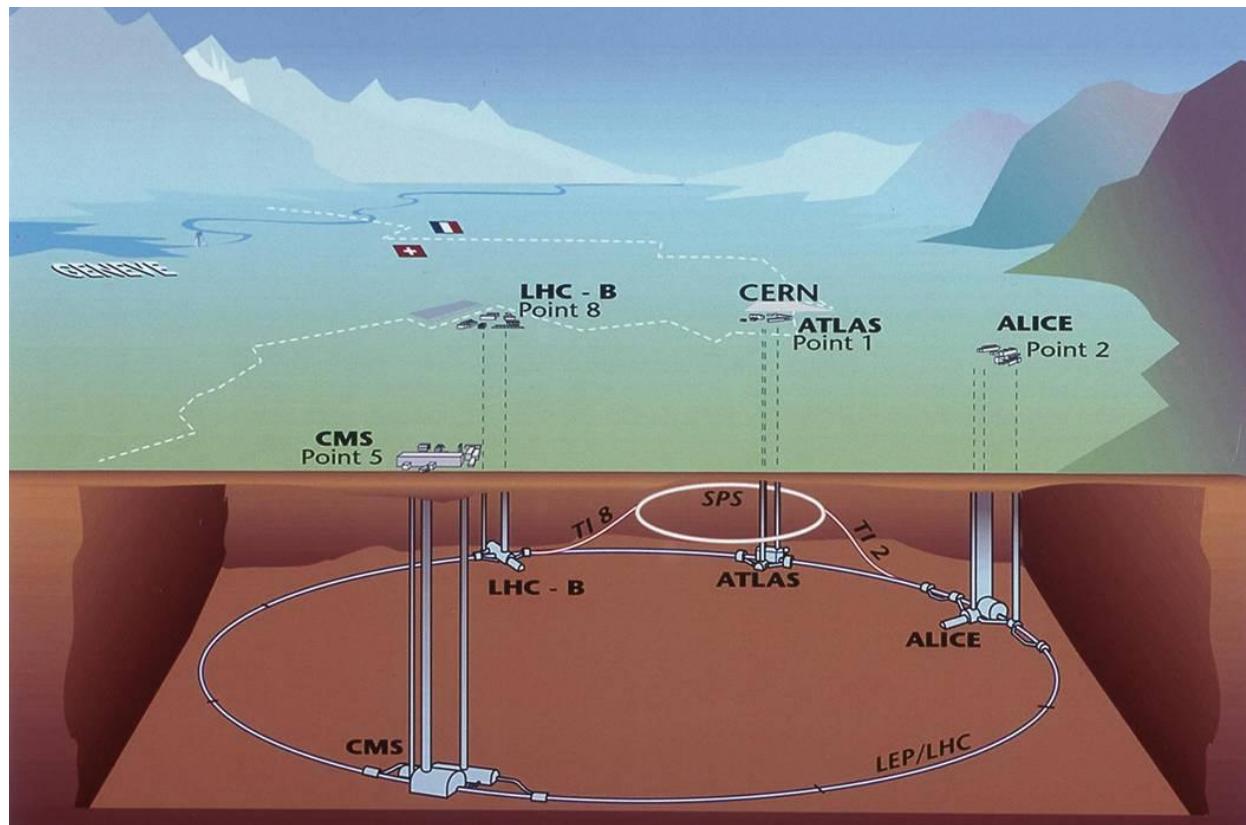


Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



Der LHC (Large Hadron Collider)



Ein 27 km langer, ringförmiger **Teilchenbeschleuniger**
4 Teilchen-Detektoren: ATLAS, ALICE, CMS und LHC-b

Was geschieht im LHC?

- Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 6,5 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- Wenn die Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist.

Was geschieht im LHC?

- Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 6,5 Tera-Elektronenvolt (TeV)
- Wenn die Protonen zusammenstoßen, entstehen neue Teilchen, die man in Detektoren nachweist.

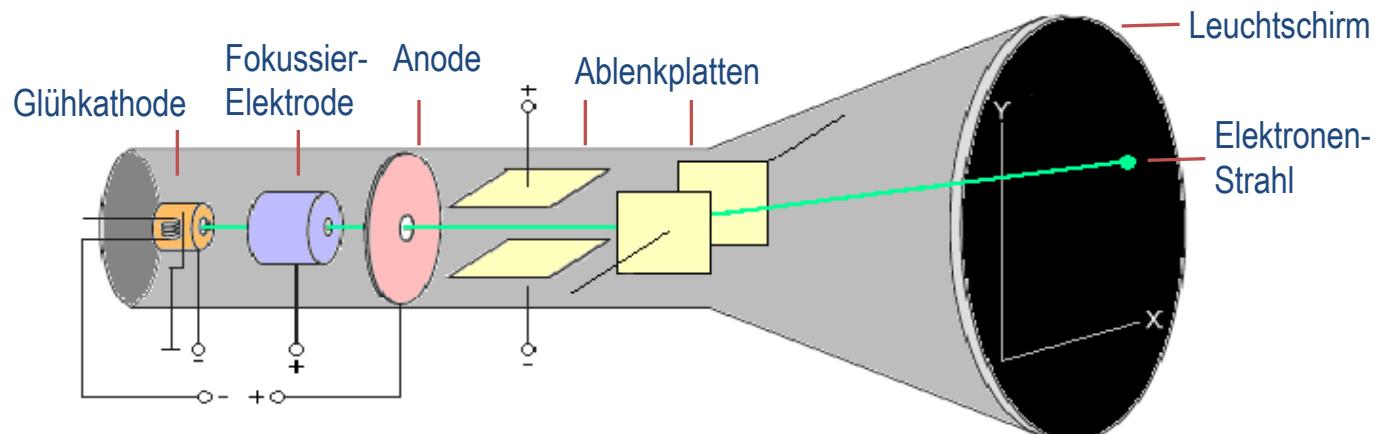
Aber von Anfang an:
Es beginnt mit einer Flasche
voller Wasserstoff ...



Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

**Der einfachste Beschleuniger:
Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre)!**

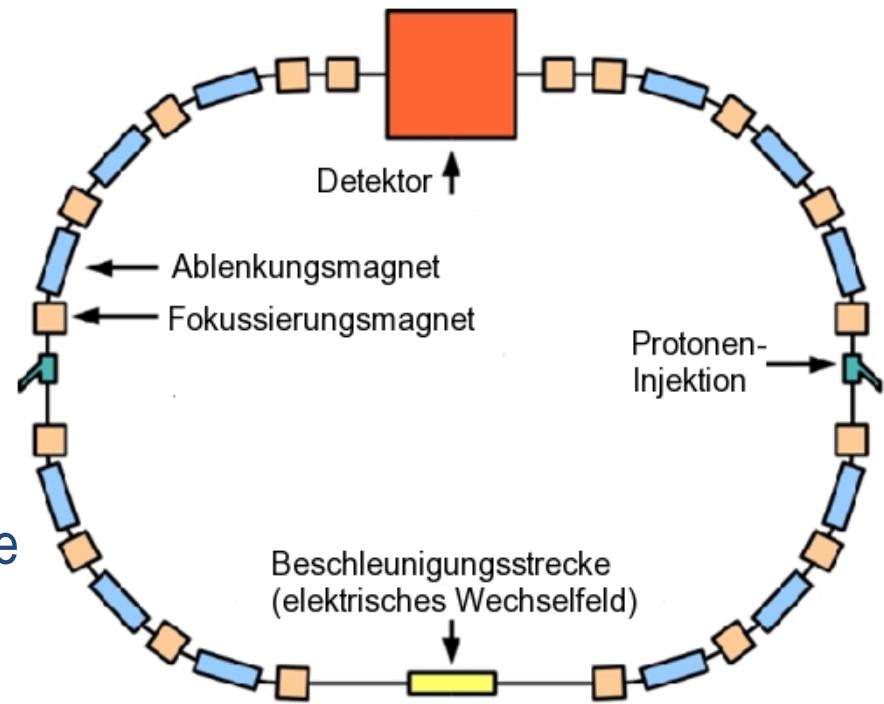
- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- ...beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- ...ablenken und fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



Wie funktioniert der LHC?

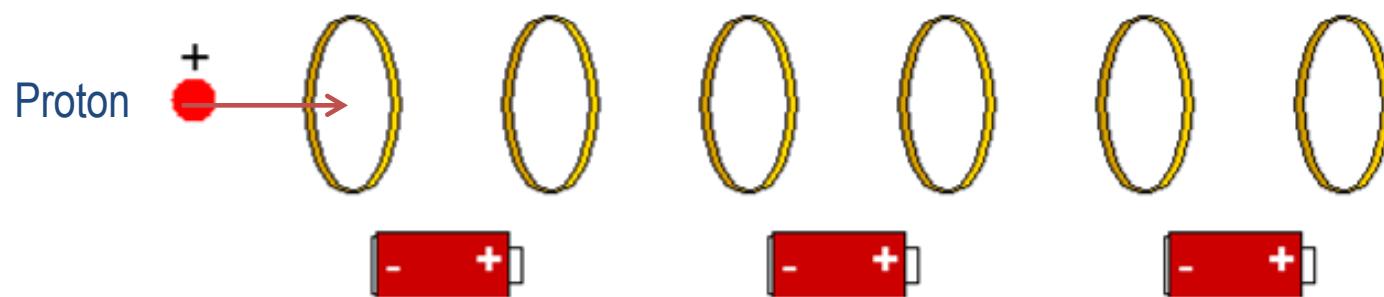
Im LHC durchlaufen Pakete (Bunches) von Protonen eine kreisförmige Bahn, auf der sie...

- ...**beschleunigt** werden
(elektrisches Wechselfeld)
- ...**abgelenkt** werden...
(Dipol-Magnete)
- ...und **fokussiert** werden
(Quadrupol-Magnete)
- Insgesamt ca. 8900 Magnete



Beschleunigung durch elektrische Felder

- 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.

Der LHC ist...

... eine der schnellsten Rennstrecken der Welt

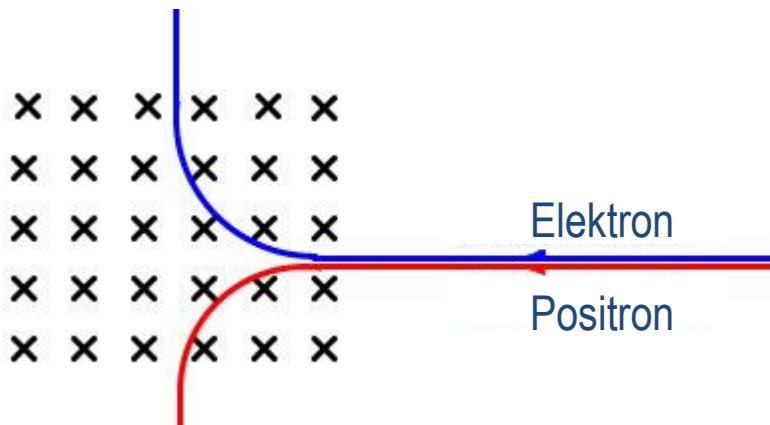
- Knapp eine Billiarde Protonen
- 99,999997% der Lichtgeschwindigkeit
- 27 km langer Tunnel

➤ **Wieviele Grenzübertritte pro Sekunde?**



Ablenkung durch Magnetfelder

- Ein Magnetfeld lenkt elektrisch geladene Teilchen senkrecht zu ihrer Flugbahn ab (Lorentzkraft):



x: Das Magnetfeld zeigt vom Betrachter weg

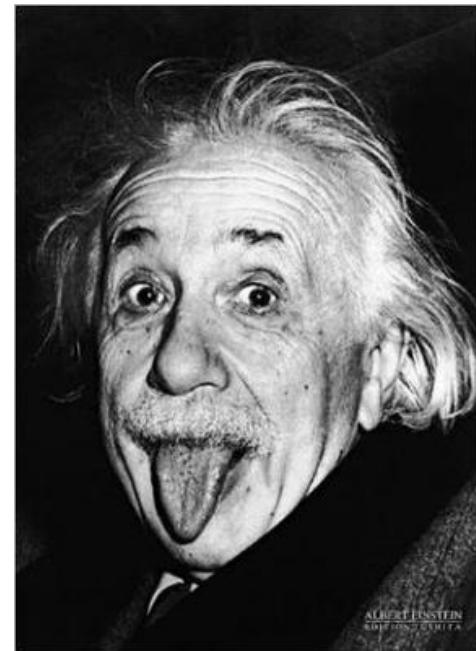
- Die Richtung und Stärke der **Bahnkrümmung** hängen von der **elektrischen Ladung** und vom **Impuls** (also von Masse und Geschwindigkeit) des Teilchens ab.

Wozu Teilchenbeschleuniger?

➤ Erzeugung massereicher Teilchen

Masse ist eine Form von Energie!

- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.



$$E = mc^2$$

Wozu Teilchenbeschleuniger?

- Erzeugung massereicher Teilchen

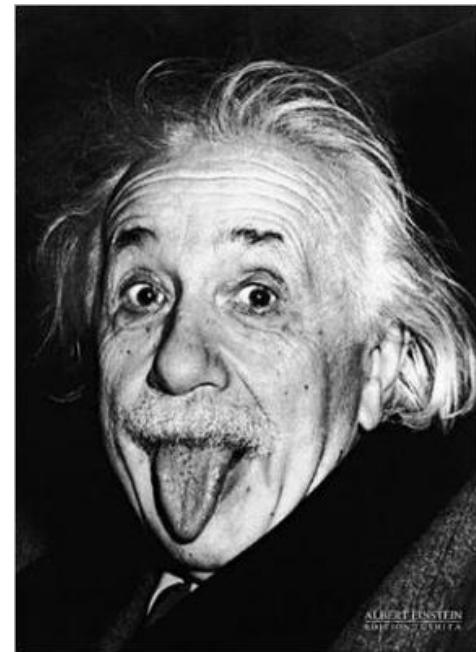
Masse ist eine Form von Energie!

- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Beispiel:

- Kernspaltung im Kraftwerk
(Masse → Wärme → elektrische Energie)

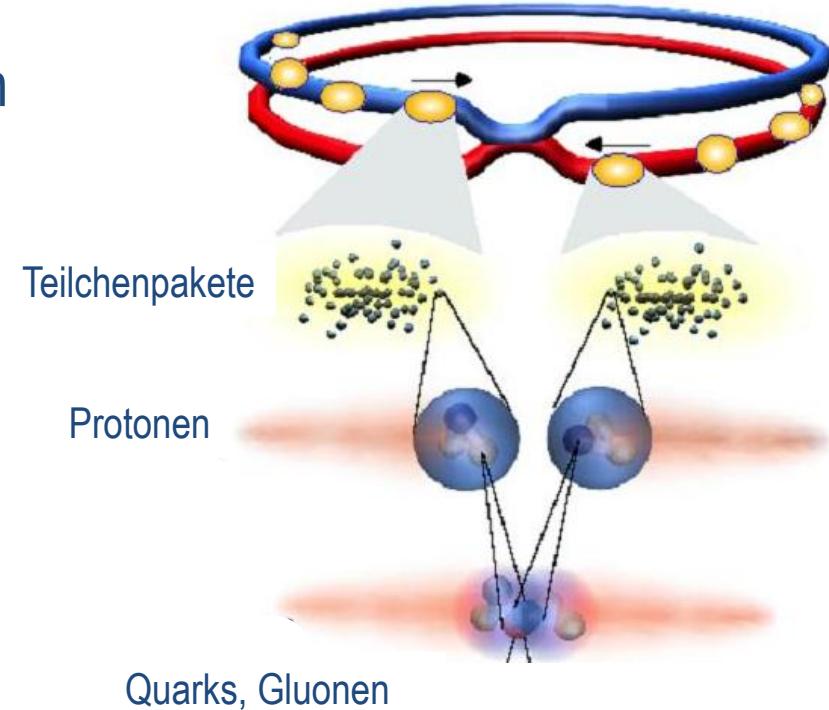
- Teilchenkollisionen!
(Bewegungsenergie → Masse)



$$E = mc^2$$

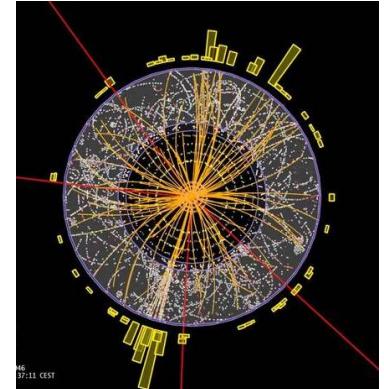
Teilchenkollisionen im LHC

- 2 gegenläufige Protonenstrahlen
 - ...mit je 1400 Teilchenpaketen
 - 100 Milliarden Protonen pro Paket
 - 20 Millionen Paket-Kreuzungen pro Sekunde...
 - ...mit je etwa 30 Proton-Proton-Kollisionen
- ca. 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde!



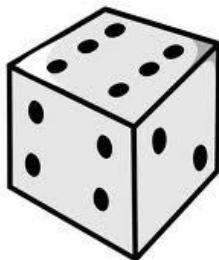
Teilchenkollisionen im LHC

- **600 Mio. 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

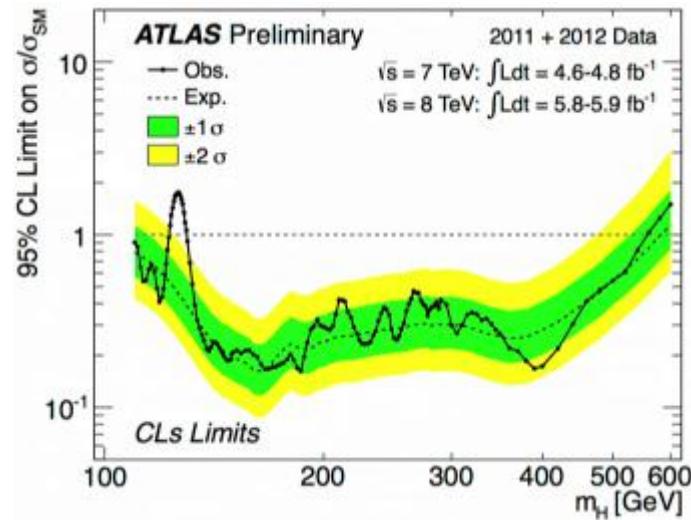
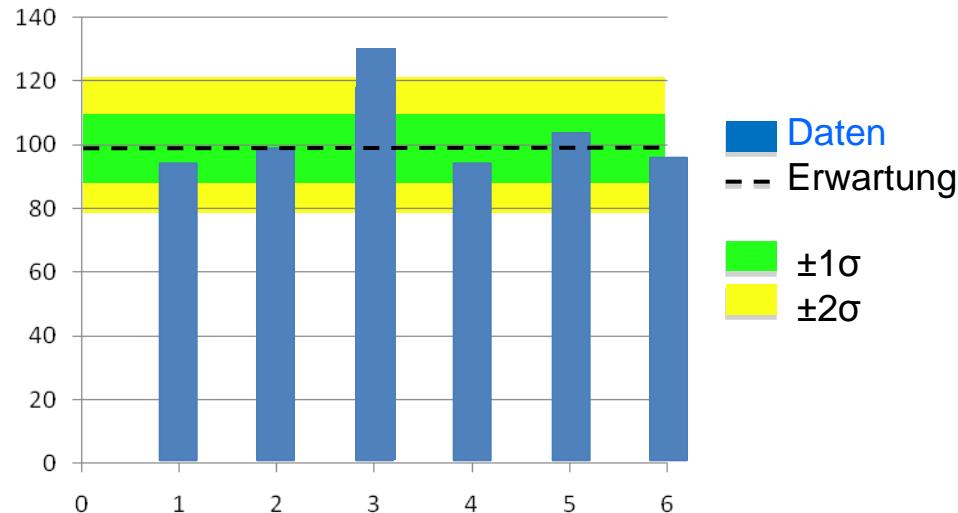


Warum so viele Kollisionen?

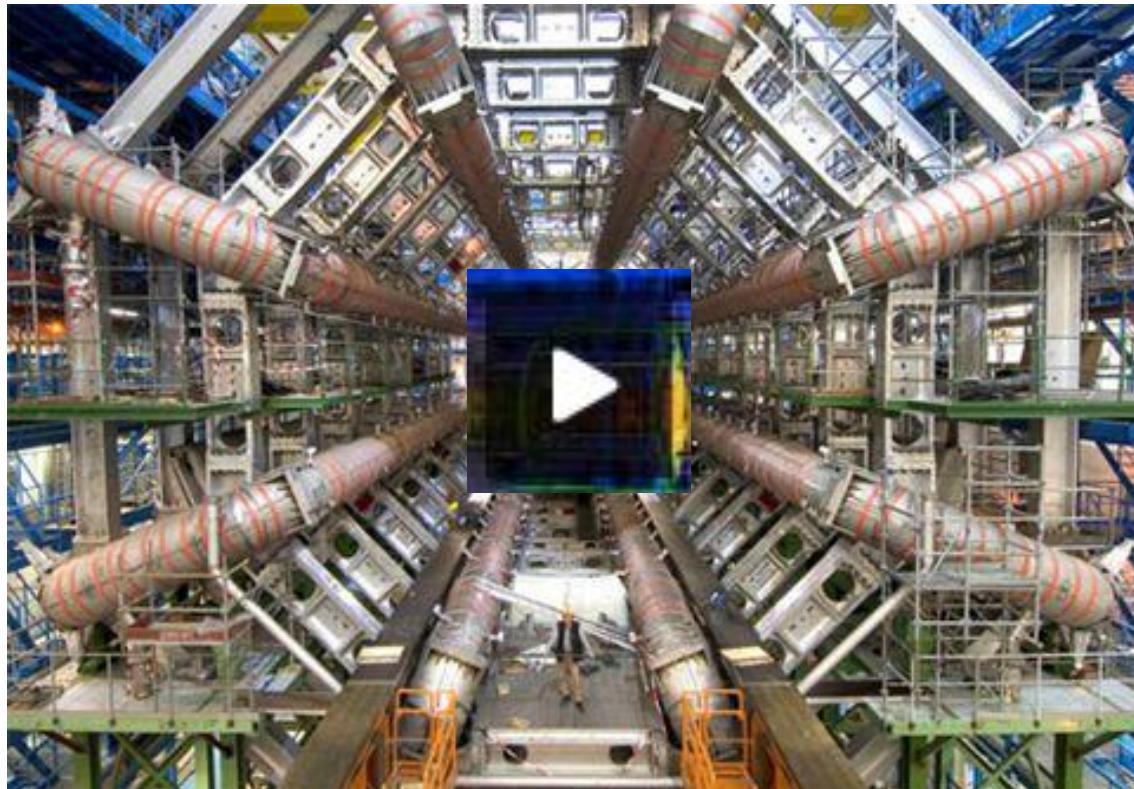
Ist der Würfel manipuliert oder nicht?



Existiert das Higgs-Boson oder nicht?



Im Schnelldurchlauf



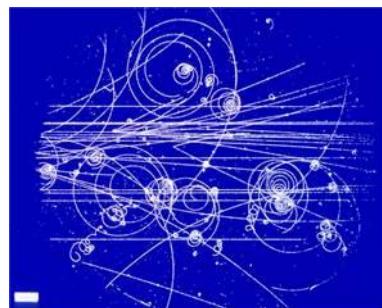


Analyse von Teilchenspuren im **ATLAS-Detektor**

Wie weist man Elementarteilchen nach?

Bildgebende Detektoren

z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

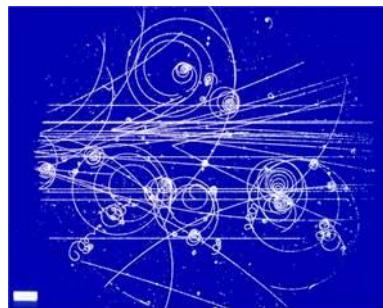


- sichtbare Teilchenspuren

Wie weist man Elementarteilchen nach?

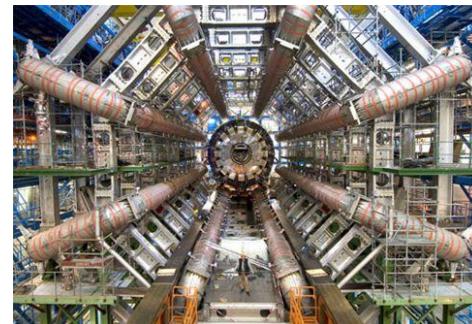
Bildgebende Detektoren

z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



Elektronische Detektoren

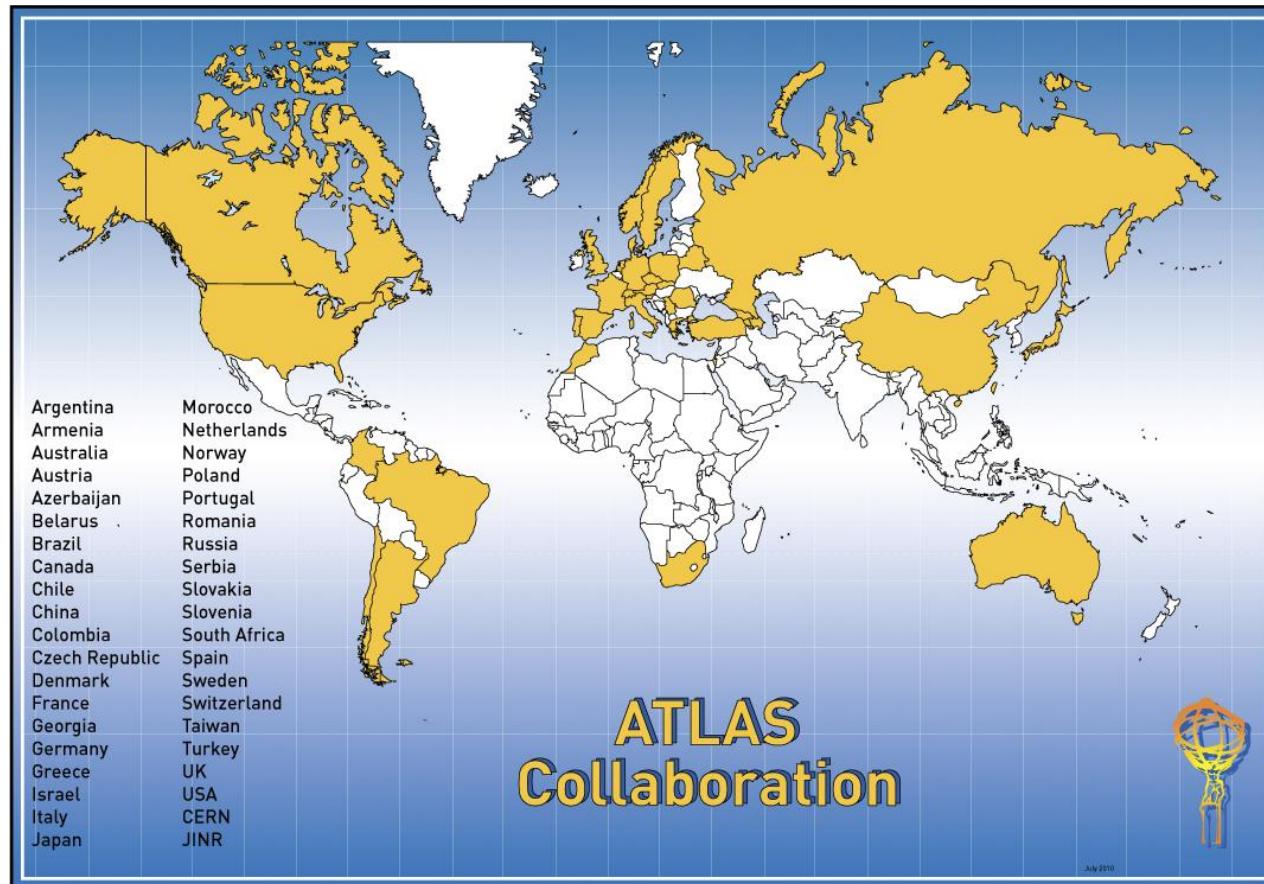
z.B: **ATLAS**-Detektor, Geigerzähler



- sichtbare Teilchenspuren

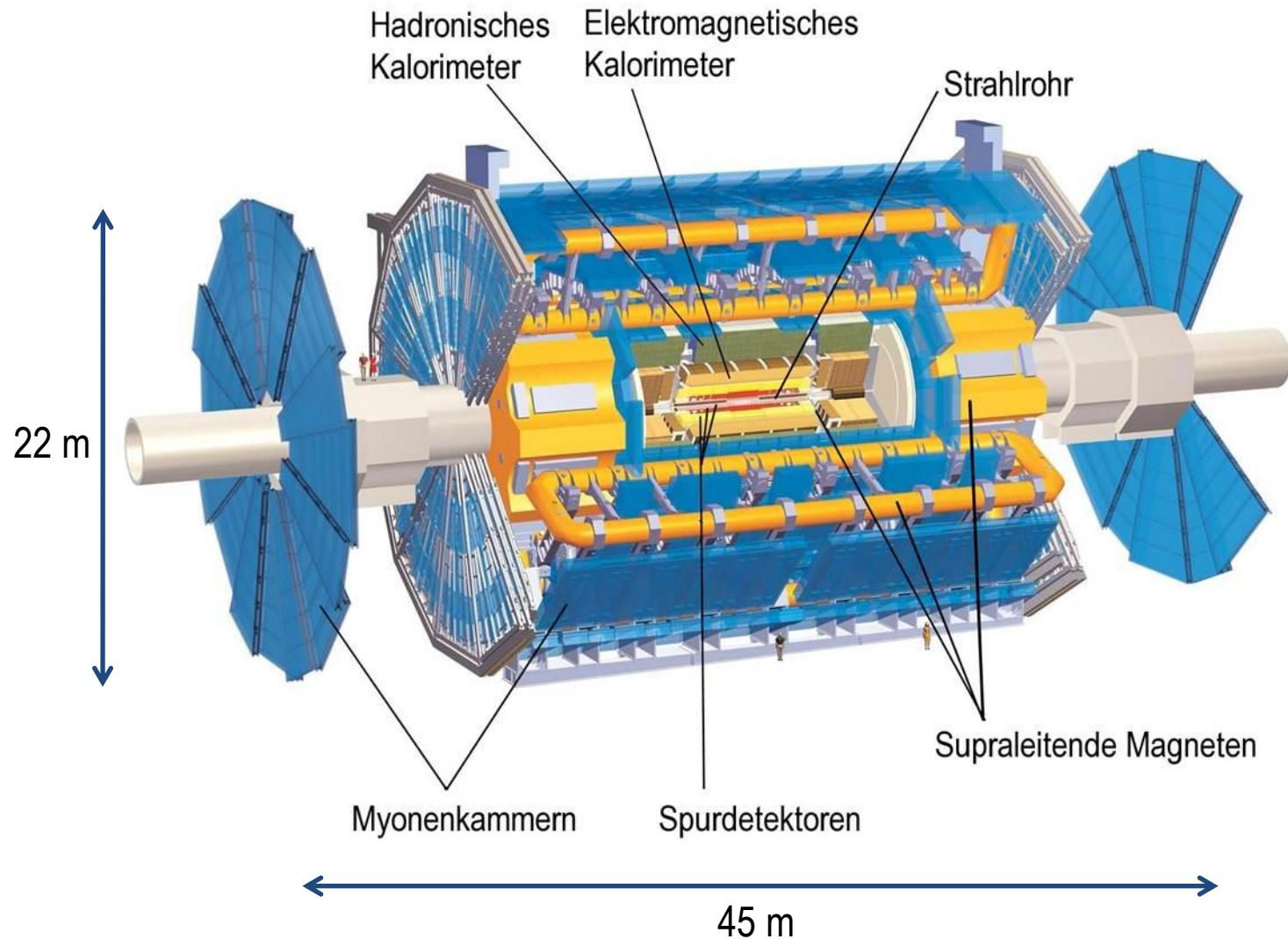
- elektrische Signale
- Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

Wer ist ATLAS?

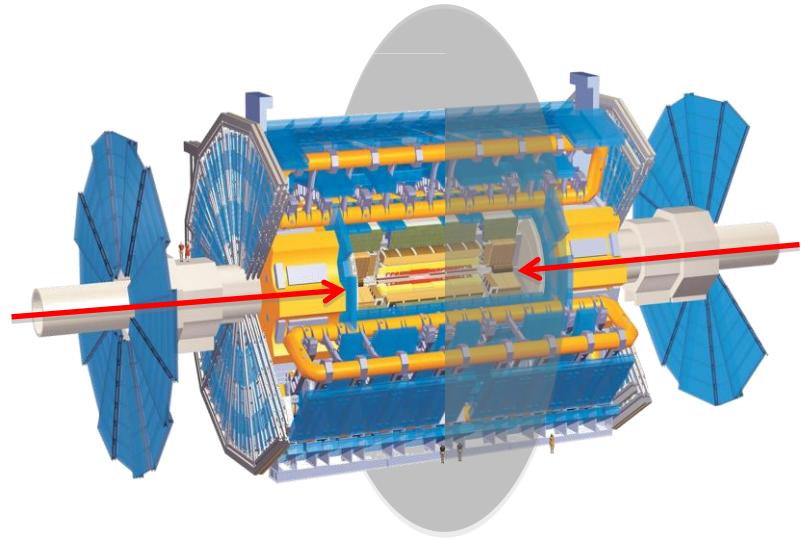


38 Länder
177 Institute
3000 Wissenschaftler
(~ 15% Frauen)

Der ATLAS-Detektor



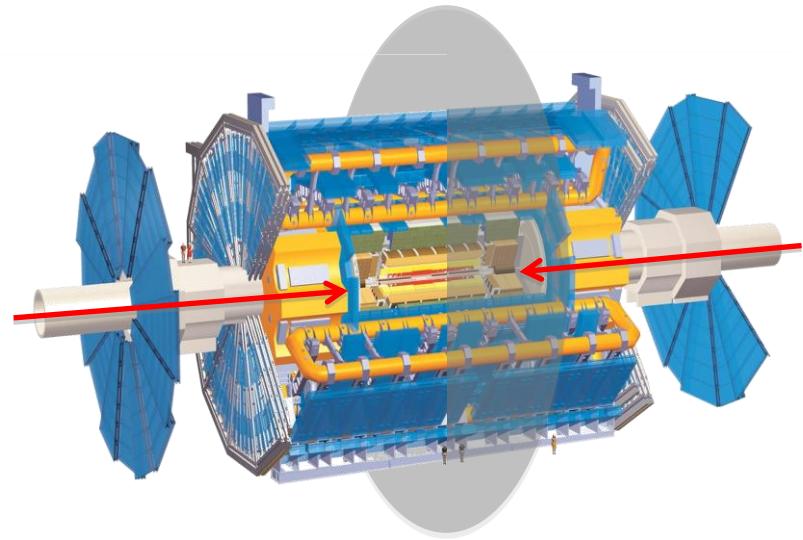
Was misst ATLAS?



Den Personalausweis, bitte!

Wie können Teilchen nachgewiesen werden?

Was misst ATLAS?

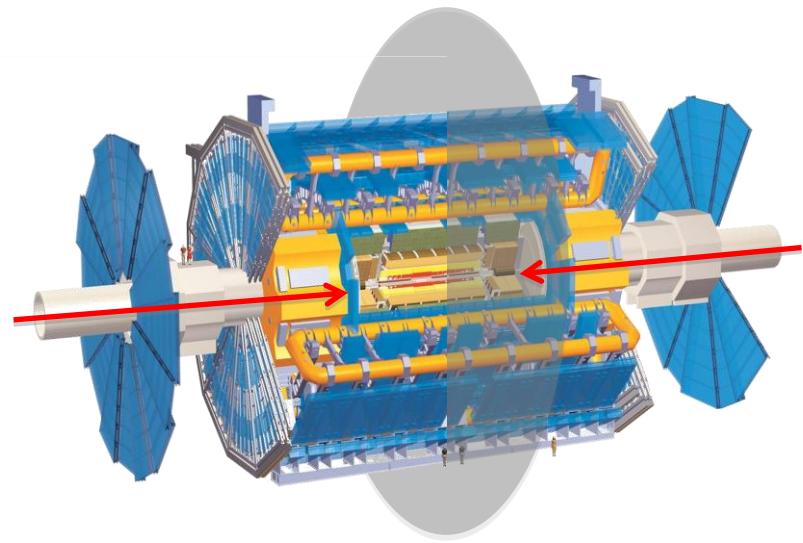


Den Personalausweis, bitte!

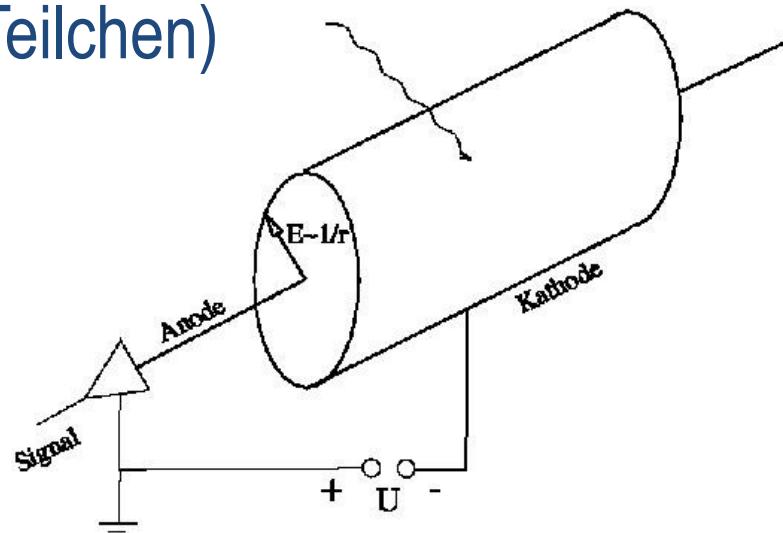
Wie können Teilchen nachgewiesen werden?

Durch ihre Wechselwirkung mit Materie!

Was misst ATLAS?



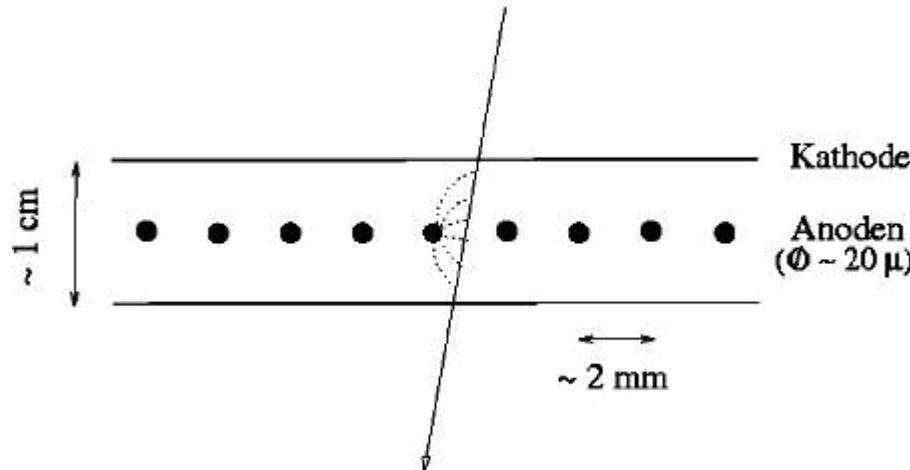
Ortsmessung
durch Ionisation
(nur geladene Teilchen)



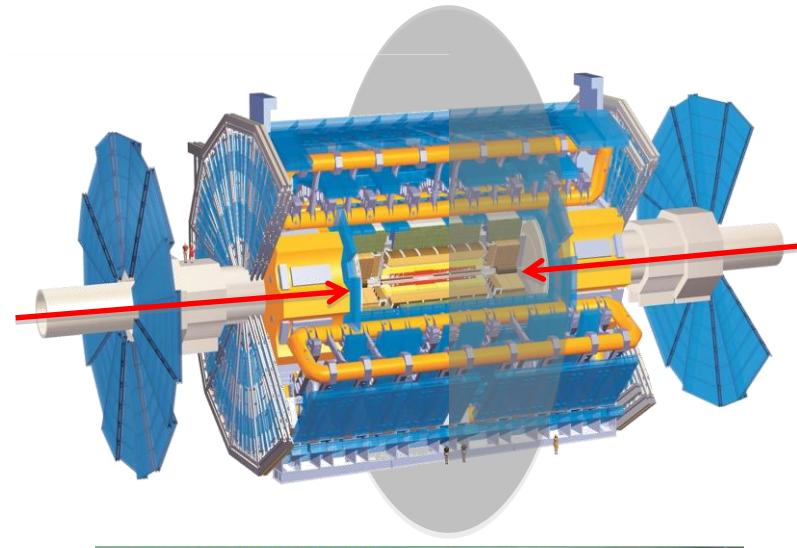
Geiger-Müller-Zählrohr

Was misst ATLAS?

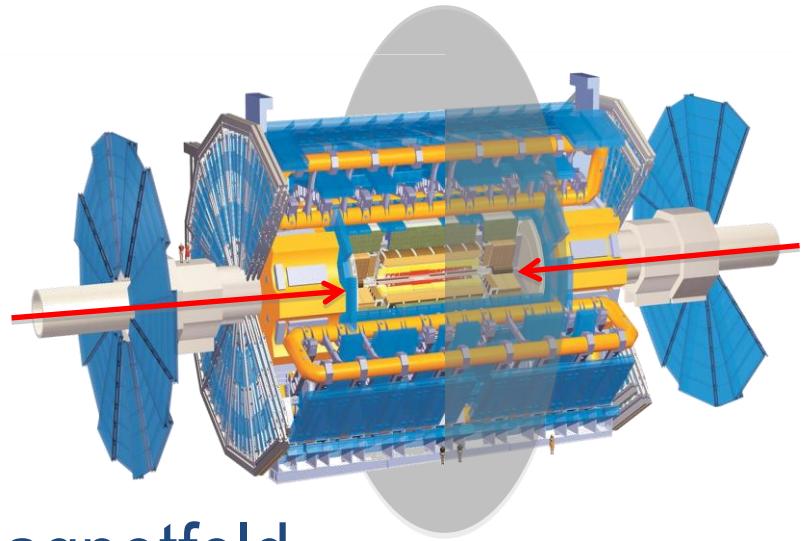
Ortsmessung
durch Ionisation
(nur geladene Teilchen)



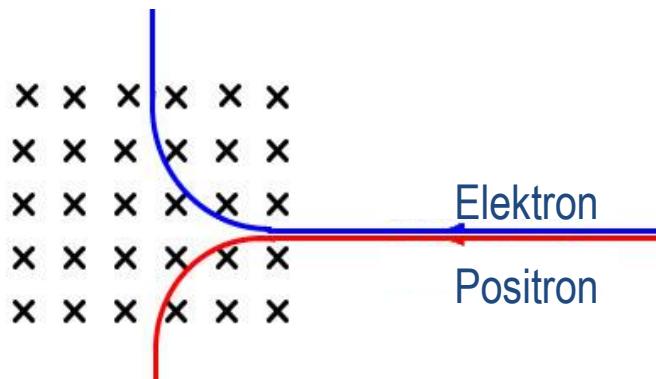
Spurkammern



Was misst ATLAS?



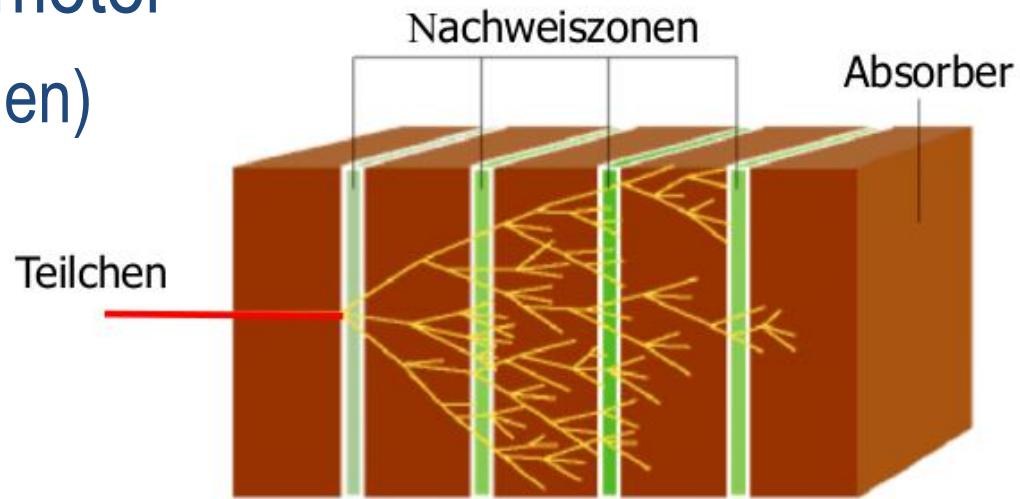
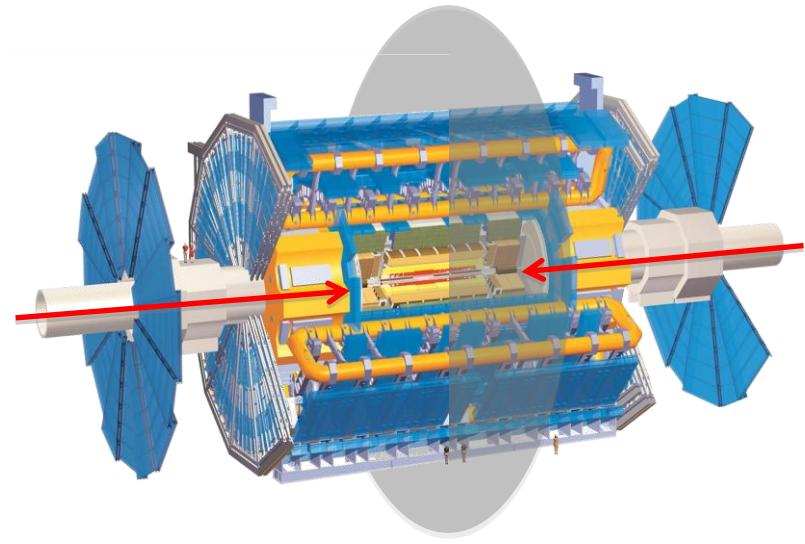
Impulsmessung
durch Ablenkung im Magnetfeld
(nur geladene Teilchen)



- Stärke der **Krümmung** → Betrag des **Impulses**
- **Richtung** der Krümmung → **elektrische Ladung**
- Impulsmessung aus Ortsmessung

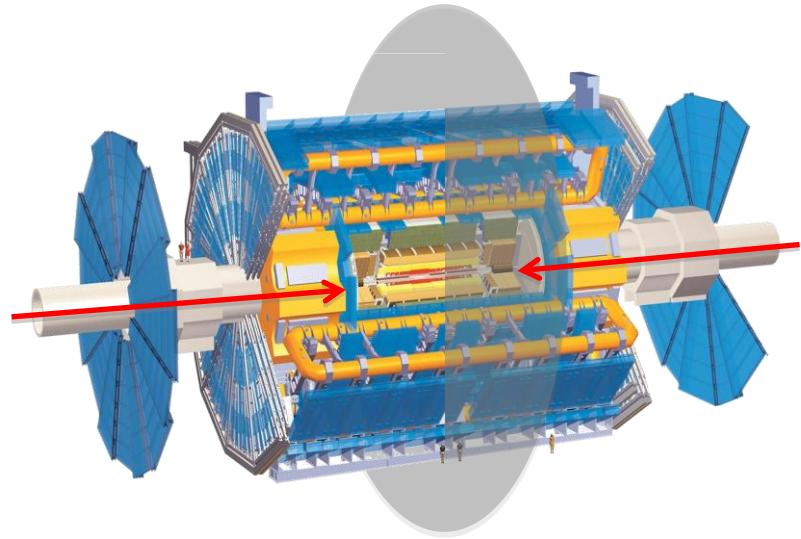
Was misst ATLAS?

Energiemessung
im Kalorimeter
(alle Teilchen)



- Energieabgabe durch Wechselwirkung mit dem Material
→ Erzeugung neuer Teilchen: „Aufschauern“

Was misst ATLAS?



- Spur geladener Teilchen in **Spurdetektoren**
→ **Impuls**
→ Vorzeichen der **elektrischen Ladung**
- Energie in **Kalorimetern**

ATLAS Detektor - Bauteile

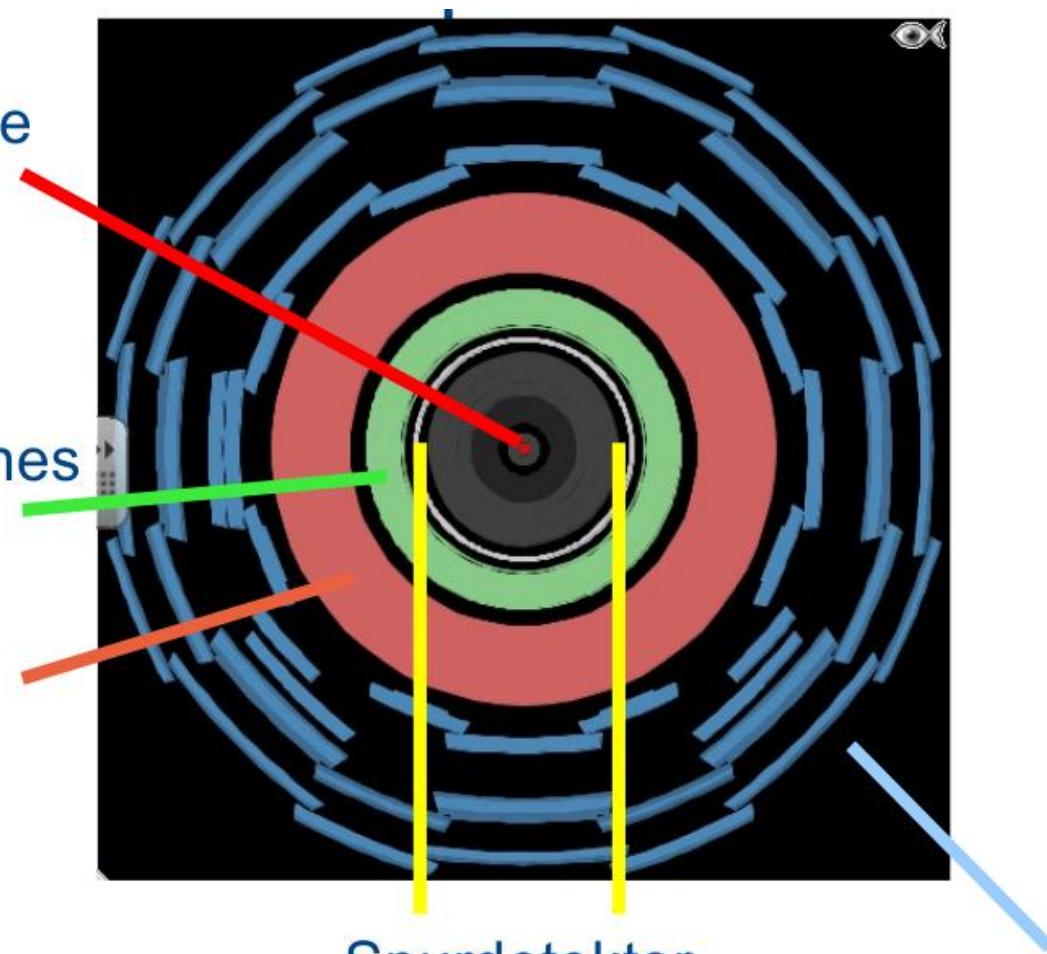
Strahlachse

elektromagnetisches
Kalorimeter

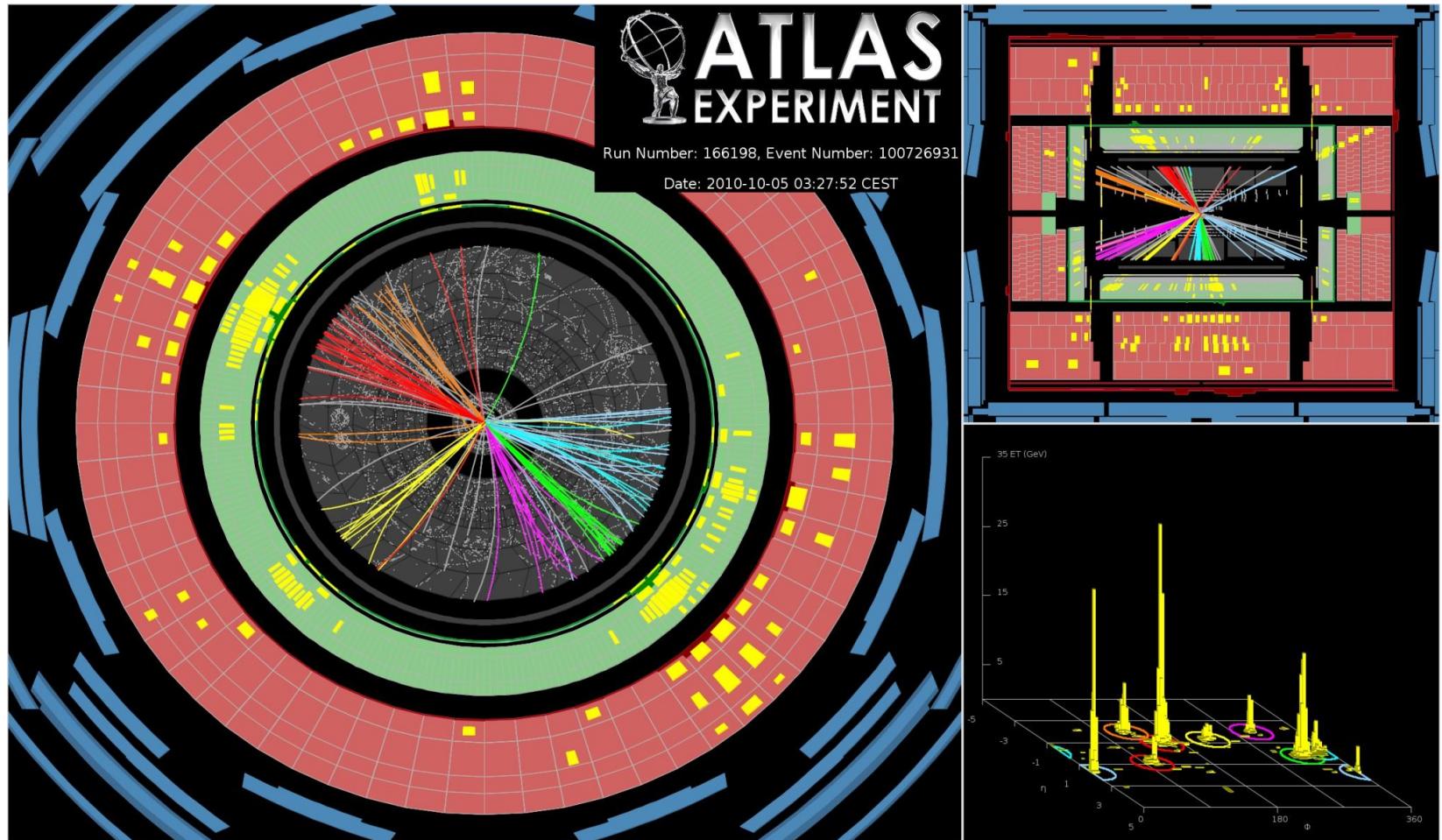
hadronisches
Kalorimeter

Spurdetektor

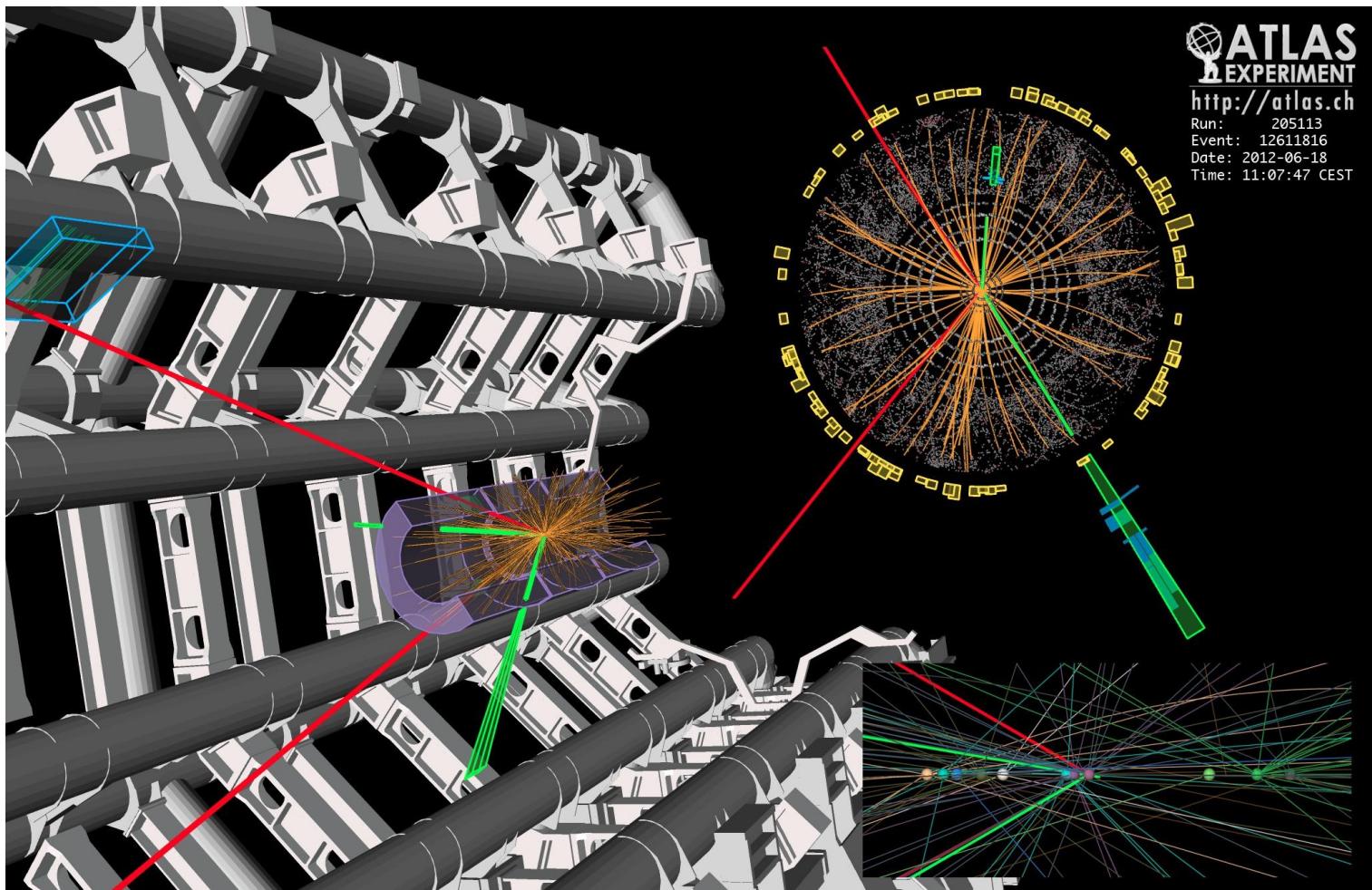
Myonkammern



Was sieht man da eigentlich?



Was sieht man da eigentlich?



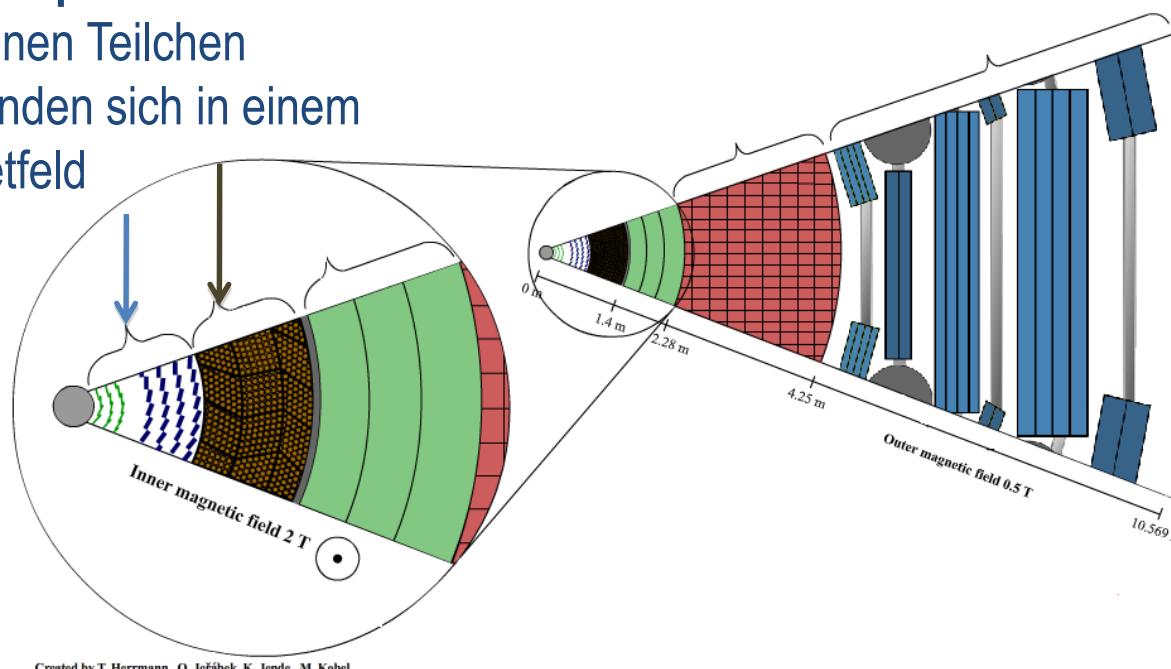
Kandidat für Higgs-Ereignis

$H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$

Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

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

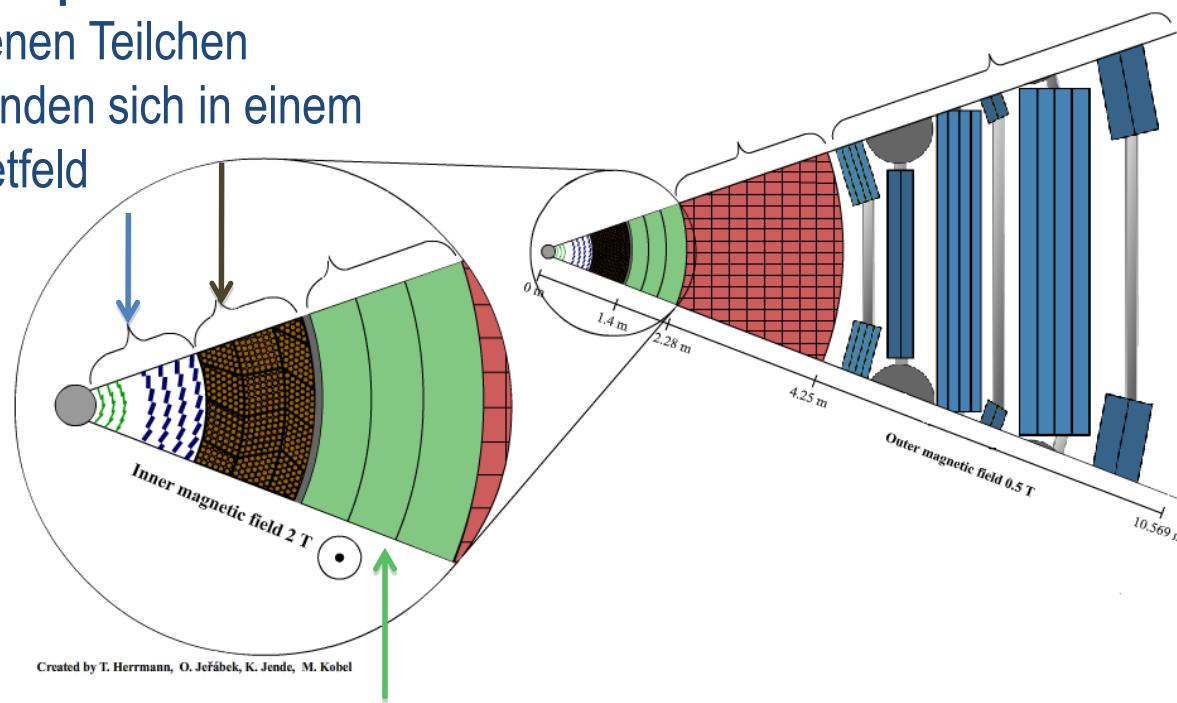


Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

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



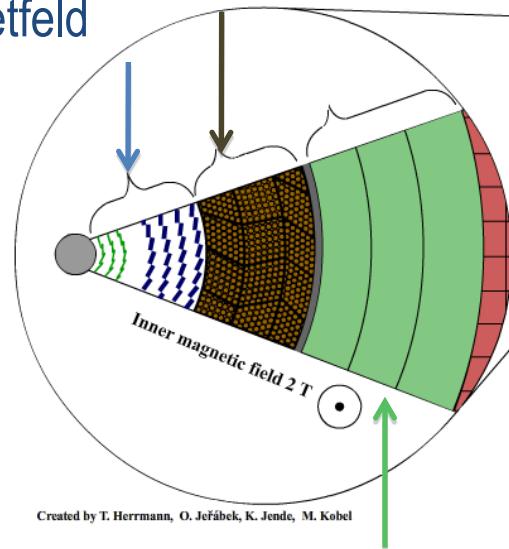
Elektromagnetisches Kalorimeter

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

Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

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

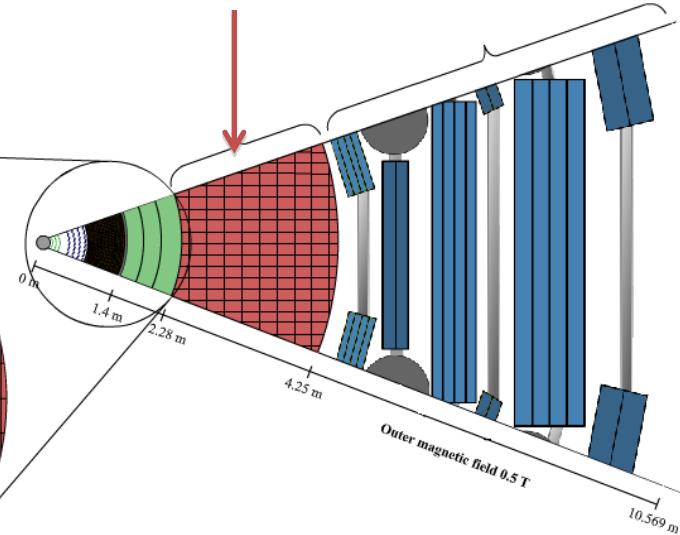


Elektromagnetisches Kalorimeter

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

Hadronisches Kalorimeter

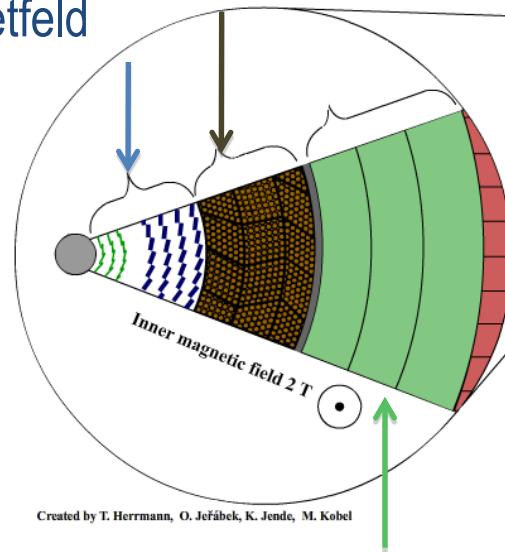
... misst die **Energie** von Hadronen
(= aus Quarks bestehende Teilchen)



Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

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

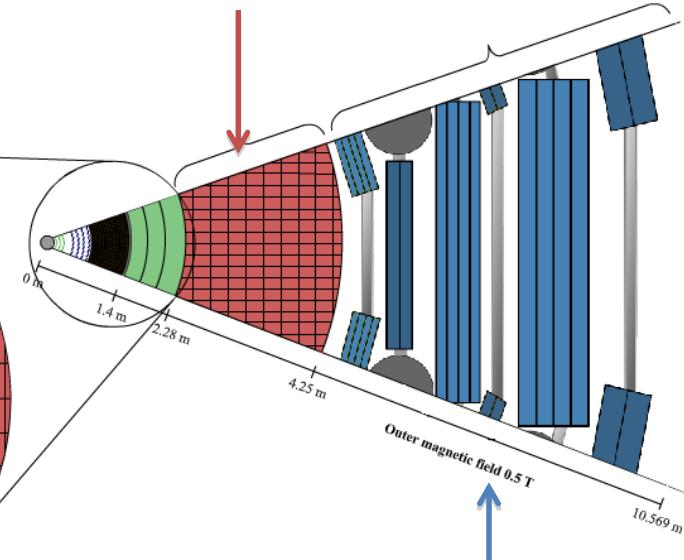


Elektromagnetisches Kalorimeter

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

Hadronisches Kalorimeter

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

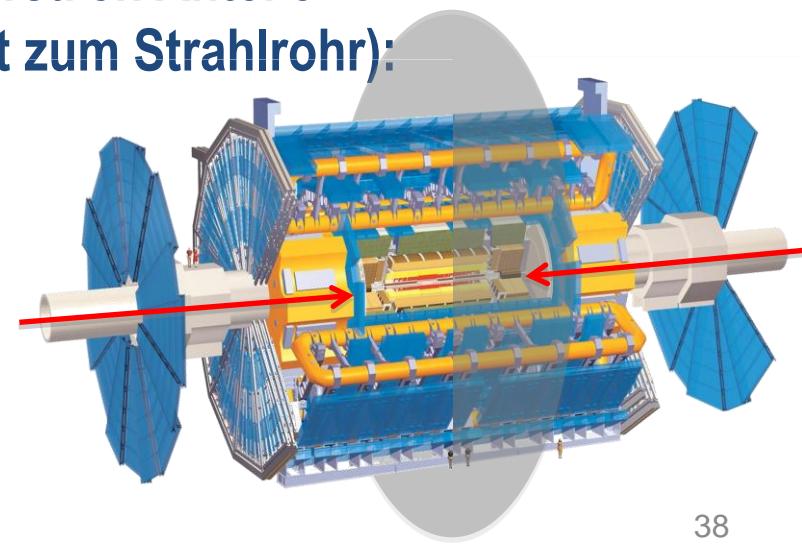


Myonenkammern

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

Was misst ATLAS?

- **Spur**
Impuls und Vorzeichen der elektrischen Ladung
in **Spurdetektoren**
- **Energie in Kalorimetern**
- Besonders wichtig sind die **transversalen Anteile**
von Impuls und Energie (**senkrecht zum Strahlrohr**):
 - **PT**: transversaler Impuls
 - **ET**: transversale Energie



Jetzt seid Ihr dran!

- Fragen soweit?
- Handouts zur Erinnerung für die Messung später!
- Teilchenidentifikation zum Verstehen und Ausprobieren:

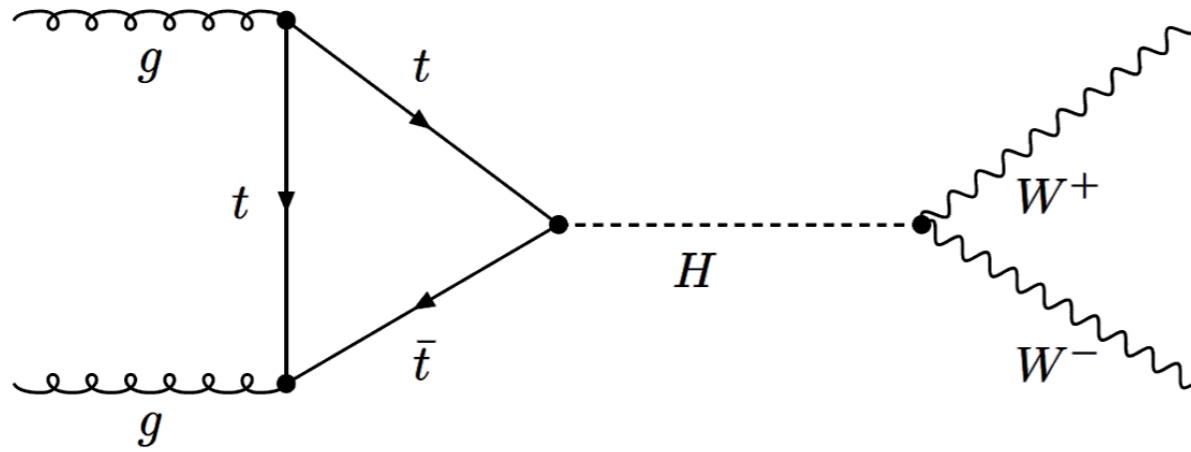
http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm

Teil 4: Vor der Messung

Alle Zutaten um selbst als Teilchendetektiv tätig zu werden!

Die Hauptdarsteller heute: W-Bosonen

- Mit ihrer Hilfe werden wir den Aufbau von Protonen erforschen...
- ...und erfahren, wie Physiker nach dem Higgs-Boson suchen.





W-Bosonen...

- ...sind Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung
- ...sind elektrisch geladen: W^+ , W^-
- ...gehören zu den massereichsten Teilchen des Standardmodells (80,4 GeV !)
- ...wandeln sich nach ca. 10^{-25} s in leichtere Teilchen um
→ kurze Reichweite

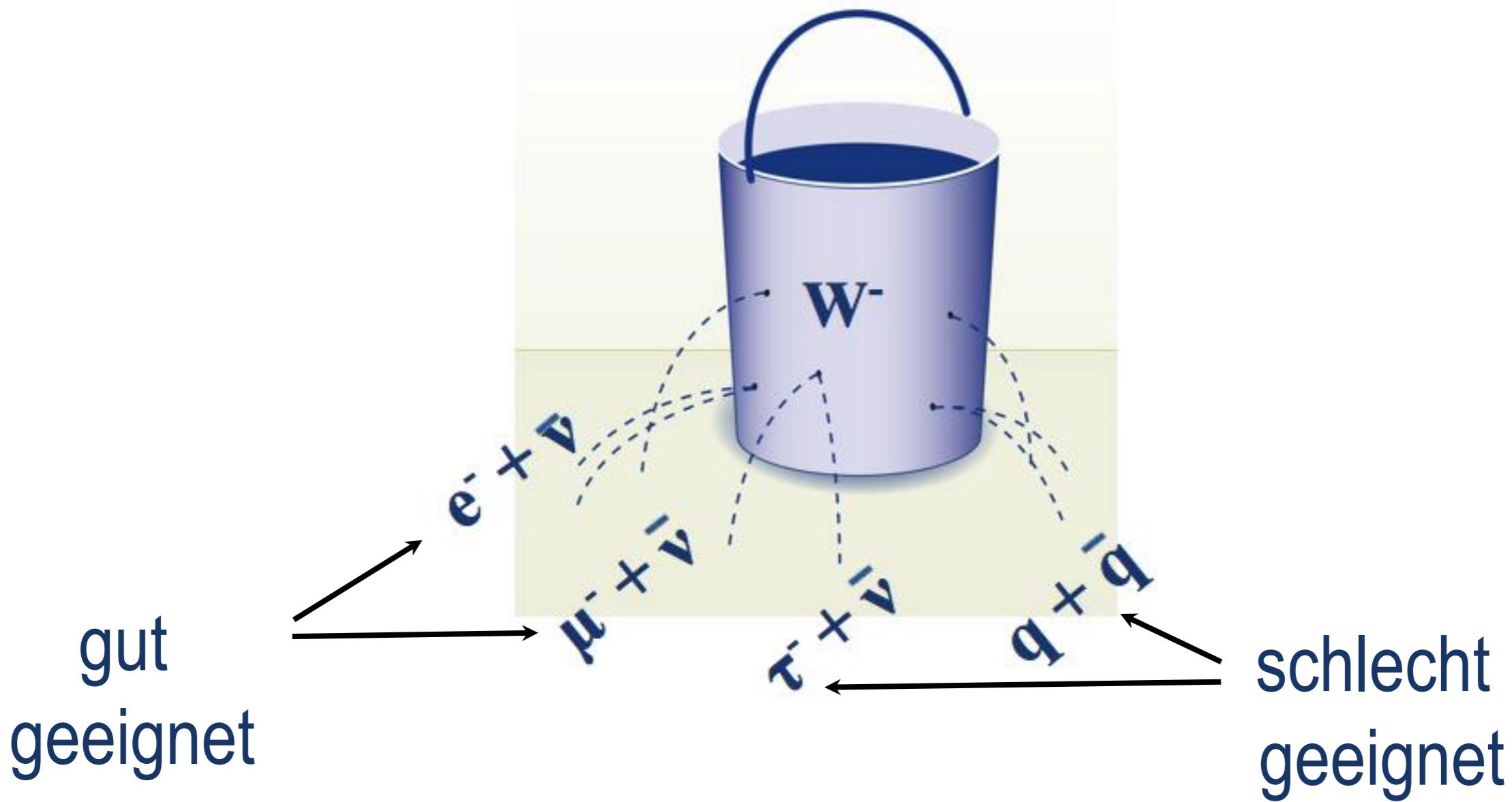
0	0	γ	Photon
0	0	g	Gluon
91,2 GeV	0	Z^0	Z Boson
80,4 GeV	± 1	W^\pm	W Boson

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



Wie findet man W-Bosonen?

- man sucht nach Zerfallsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann





Wie findet man W-Bosonen?

- Ihr sucht heute nach folgenden Zerfallsprodukten:

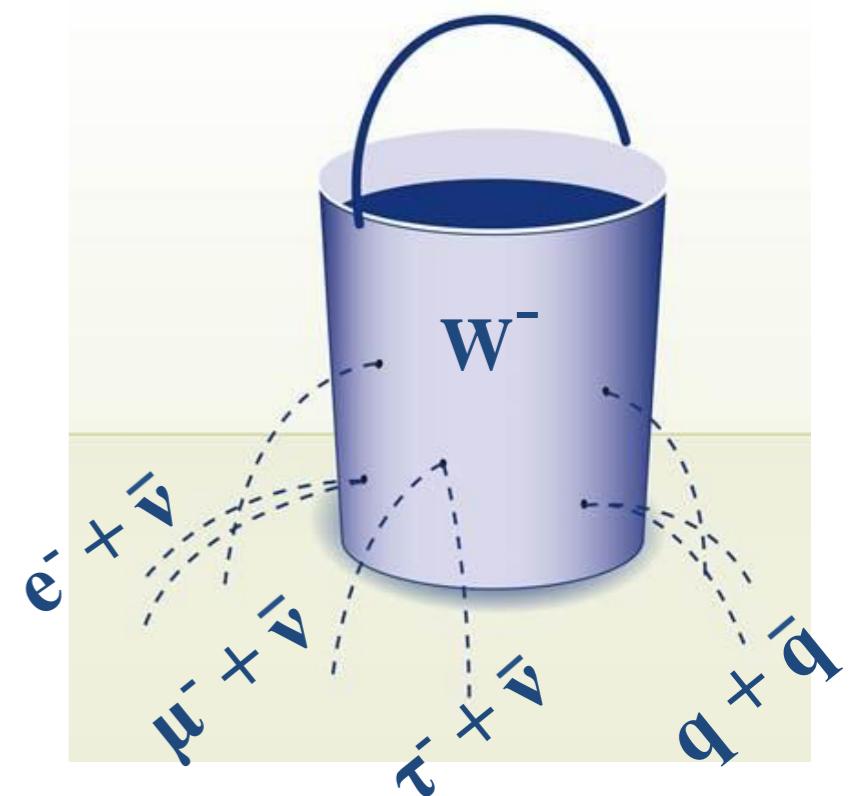
$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$$

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

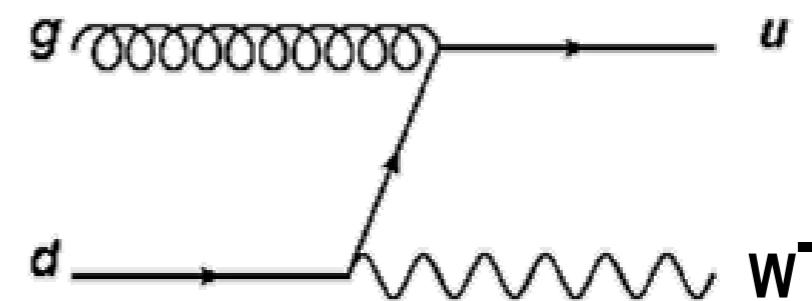
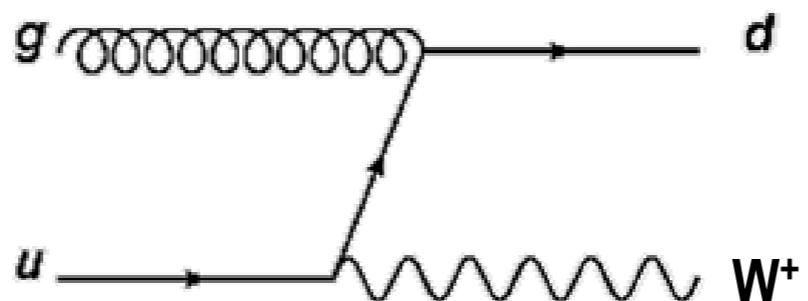
- Das sind **Signalereignisse**. Alle anderen Ergebnisse von Kollisionen sind "Untergrund".





Wie entstehen W-Bosonen?

- Beta-Zerfall
- Zusammenstoß von Protonen im LHC:



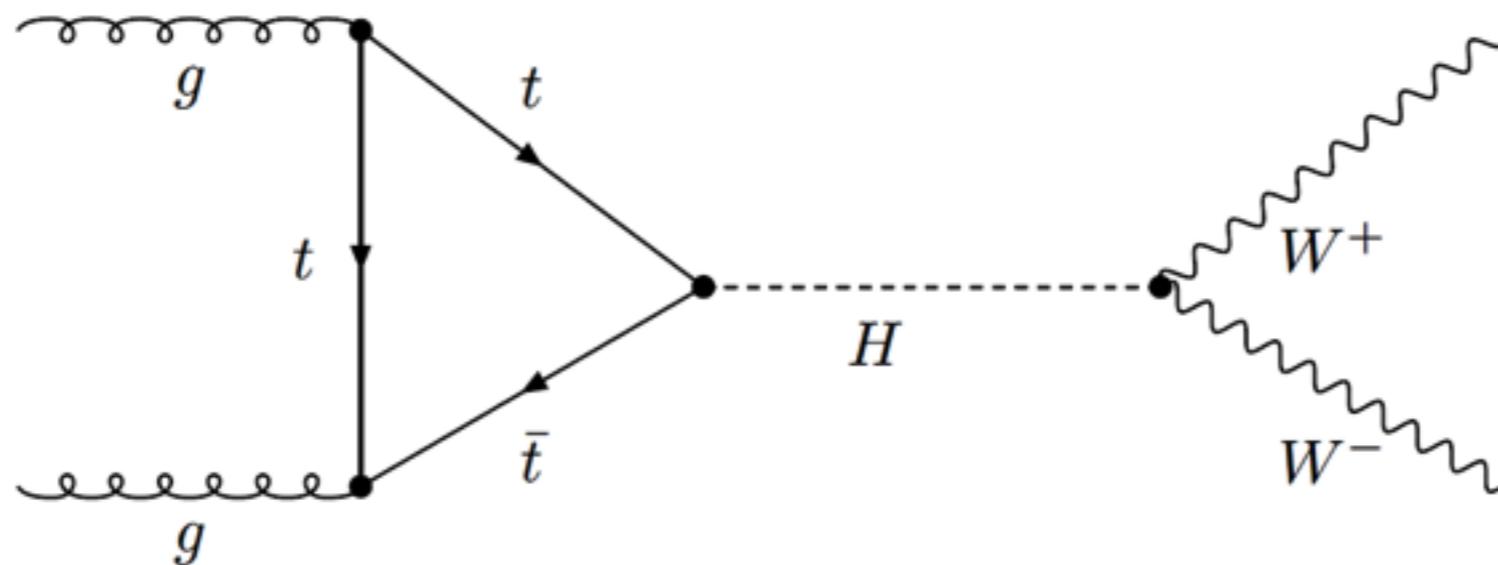
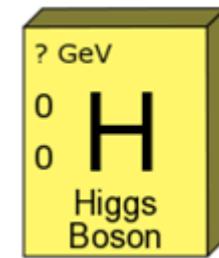
$$u + g \rightarrow W^+ + d$$

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

1. Messaufgabe: In welchem Verhältnis sollten W^+ und W^- im LHC entstehen?



Die Suche nach dem Higgs

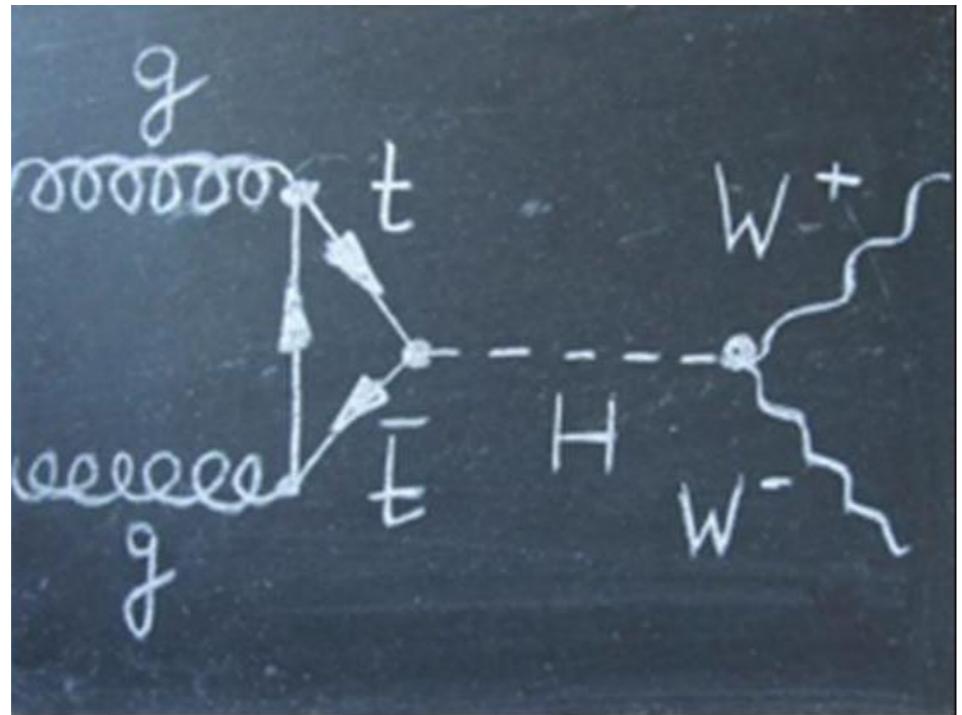


- Ein möglicher Prozess für die Produktion & den Zerfall des Higgs
- 2 Gluonen fusionieren zu einem Higgs-Teilchen
- Higgs-Teilchen zerfällt in 2 W-Bosonen

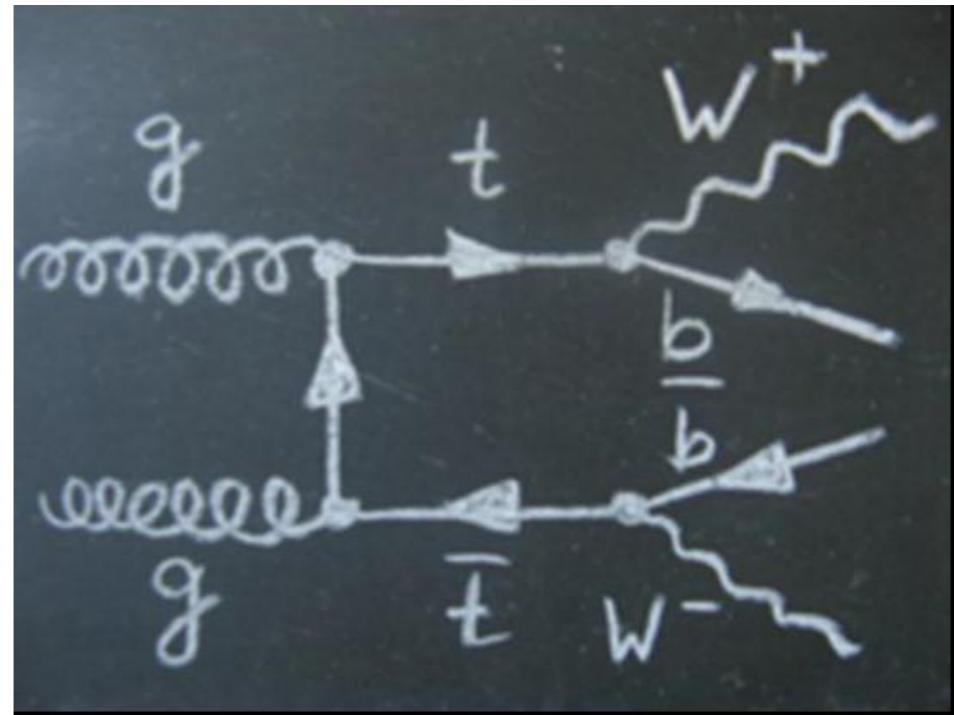


Higgs-Boson oder Untergrund?

Zwei W-Bosonen können von einem Higgs-Boson stammen...



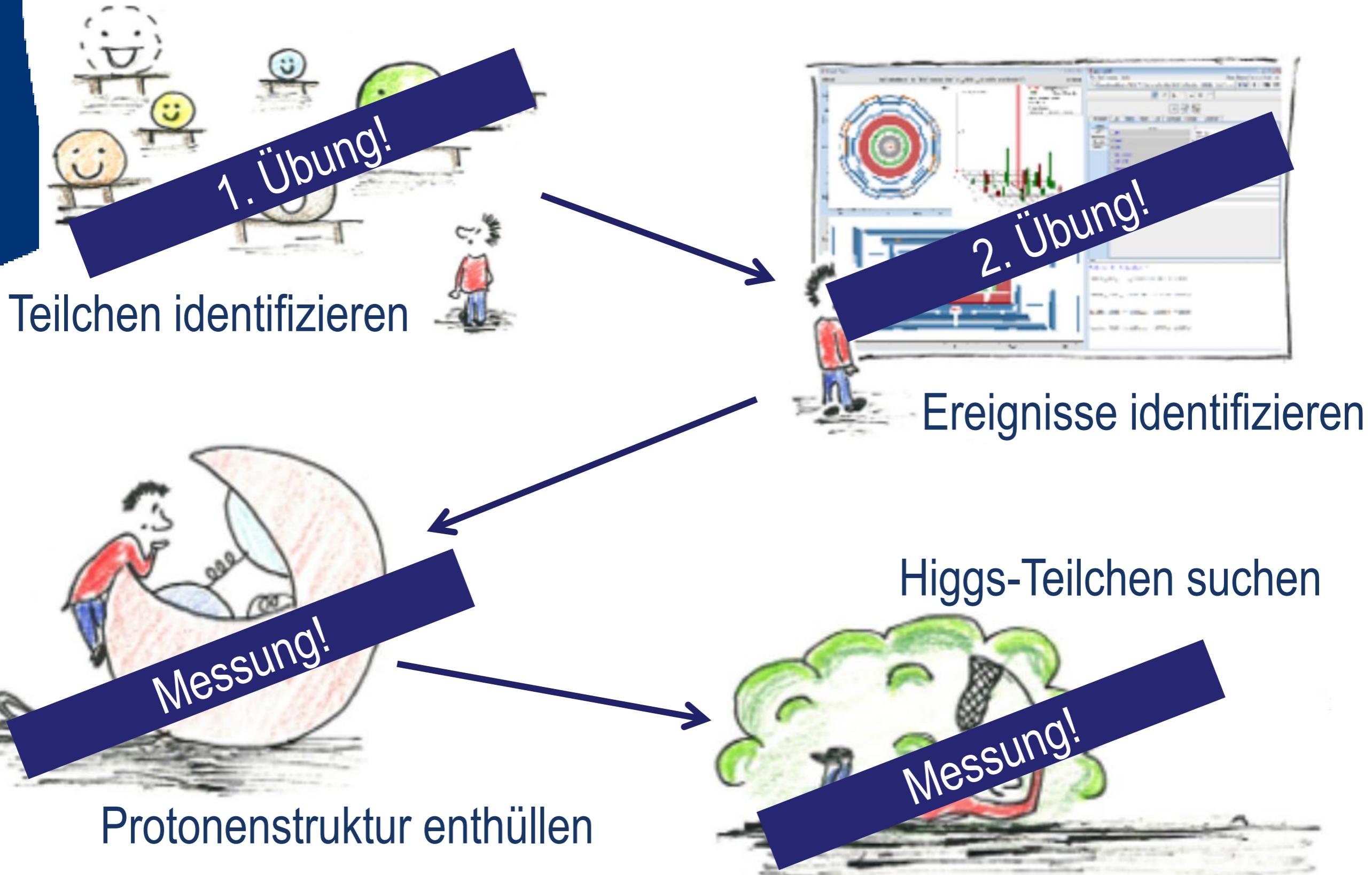
...aber sie können auch anders entstanden sein (Untergrund), z.B. so:



➤ Wie können wir Higgs-Bosonen von Untergrund unterscheiden?
Messung des Winkels $\Delta\Phi$ zwischen den beiden Leptonen (senkrecht zum Strahlrohr)

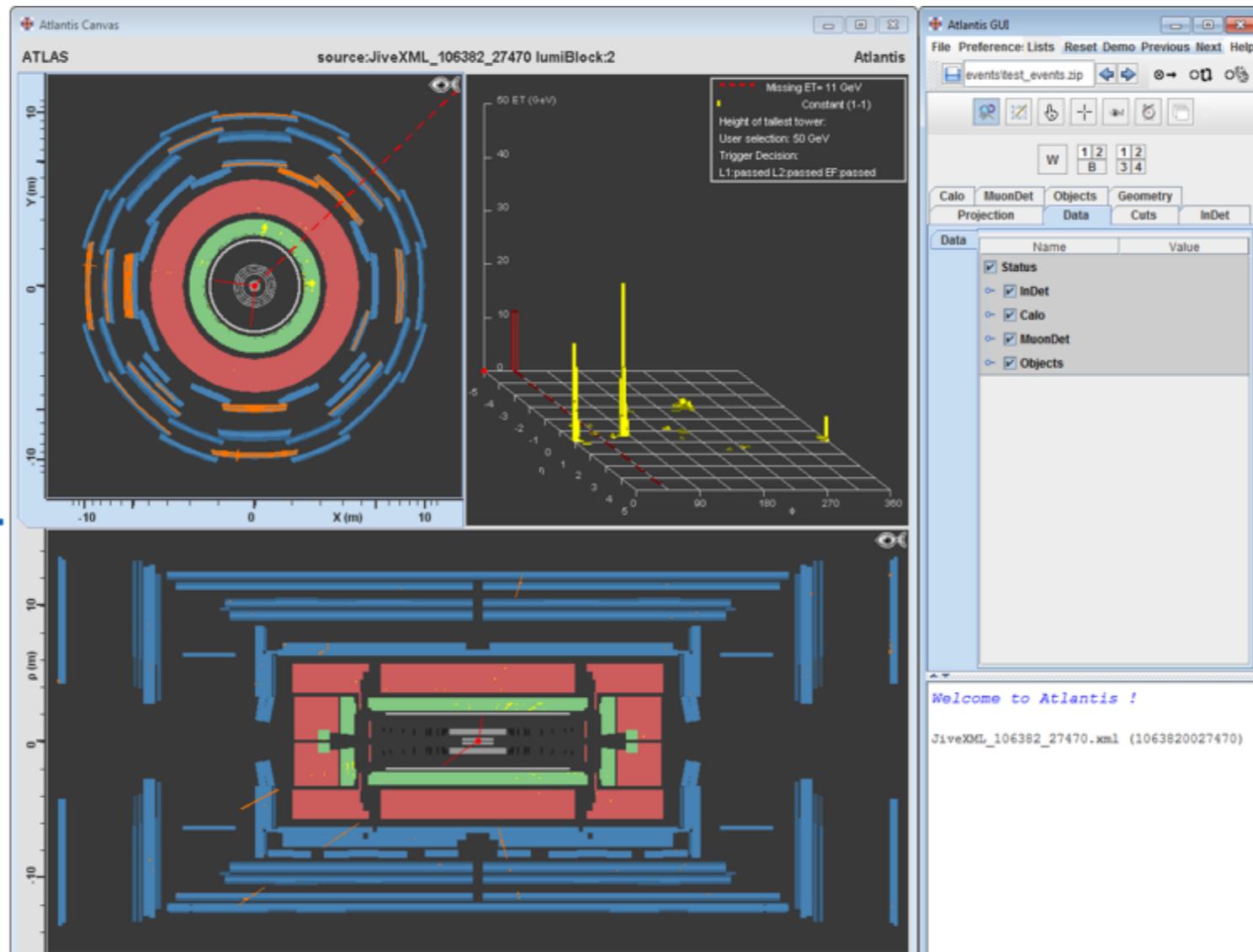
2. Messaufgabe: Suche nach W-Bosonen und Bestimmen des Winkels!

Unser Plan für heute



Event-Display MINERVA

Anzeige
der
Teilchen-
spuren



Werkzeuge,
Navigation

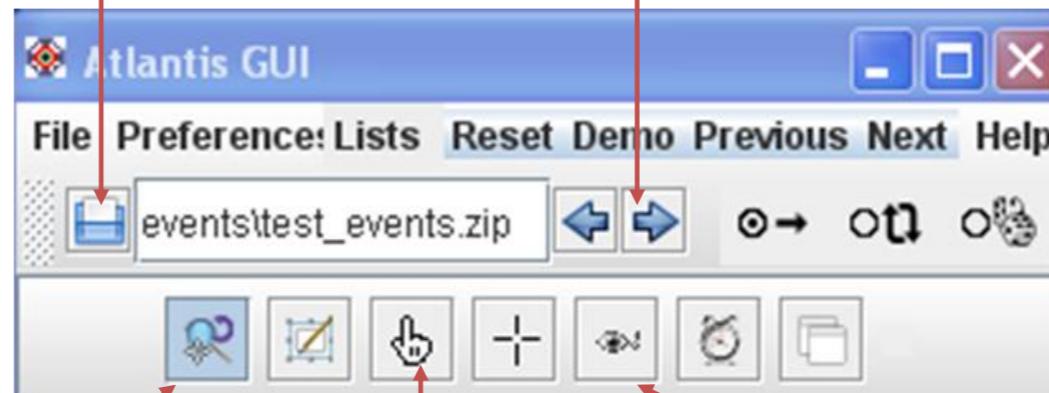
Einstellungen

Informationen zu
Teilchenspuren

Die Software MINERVA

Datenpaket
öffnen

Datenpaket
durchblättern



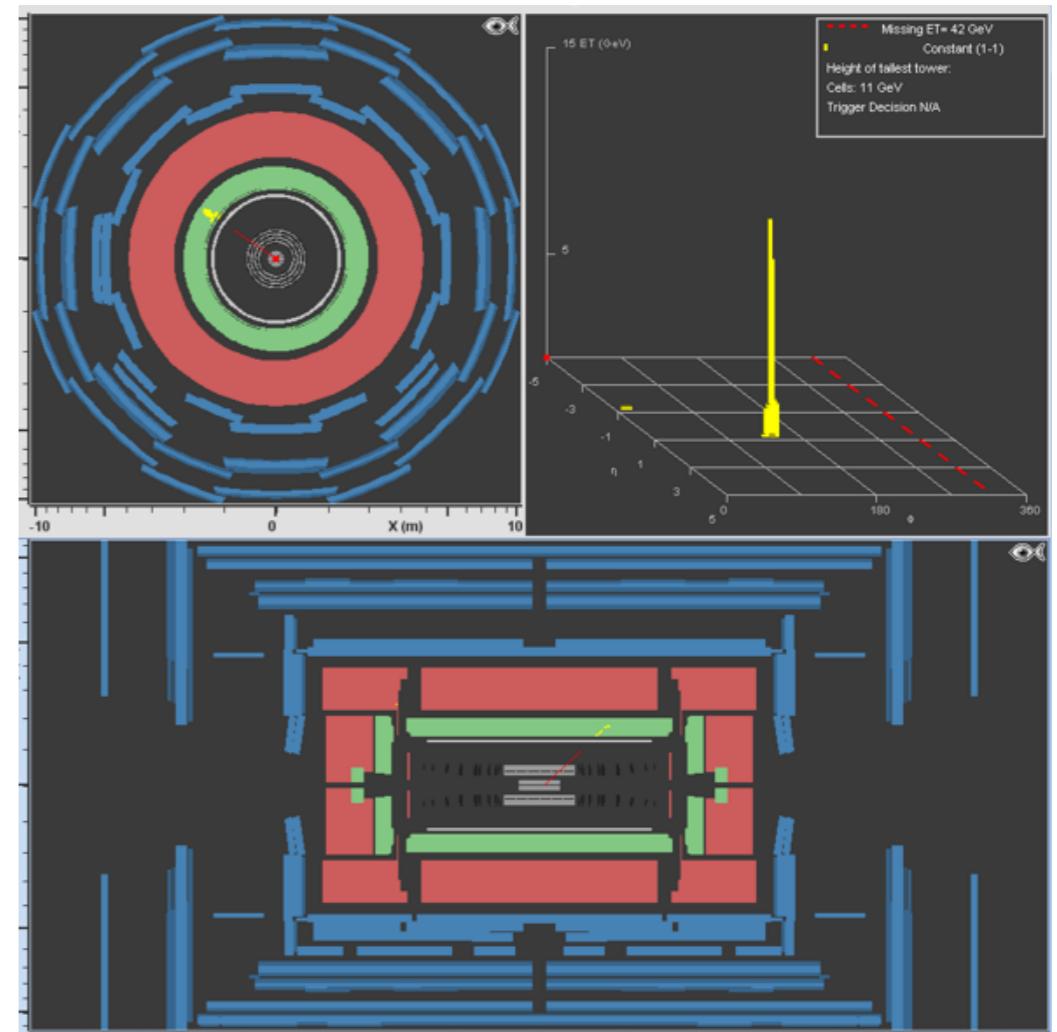
Zoom

Spur-
Auswahl

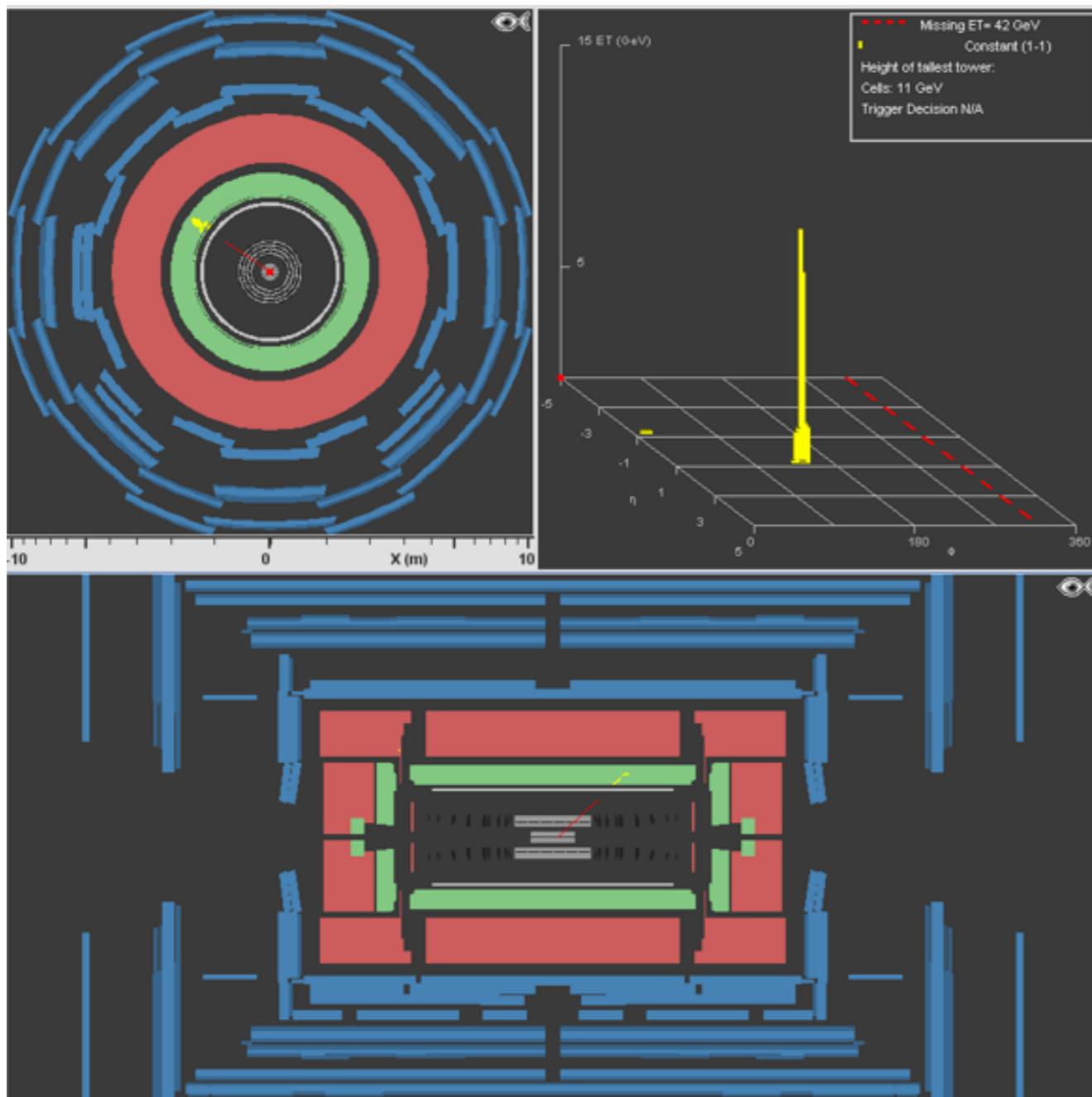
Fischaugen-
Zoom

Teilchenrekonstruktion

- Impulsmessung
 - Energiemessung
 - Ladungsbestimmung
- Grafische Darstellung der Teilchenspuren und Energieeinträge in einem „Event-Display“
- Wo wird das Signal hinterlassen?
 - Was ist die Ladung?
 - Wie hoch sind Energie bzw. Impuls?

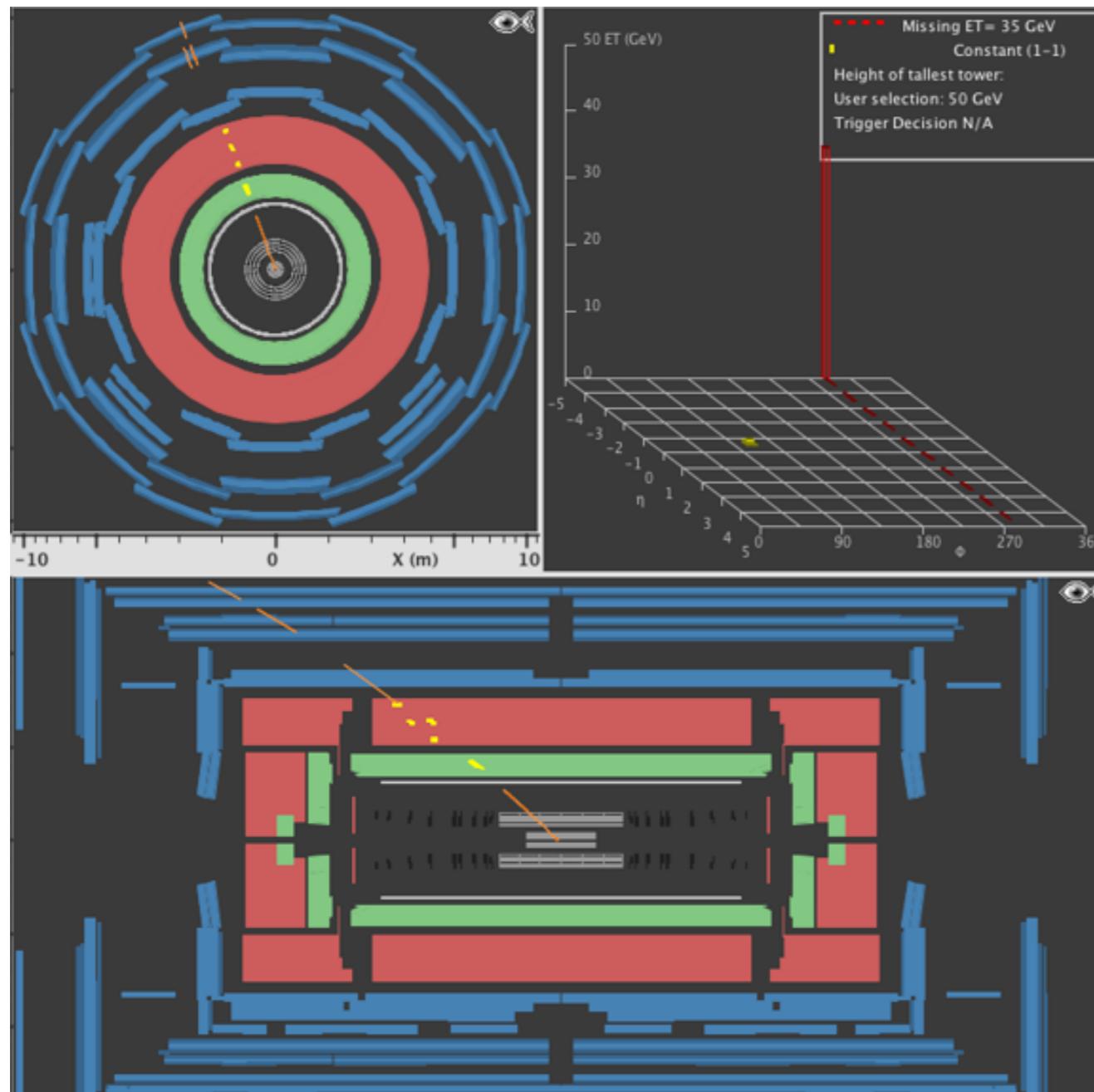


Teilchenspuren: Elektron oder Positron



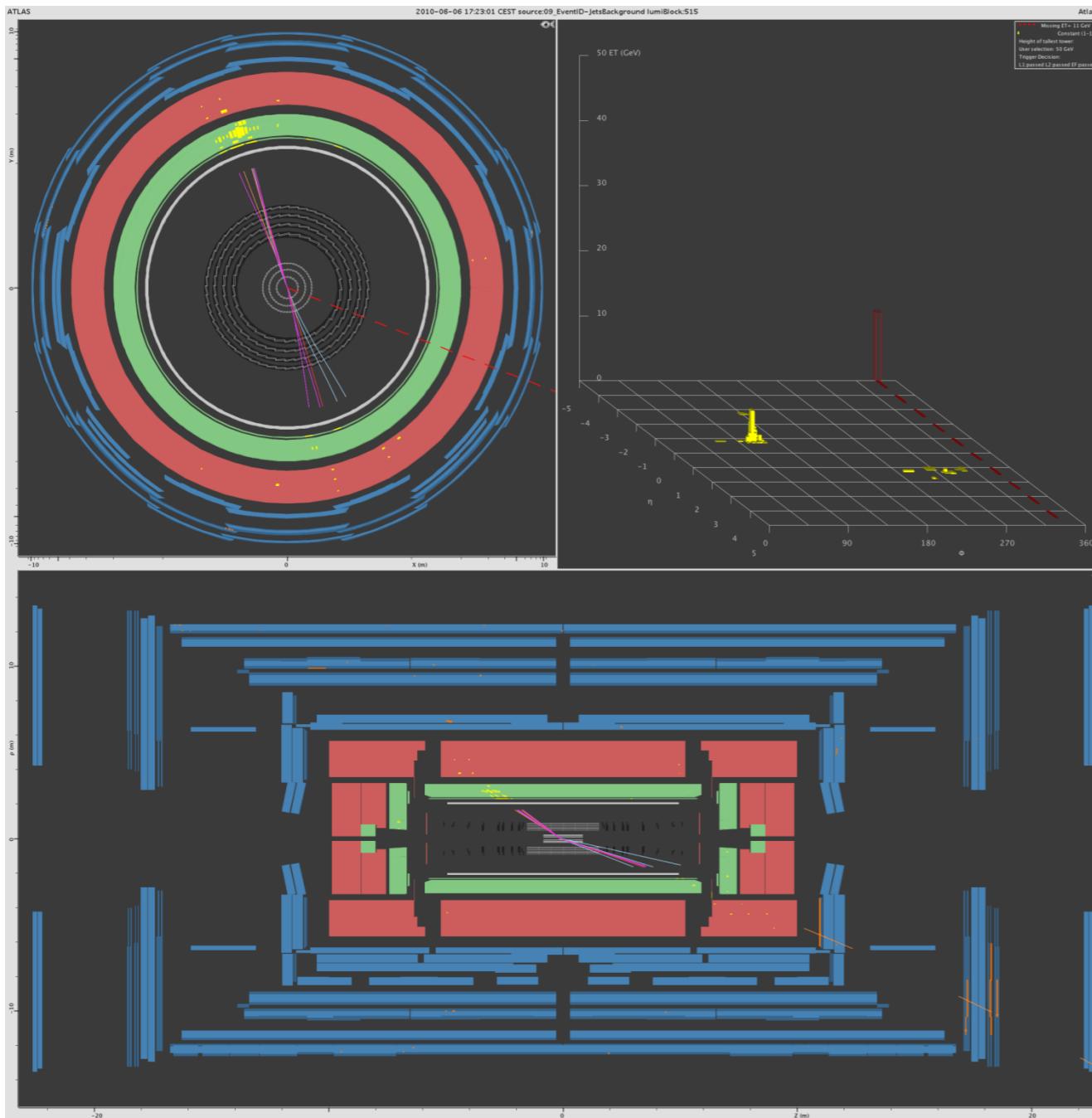
- Spur im inneren Detektor
- Vollständige Energieabgabe im elektromagnetischen Kalorimeter
- Keine Energieabgabe im hadronischen Kalorimeter
- Photon:
Wie Elektron, aber ohne Spur im inneren Detektor

Teilchenspuren: Myon oder Antimyon



- Spur im inneren Detektor und in den Myonenkammern
- Wenig Energieabgabe in Kalorimetern
- Spuren in den Myonenkammern sind teils schwierig erkennbar
➤ Beide Ansichten nutzen!

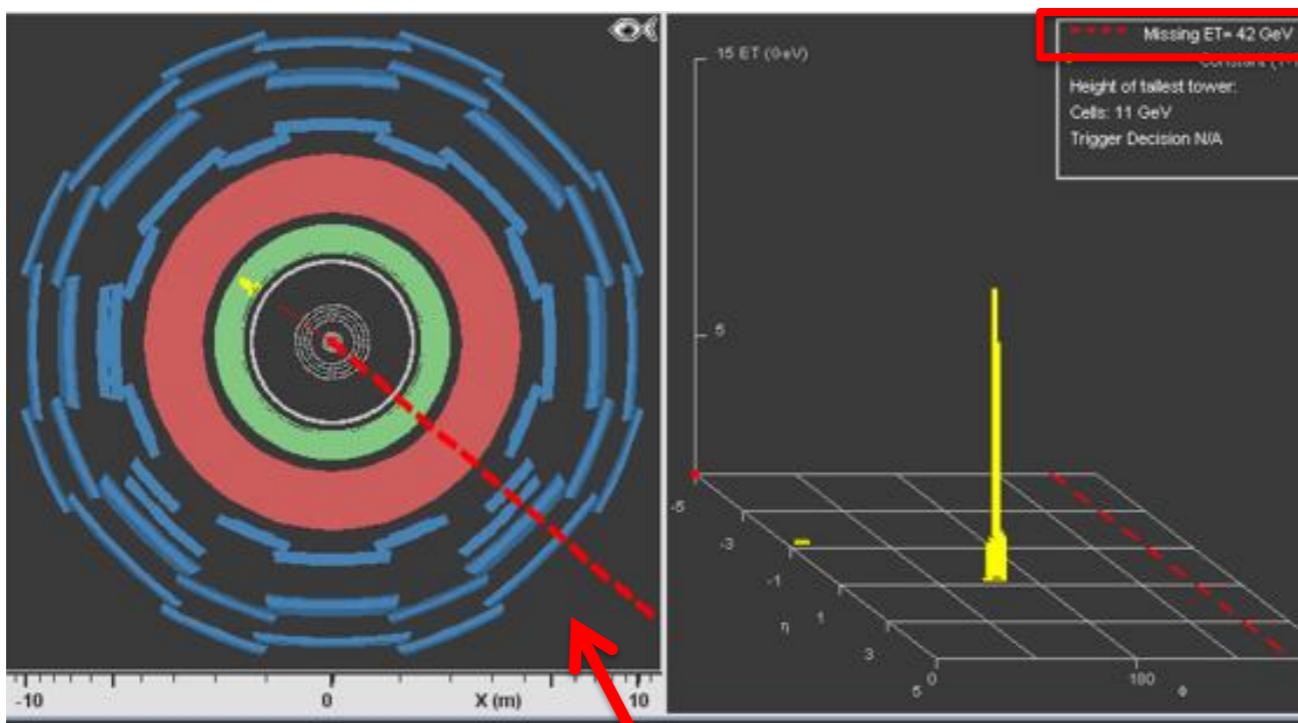
Teilchenspuren: Quarks



- Quarks erzeugen Bündel aus Hadronen (z.B. Pionen, Protonen, Neutronen): **Jets**
- Nachweis:
 - Spurbündel
 - Energieabgabe in beiden Kalorimetern

Neutrinos

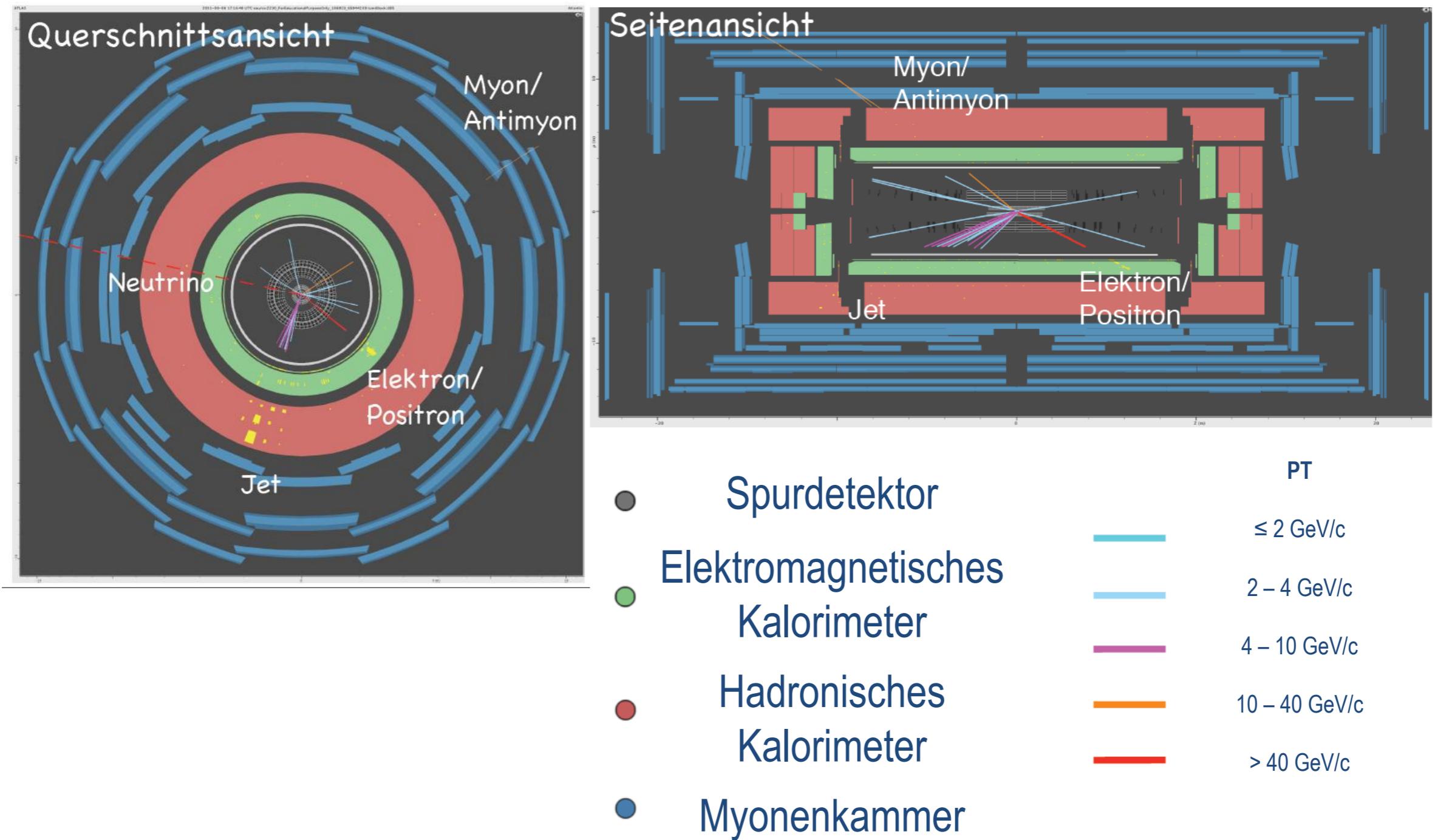
- ...hinterlassen keine Spur und keine Energie in den Kalorimetern.
➤ **Woran kann man sie trotzdem erkennen?**
- Ersatzgröße: fehlender transversaler Impuls „**Missing ET**“ (**MET**)
- Berechnet aus Impulserhaltung in der Kollision



Betrag des fehlenden Impulses

Die Richtung des fehlenden Impulses wird durch eine gestrichelte Linie dargestellt.

Teilchenspuren: Übersicht



Aktiv werden!

- Übung 1: Teilchenidentifikation

http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_lhcphysics3.htm

- Minerva starten: Minerva.jar
- Übung 2: Ereignisidentifikation

http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_exercise2.htm



Nützliches für die Messung

energiereiches (Anti-)Neutrino

Elektronen, Myonen oder ihre Antiteilchen
je nach Aussehen der Spur im Detektor

! Check den Interaktionspunkt !

Anklicken der Spur mit dem Zeigefinger

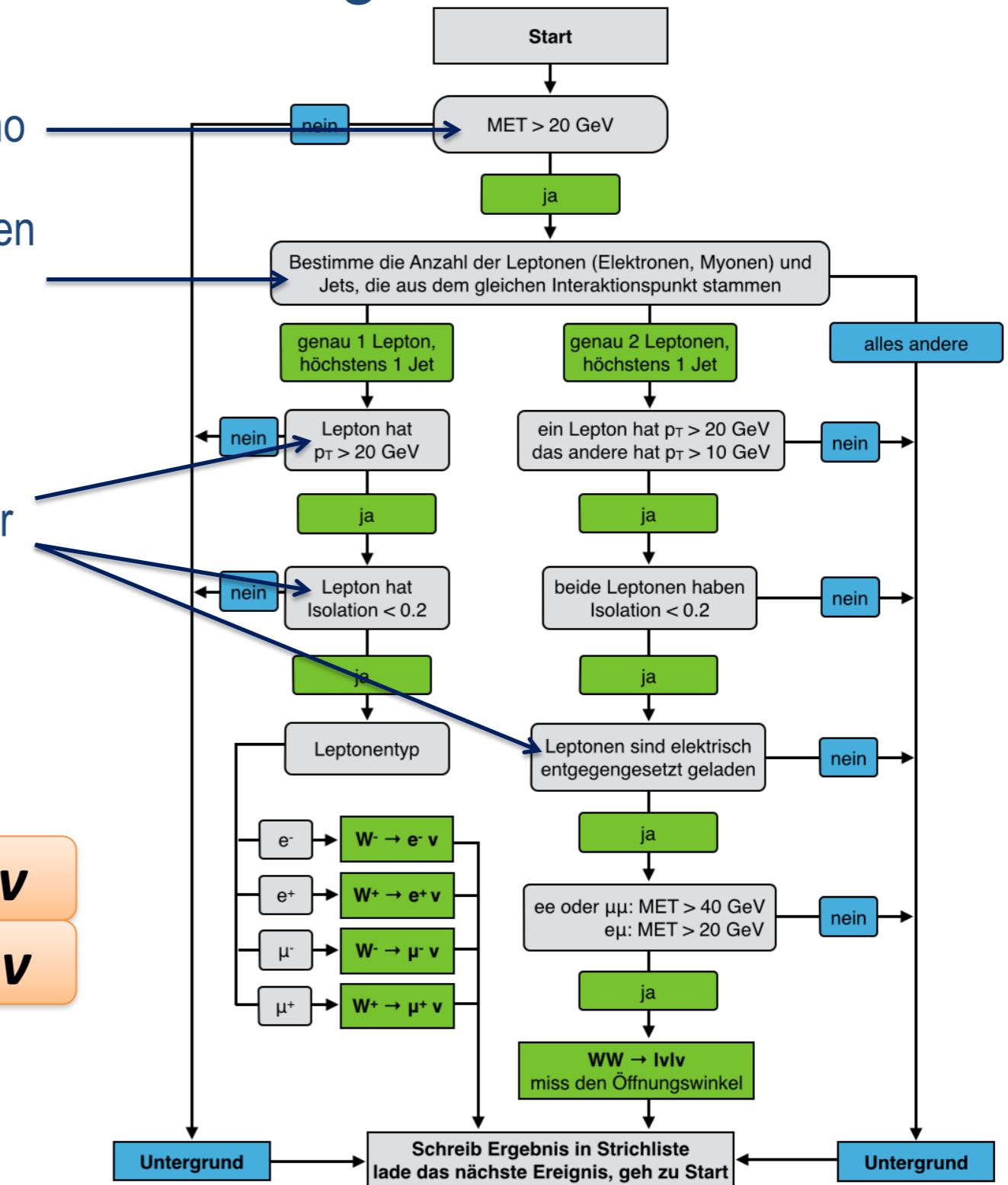
- Zur Erinnerung:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$$

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$



Nützliches für die Messung

Interaktionspunkt:

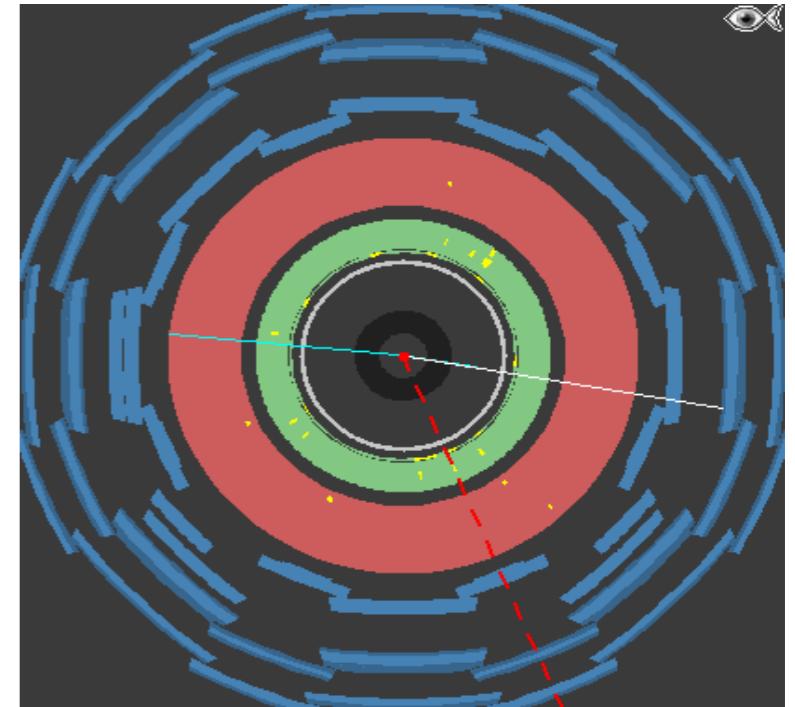
- In Seitenansicht hineinzoomen
- Punkt mit grüner Umrandung

Messen der Isolation!

- Spurauswahl-Werkzeug anklicken
- Je kleiner der Wert, desto besser isoliert

Winkel messen nicht vergessen!

- Spurauswahl-Werkzeug anklicken
- P-Taste gedrückt halten, beide Spuren markieren
- Der Winkel $\Delta\Phi$ wird in der Infobox angezeigt



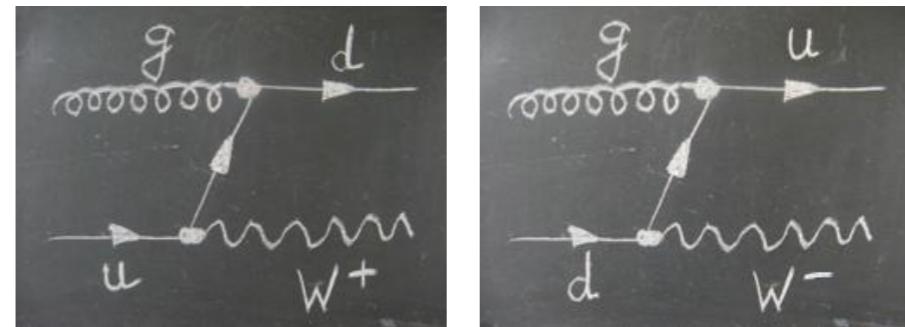
Aktiv werden!

- Jedes Team erhält Datenpaket mit Ereignisbilder aus 50 Kollisionen
 - User: MC2013
 - PW: ATLAS.is.great
- Jedes Team durchsucht sein Datenpaket nach Signalereignissen für W- und WW-Zerfälle
 - Strichliste nicht vergessen!

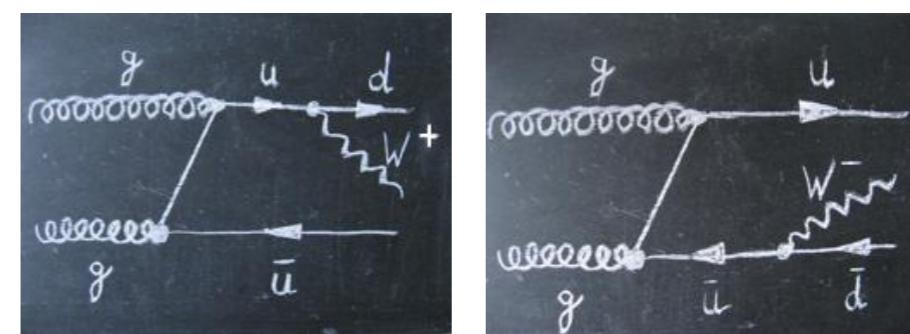
Auswertung

Das W^+ / W^- -Verhältnis

- Welches Verhältnis von W^+ und W^- -Bosonen hattet ihr erwartet? Was könnte ein Grund für ein abweichendes Ergebnis sein?
 - Bei Protonen-Kollisionen können W -Bosonen bei Quark-Gluon-Wechselwirkungen entstehen. Hierbei entstehen doppelt so viele W^+ wie W^- .



- Doch W -Bosonen entstehen auch bei Gluon-Gluon-Wechselwirkungen:



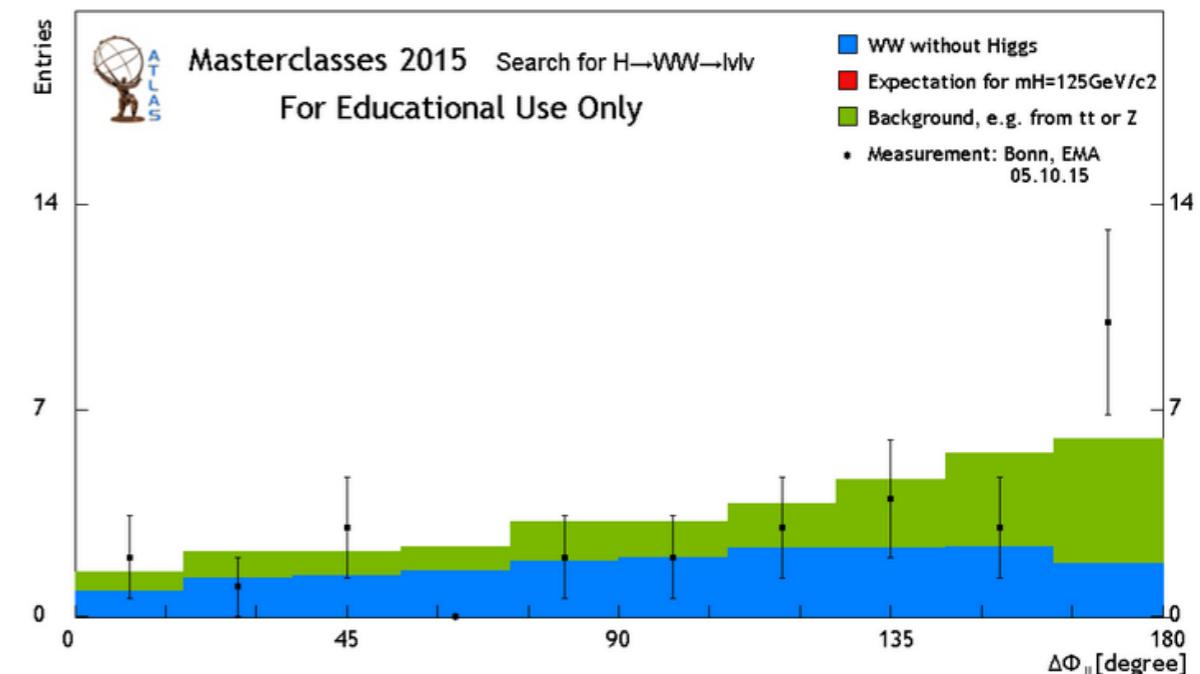
- Bei diesen Prozessen entstehen W^+ und W^- gleich oft. Dadurch wird das Verhältnis verzerrt.

Higgs-Suche am ATLAS

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults>

Datenanalyse am CERN

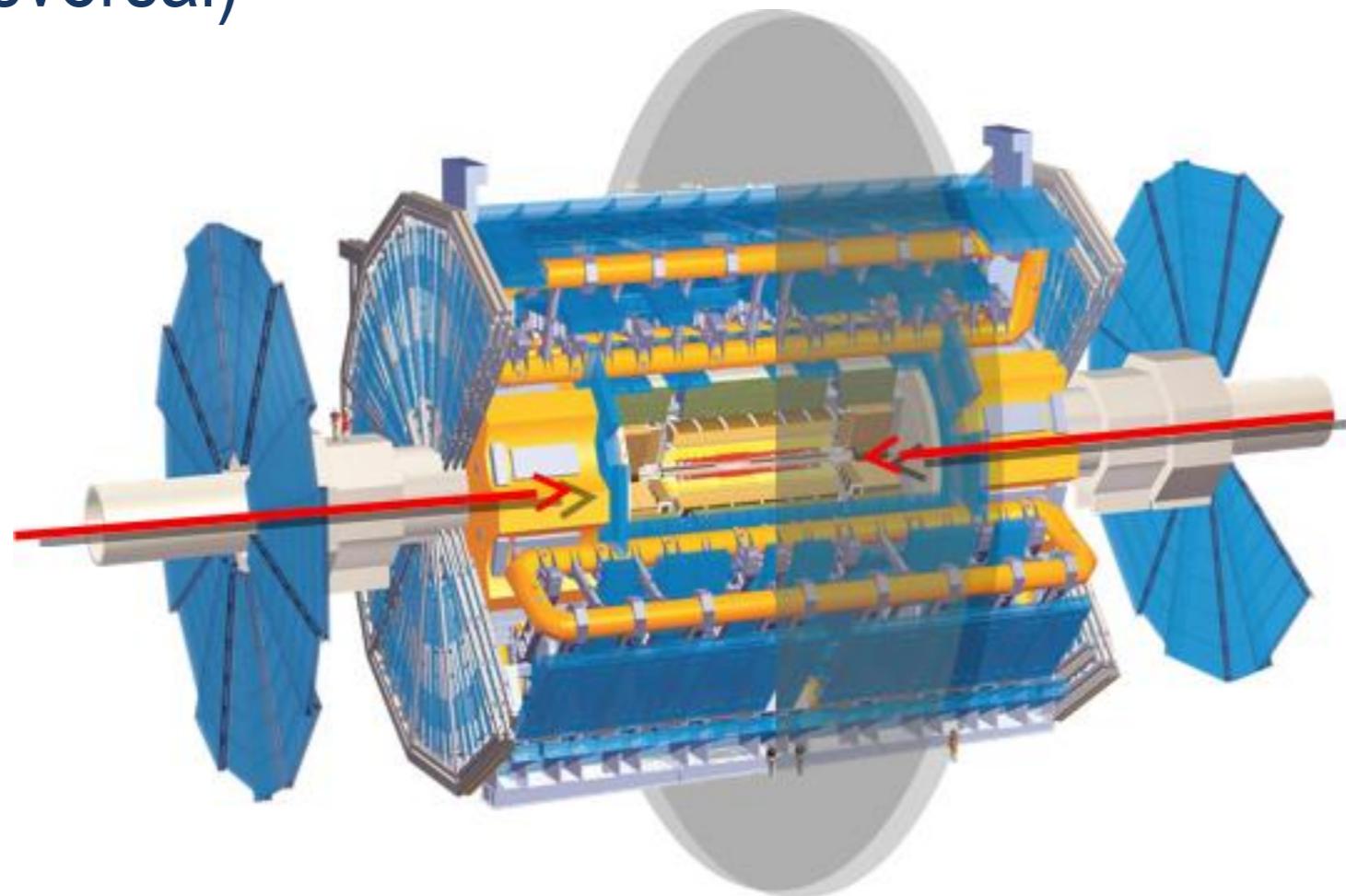
- Auswahl „interessanter“ Kollisionen (Trigger, Schnitte)
- Zusammenfassung von benötigten Messgrößen (z.B. Winkel zwischen zwei Teilchen)
- ... oft in Histogrammen (Wie oft tritt bestimmter Winkel auf?)
- Abschätzung von Messunsicherheiten
- Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und Simulationen



... und genau das haben wir heute auch gemacht!

Variablen: Transversaler Impuls

- wissen nicht, welchen Impuls die kollidierenden Teilchen genau haben
- verwenden deshalb nur den Teil senkrecht zum Strahl (transversal)



Externe Bildnachweise

- Slide 2,3,11,52: CERN
- Slide 6: CERN, SWRinfo
- Slide 7,8: FOX, CERN
- Slide 11: BNL, ATLAS
- Slide 14-115: Netzwerk Teilchenwelt
- Slide 17-25, 38, 47, 62, 92: Wikipedia
- Slide: 53: natronics.github.io/science-hack-day-2014/lhc-map/
- Slide 91: The Particle Zoo, www.particlezoo.net
- Slide: 70-79,81,82,115: ATLAS