

# Teilchenphysik

Wie vermittelt ich das?

Raum Name:  
TEILCHENWELT



**Wer von euch hat schon Erfahrungen gesammelt?**

# Das Standardmodell: Teilchenzoo oder geniales System?

Ein erprobter Erklärungsansatz



# Didaktisches Konzept

- ▶ Netzwerk Teilchenwelt hat in den letzten ~ 5 Jahren viel Aufwand betrieben, um didaktisches Konzept für Teilchenphysik im Unterricht zu erarbeiten.
- ▶ Wichtiges Ziel war, besser an bekanntem Wissen zu orientieren und neuen Stoff darauf aufzubauen
- ▶ Hauptkonzept: “Wechselwirkungen statt Teilchen”



**FOLGENDE BÄNDE  
SIND VERFÜGBAR:**

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen  
und Teilchen



**KOSTENFREI  
ERHÄLTLICH!**

**Wo finde ich das?**

## UNTERRICHTS- MATERIALIEN ZUR TEILCHENPHYSIK

Teilchenphysik ist aktuell und spannend. Die Joachim Herz Stiftung und das Netzwerk Teilchenwelt haben gemeinsam mit Wissenschaftlern und Lehrkräften dieses Thema für den Physikunterricht aufgegriffen und eine Heftreihe mit Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik entwickelt. Sie soll Lehrkräften Ideen, Anregungen und Hintergrundinformationen für ihren Unterricht geben.

Die Materialien können per E-Mail an [info@leifphysik.de](mailto:info@leifphysik.de) angefordert oder unter [www.leifphysik.de/tp](http://www.leifphysik.de/tp) heruntergeladen werden.



PHYSIK



NETZWERK  
TEILCHENWELT



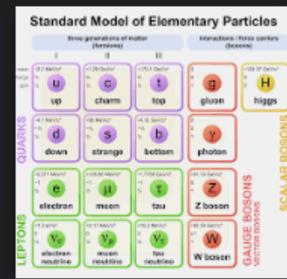
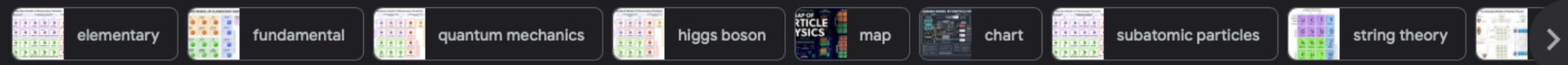
# Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ Elegantes Theoriegebäude („Quantenfeldtheorie“) mit großer Vorhersagekraft  
angereichert mit experimentellen Erkenntnissen
- ▶ Grundlage: Fundamentale Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
- ▶ Beschreibt alle bekannten Wechselwirkungen auf Teilchenebene
- ▶ Wurde 1960er und 1970er Jahren entwickelt.  
Seitdem in zahlreichen Experimenten überprüft

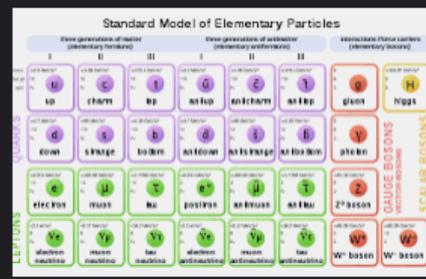


# Fußball Analogie

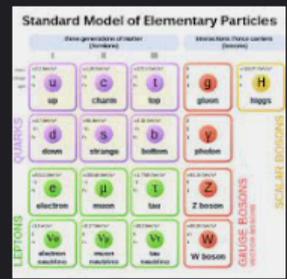
- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
- ▶ Die frühesten Hinweise auf Fußball findet man schon vor 5000 Jahren in China...
- ▶ Es gibt zwei Teams mit je 11 Spielern. Beide haben Mittelfeldspieler, Stürmer, Innenverteidiger, Außenverteidiger...
- ▶ Zwei Teams versuchen einen Ball in das jeweils andere Tor zu schießen. Sie dürfen dabei nur die Füße verwenden, außer...
- ▶ Alle vier Jahre gibt es darin eine Weltmeisterschaft. Das größte Stadion dafür wurde in...



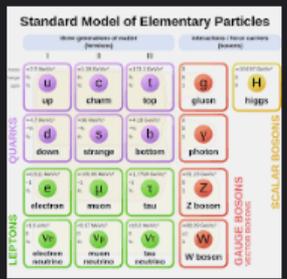
Standard Model - Wikipedia en.wikipedia.org



Particle physics - Wikipedia en.wikipedia.org



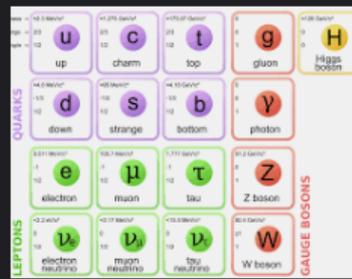
Standard Model - Wikipedia en.wikipedia.org



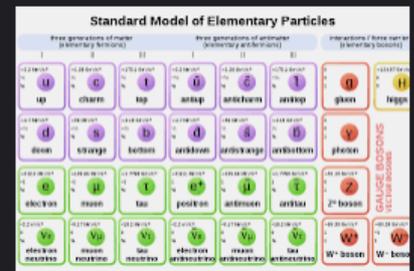
Standard Model - Wikipedia en.wikipedia.org



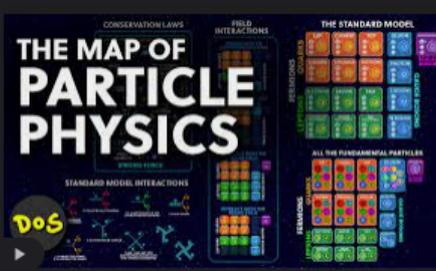
DOE Explains...the Standard Model of ... energy.gov



Quantum Diaries quantumdiaries.org



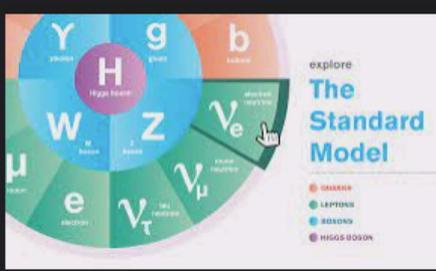
Particle physics - Wikipedia en.wikipedia.org



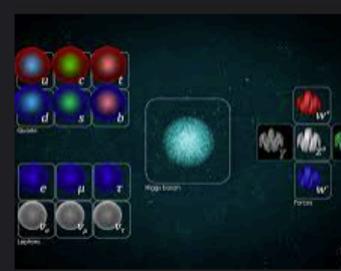
The Map of Particle Physics | The Standard Model... youtube.com



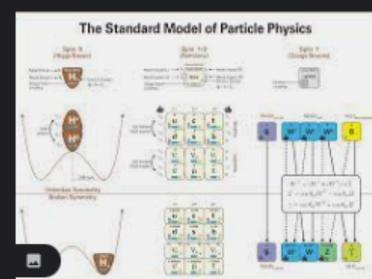
Standard Model of the Cosmos As a Mat... businessinsider.com



The Standard Model of particle physics | symmet... symmetrymagazine.org



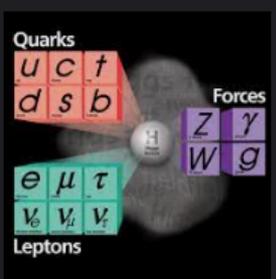
The Standard Model | CERN home.cern



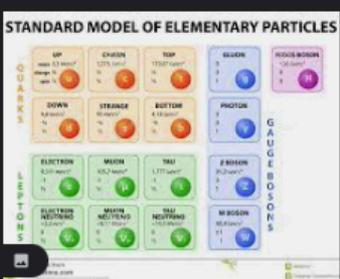
File:Standard Model Of Particle Physics... commons.wikimedia.org



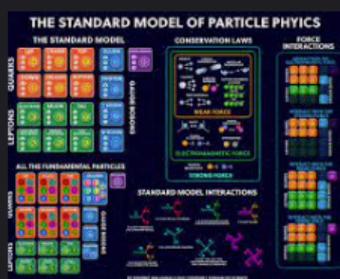
A New Map of All the Par... quantamagazine.org



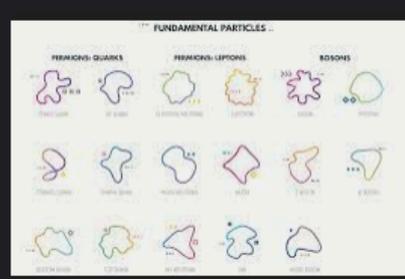
Particle Physics - Faculty of ... physik.uni-wuerzburg.de



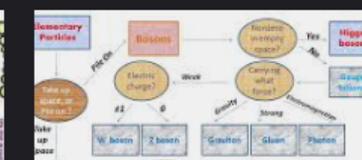
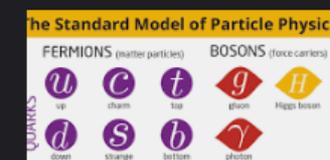
Standard Model of Elementary Partic... dreamstime.com



Dom/DoS on Twitter: "Here's a nearly... twitter.com

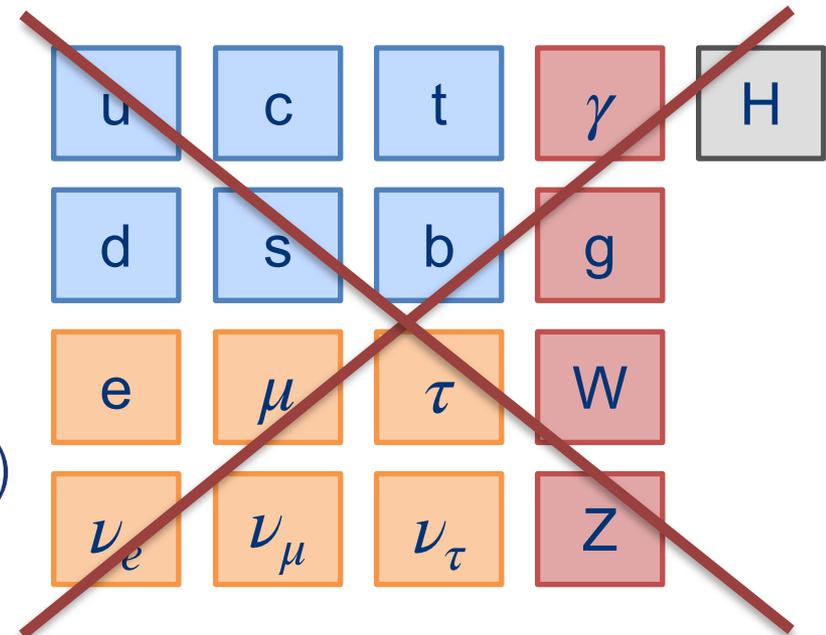


Understanding experiments with the Standar... innovationnewsnetwork.com



# Fußball Analogie

- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - ▶ Man beginnt mit den Grundregeln
  - ▶ **Nicht:** mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen
  - ▶ Regeln = Wechselwirkungen, Erhaltungssätze,...
  - ▶ Spieler = Elementarteilchen
- ▶ Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen??
  - ▶ Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
  - ▶ Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)



# Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ Grundlage: Konsequenzen fundamentaler Symmetrien (lokaler Eichsymmetrien)
  - ▶ Ladungen und Wechselwirkungen
  - ▶ Nicht: Liste der existierenden Teilchen
  - ▶ Sondern: Regeln, die beschreiben, wie diese wechselwirken

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\
 & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. \\
 & + \bar{\psi}_i y_{ij}\psi_j\phi + h.c. \\
 & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)
 \end{aligned}$$

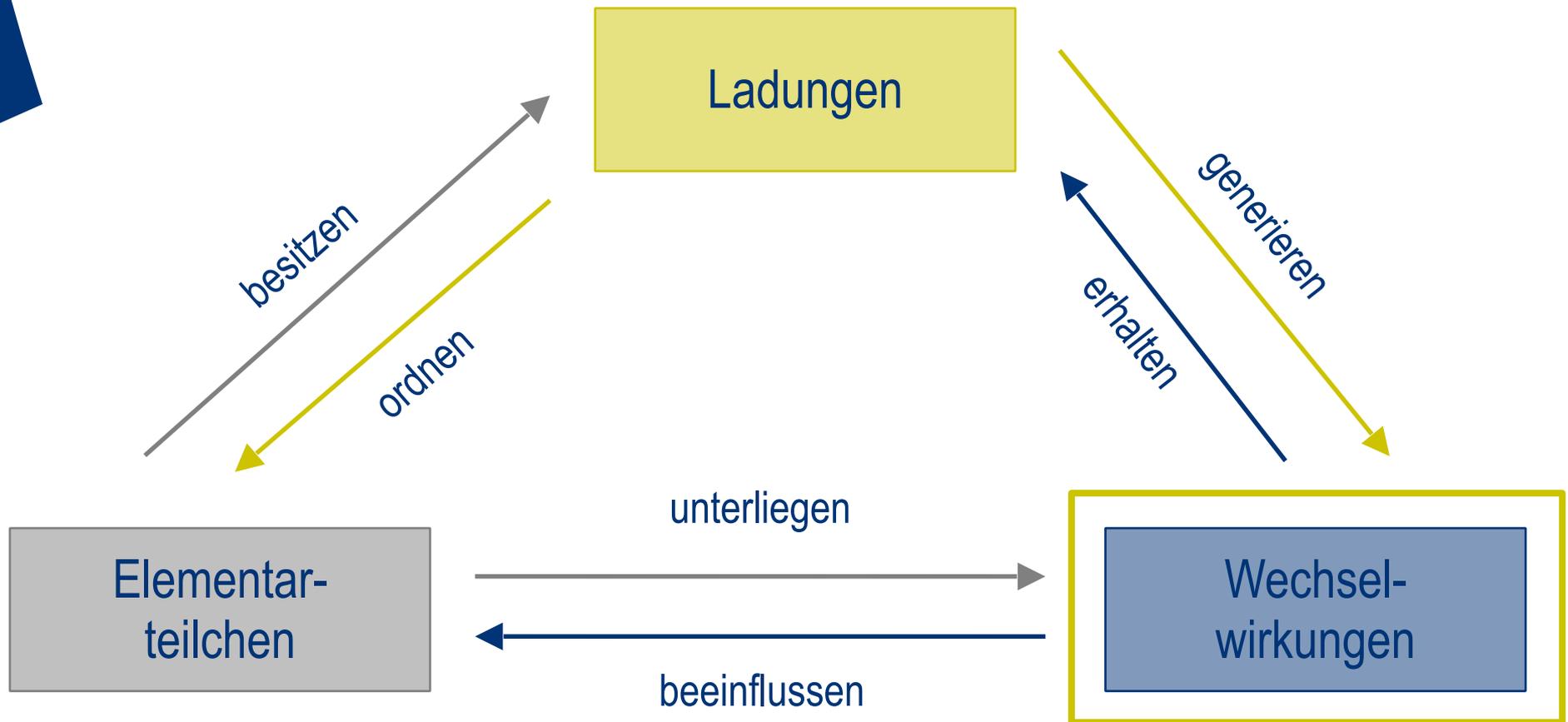


u	c	t	$\gamma$	H
d	s	b	g	
e	$\mu$	$\tau$	W	
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z	

# Roter Faden

- ▶ Physik versucht, Wirklichkeit möglichst einfach zu beschreiben
- ▶ 4 fundamentale Wechselwirkungen
- ▶ Verallgemeinerung der Kraft zu Wechselwirkung:  
Kraft + Umwandlung + Erzeugung + Vernichtung
- ▶ Verallgemeinerung von “Ladung”:  
Erhaltungssätze, Ladungsvektoren
- ▶ Ablösung des Konzepts “Feldlinien” durch Botenteilchen
- ▶ Ladungszustände (Multiplets) für verschiedene Teilchen
- ▶ Ordnungsschema für Elementarteilchen

# Die drei Grundpfeiler des Standardmodells

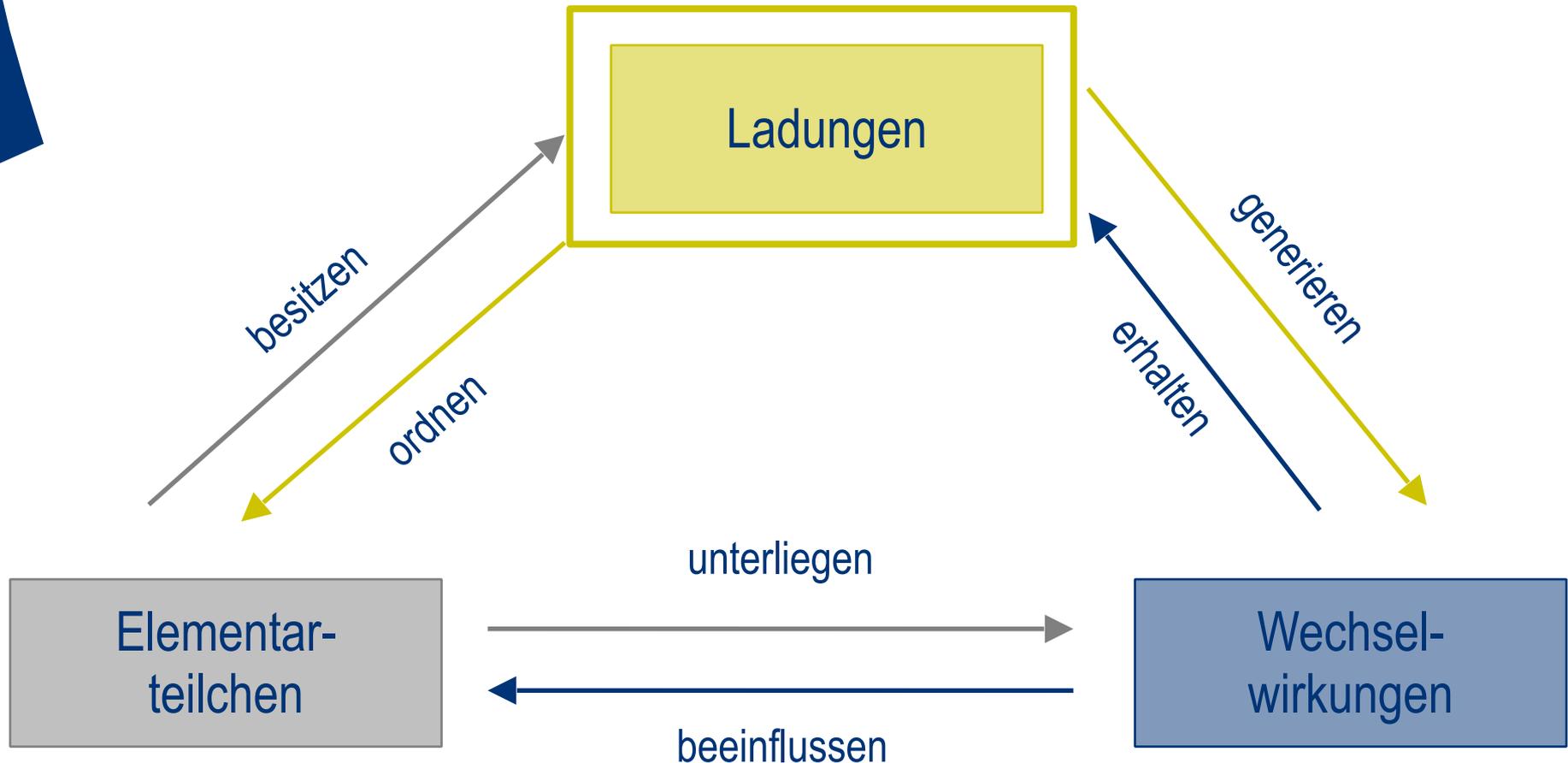


# Basiskonzept: Wechselwirkungen

**Basiskonzept:  
Wechselwirkung**  
= Kraft + Umwandlung +  
Erzeugung + Vernichtung

- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
  - ▶ (Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke WW)
- ▶ 3 dieser Wechselwirkungen werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben und **besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
- ▶ Die Wechselwirkungen des Standardmodells **werden durch Ladungen hervorgerufen**

# Die drei Grundpfeiler des Standardmodells



# 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
- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

elektrische Ladungszahl	$Z$
schwache Ladungszahl	$I$
starker Farbladungsvektor	$\vec{C}$

# Konzept der Ladungen

- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten Wechselwirkung teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

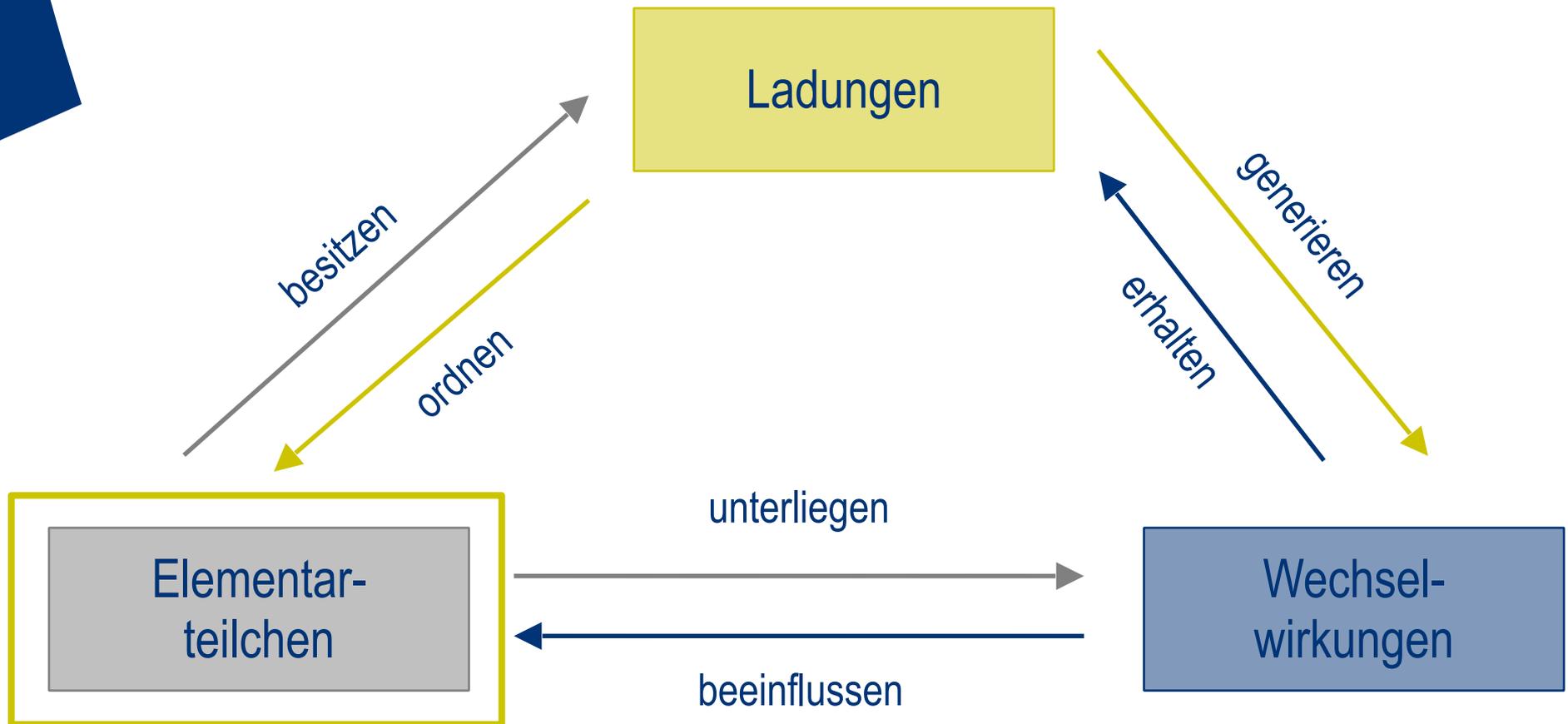
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren dienen als **Ordnungsprinzip** für Teilchen
- ▶ Ladungszahlen bzw. vektoren sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**
  - ▶ Grundlage der Symmetrien des Standardmodells

# Fachliche Didaktische Hinweise

## Verallgemeinerung vom Ladungsbegriff:

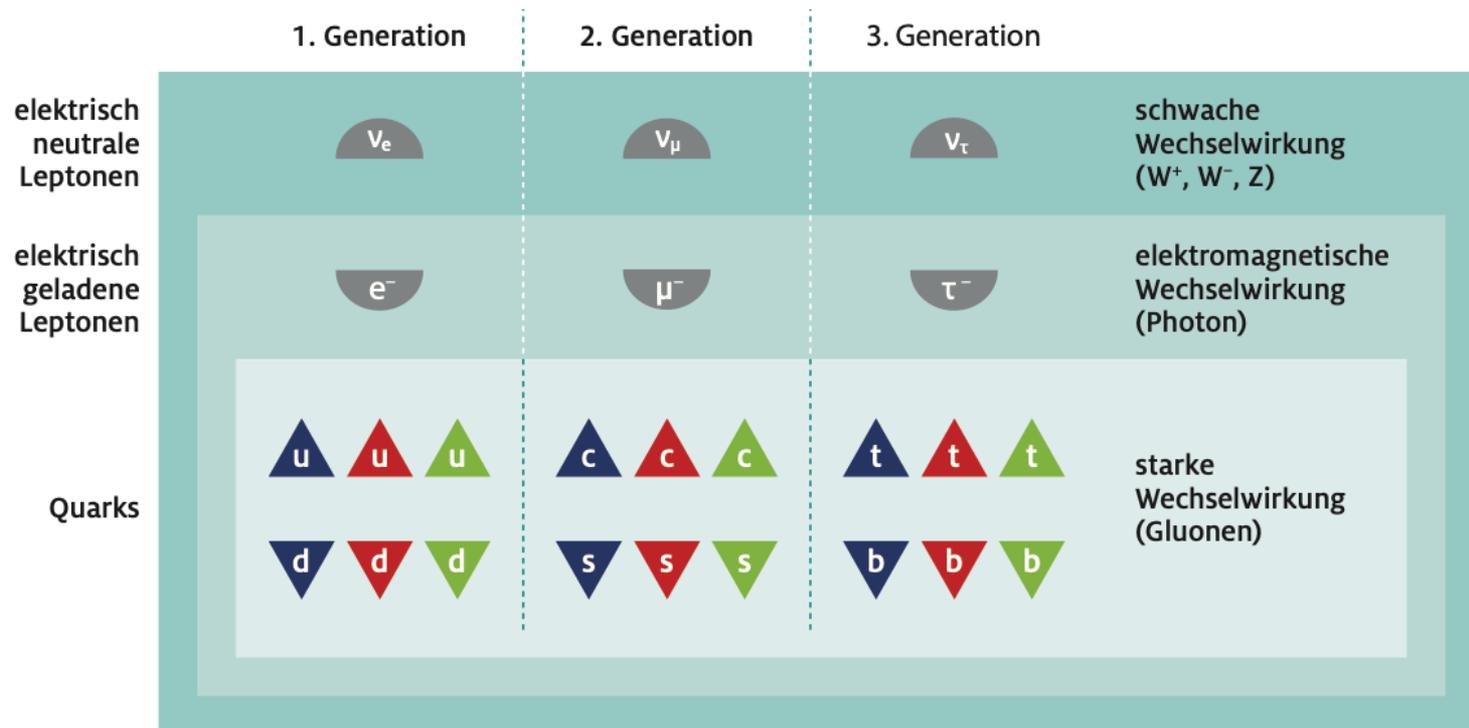
- ▶ **Wichtig:** elektromagnetische Ladung nicht als “Ladung” abkürzen!
  - ▶ behindert Verständnis vom allgemeinen Ladungsbegriff
- ▶ Betonung von Ladungszahl/-vektor als Teilcheneigenschaft

# Die drei Grundpfeiler des Standardmodells



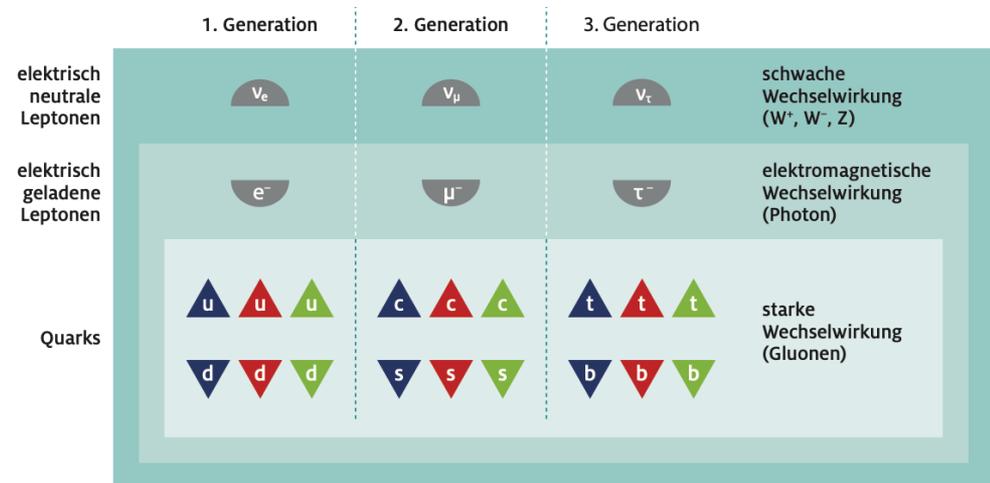
# Materieteilchen

- ▶ Stabile Materie in unserer Umgebung besteht nur aus Teilchen der ersten Generation: Elektronen, Up- und Down-Quarks.
- ▶ Von ihnen gibt es je zwei massereichere, instabile „Kopien“ mit gleichen Ladungen (2. und 3. Generation).



# Anordnung der Materieteilchen

- ▶ Anordnung der Materieteilchen ist intuitiv, wenn man Ladungen verstanden hat
- ▶ Schüler können die Anordnung entwerfen und erklären



# Fachliche Didaktische Hinweise

Raum Name:  
TEILCHENWELT



- ▶ Passt eure Fachsprache an

**“Botenteilchen” , “Austauschteilchen” oder doch “Boson”?**

# Feynman Diagramme

- ▶ Wechselwirkungen lassen sich durch Feynman Diagramme beschreiben

- ▶ Materieteilchen



- ▶ Antimaterieteilchen



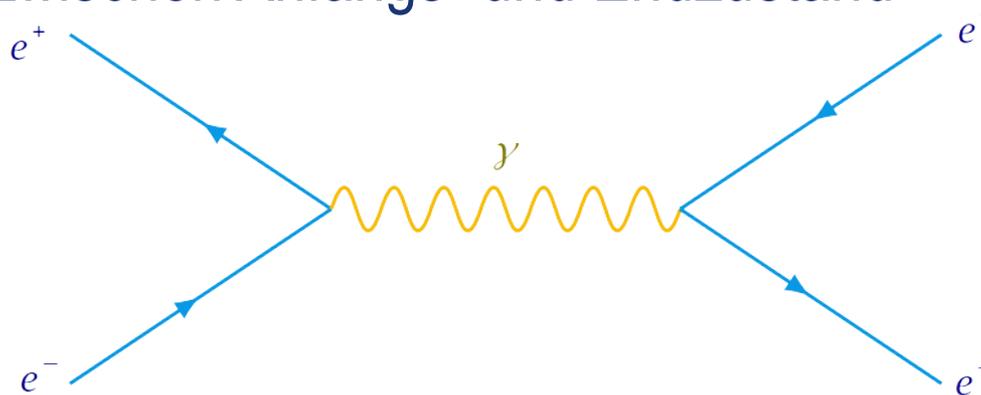
- ▶ W, Z,  $\gamma$



- ▶ Gluonen

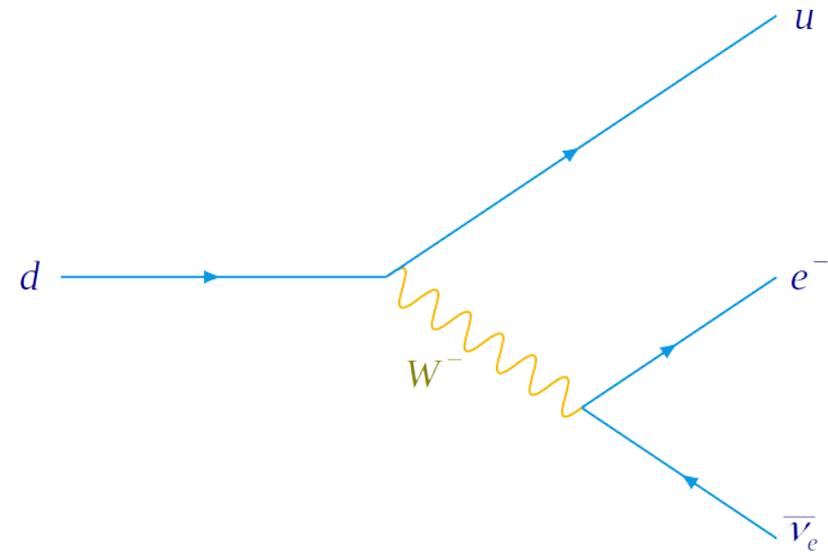
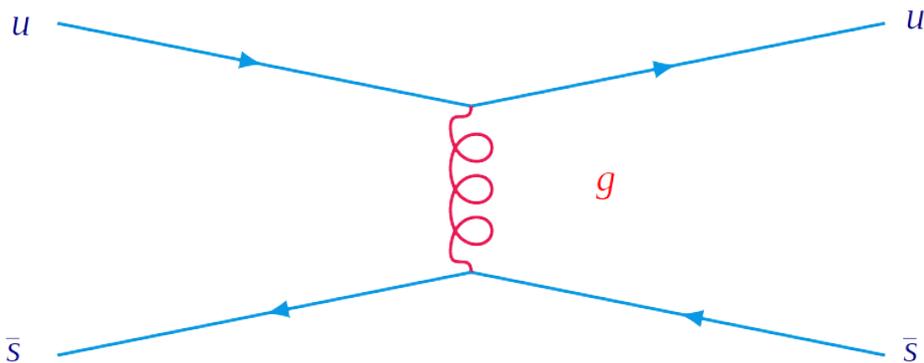


- ▶ Vermittlung zwischen Anfangs- und Endzustand



# Fachliche Didaktische Hinweise

- ▶ **Mehr als nur hübsche Bildchen:** Feynman Diagramme sind die Visualisierung hochkomplexer Formeln
  - ▶ Einzigartiger Zugang zu hochkomplexen Formeln
- ▶ Verdeutlichung des Ladungserhalt an jedem Vertex





# Gibt es Fragen?

?

?

?

?

?

# Masterclasses

Teilchenphysiker für einen Tag

# Masterclass mit Open Data

- ▶ Vielfalt an Aufgaben:
  - ▶ Teste Qualität von Daten
  - ▶ Event displays: Teilchenidentifikation
  - ▶ Histogramme
  - ▶ Schlussfolgerungen
- ▶ Öffentlich verfügbar
- ▶ Regelmäßig aktualisiert

Raum Name:  
TEILCHENWELT



▶ ATLAS: W-Pfad oder Z-Pfad



▶ CMS: W/Z/H Analyse

▶ Belle II



ALICE

▶ ALICE: Strange Teilchen

▶ Hadronen-Therapie



▶ MINERvA



▶ LHCb: Charm Lebensdauer

<https://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-vermittler/informationen-zu-den-messungen/>  
[https://physicsmasterclasses.org/index.php?cat=local\\_organisation&page=measurements](https://physicsmasterclasses.org/index.php?cat=local_organisation&page=measurements)

# ATLAS W-Pfad

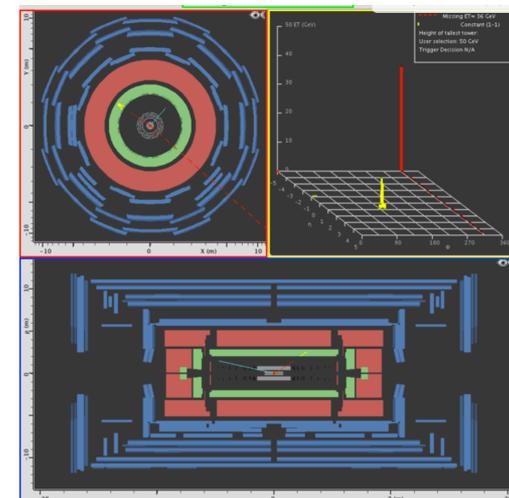
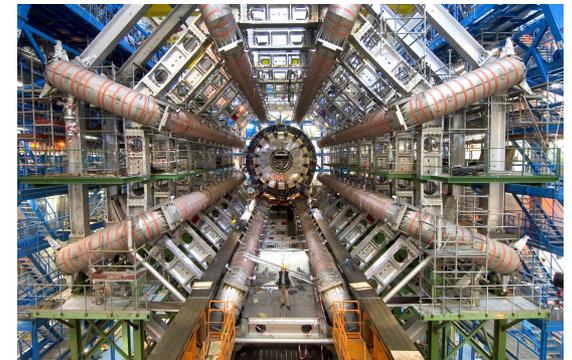
Woraus besteht das Proton?

# Lernziele im W-Pfad

- ▶ Erleben die wissenschaftliche Methode am praktischen Beispiel
  - ▶ **Aufstellen von Theorien**  
Was vermute ich? Welche alternativen Erklärungen gibt es?  
Welchen Ausgang würde ich im Experiment erwarten?
  - ▶ **Interpretieren von statistischen Aussagen**  
Ist das jetzt ein Beweis für meine Theorie? Wie verstehe ich  
Histogramme? Was heißt “signifikant”? Was muss ich machen, um  
ein besseres Ergebnis zu erhalten?
- ▶ Vorteile/Notwendigkeit von internationalen Kollaborationen

# Der ATLAS W-Pfad

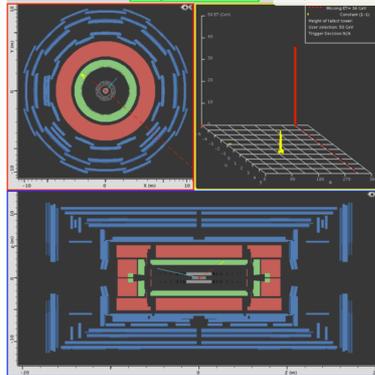
- ▶ Eine der Messung für SchülerInnen mit Daten vom ATLAS Detektor
- ▶ Aufbau:
  - ▶ Die Theorie:  
Einführungsvortrag über das Standardmodell
  - ▶ Das Experiment:  
Funktionsweise von LHC und der ATLAS Detektor
  - ▶ Einführung in Messung und die Software



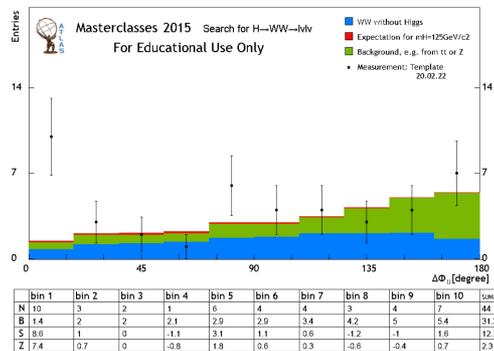
<https://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath.htm>

# Der ATLAS W-Pfad

SchülerInnen identifizieren  $l\nu$  und  $ll\nu\nu$  Ereignisse und führen Strichliste



Total #	$W \rightarrow \dots + \nu$				Background	WW	WW event numbers and lepton angle													
	$e^+$	$e^-$	$\mu^+$	$\mu^-$			no. 1 angle	no. 2 angle	no. 3 angle	no. 4 angle	no. 5 angle	no. 6 angle	no. 7 angle	no. 8 angle	no. 9 angle	no. 10 angle				
480																				
group A	1	1	2	1	17	2	100									130	0			
group B	5	1	10	11	0	10	5	16.2	45	54										
group C								0	0	0	0	0	0	0	0					
group D											0	0	0	0						
group E	2	1	1	0	3	0														
group F	3	2	0	1	7	0		10	27	24	74	89	0	0						
group G	0	0	1	1	0	9							0	0						
group H	4	1	0	1	6	0														
group I	9	3	6	7	19	7	75	8	126	127	27	177	165	0						
group J	0	2	9	5	9	4	180	179	148	73	0	0	0	0						
group K	3	4	9	6	11	2	169.1	8.2	14.5											
group L	3	4	9	6	11	1	55													
group M	2	3	1	5	7	3	112	11	17											
group N																				
group O																				
group P	7	0	4	5	9	4	180	179	148	73										
group Q	1	3	10	12	19	5	105.8	12	129.5	122.8	125.2									
group R	18	6	1	3	23	2	10.3	107.2												



Total	72	41	74	65	174	54
$\Sigma  W^+ , \Sigma  W^- $	$ W^+ $	146	$ W^- $	106	$ W^+  +  W^- $	252
Ratio	$ W^+ / W^- $		1.38	±	0.18	

Comparison with results of the ATLAS collaboration (from 2011):

Measurement of the  $W \rightarrow l\nu$  and  $Z/\gamma^* \rightarrow ll$  production cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector\*) and Search for the Standard Model Higgs boson in the  $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu\nu$  decay mode using 1.7 fb<sup>-1</sup> of data collected with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 7$  TeV \*\*)

\*) Authors: The ATLAS Collaboration (Submitted on 5 Dec 2011): <http://arxiv.org/abs/1109.5141.pdf>  
 \*\*) Authors: The ATLAS Collaboration (24 Aug 2011): ATLAS-CONF-2011-134

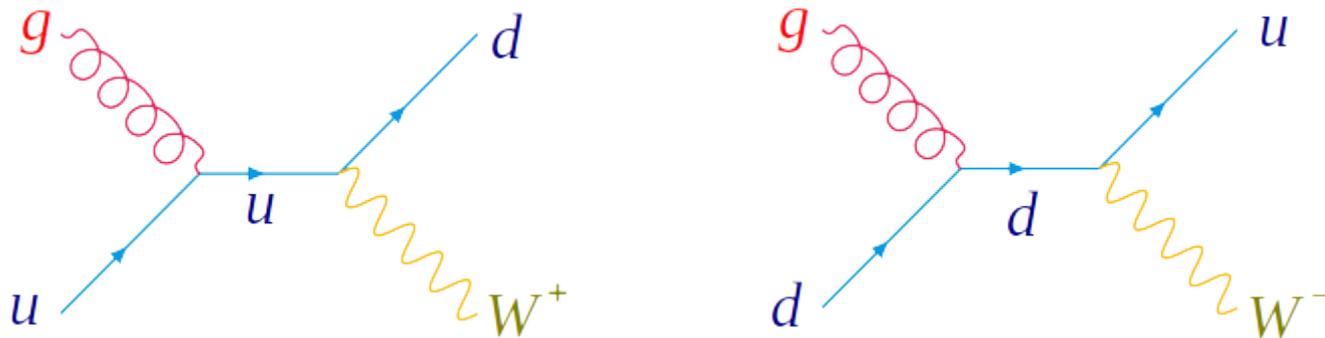
	$W \rightarrow \dots + \nu$				Background	WW cand.
	$e^+$	$e^-$	$\mu^+$	$\mu^-$		
Total	77885	52856	84514	55234	21930	469
$\Sigma  W^+ , \Sigma  W^- $	$ W^+ $	162399	$ W^- $	108090	$ W^+  +  W^- $	270489
Ratio	$ W^+ / W^- $		1.50	±	0.03	

Suche nach dem Higgsboson

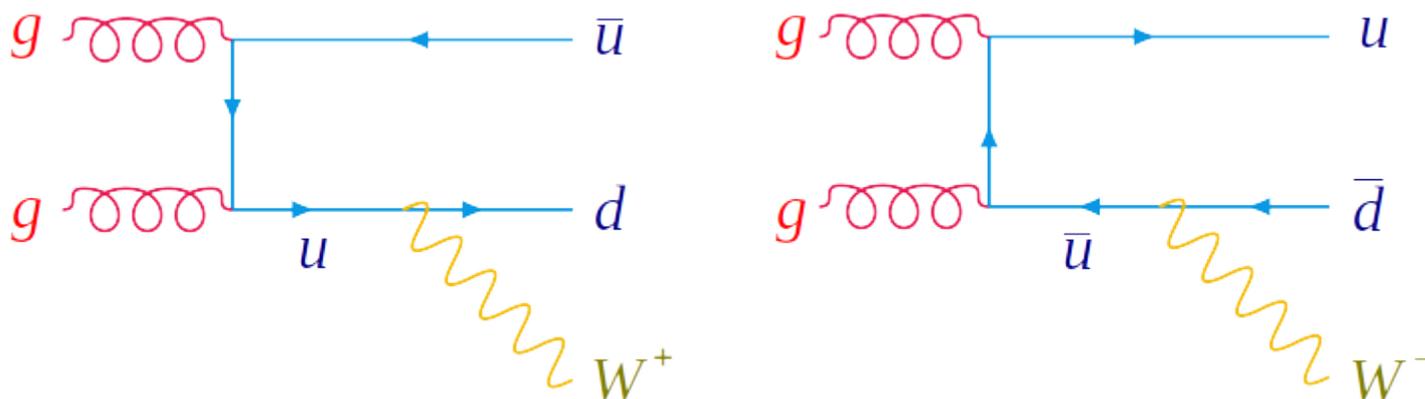
Aufbau des Protons

# Aufgabe 1: Das $W^+ / W^-$ -Verhältnis

- Rückschlüsse auf die Protonenstruktur können aus dem Ladungsverhältnis von  $W^+$  und  $W^-$  Bosonen bestimmt werden.



- (Provozierte) Erwartung der Schüler  $W^+ / W^- = 2 : 1$
- Gemessenes (= reales) Ergebnis:  $1.5 : 1$  (Gluonen, Seequarks)



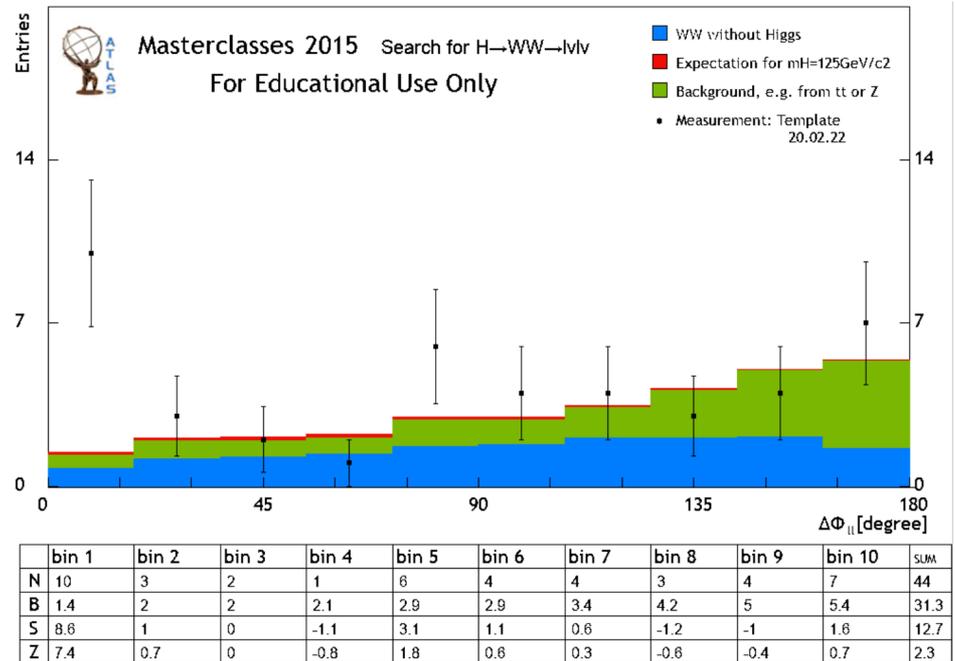
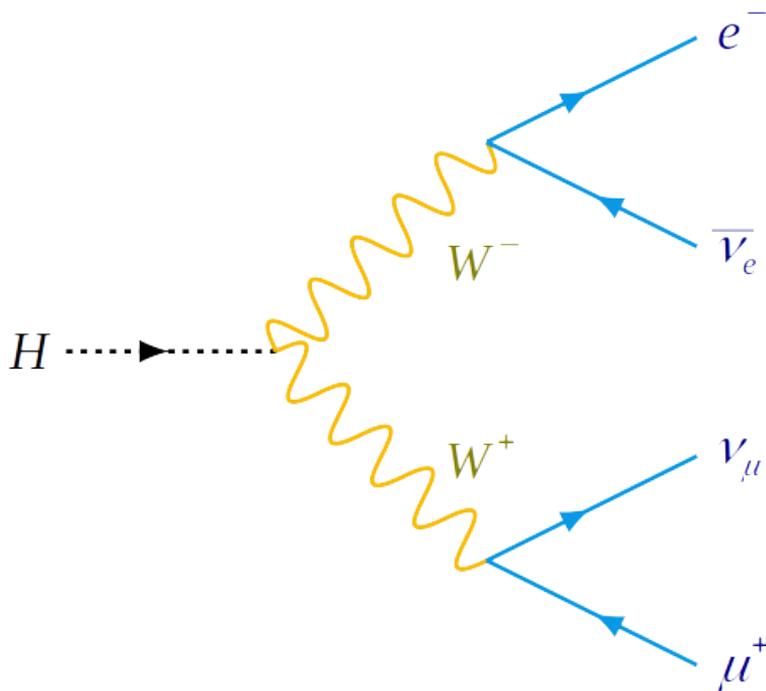
# Fachliche Didaktische Hinweise

**Schüler sollen selbständig Forschung nachempfinden:**

- ▶ Kenntnis von Quarks und Protonen: Theorie  
→ Selbständig auf das Verhältnis 2:1 kommen
- ▶ Kenntnis von Unsicherheitsgrenzen: Auswertung Experiment  
→ Selbstständig bewerten ob Theorie haltbar
- ▶ Mit dem Vermittler das Ergebnis diskutieren

# Aufgabe 2: Das Higgsboson

- ▶ Nach dem Higgsboson kann in Ereignissen mit 2 W Bosonen gesucht werden
- ▶ Durch Messung einer Winkelverteilung kann zwischen Signal- und Untergrundereignissen unterschieden werden



# Vor der Masterclass

- ▶ Foliensammlung (Vorlage mit vielen Beispielfolien und Kommentaren, verfügbar im [wiki](#) und auf [teilchenwelt.de](http://teilchenwelt.de))
- ▶ Passt den Vortrag an die SchülerInnen und Situation an:
  - ▶ Welche Messaufgaben wollt ihr bearbeiten und welche Inhalte sind dafür notwendig?  
Z. B.: Was müsst ihr vermitteln, damit die Protonstruktur verständlich ist?
- ▶ Viele, gute Tips findet ihr auch [hier](#)

# Handout: Während der Masterclass

- ▶ Handout für SchülerInnen verfügbar auf [teilchenwelt.de](http://teilchenwelt.de)
- ▶ An die SchülerInnen austeilen und z.B. während des Vortrags darauf verweisen

**HINWEISE**  
W-PFAD  
2016

**NETZWERK  
TEILCHENWELT**

## HANDOUT FÜR TEILCHENPHYSIK-MASTERCLASSES

ATLAS-DATEN: W-PFAD (2016)

**Liebe Vermittlerinnen und Vermittler,**

das vorliegende Handout unterstützt die Teilnehmer von Teilchenphysik-Masterclasses bei der Messung und ermöglicht ihnen weitgehend selbständiges Arbeiten. Teilnehmer und Lehrkräfte können das Handout mitnehmen und für die Nachbereitung der Masterclass nutzen.

Idealerweise wird das Handout doppelseitig in Farbe ausgedruckt.

Dieses Handout ist speziell für Minerva-Versionen ab 2013 konzipiert (mit Winkelmessung), enthält aber gerade auf der ersten Seite für Vermittler wesentliche Hinweise zum Umgang mit der MINERVA-Version 2015.

Das Handout enthält...

- die Aufgabenstellung und die Selektionskriterien, anhand welcher die Teilnehmer W- und WW-Signale erkennen,
- die wichtigsten Funktionen der Software MINERVA,
- die Darstellung von Teilchenspuren im Event-Display
- und Informationen über Elementarteilchen und Wechselwirkungen.

**NEU seit 2015:**

- Geänderte Selektionskriterien, da neue Funktionen (konkreter Wert für Isolation -> Seite 3 und Vertexdarstellung) hinzu gekommen sind
- neue Datensätze (insgesamt 12000 Ereignisse) mit geänderter Zusammensetzung (mehr Signal, weniger Untergrund) und leichter zu identifizierenden Ereignissen
- Modifiziertes Flow-Chart mit Fokus auf typischen Problemen der Jugendlichen:
  - MINERVA gibt nun beim Anklicken einer Teilchenspur einen Isolationswert an.
  - Dies ist das Verhältnis der Summe der transversalen Impulse aller Spuren in einem Kegel mit DeltaR < 0,3 geteilt durch den transversalen Impuls der angeklickten Spur.
  - MINERVA zeigt nun Vertices, die durch mehr als drei Spuren definiert sind. Diese sind grün dargestellt.

**Technische Hinweise**  
MINERVA 2015 muss immer mithilfe der Start-Datei, die zu dem Betriebssystem auf dem ausführenden Rechner passt, gestartet werden. (Das Programm Atlantis darf nicht als „Executable Jar File“ ausgeführt werden, sonst kann es passieren, dass die Grafiken im Programm falsch angezeigt werden.) Bevor das Programm ausgeführt werden kann, müssen die Dateien noch extrahiert werden. Ein entsprechender Befehl dafür erscheint beim ersten Klick auf die jeweilige Start-Datei.

Viel Spaß wünscht  
das Teilchenwelt-Team

# Vorschlag: Ablauf Masterclass - Theorieblock

8:45	Ankunft, Technikvorbereitung
9:00	Motivation
9:10	Einführung in Wechselwirkungen und Ladungen
9:35	Pause
9:45	Aktivierung z.B. mit Steckbriefen
9:55	Einführung in Teilchen
10:30	Pause
10:45	Einführung LHC
11:15	Pause
11:25	Einführung ATLAS und Teilchenidentifikation

# Vorschlag: Ablauf Masterclass - Messungsblock

12:45	Messauftrag erklären
13:00	Einführung in Software + Einführung in Messung
13:15	Entscheidungsbaum erklären und 1-2 Events gemeinsam durchgehen
	Übung 2 (Ereignisidentifikation)
	fließender Übergang in Pause
14:00	Beginn der Messung, selbstständiges Eintragen in Tabelle
14:50	Auswertung, Vergleich mit ATLAS Messungen
15:00	Vorstellung Netzwerk Teilchenwelt und weitere Möglichkeiten darin

# Fachliche Didaktische Hinweise

## Kein Zeitplan ist in Stein gemeißelt:

- ▶ Rahmenbedingung wird immer von der Schule gegeben: Mittagspause, anschließendes Schulprogramm,...
- ▶ Achtet auf die Konzentration und Motivation eurer Schüler
- ▶ Zur Not einfach mal die Schüler fragen
- ▶ Nutzt auch die Pausen mit den Schülern

# Und online?

## Geschwächte Aufmerksamkeit und Leistungsfähigkeit

Möglichkeiten:

- ▶ Den Umfang einschränken
- ▶ Auf mehrere Tage verteilen
  
- ▶ Nach einem Schultag ist die Aufmerksamkeit noch geringer!
  
- ▶ Bietet digitale und anonyme Möglichkeiten Feedback zu geben und Fragen zu stellen



# Gibt es Fragen?

?

?

?

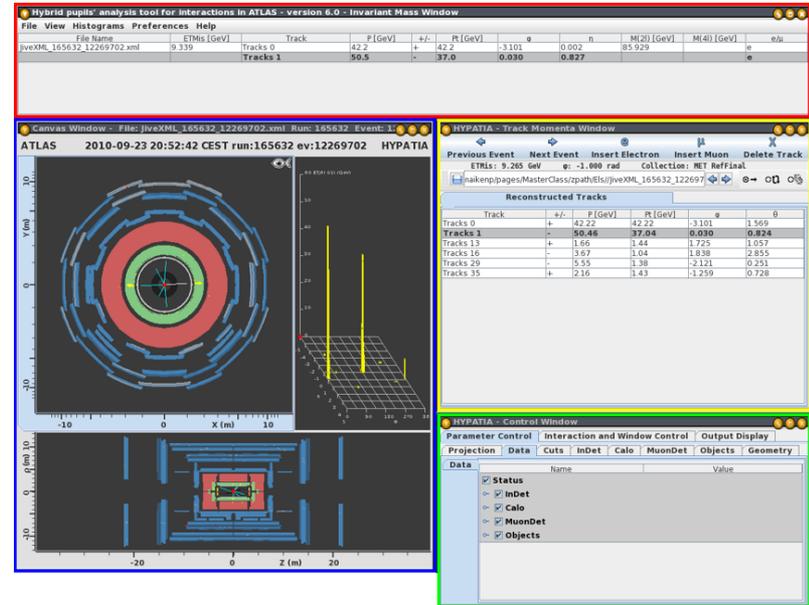
?

?

# Noch mehr Masterclasses

# ATLAS Z-Pfad

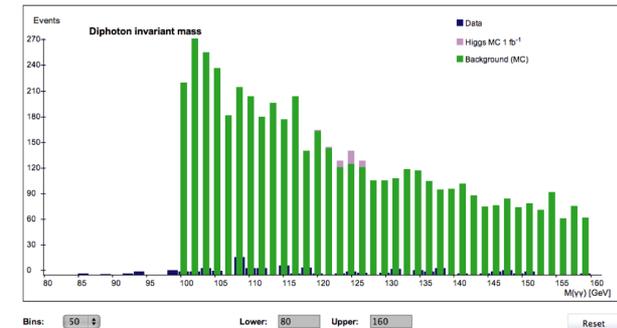
- ▶ Events identifizieren  $ll$ ,  $4l$ ,  $\gamma\gamma$
- ▶ Invariante Masse berechnen
- ▶ Ergebnisse kombinieren und auswerten



- ▶  $ll$  Ereignisse
  - ▶ Vermessung von bekannten Teilchen:  $Z^0, J/\psi, U$
  - ▶ Suche nach neuer Physik:  $Z'$ , Graviton

- ▶  $4l$  und  $\gamma\gamma$  Ereignisse
  - ▶ Higgs-Suche

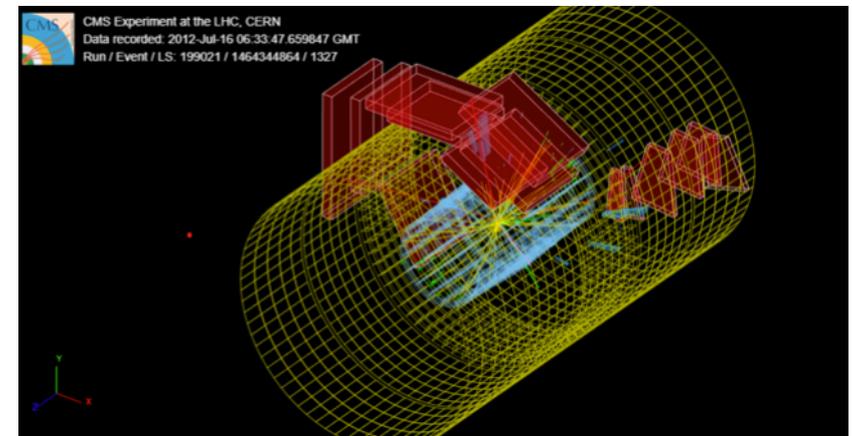
- ▶ Wichtigste Konzepte: Statistik, Modellierung, Signifikanz



<https://atlas.physicsmasterclasses.org/de/zpath.htm>

# CMS WZH-Messung

- ▶ 3D event display
- ▶ SchülerInnen sollen W, Z und Higgs-Kandidaten finden
- ▶ Invariante Masse von Leptonenpaaren oder 4l oder Lepton + MET werden in Histogramm gesammelt
- ▶ Messung von Verhältnissen:
  - ▶  $W^+/W^-$
  - ▶  $e/\mu$
- ▶ 3000 Events voller Ausreißer und notwendiger Interpretation

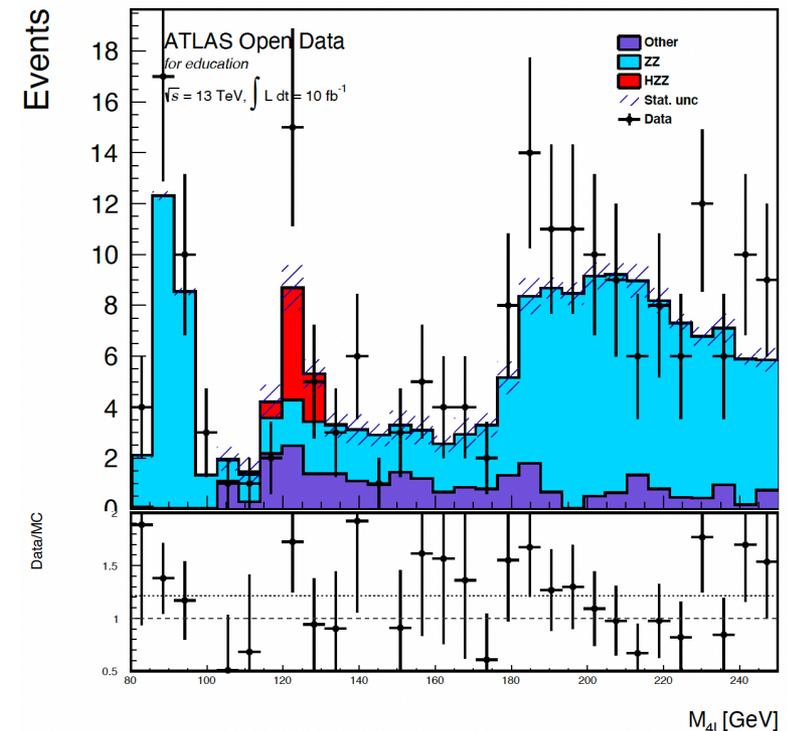


<https://cms.physicsmasterclasses.org/cmsde.html>

# Selbstständig weiter forschen

# Forschungsarbeiten

- ▶ SchülerInnen haben die Möglichkeit, im Netzwerk Teilchenwelt eine Forschungsarbeit (BeLL, Jugend forscht o.ä.) zu schreiben
- ▶ Eigenständig arbeiten und forschen
- ▶ ATLAS Open Data:
  - ▶ Daten & Beispielalgorithmen
  - ▶ Seit 2020: 10 x mehr Daten bei 13 TeV
- ▶ Noch mehr im atlas outreach [github](#)





# Gibt es Fragen?

?

?

?

?

?

**Danke für eure Aufmerksamkeit,  
und hier ein Keks für euch**

