

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

Teilchenphysik Masterclasses

Das Leben, das Universum und der ganze Rest



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT

Teil 1: Einführung

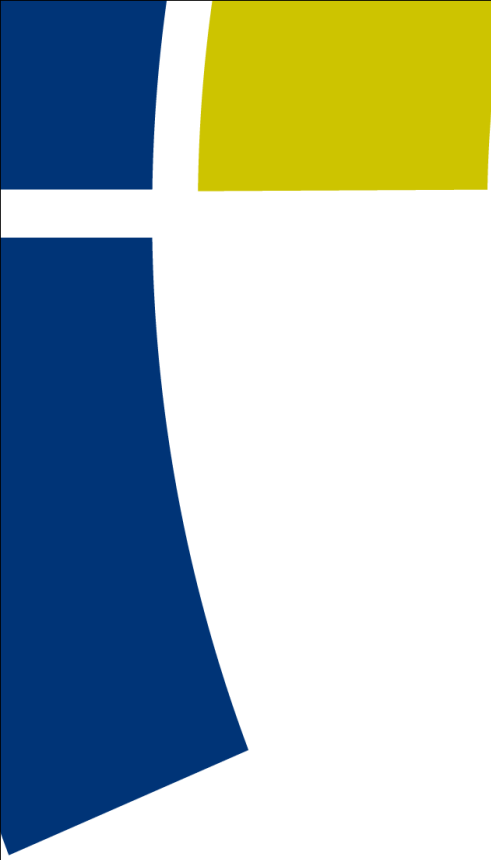
Warum Teilchenphysik?



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT



Fundamentale Fragen

Wer?

Wie?

Was?

Wieviel?

Wann?

Wo?

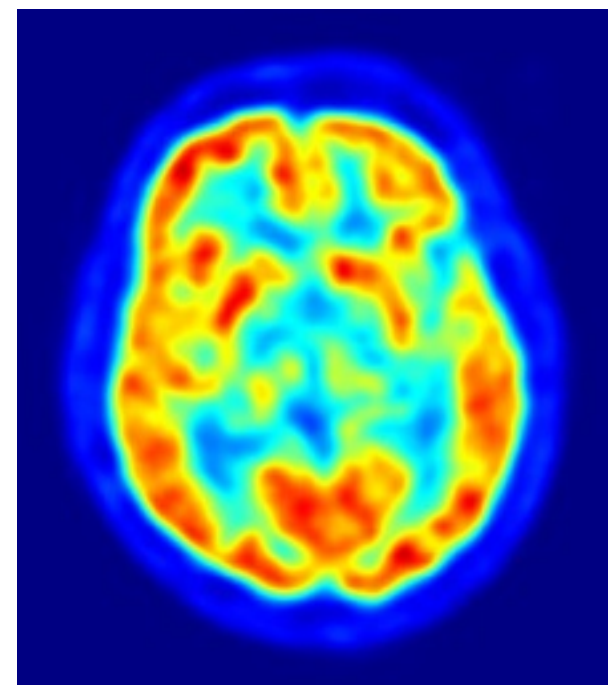
Warum Teilchenphysik?

- Interesse und Neugier!
- Erkenntnisgewinn über Geschichte, Funktionsweise und Aufbau des Universums
- Anwendungen:

World Wide Web

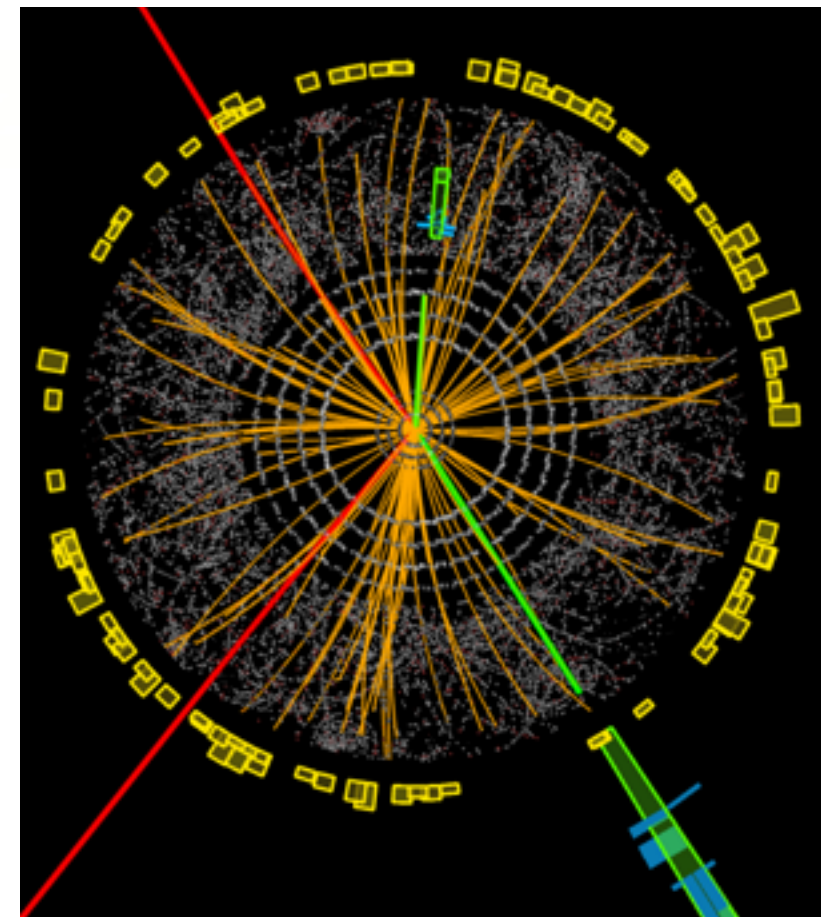


Medizin



Wie forschen Teilchenphysiker?

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

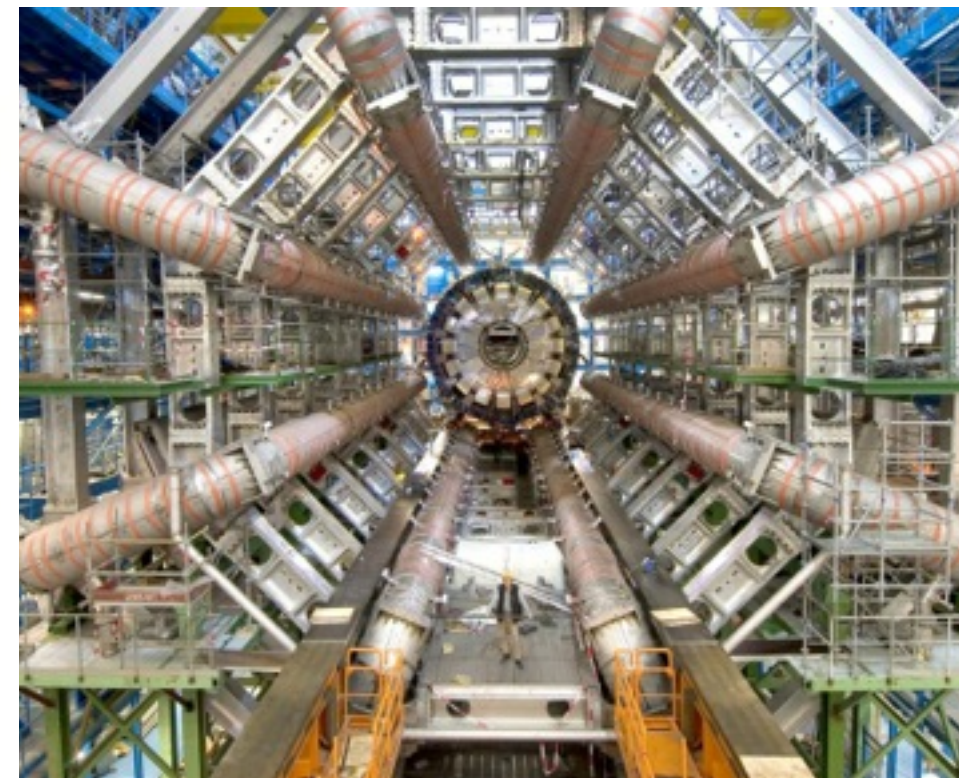


Wie forschen Teilchenphysiker?

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

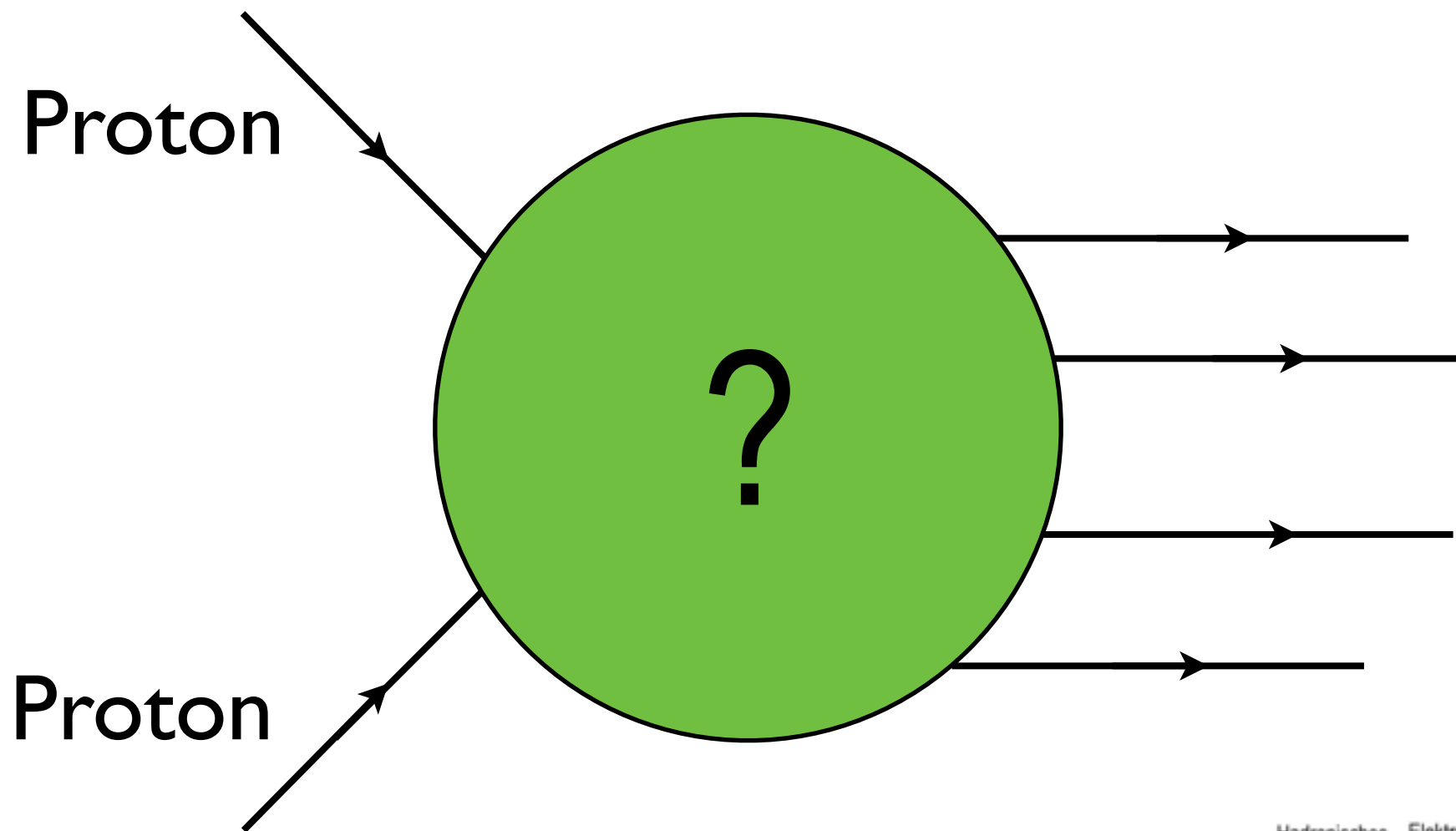


\$1.5 Millionen

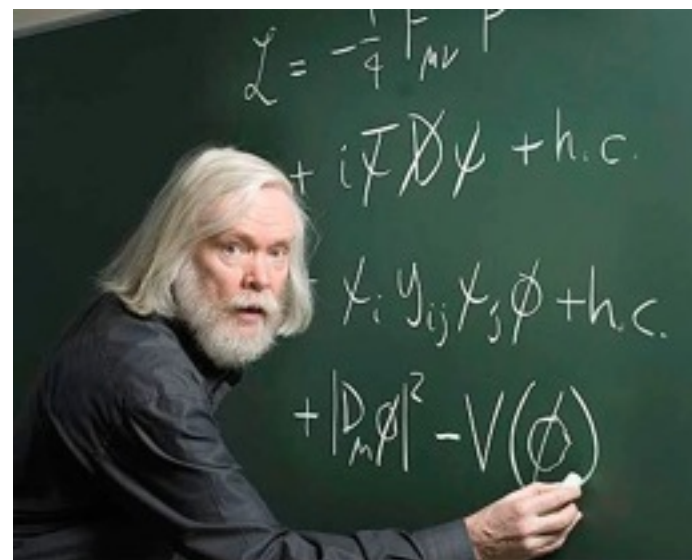


\$450 Millionen

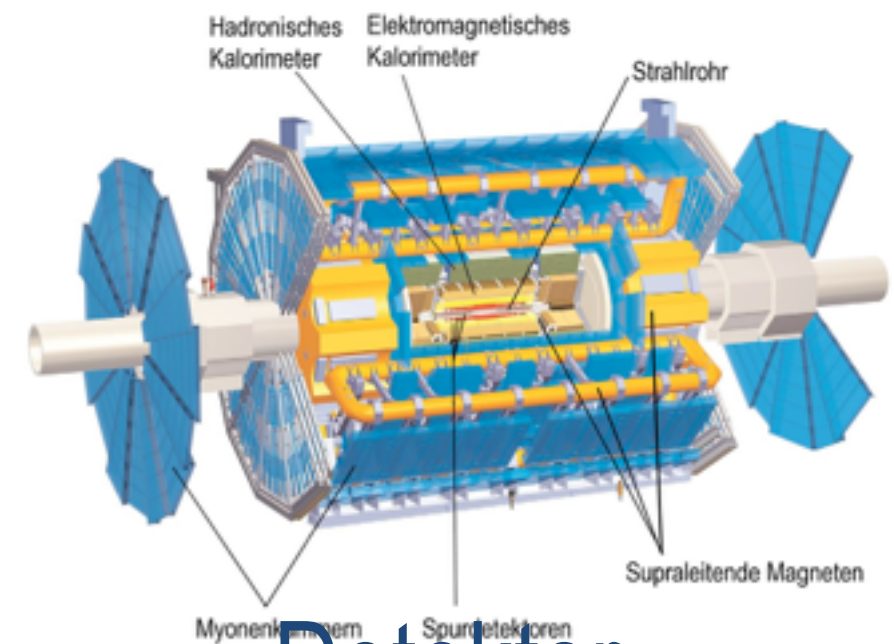
Wie forschen Teilchenphysiker?



Beschleuniger



Theorie



Detektor

Teil 2: Theoretisches

Wie Physiker sich die Welt vorstellen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



NETZWERK
TEILCHENWELT

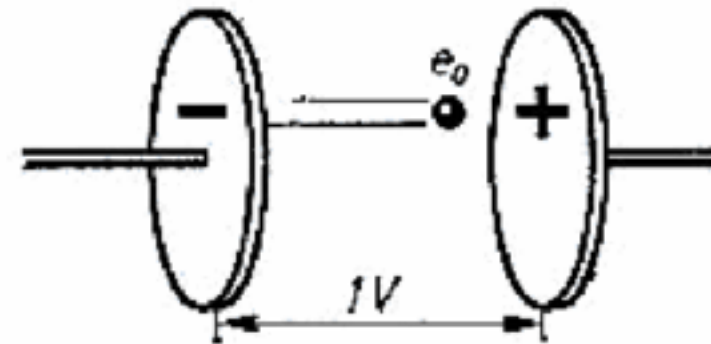
Elektronenvolt

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

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

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

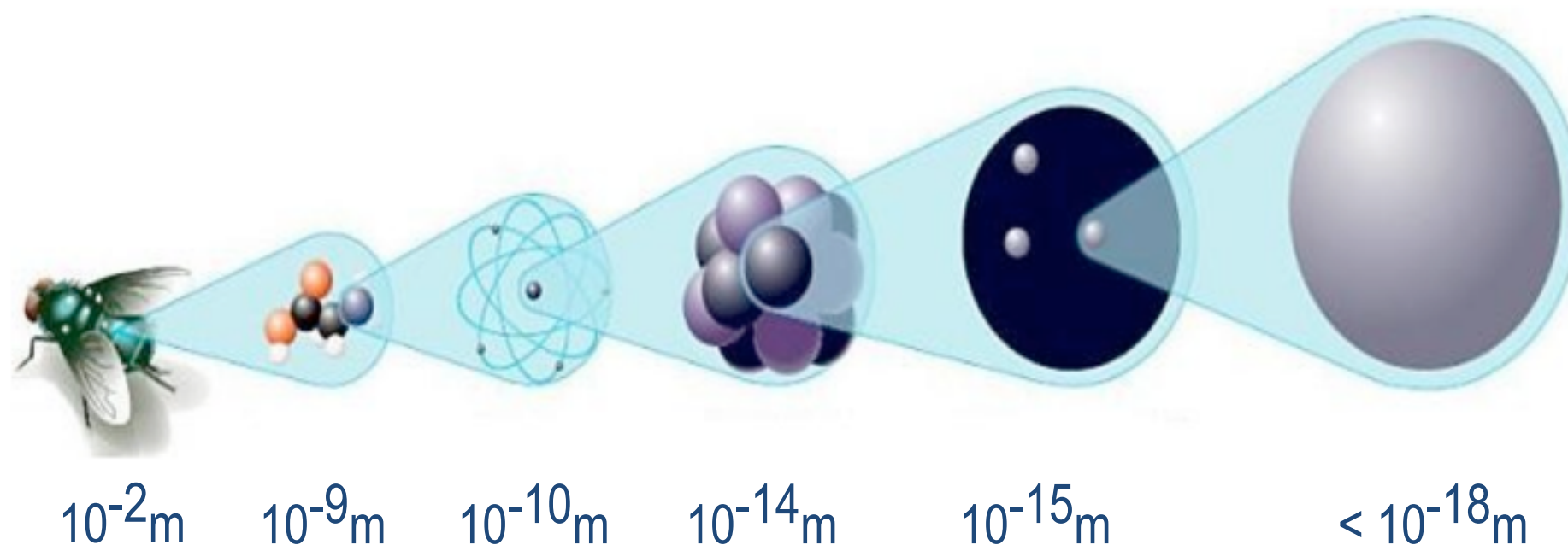
$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$



- Wegen $E=mc^2$ können Massen in eV angegeben werden!
- Proton = 0,938 GeV
- Stück Butter (250g) = $1,4 \times 10^{26} \text{ GeV}$

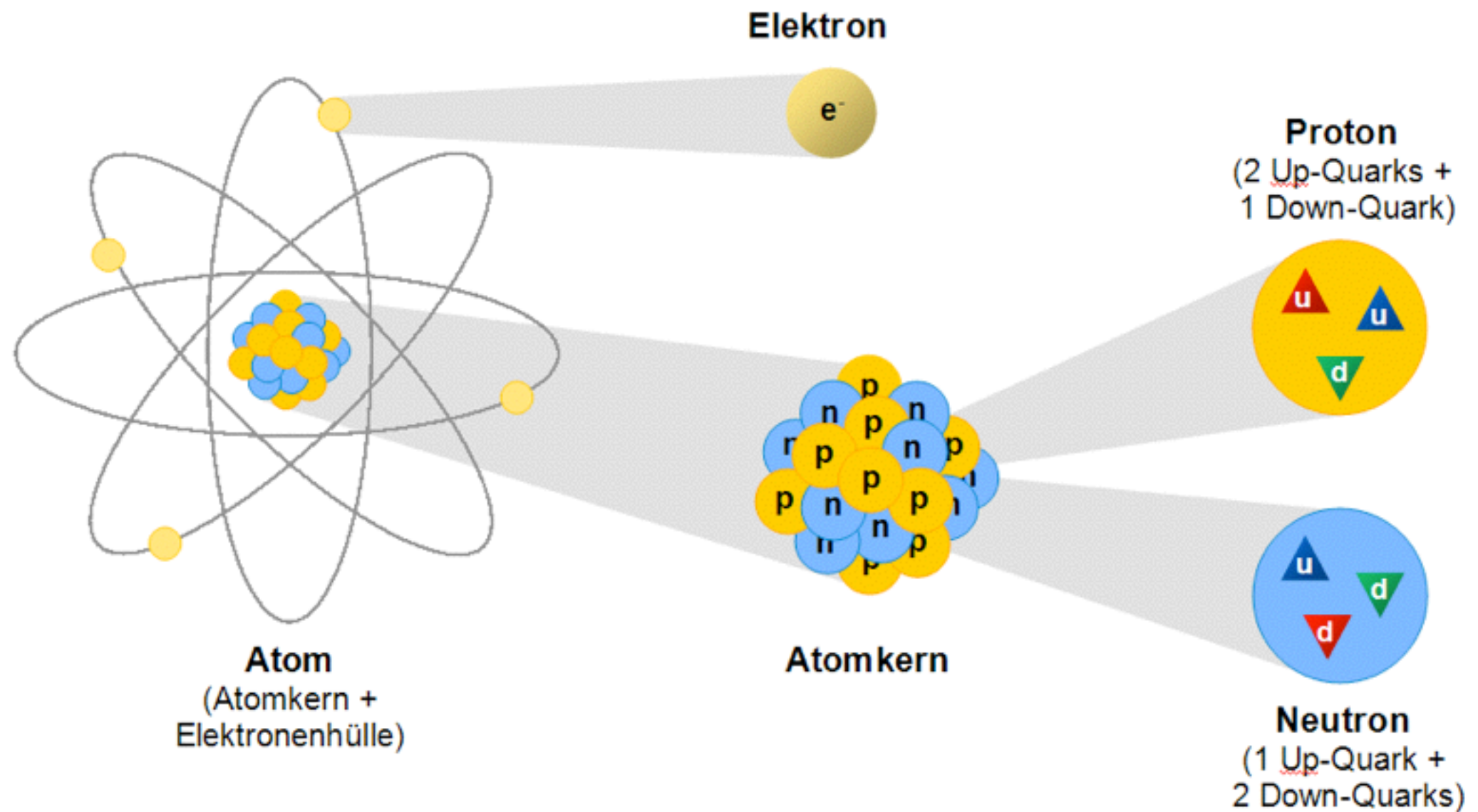
Was ist Teilchenphysik?

- 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
Masse →	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	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
Leptonen			

Bausteine der Materie

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse	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
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e Elektron	μ Myon	τ Tau
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino

Bausteine aller
stabilen Materie

Schwerere Kopien
der ersten
Generation, instabil

Bausteine der Materie

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III
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	1,04 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 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

Geladene Leptonen:
Elektron, Myon, Tau

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

Bausteine der Materie

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III
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
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

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

Neutrinos: zu jeder
Sorte Leptonen eine
Art



Bausteine der Materie

Quarks: einzigen stark
wechselwirkenden
Teilchen



Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Quarks	2,4 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1,27 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ t top
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ 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

- 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



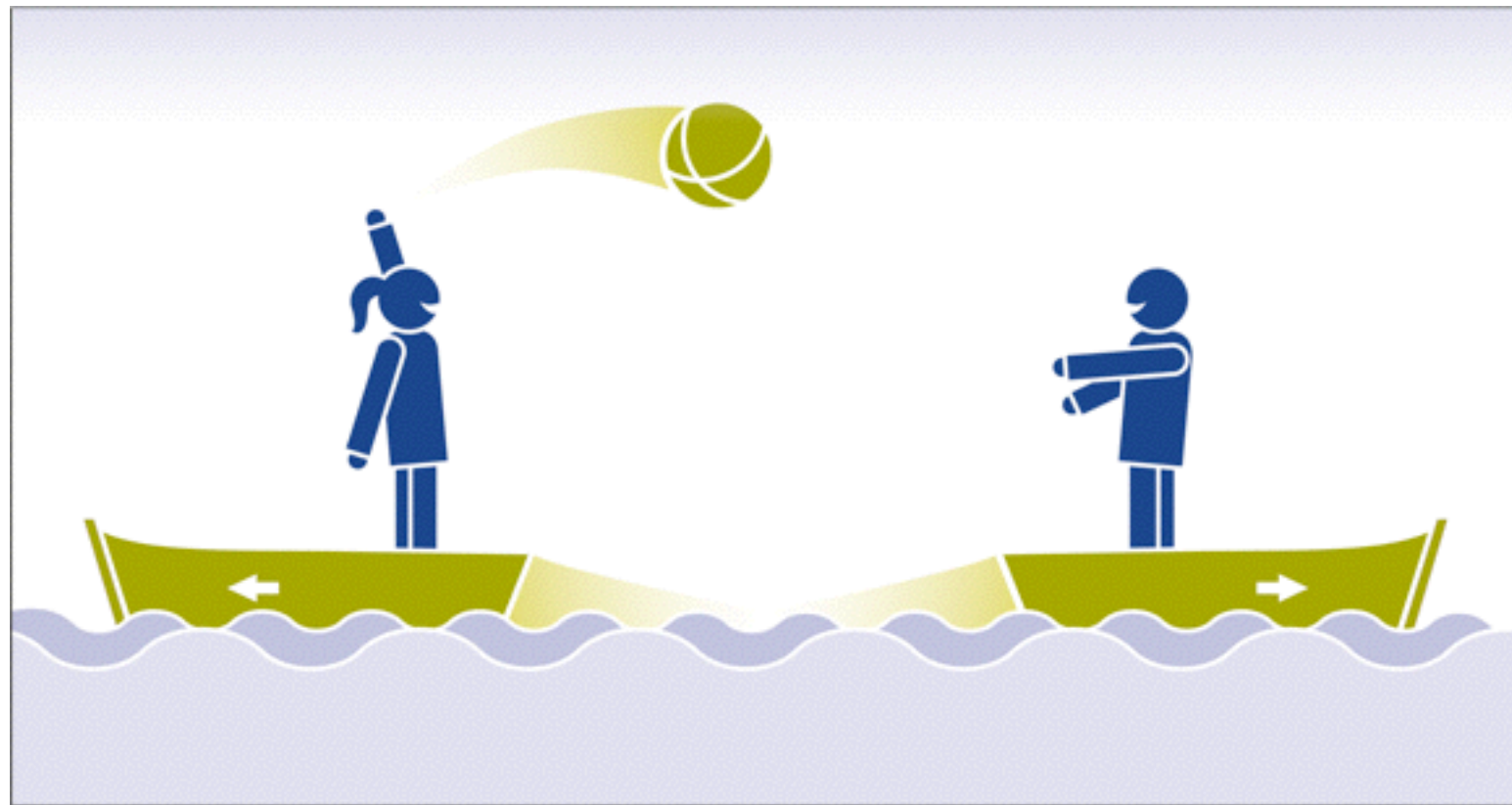
Ein Glas fällt vom Tisch



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

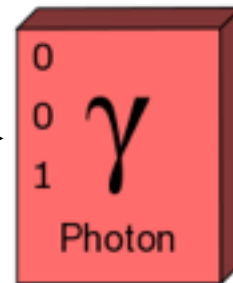
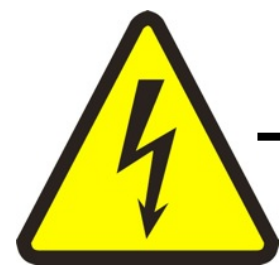
Wechselwirkungen, wie?

- durch Austauschteilchen

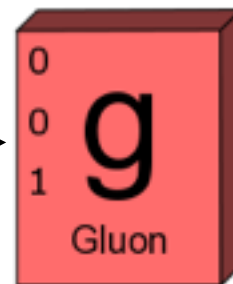


- Quarks und Leptonen “kommunizieren” untereinander indem sie Austauschteilchen aussenden/einfangen

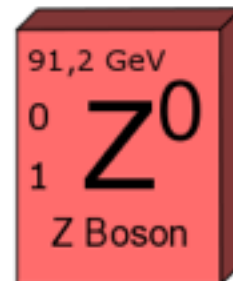
Wechselwirkungen, wer?



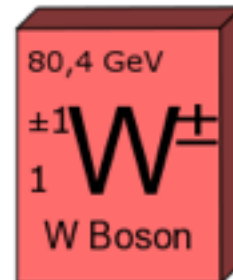
Photon: elektronmagnetische Wechselwirkung



Gluon: starke Wechselwirkung



Z- und W-Bosonen: schwache Wechselwirkung

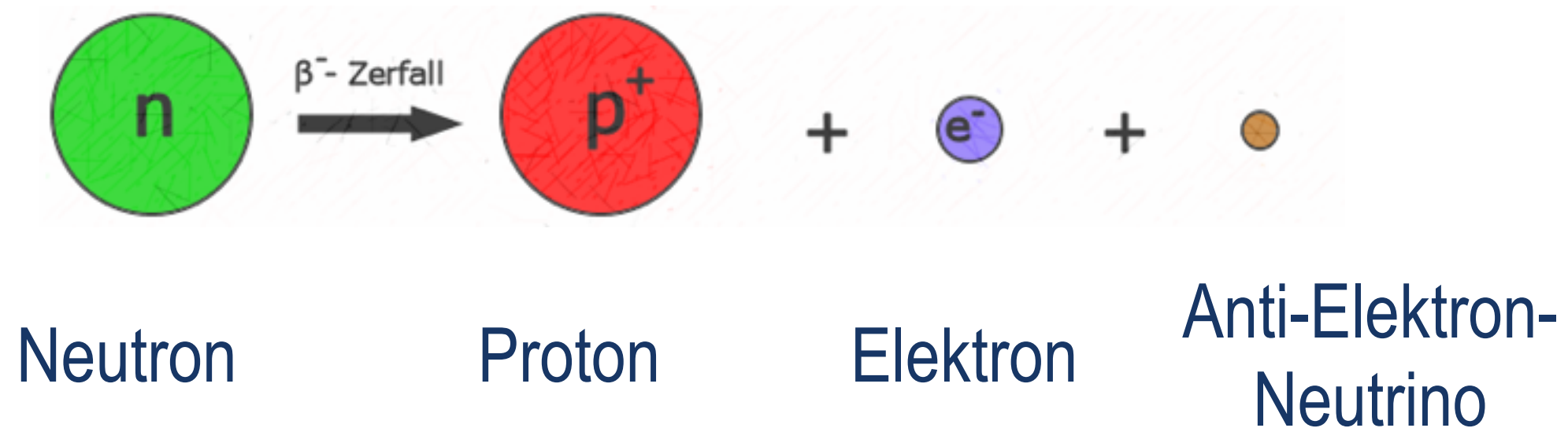


Eichbosonen



???

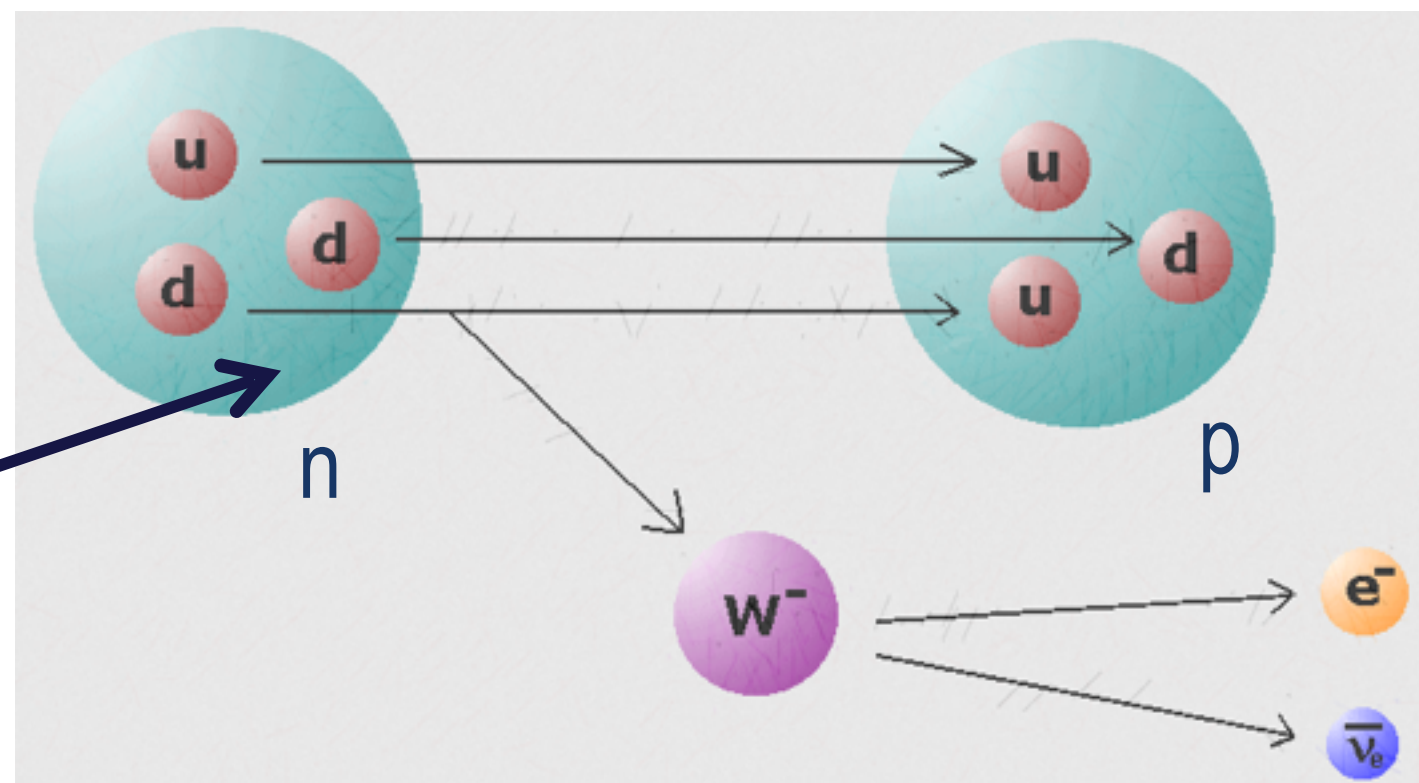
Beispiel Betazerfall: das W-Boson & die schwache Wechselwirkung



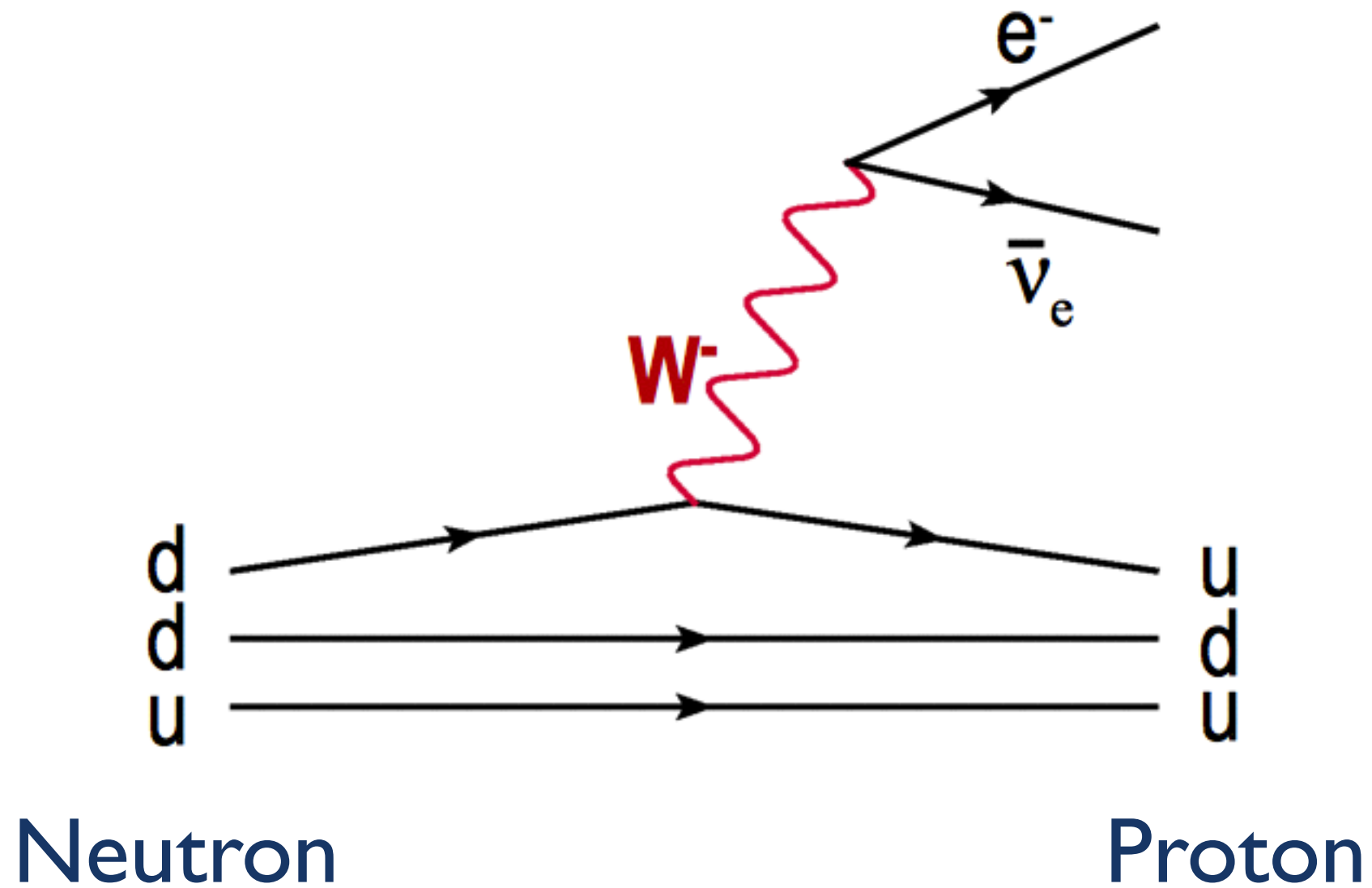
Schau genauer hin!

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

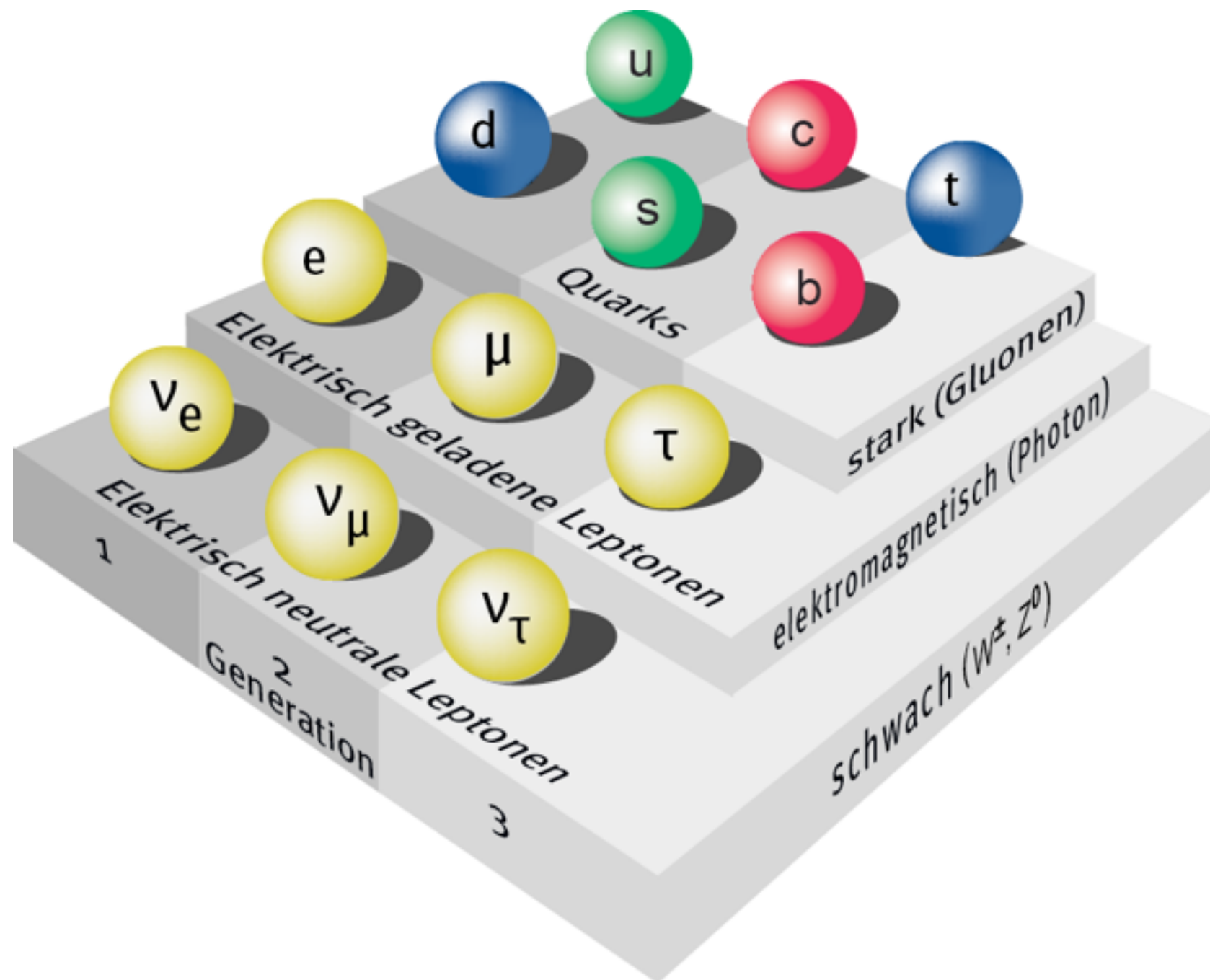
Animation!



Betazerfall aus Physikersicht

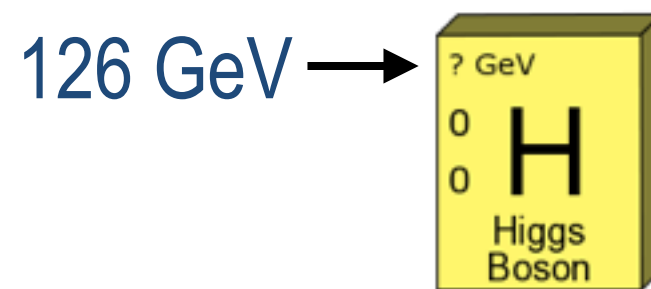


Wer wechselwirkt wie?



Warum braucht es das Higgs?

- 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



Ende Teil 2

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	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 0 1 g Gluon	
	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	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson	
	<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	80,4 GeV ± 1 1 $W^\pm$ W Boson	Eichbosonen
Leptonen					



Teil 3: Wie findet man das Higgs?



Wir erzeugt man das Higgs?

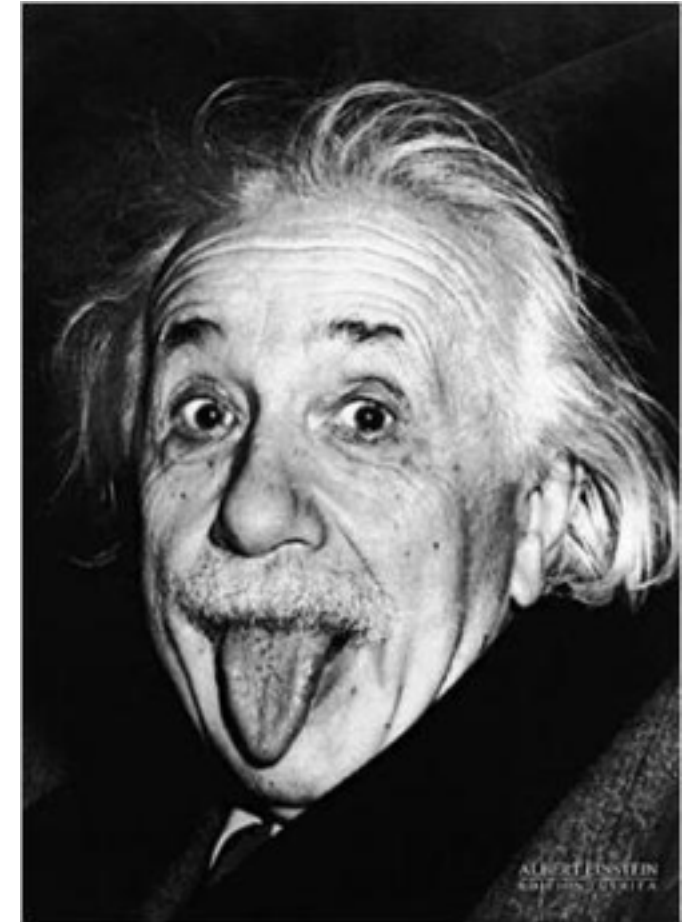
Teilchenbeschleuniger ➤ Erzeugung massereicher Teilchen

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)



$$E = mc^2$$

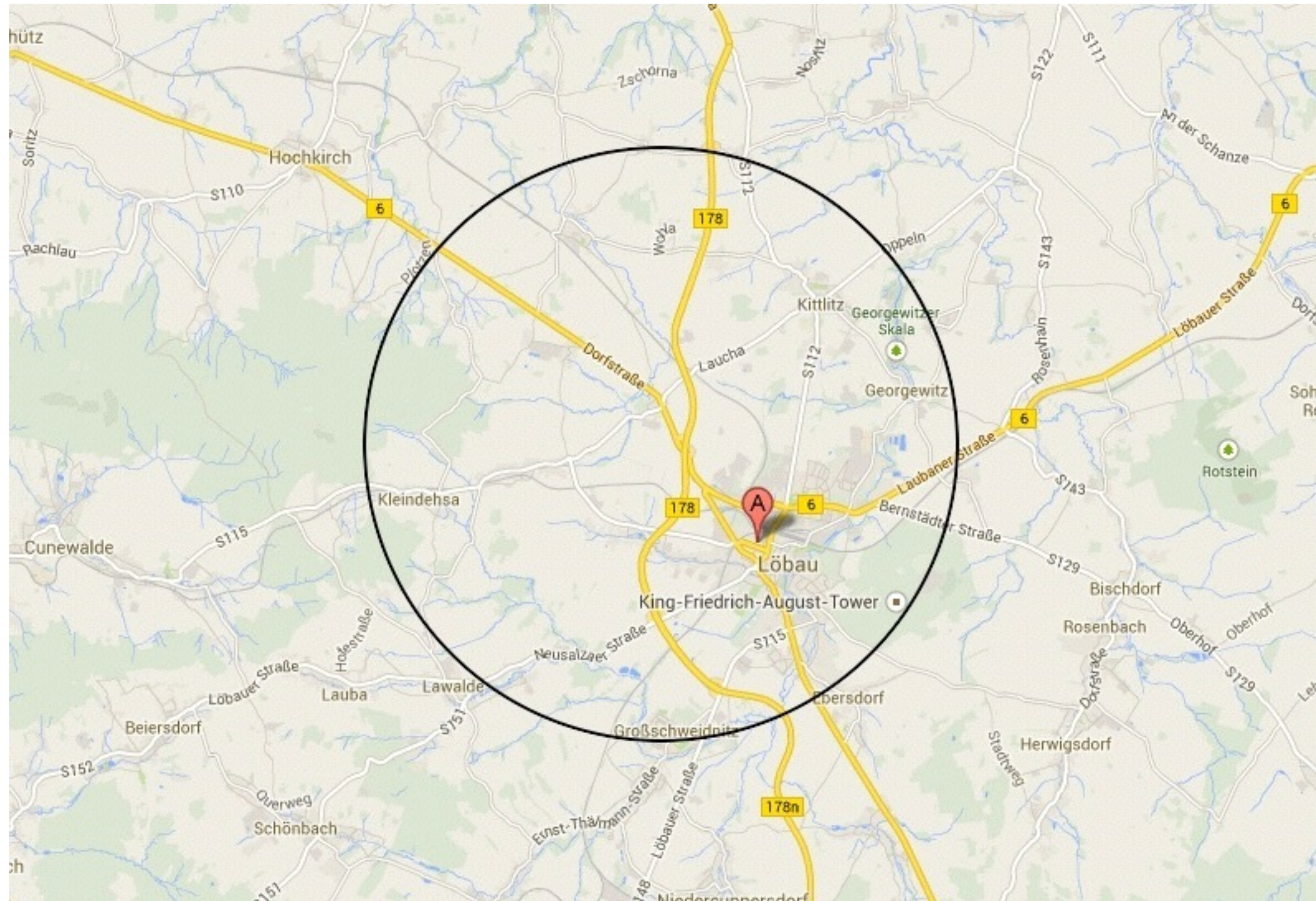
Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

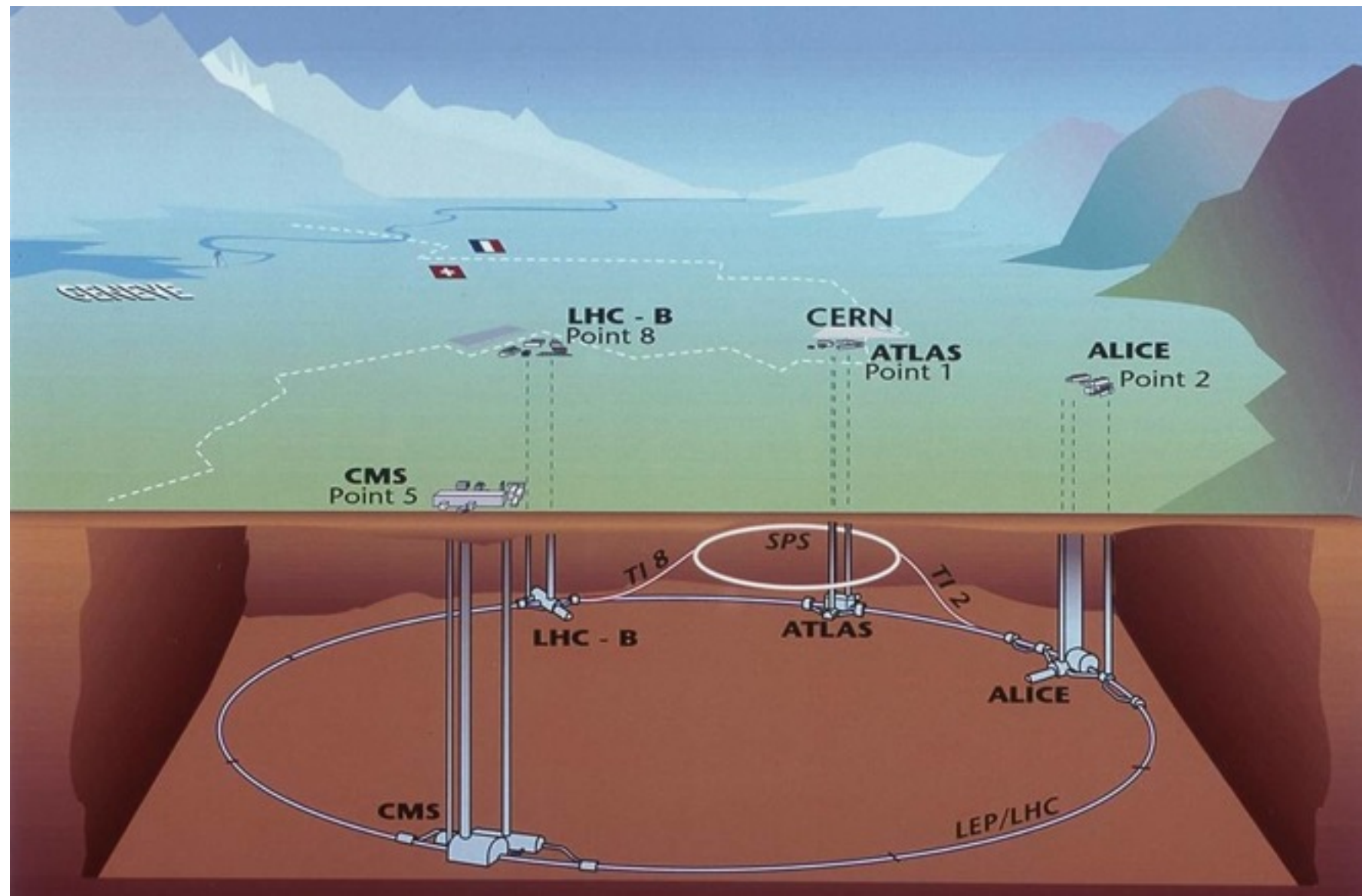


Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



Der LHC (Large Hadron Collider)



Was geschieht im LHC?

- Protonen kreisen in entgegengesetzten Richtungen mit einer Energie von je 4 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 ...

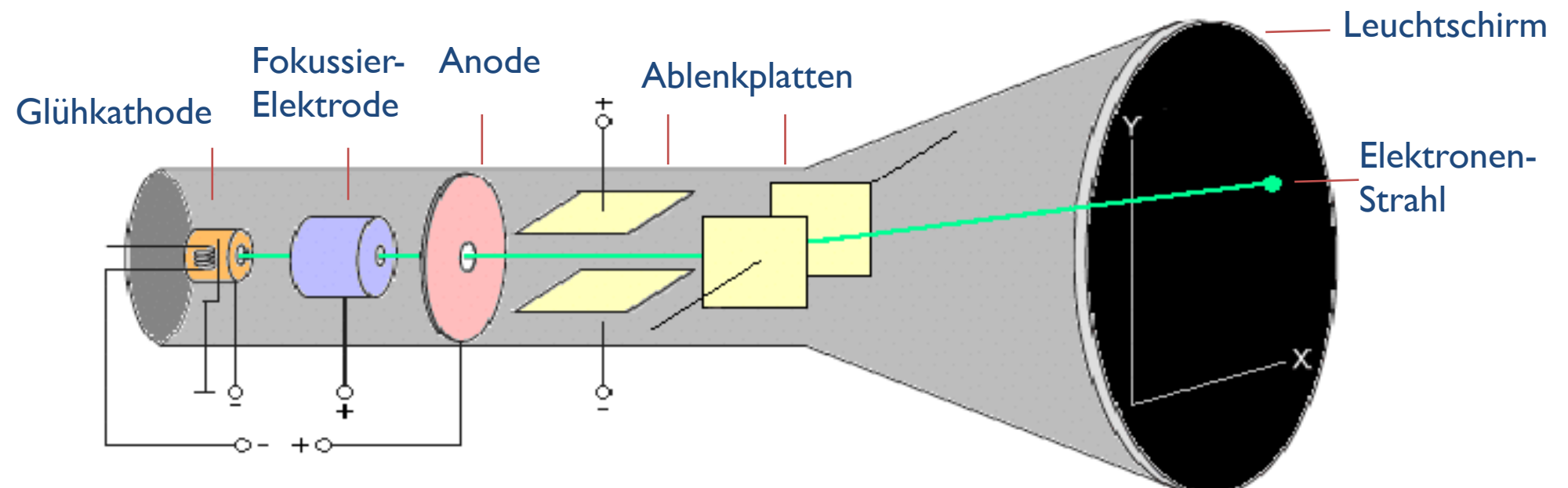


Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

Der einfachste Beschleuniger:

Ein alter Fernseher (Braun'sche Röhre)!

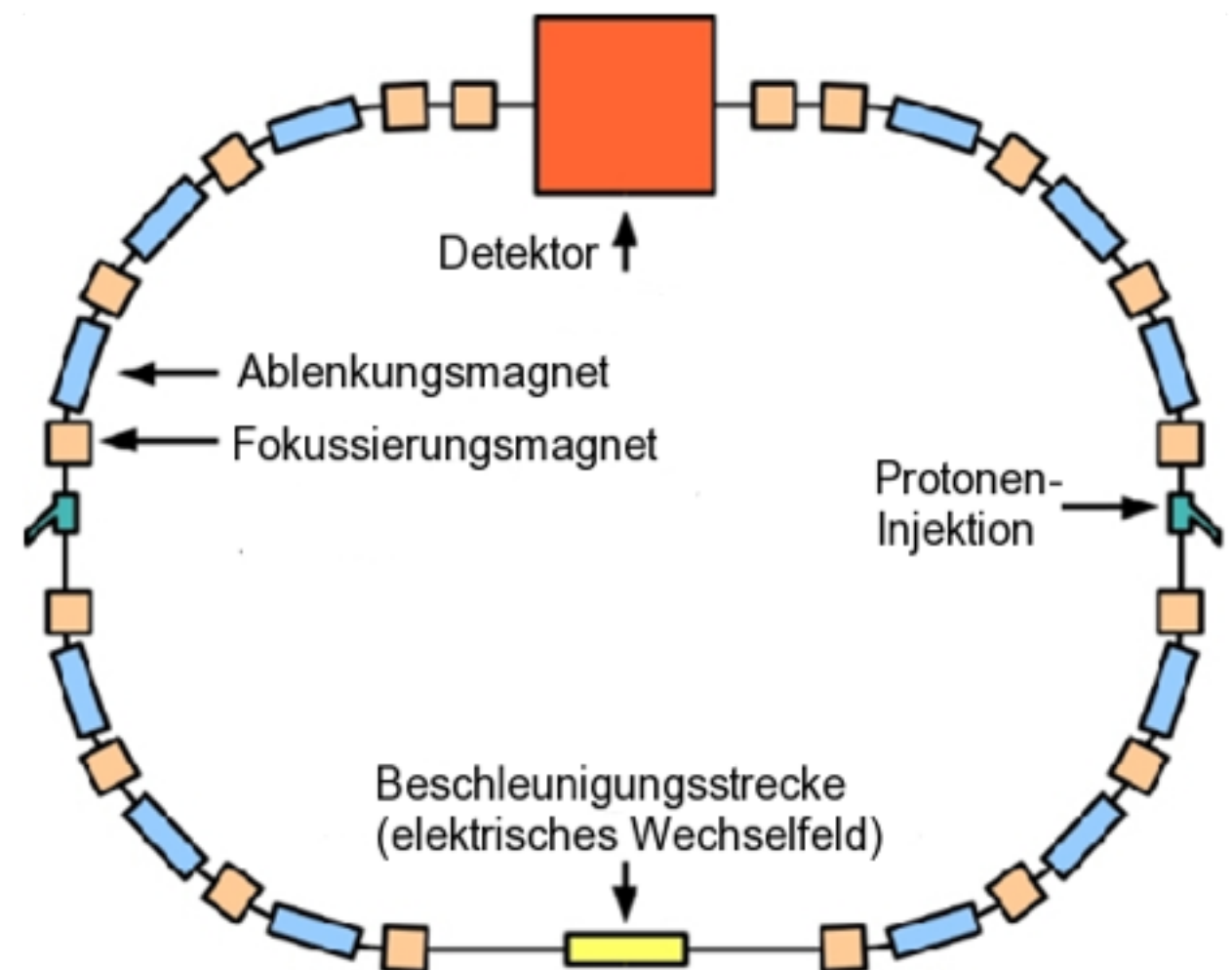
- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- ...beschleunigen: elektrisches Feld (Hochspannung)
- ...ablenken und fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



Wie funktioniert der LHC?

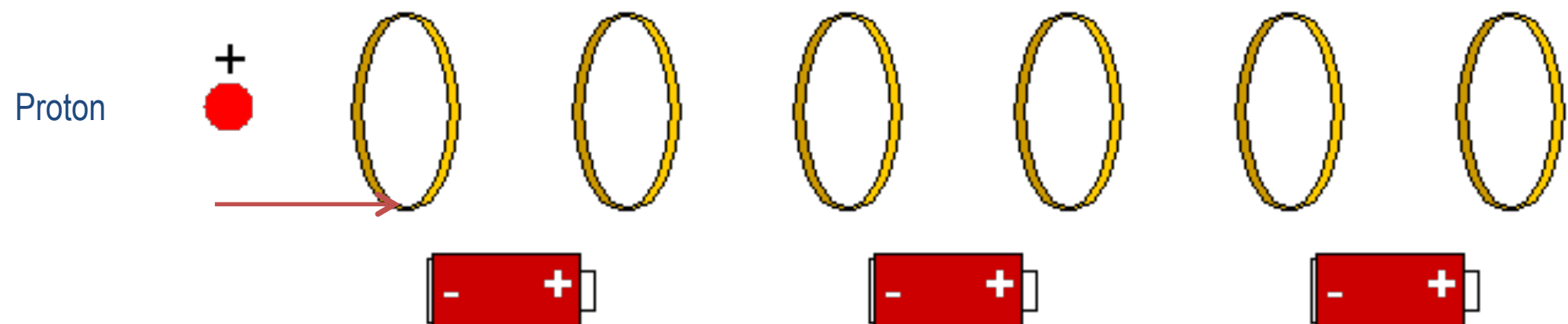
Im LHC durchlaufen Pakete (Bunches) von Protonen eine kreisförmige Bahn, auf der sie...

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



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.

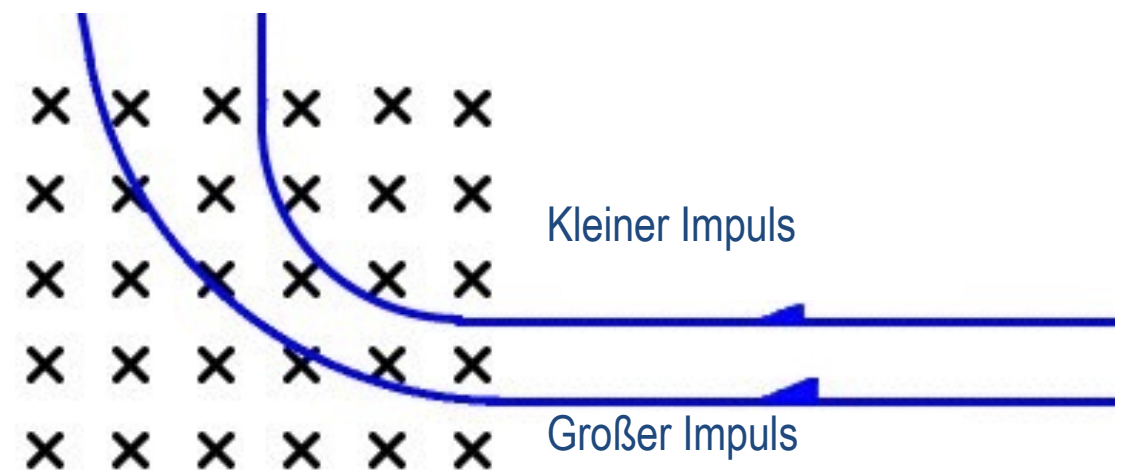
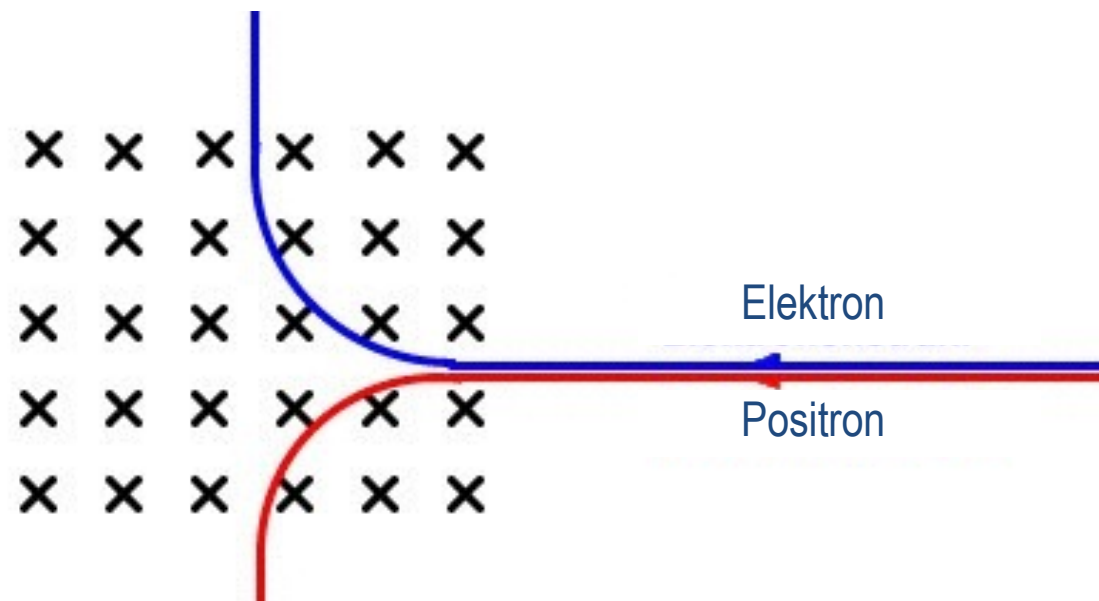
Der LHC ist...

- **Eine der schnellsten Rennstrecken der Welt**
 - Knapp eine Billion Protonen
 - 99,999997% der Lichtgeschwindigkeit
 - 27 km langer Tunnel
 - **Wieviele Grenzüberschreitungen pro Sekunde?**



Ablenkung durch Magnetfelder

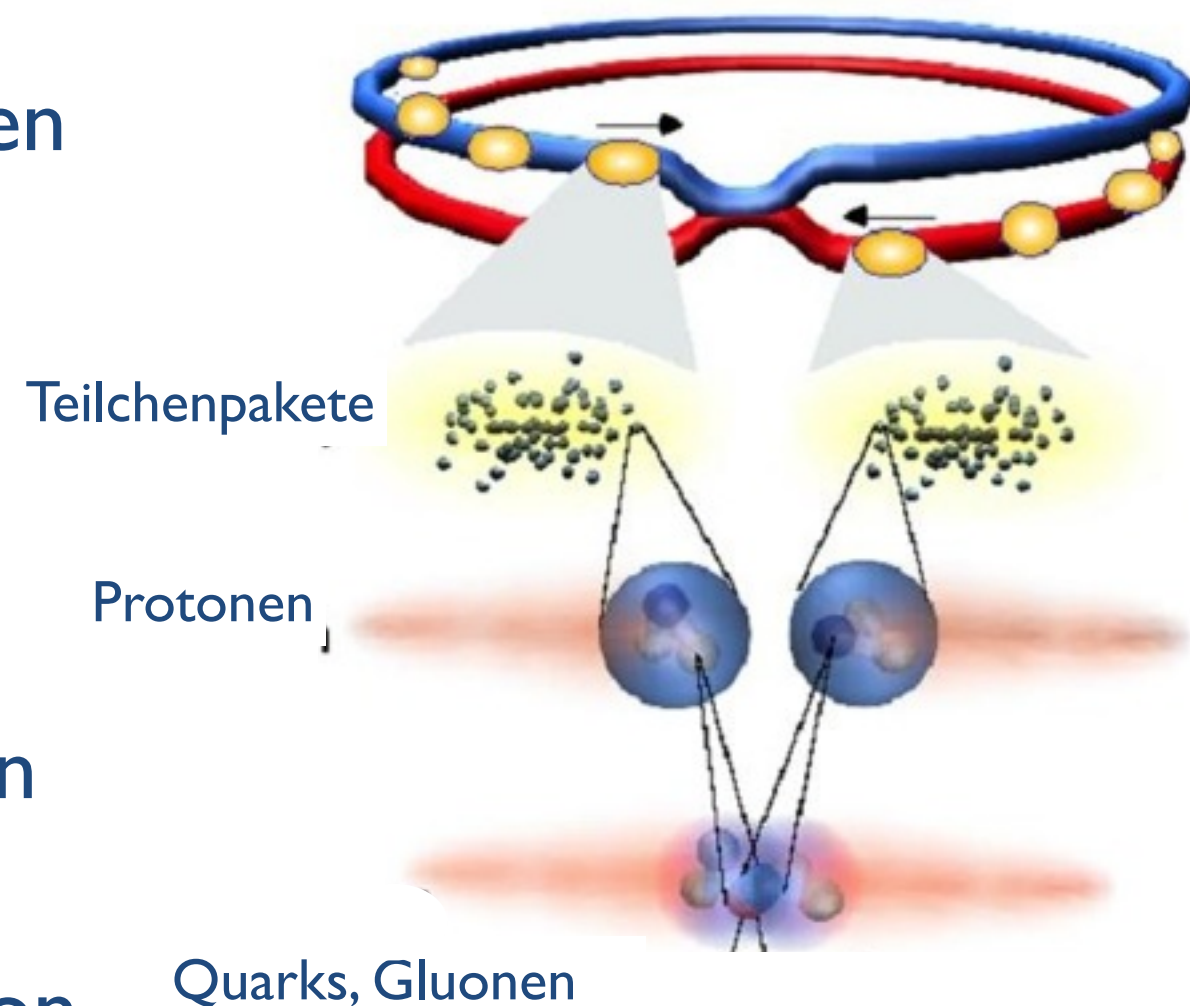
- Ein Magnetfeld lenkt elektrisch geladene Teilchen senkrecht zu ihrer Flugbahn ab (Lorentzkraft):
- Die Richtung und Stärke der **Bahnkrümmung** hängen von der **elektrischen Ladung** und vom **Impuls** (also von Masse und Geschwindigkeit) des Teilchens ab.



x: Das Magnetfeld zeigt vom Betrachter weg

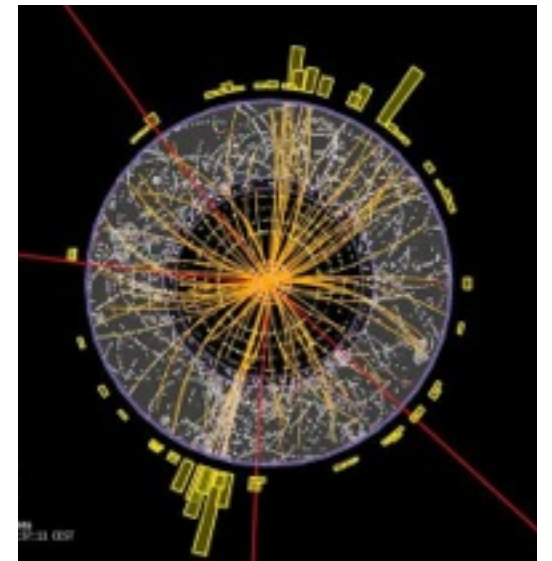
Teilchenkollisionen im LHC

- 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!



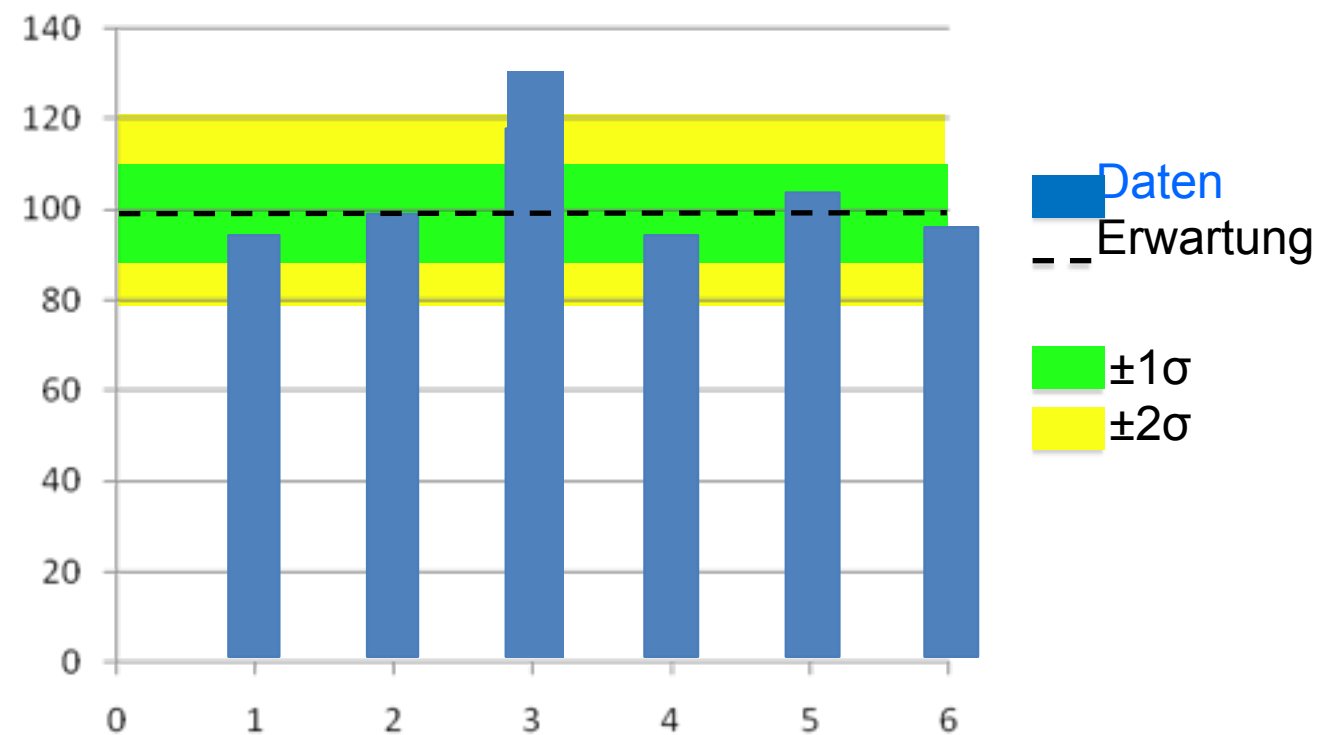
Teilchenkollisionen im LHC

- 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

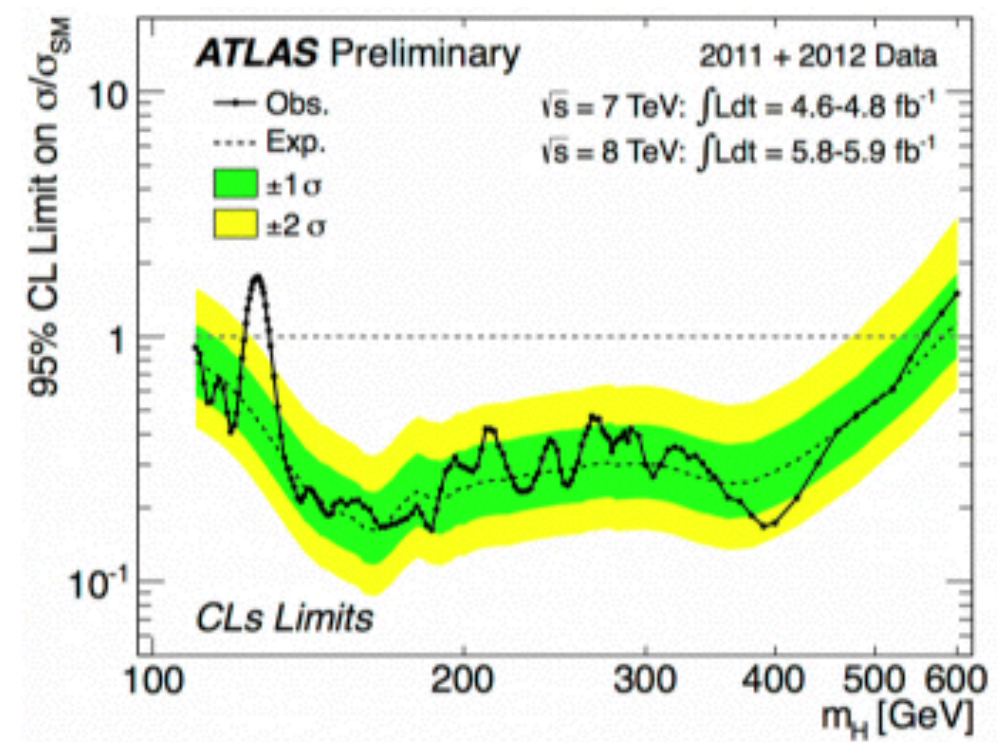


Warum so viele Kollisionen?

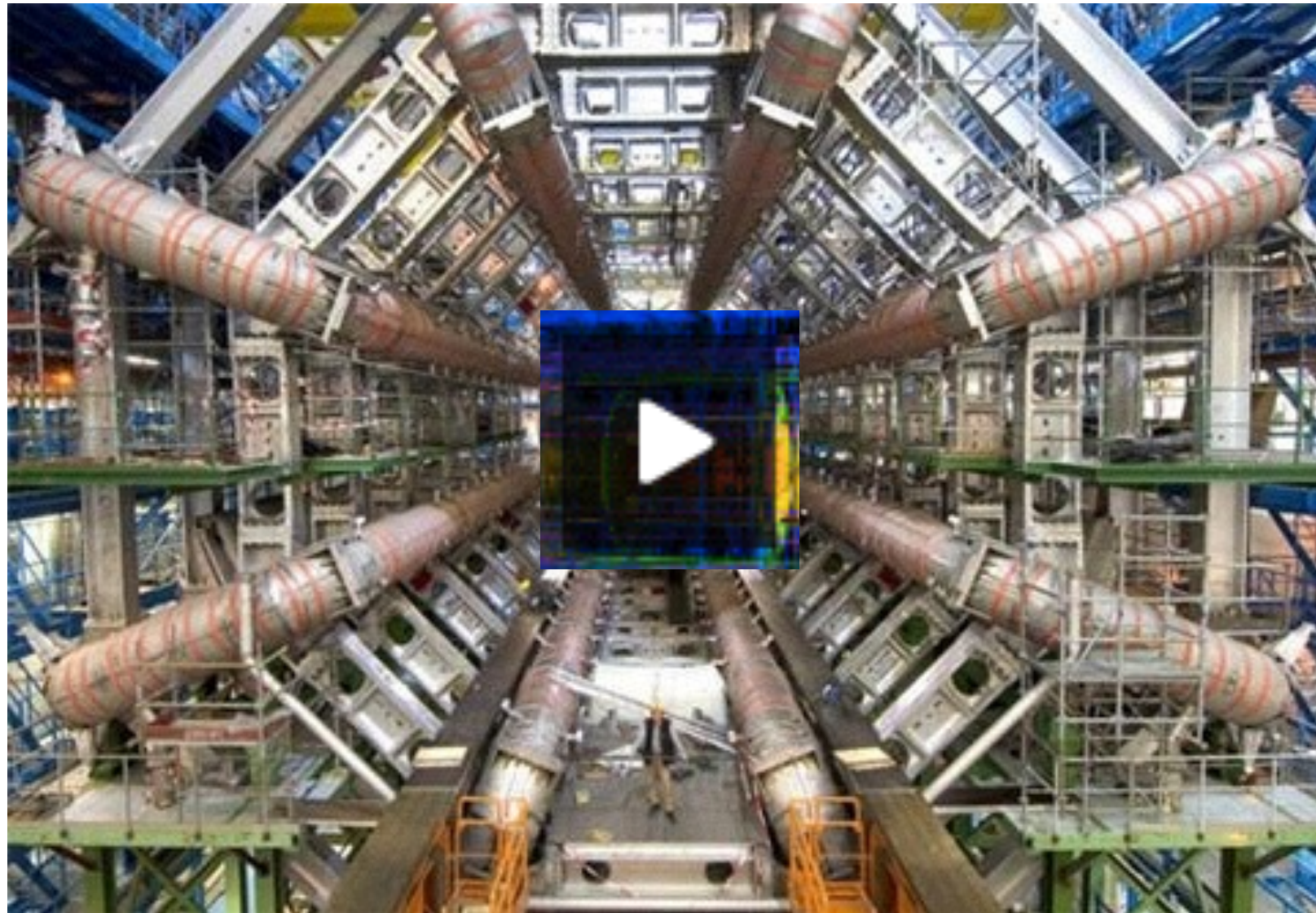
Ist der Würfel manipuliert oder nicht?



Existiert das Higgs-Boson oder nicht?



Im Schnelldurchlauf



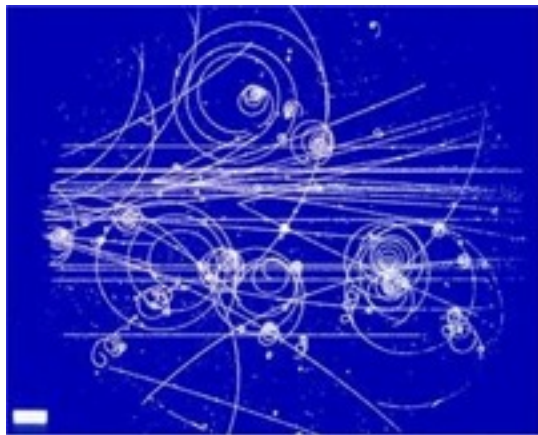
Analyse von Teilchenspuren im ATLAS Detektor



Wie weist man Elementarteilchen nach?

Bildgebende Detektoren

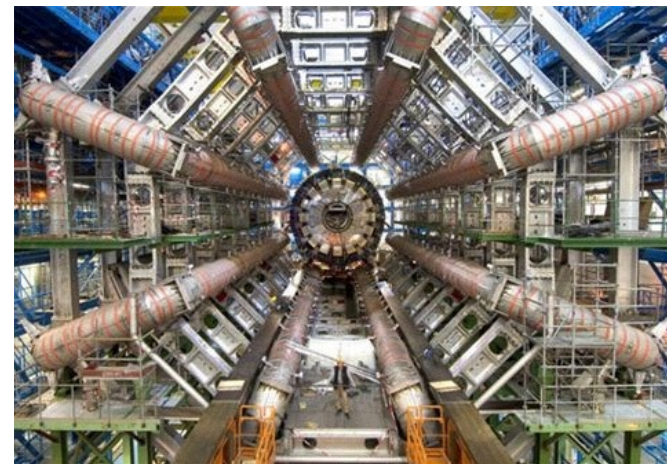
z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer



➤ sichtbare Teilchenspuren

Elektronische Detektoren

z.B: **ATLAS**-Detektor, Geigerzähler



➤ elektrische Signale
➤ Eigenschaften der Teilchen werden daraus rekonstruiert

Wer ist ATLAS?

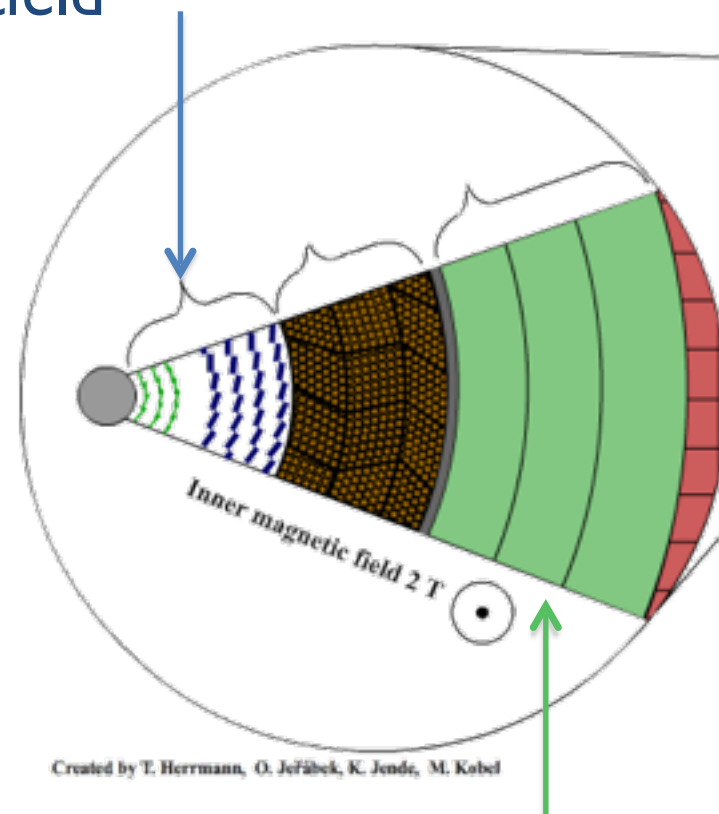


37 Länder
173 Institute
3000 Wissenschaftler

Der ATLAS-Detektor

Spurdetektoren

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

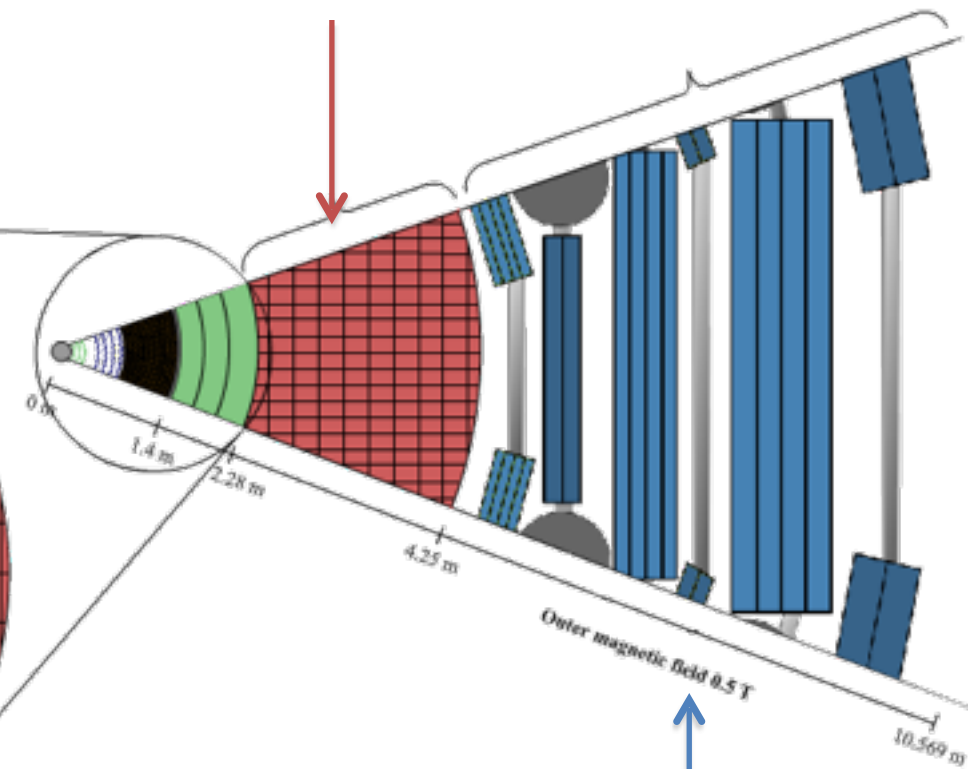


Elektromagnetisches Kalorimeter

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

Hadronisches Kalorimeter

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

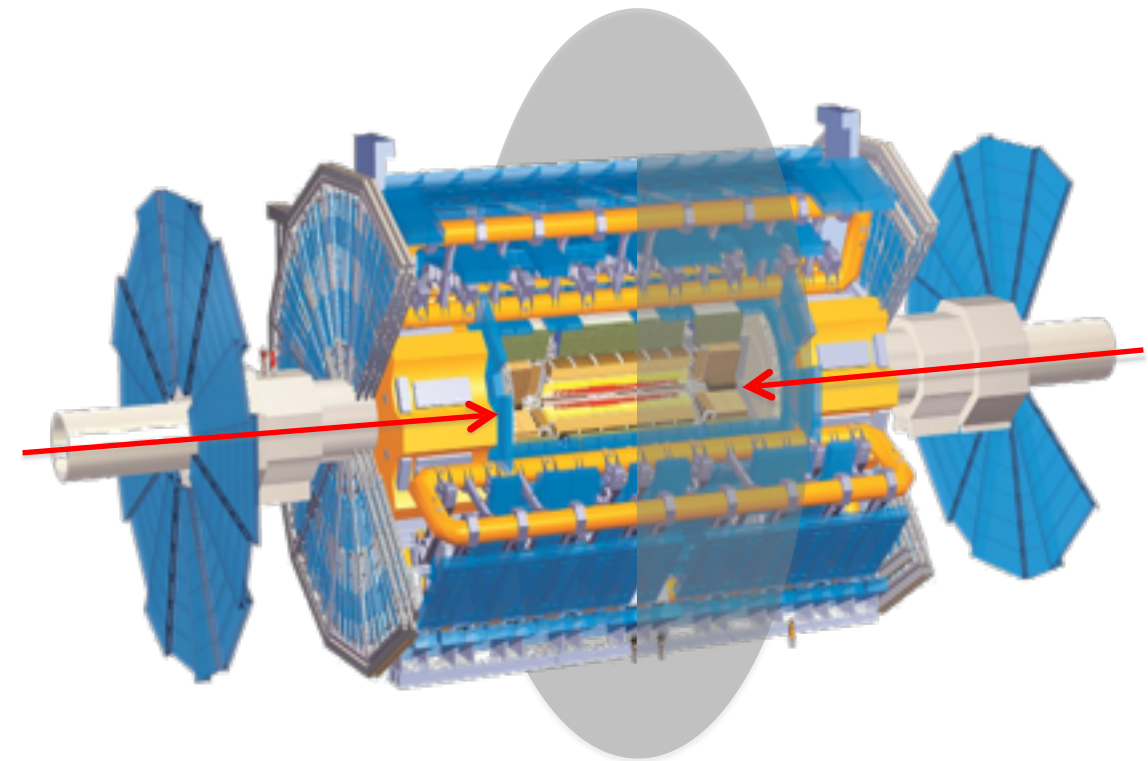


Myonenkammern

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

Was misst ATLAS?

- Spurdetektoren: **Spur**
Impuls und
Vorzeichen der elektrischen Ladung
- Kalorimeter: **Energie**
- 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://cern.ch/go/7JLq> -> Teilchenidentifikation

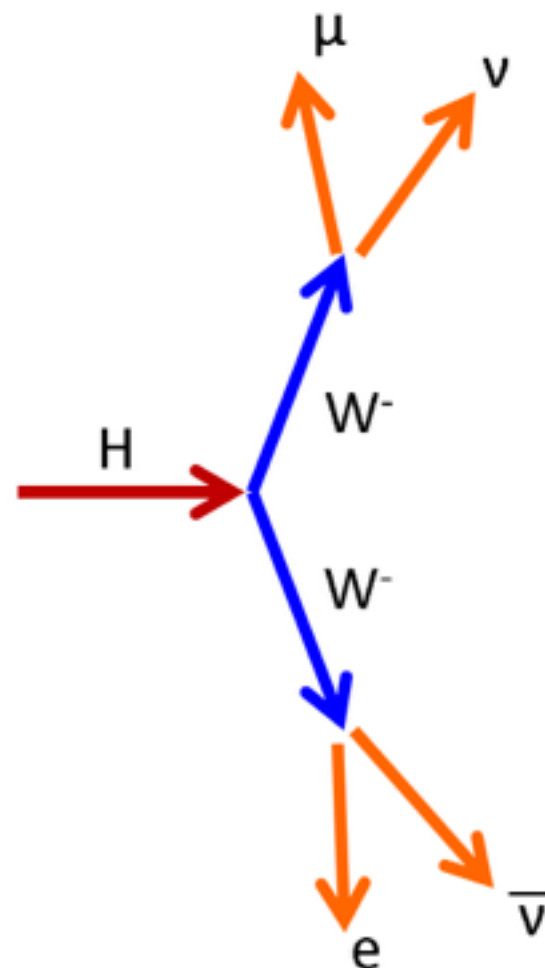
Teil 4: Vor der Messung

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⁻-BOSON
NACHWEIS: 1983

W⁻

AUSTAUSCHTEILCHEN

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

W⁺-BOSON
NACHWEIS: 1983

W⁺

AUSTAUSCHTEILCHEN

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

W-Bosonen...

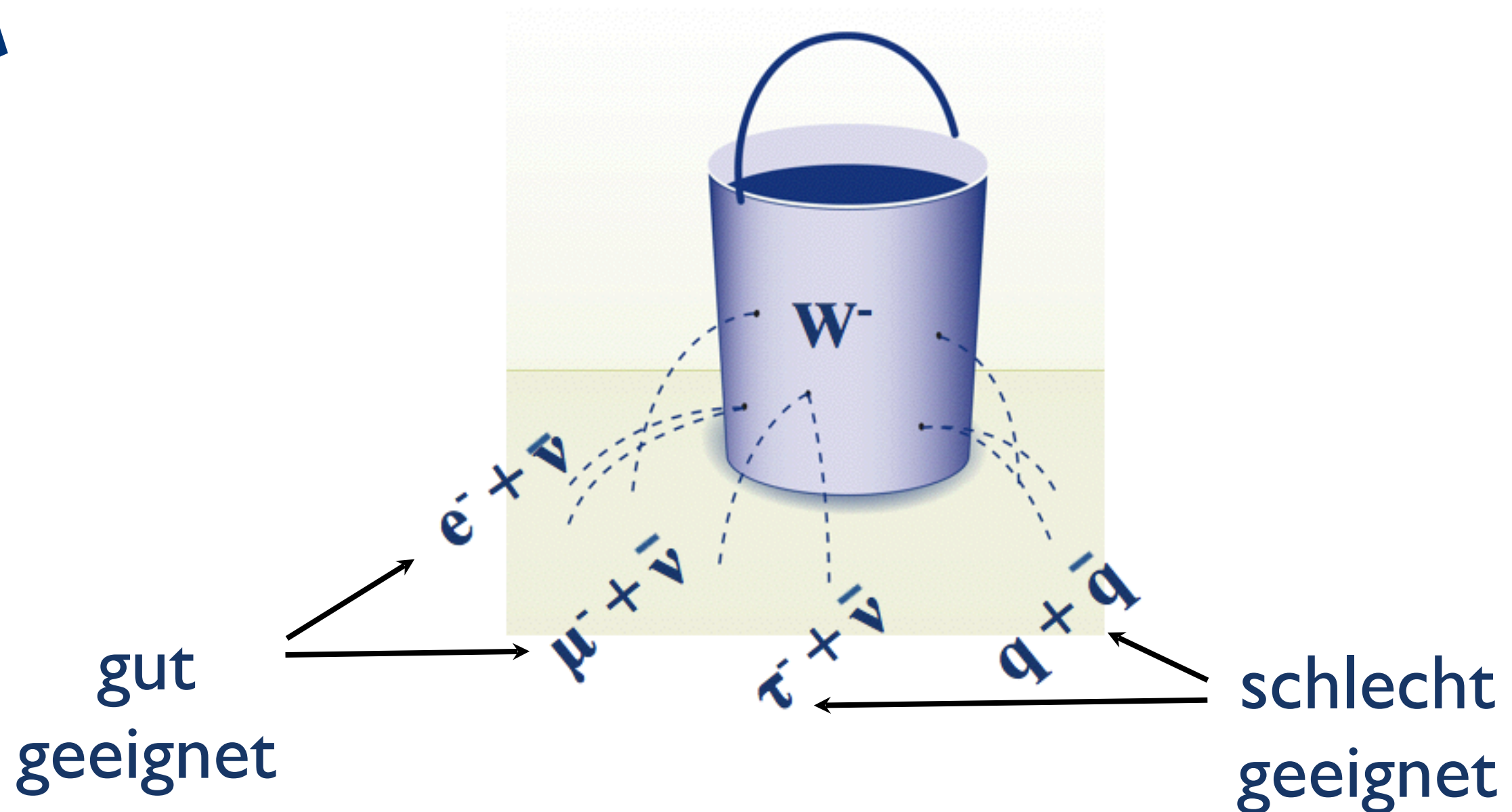
- ...sind Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung
- ...sind elektrisch geladen: W^+ , W^-
- ...gehören zu den massereichsten Teilchen des Standardmodells (80,4 GeV !)
- ...wandeln sich nach ca. 10^{-25} s in leichtere Teilchen um (kurze Reichweite)



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

Wie findet man W-Bosonen?

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



Wie findet man W-Bosonen?

- Ihr sucht heute nach folgenden Umwandlungsprodukten:

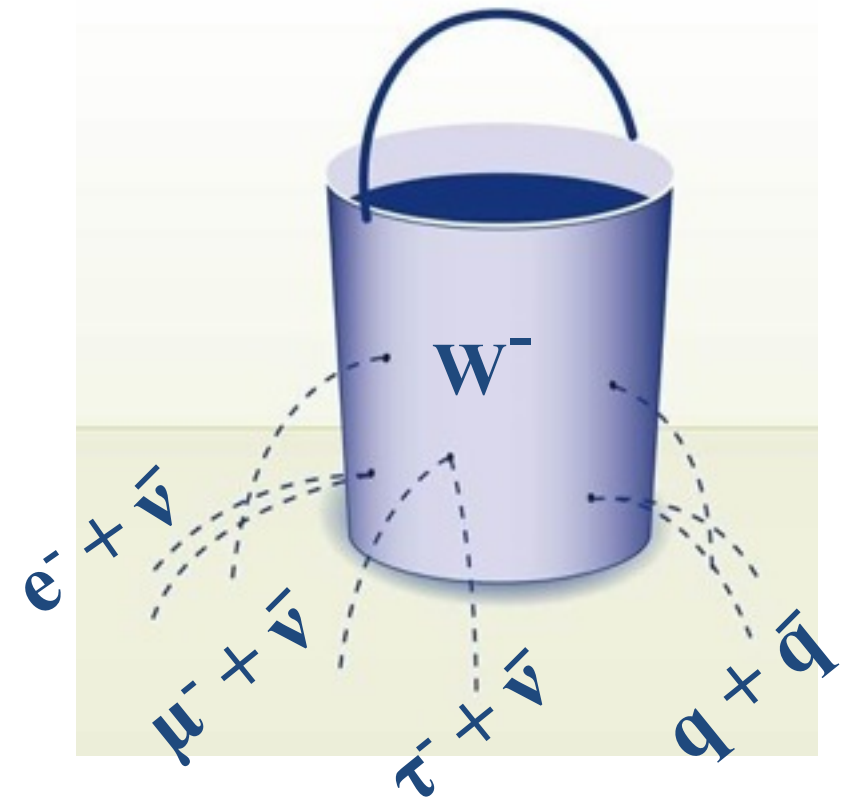
$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$$

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

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

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

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



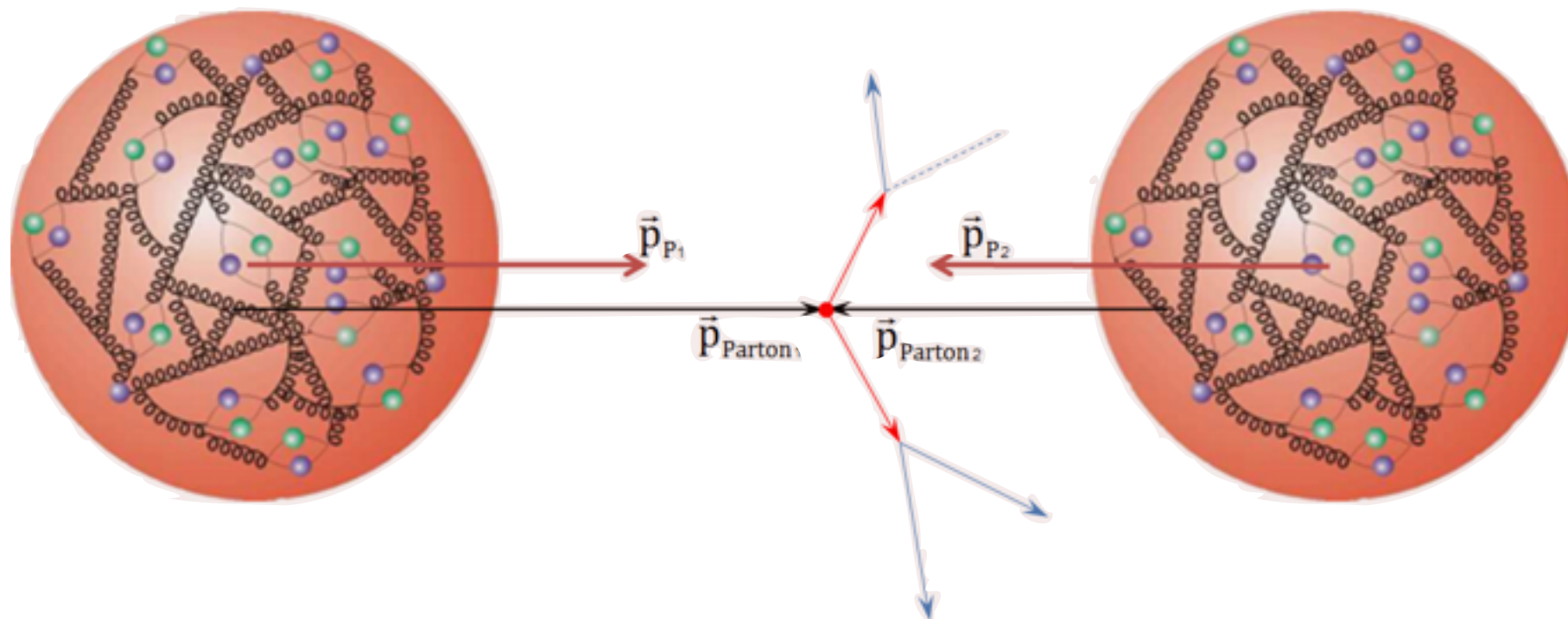
Wie entstehen W-Bosonen?

- Zusammenstoß von Protonen im LHC (sinnbildlich):



Wie entstehen W-Bosonen?

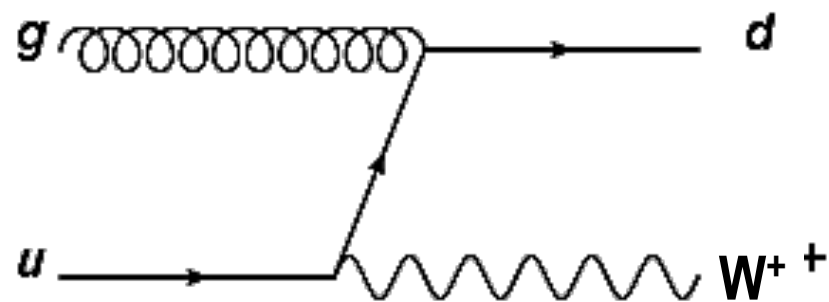
- Zusammenstoß von Protonen im LHC:



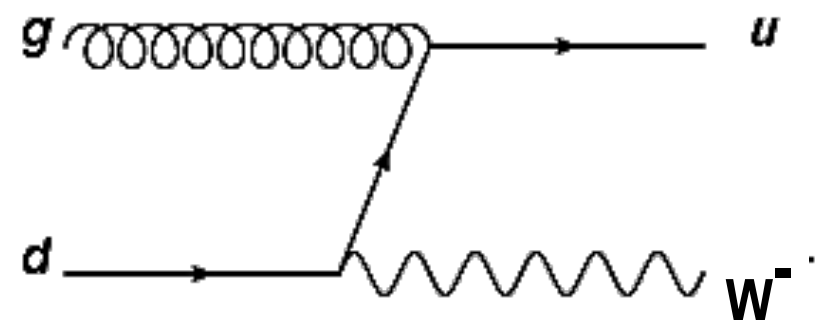
- Proton besteht aus
 - 3 permanenten Quarks (up-up-down)
 - Gluonen
 - Quark-Antiquark-Paaren

Wie entstehen W-Bosonen?

- Zusammenstoß von Protonen im LHC:



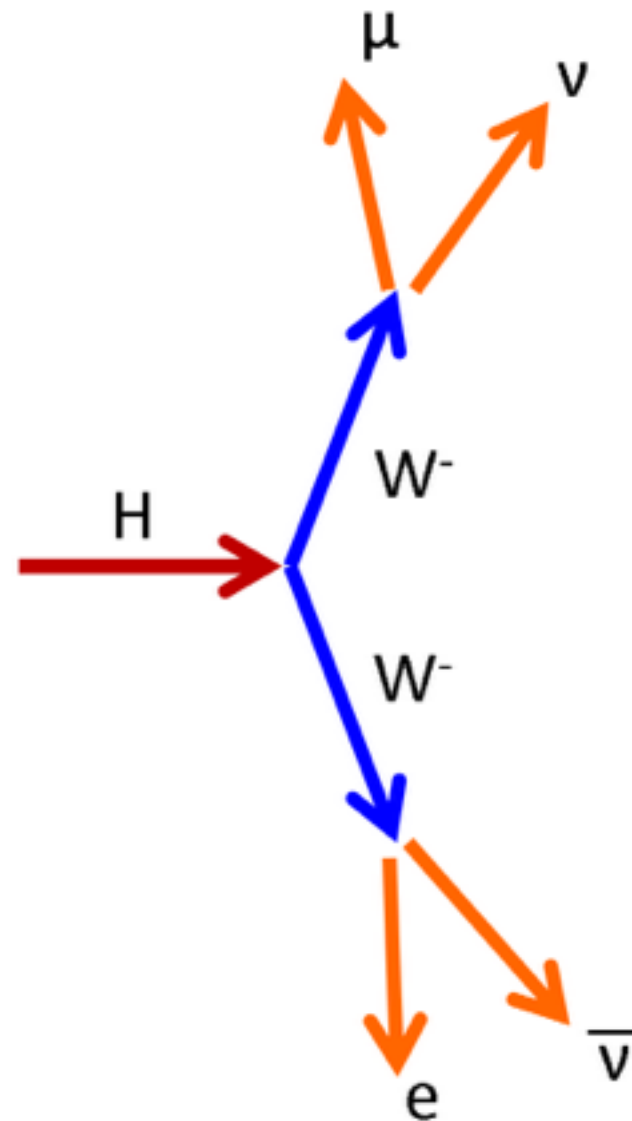
$$u + g \rightarrow W^+ + d$$



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

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

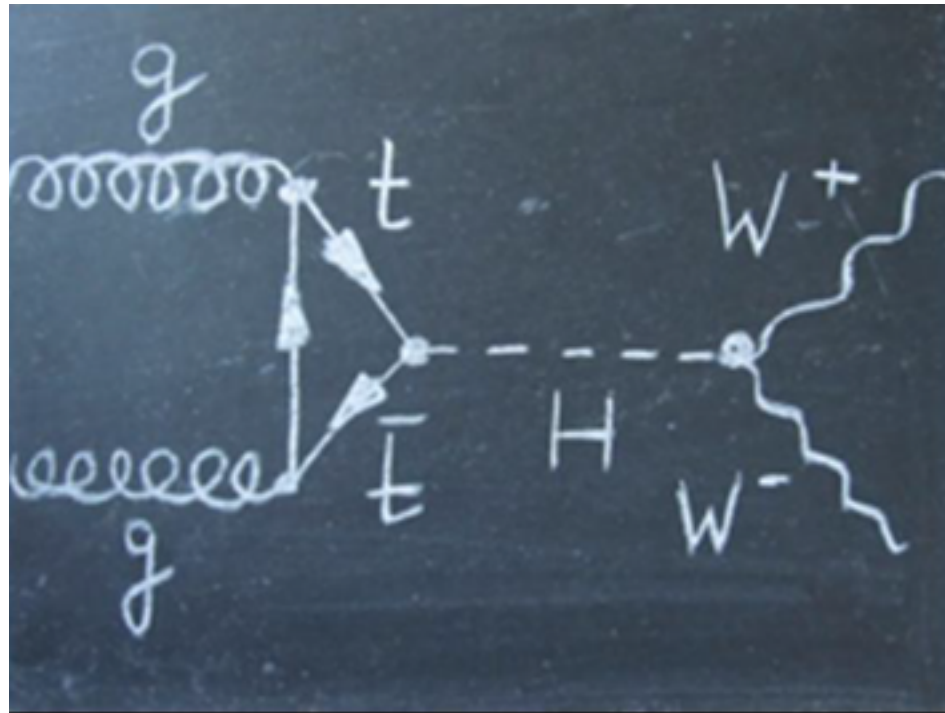
Die Suche nach dem Higgs



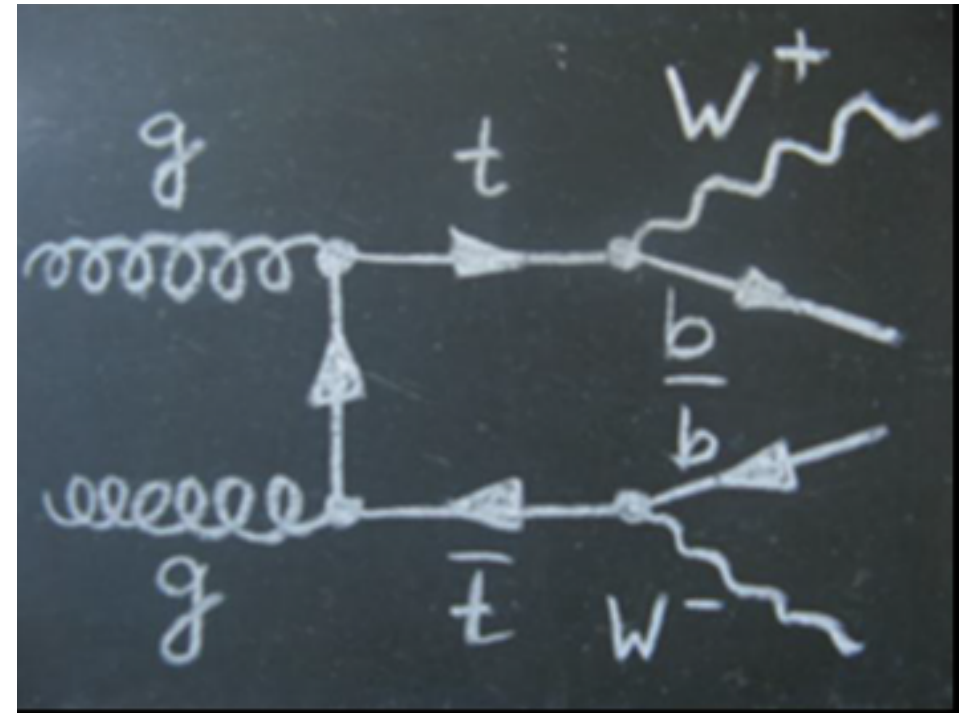
- Higgs entsteht bei Kollision
- Umwandlung des Higgs in 2 W-Bosonen
- W-Bosonen zerfallen in Leptonen
- Aber: Endprodukte können auch aus anderen Umwandlungen kommen (Untergrund)

Higgs-Boson oder Untergrund?

Signal-Ereignis



Untergrund-Ereignis



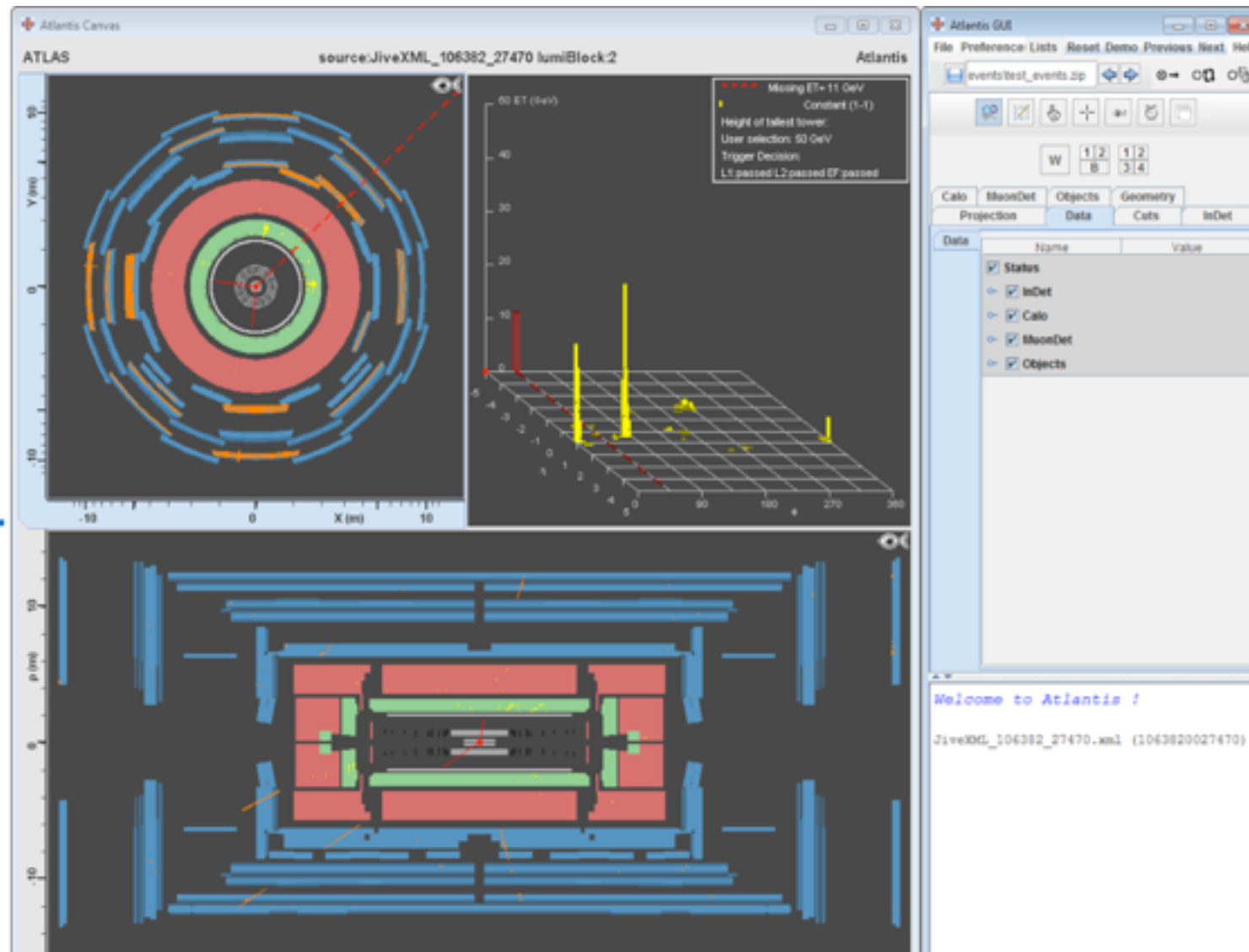
➤ Sind sie unterscheidbar?

Ja, durch Winkel $\Delta\Phi$ zwischen den beiden Leptonen

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

MINERVA

Anzeige
der
Teilchen-
spuren



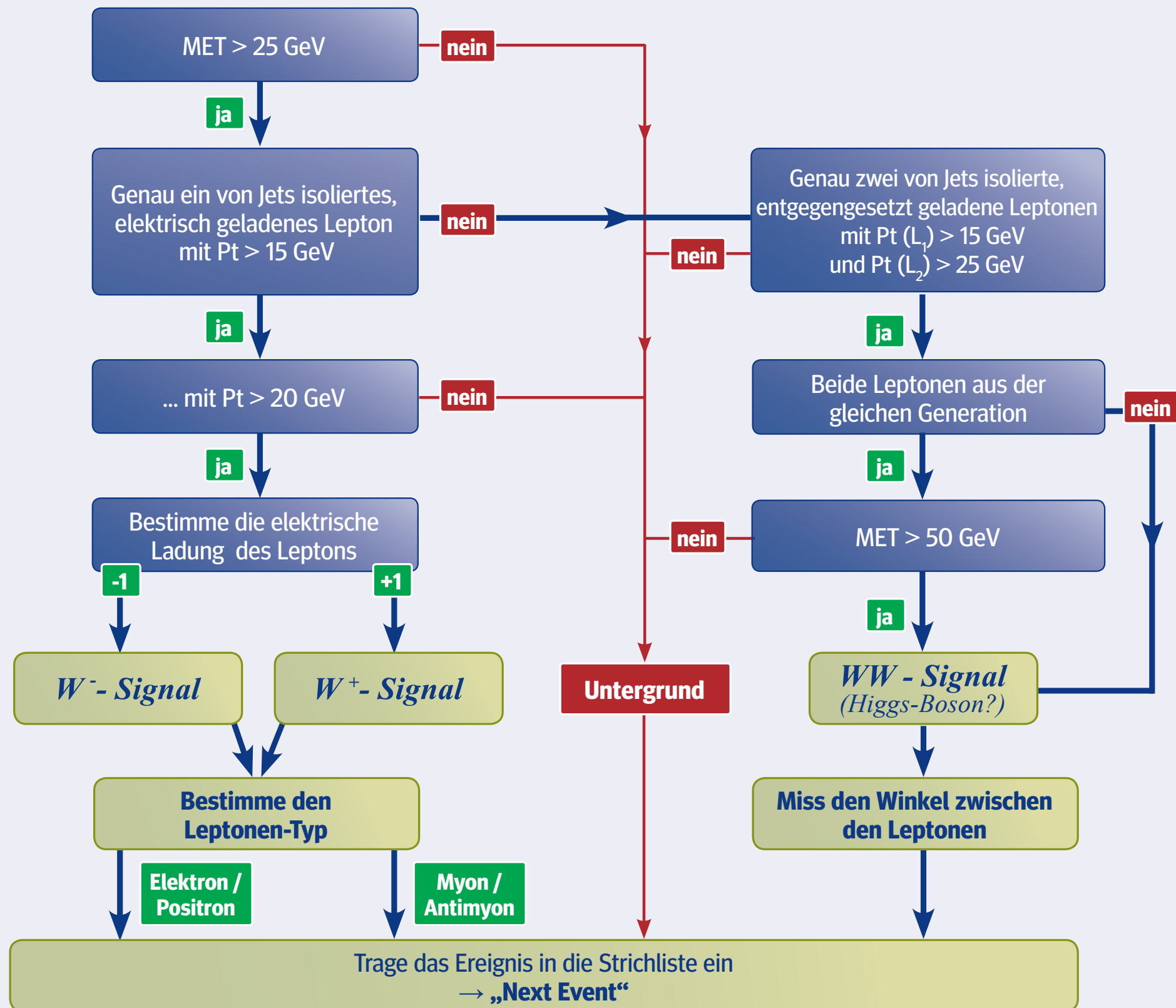
Werkzeuge,
Navigation

Einstellungen

Informationen zu
Teilchenspuren

DATENANALYSE: SO UNTERSUCHST DU EREIGNISBILDER

Überprüfe bei jedem Ereignis, ob die Kriterien für einen W-Zerfall oder einen WW-Zerfall erfüllt sind:



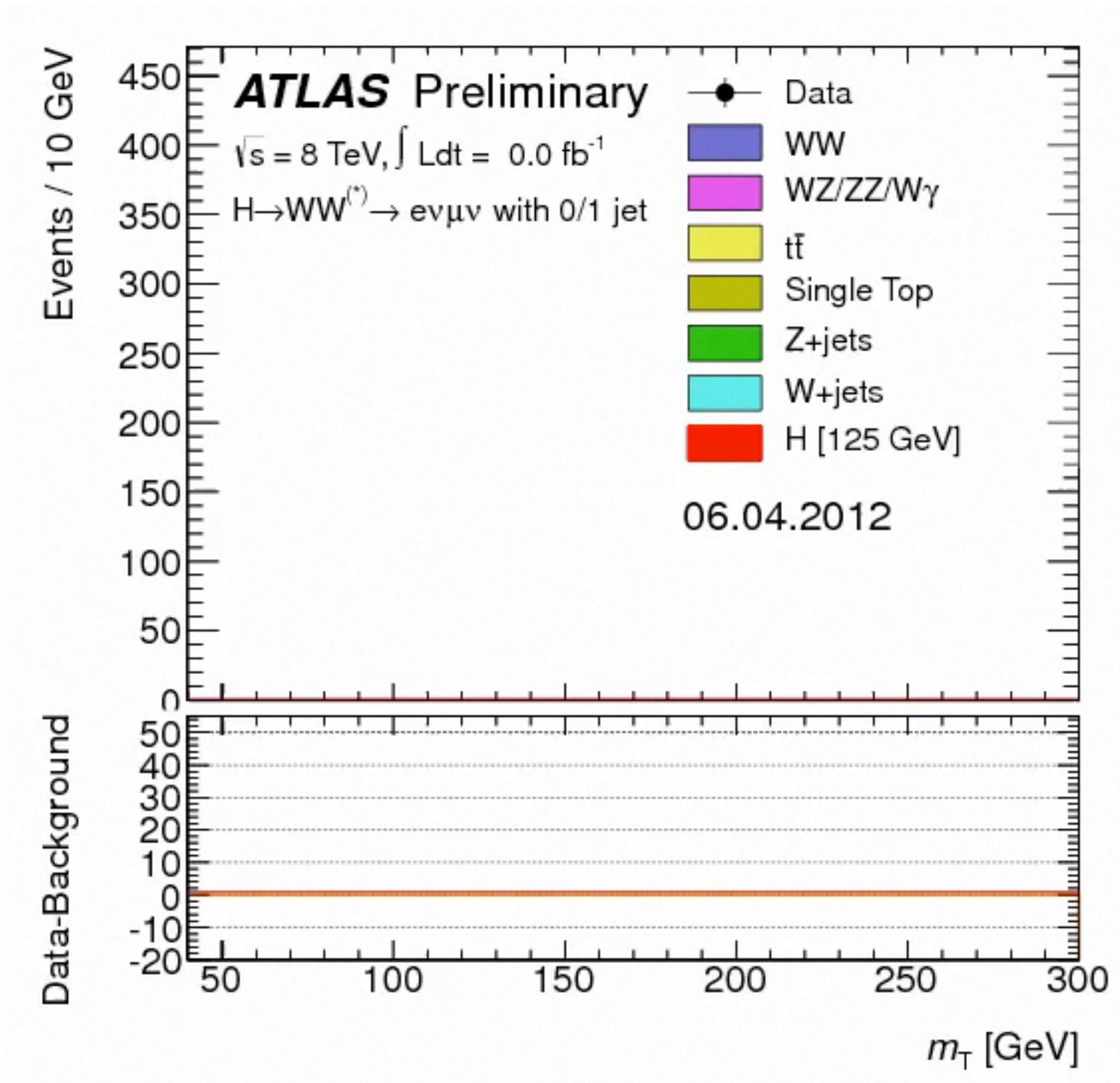
Aktiv werden!

- Jedes Team erhält Datenpaket mit Ereignisbilder aus 50 Kollisionen gemäß Zuweisung
- Jedes Team durchsucht sein Datenpaket nach Signalereignissen für W- und WW-Zerfälle
- Strichliste nicht vergessen!

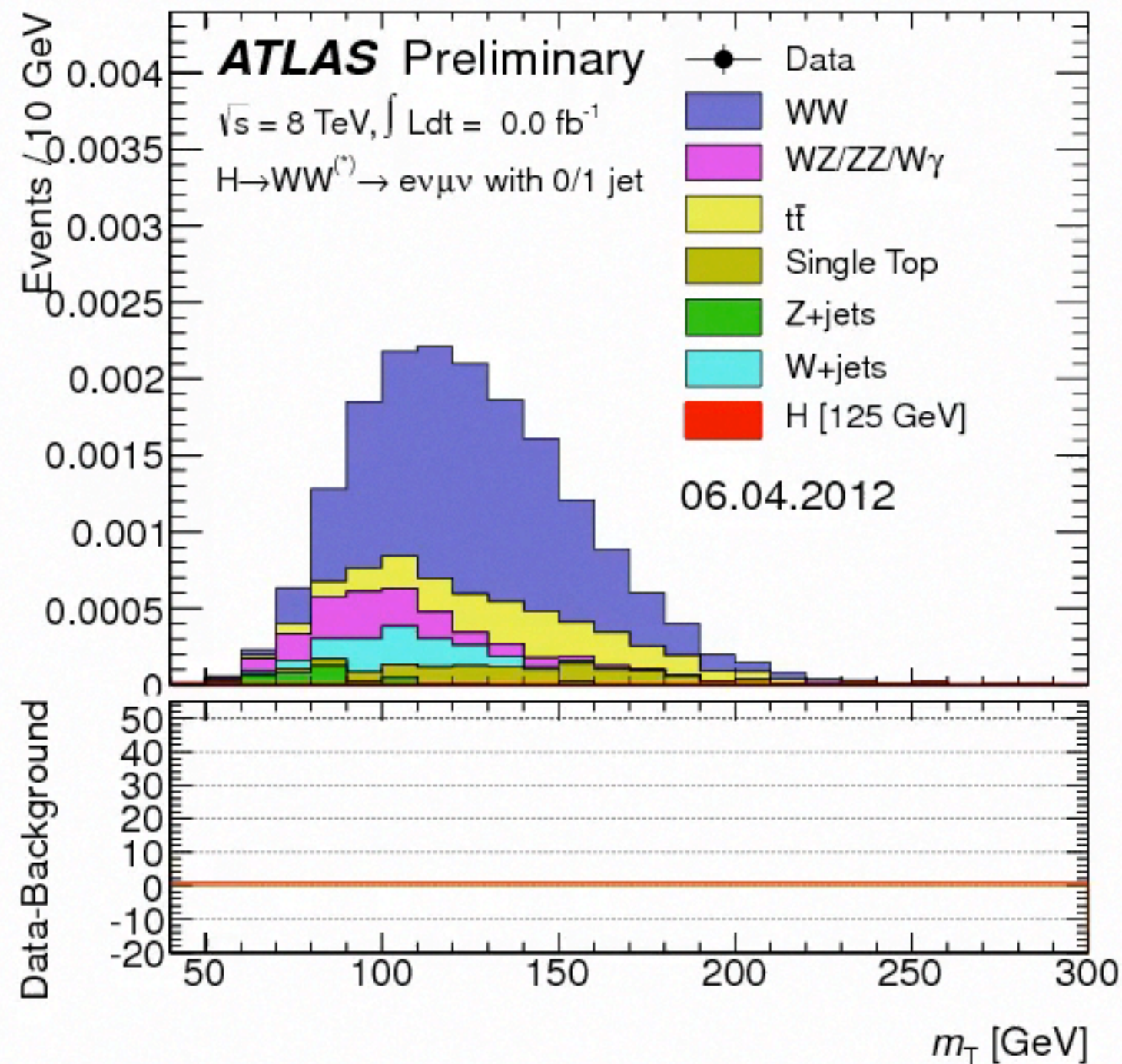
Auswertung



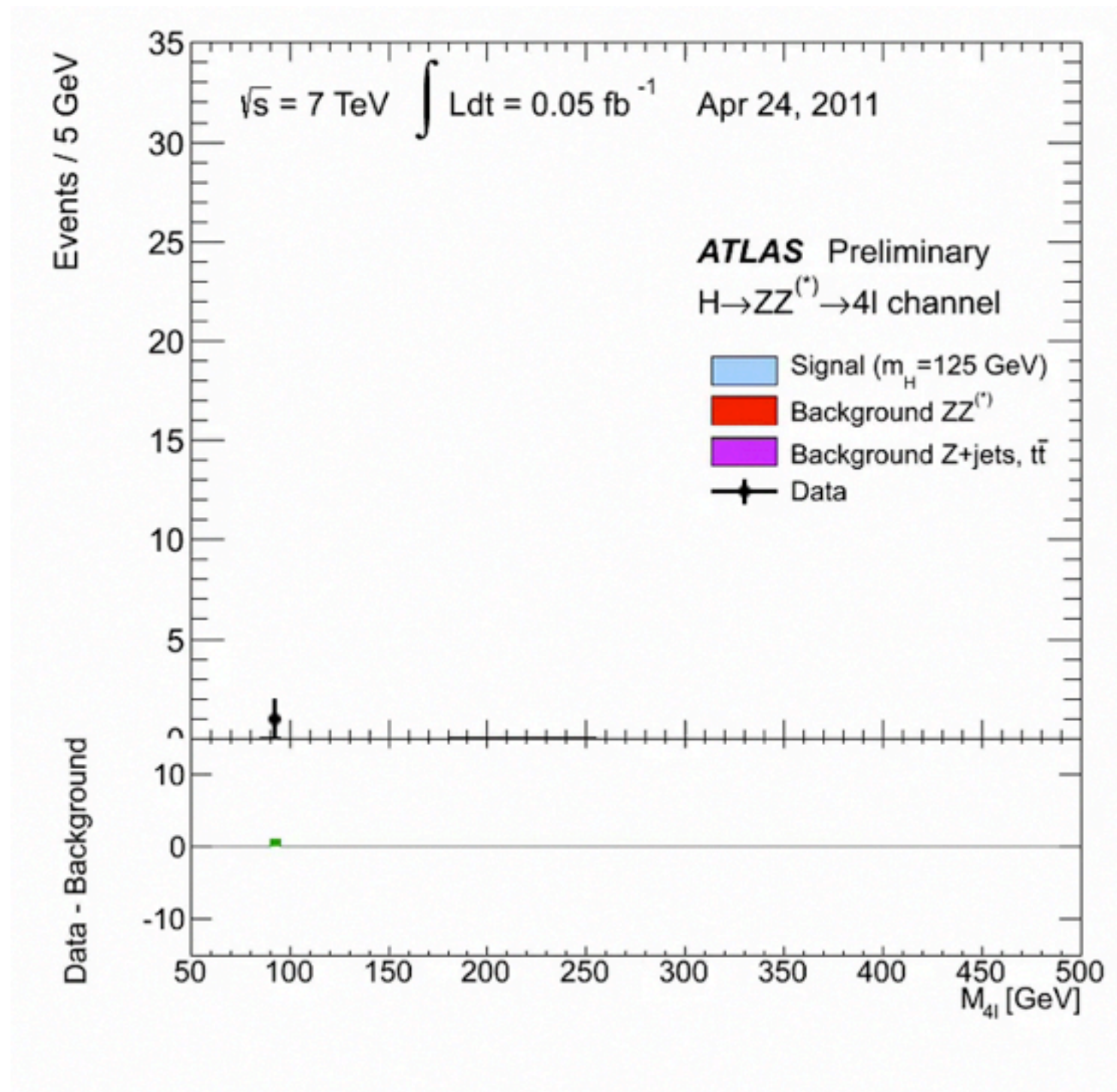
Higgs Suche bei ATLAS



Higgs Suche bei ATLAS



Higgs Suche bei ATLAS





Externe Bildnachweise

Folie 6: www.HDWallpaperBank.com (FOX)

Folie 7: wikipedia.de, FOX, CERN

Folie 8: CERN