

# Basiskonzepte der Teilchenphysik Wechselwirkungen, Ladungen, Teilchen 2

Michael Kobel

Netzwerk Teilchenwelt, TU Dresden

CERN, 21.+22.03.2016

**Herzlich willkommen!**



NETZWERK  
TEILCHENWELT



8:30 – 10:00 Uhr

Felder, Boten, Darstellen von Wechselwirkungen

Teilchen-Multipletts | Ordnungsschema

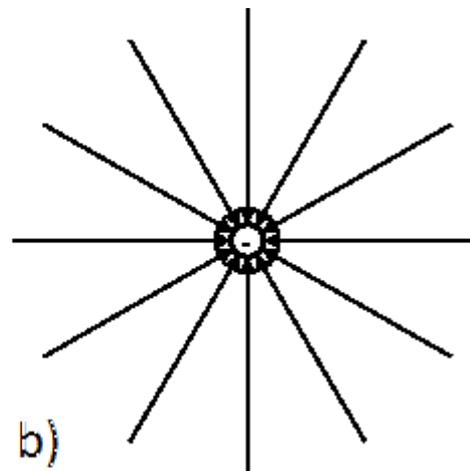
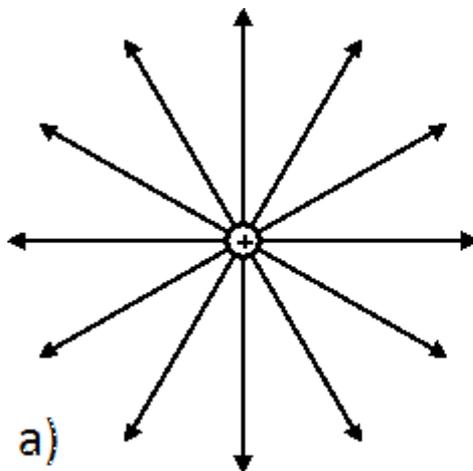
# Fachvortrag 2

# Darstellen von Wechselwirkungen

## ► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite  
hier: elektromagnetische Wechselwirkung

$$F = Q \cdot E$$

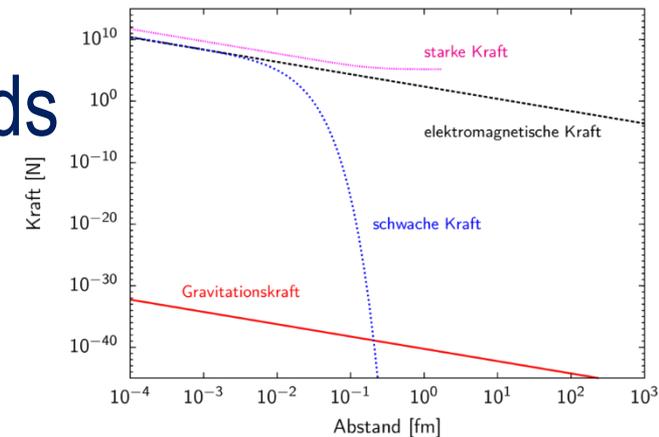
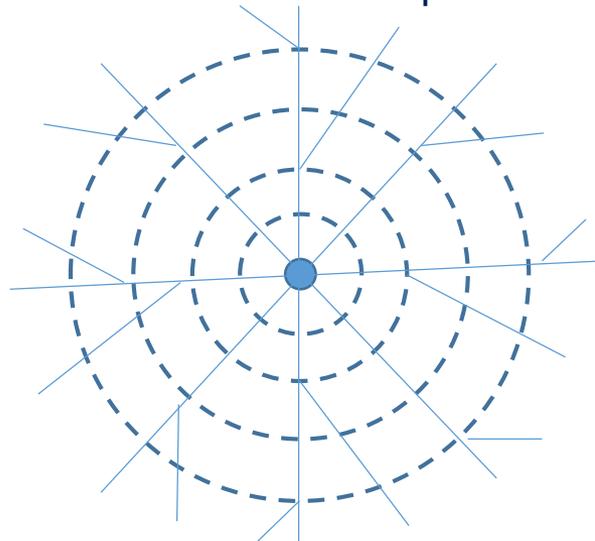


$$A = 4\pi r^2$$


$$F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$$

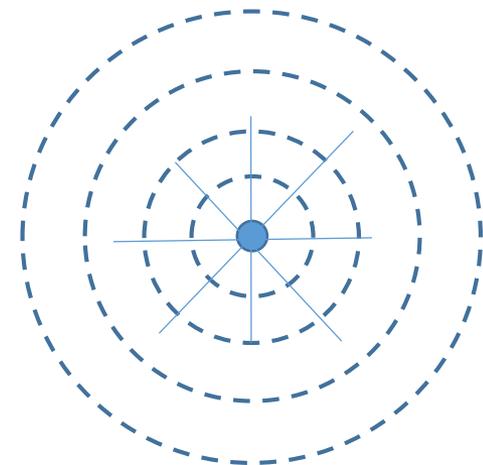
# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

- ▶ Ungewöhnliche Feldlinien für WW, deren Kräfte zunächst  $F \sim 1/r^2$  folgen, dann aber abweichen:
- ▶ 1: stark
  - Kraft  $\rightarrow$  Feldliniendichte wird konstant
  - Feldlinien entstehen spontan



## 2: schwach

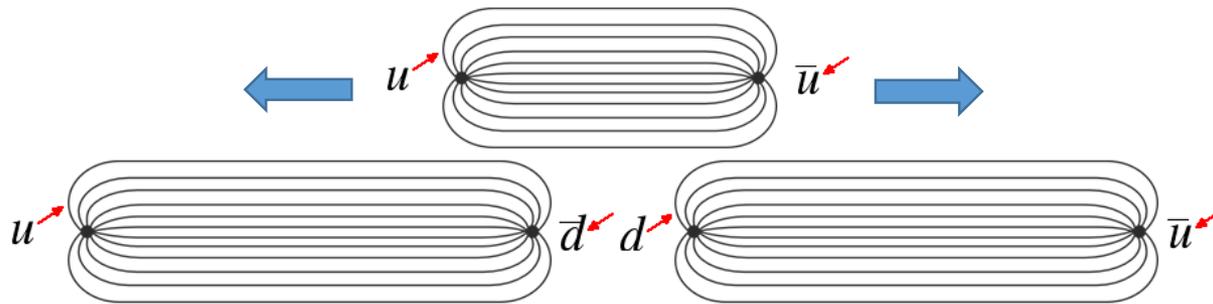
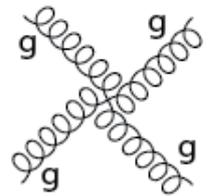
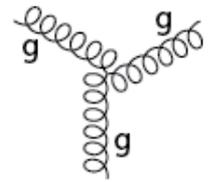
Kraft strebt rasch gegen Null  
Feldlinien enden „im Nichts“



# Lösung 1: stark geladene Botenteilchen

## ► Starke WW: Feldquanten Gluonen

- **Tragen selbst die starke Ladung**  
(während z.B.  $q(\text{Photon}) = 0$ )
- Gluonen können daher selber Gluonen abstrahlen  
(im Gegensatz zu Photonen)  
→ Feldliniendichte bleibt konstant
- Masselos → prinzipiell unendliche Reichweite, aber
  - Selbstwechselwirkung → „Schlauchbildung“ der Feldlinien ( $F = \text{const}$ )
  - → Quark-Paarerzeugung → Confinement



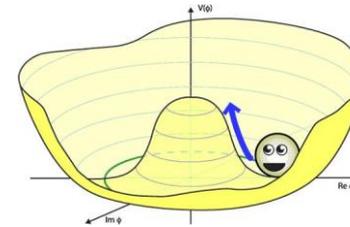
# Lösung 2: Massive Botenteilchen

## ► Schwache WW: Feldquanten „Weakonen“ (W und Z-Teilchen)

- Abschirmung „schwacher Felder“ durch BEHiggs-Hintergrundfeld  $v$   
= unendlicher See schwacher Ladung

- Abschirmendes Feld:

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$



- Anregung = Higgs-Boson

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v+H \end{pmatrix}$$



- Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien durch  $v$
- Quantenmechanik: Masse  $\leftrightarrow$  Endliche Reichweite von W und Z
  - SM: Kopplung mit  $\alpha_W$  an schwache Ladung von  $v$  ergibt Masse von W und Z  
(vorhersagbar:  $m_W c^2 = 80,37 \text{ GeV}$ ; Messung:  $80,40 \text{ GeV}$  (Präzision < Promill !))

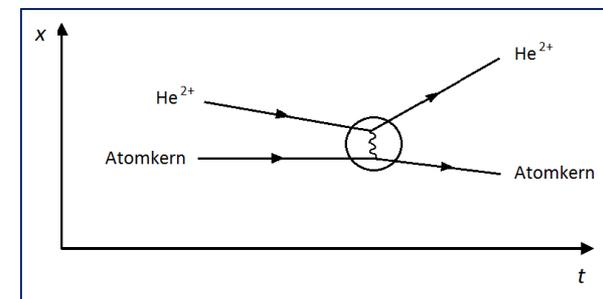
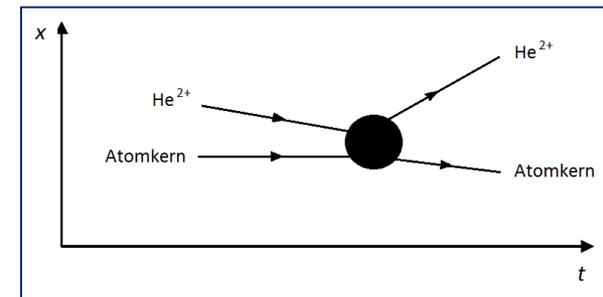
# Übergang Feldlinien $\rightarrow$ Botenteilchen

## ► Makroskopisch:

- Feldliniendichte  $\rightarrow$  Feldstärke  $\rightarrow$  Kraft in ausgedehnten Feldern
- klassische Bahnen berechenbar

## ► Mikroskopisch:

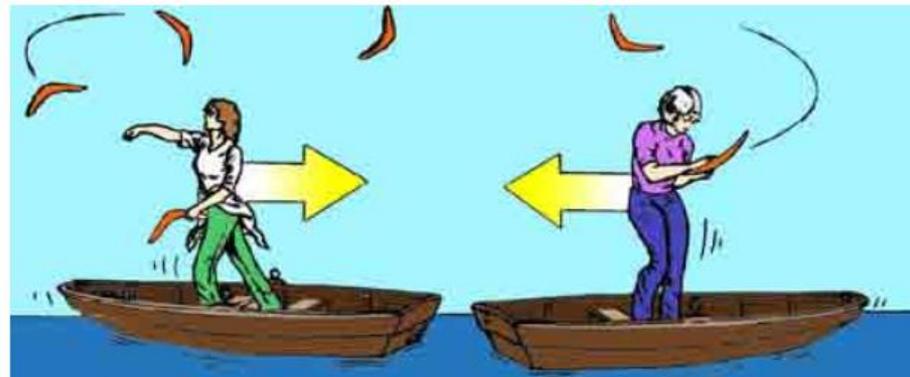
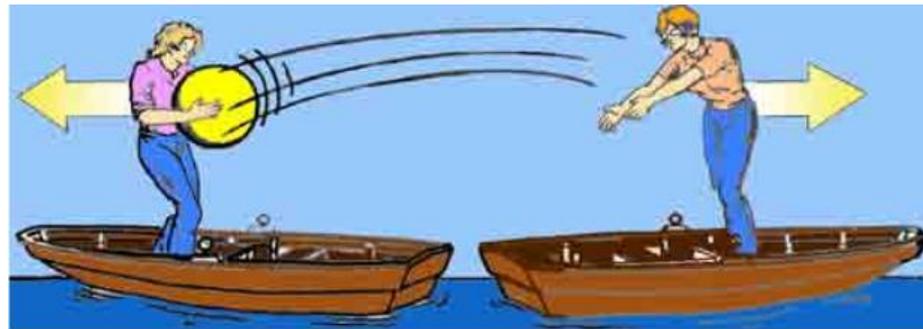
- Wechselwirkung ohne Bahnbegriff (z.B. Streuung: Unbestimmtheit von Ort u. Zeit)
- Messbar sind nur (für jedes Teilchen)
  - Energie  $E$  und Impuls  $\vec{p}$  **vorher**
  - Energie  $E$  und Impuls  $\vec{p}$  **nachher**
  - Energiedifferenz  $\Delta E$  und Impulsdifferenz  $\Delta \vec{p}$  wird durch Botenteilchen übertragen



# Darstellen von Wechselwirkungen

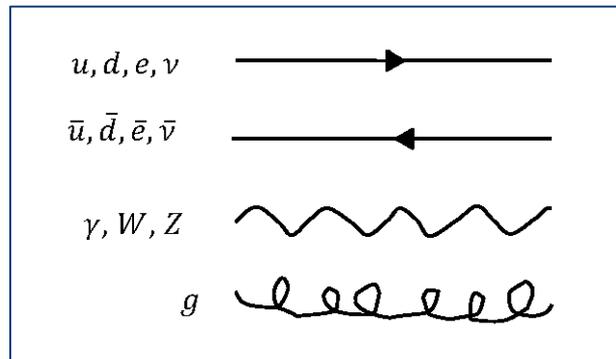
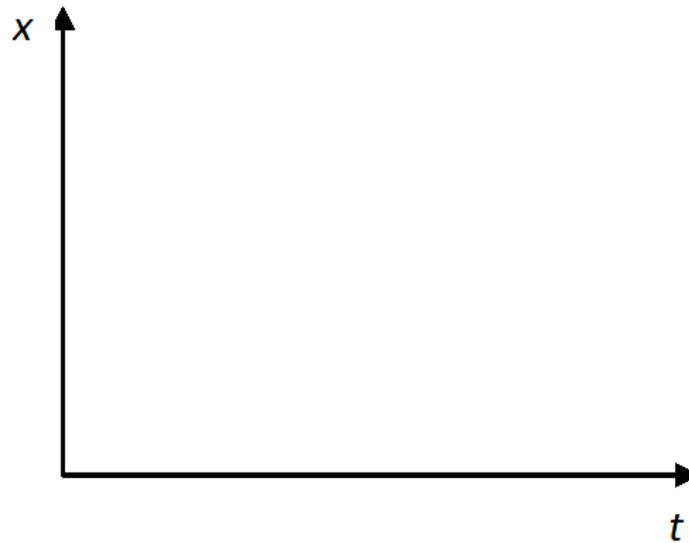
## ► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

Anstelle der Feldlinien kann die elektromagnetische Wechselwirkung auch durch den Austausch eines Botenteilchens (hier: Photon) beschrieben werden



# Feynman-Diagramme

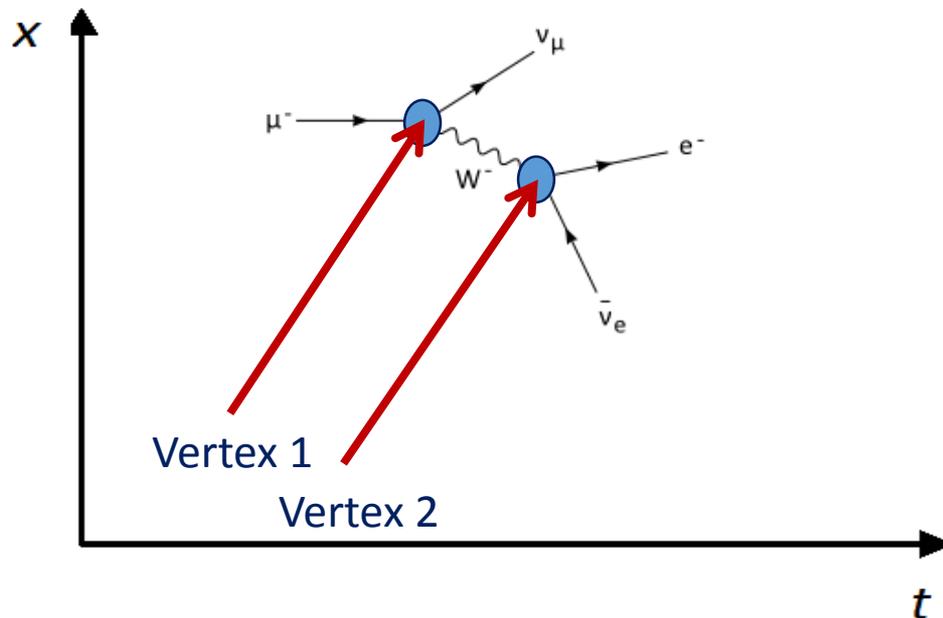
► Aufbau



# Feynman-Diagramme

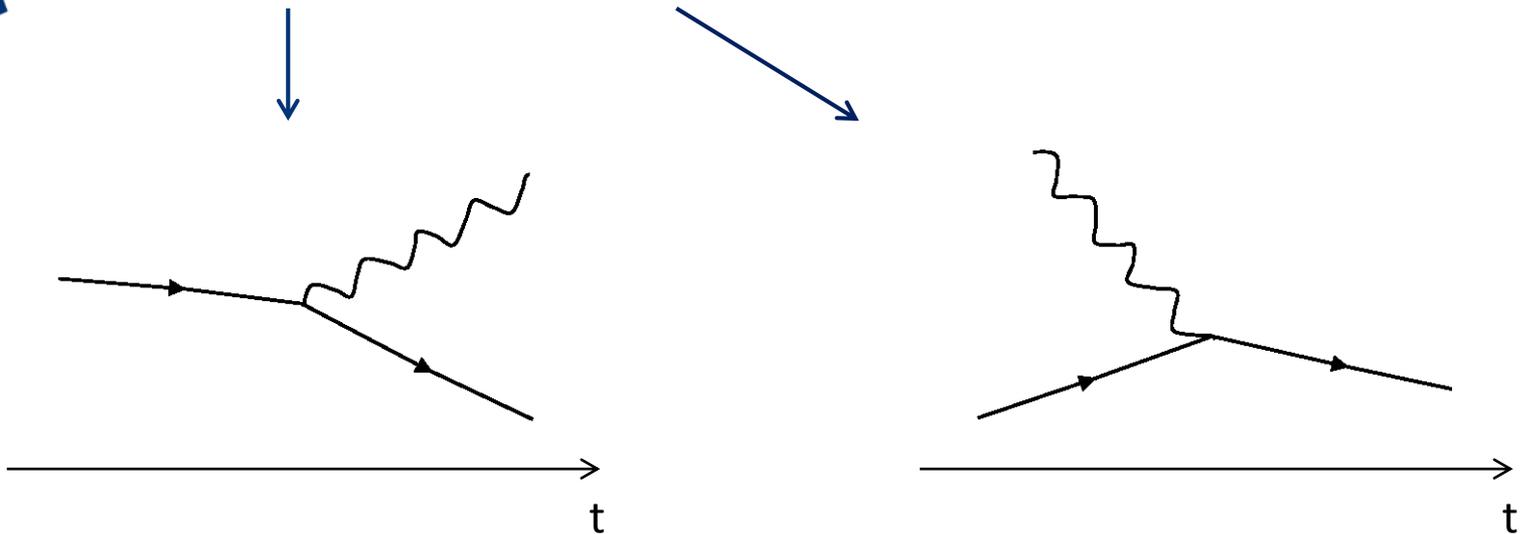
## ► Begriffsklärung:

- Vertex / Vertices (plural)
- Wechselwirkung wird dadurch dargestellt, dass Teilchen emittiert, absorbiert, vernichtet oder erzeugt werden (an einem „bestimmtem Ort“, zur einer „bestimmten Zeit“)
- **Achtung!** nur bei grafischer Darstellung im Orts-Zeit-Diagramm. In Realität: quantenmechanische Unschärfe!



# Grundbausteine 1/2

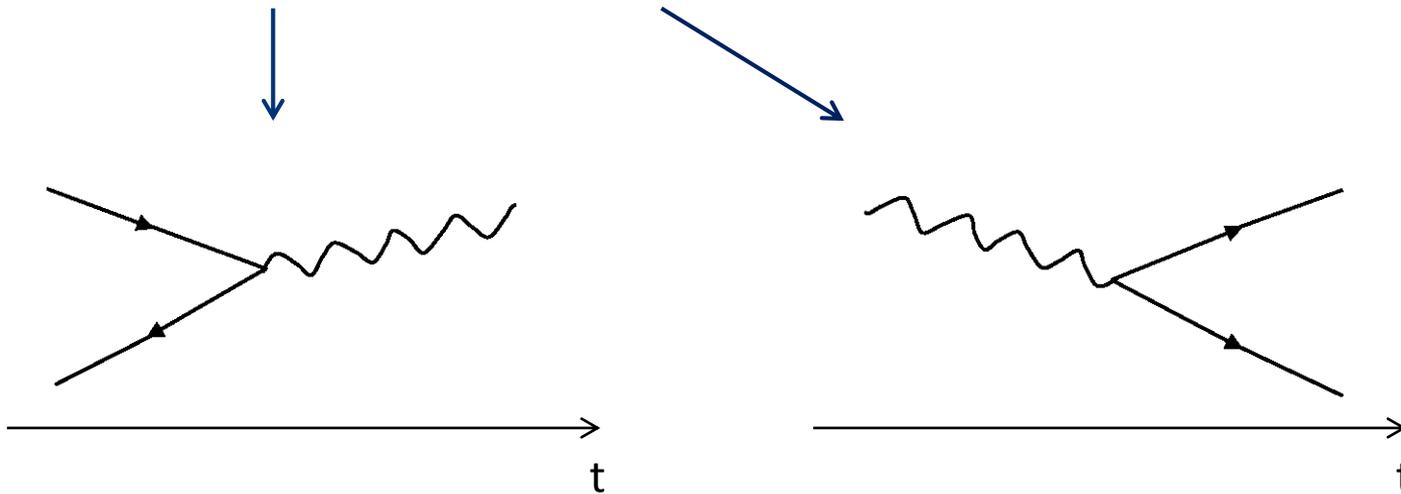
## ► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



- -> Kraftwirkungen (geht auch mit Feldlinien)
- -> Teilchenumwandlungen (geht **nicht** mit Feldlinien)

## Grundbausteine 2/2

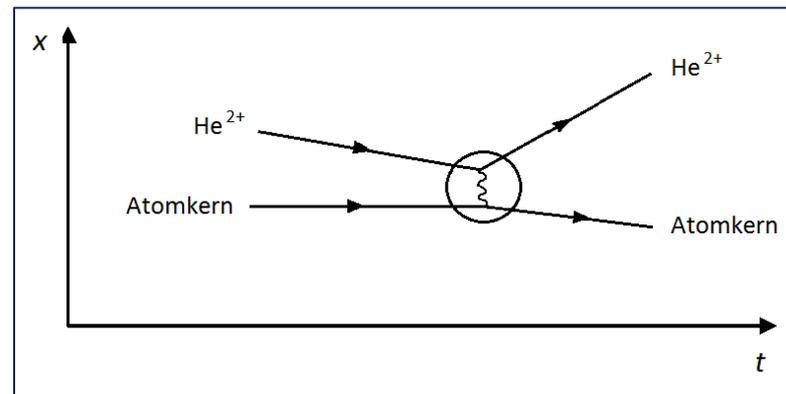
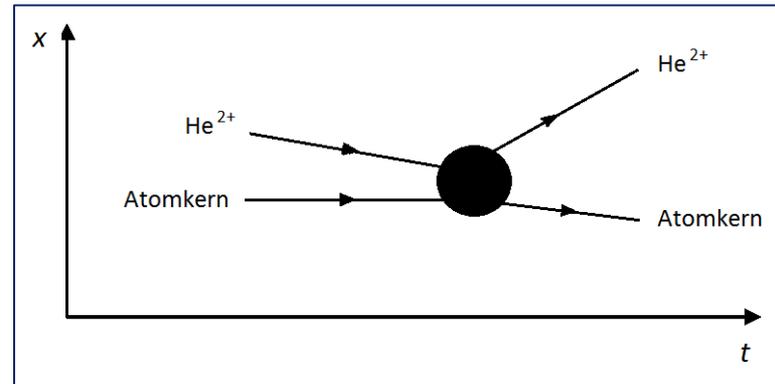
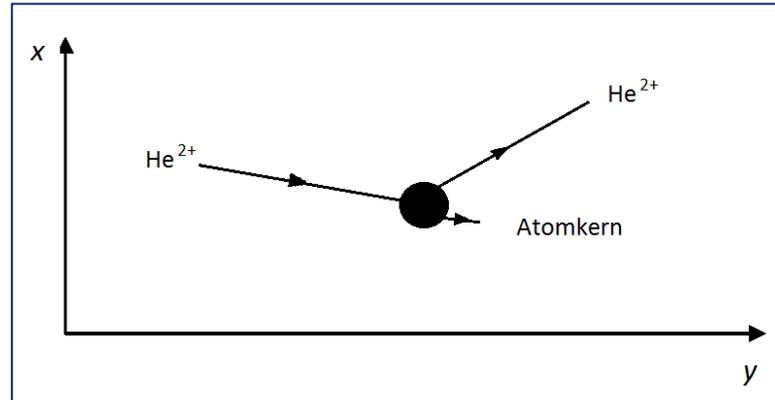
### ► Paarvernichtung und Paarerzeugung



- Geht beides **nicht** mit Feldlinien

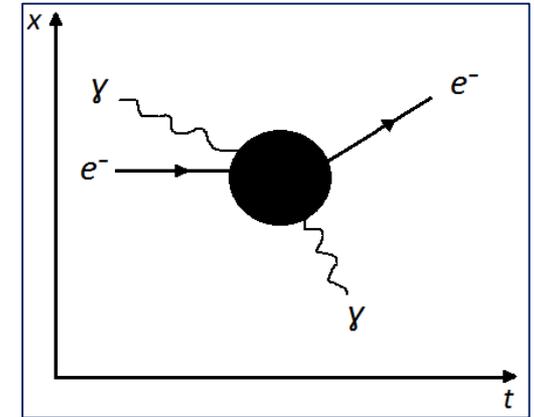
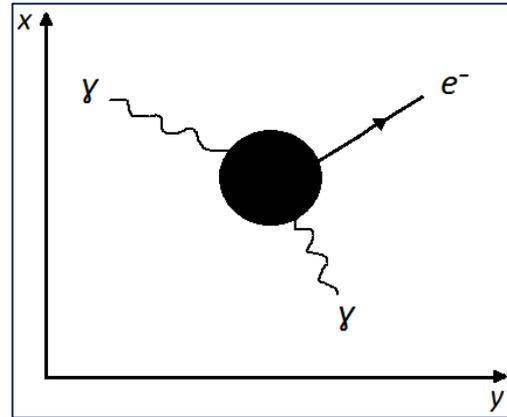
# Prozesse

## ► Rutherford-Streuung

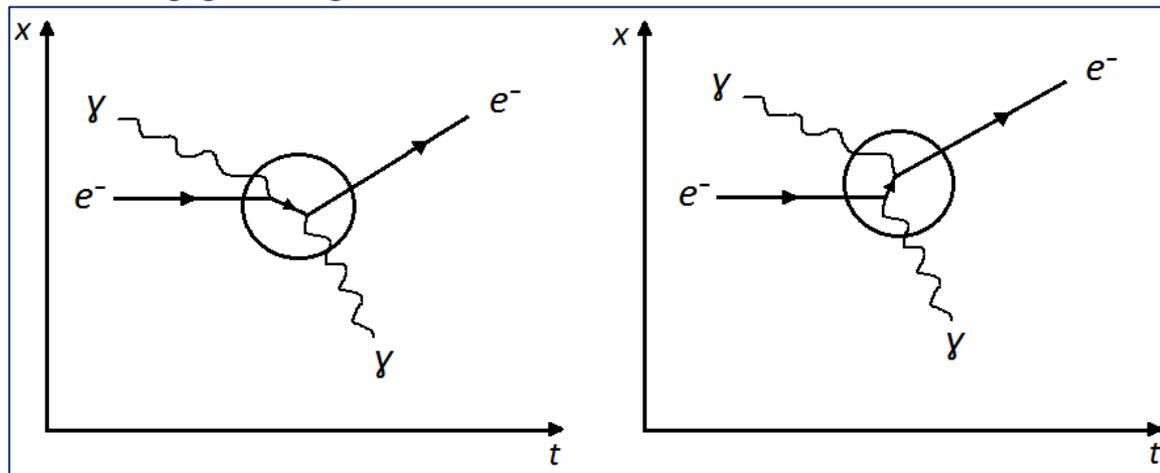


# Prozesse

## ► Compton-Streuung

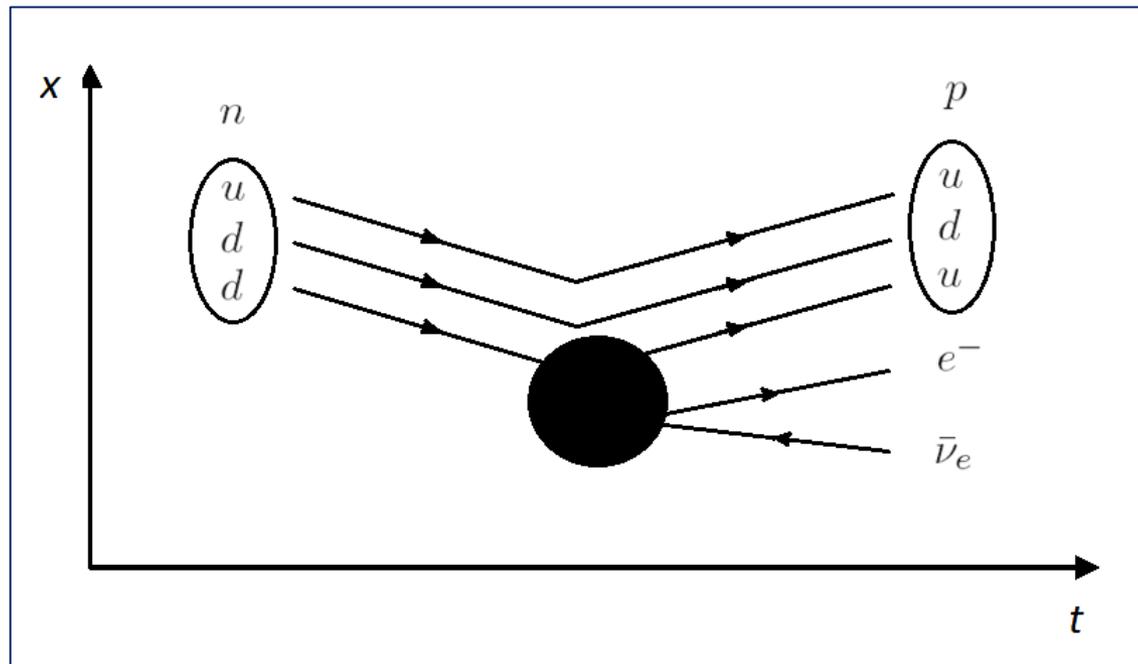


- 2 unabhängige Diagramme, müssen „addiert“ werden



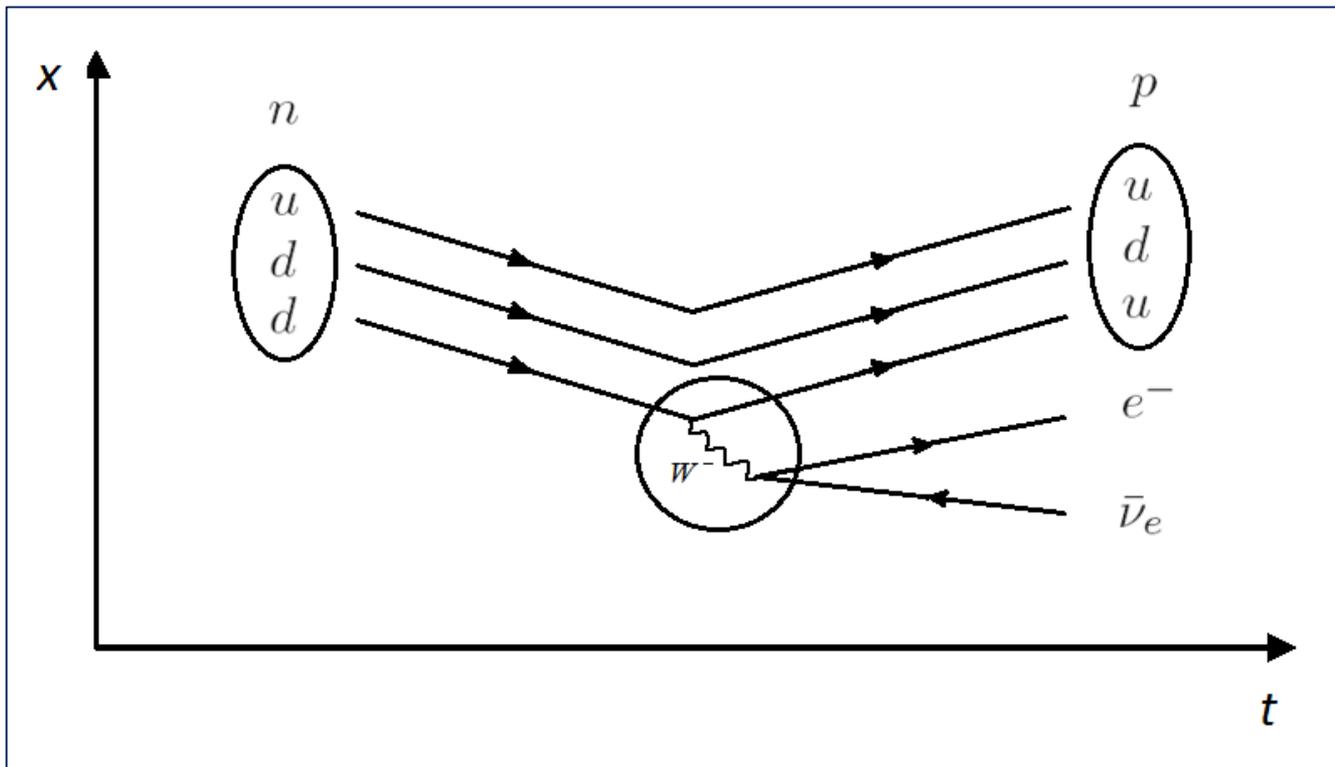
# Prozesse

## ► $\beta^-$ -Umwandlung



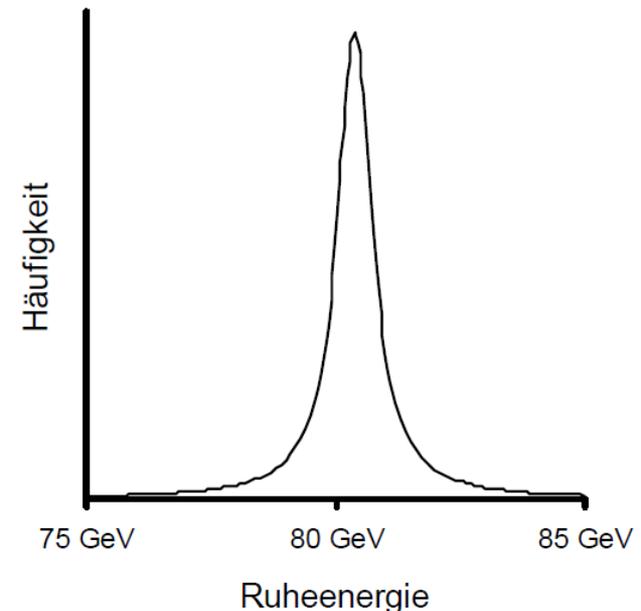
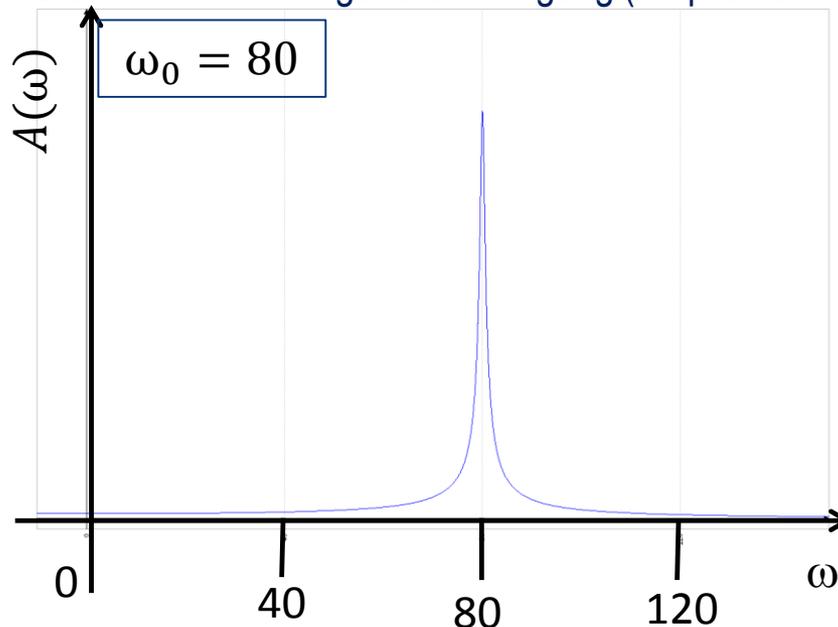
# Prozesse

- ▶  $\beta^-$ -Umwandlung + Diskussion „virtuelle Teilchen“



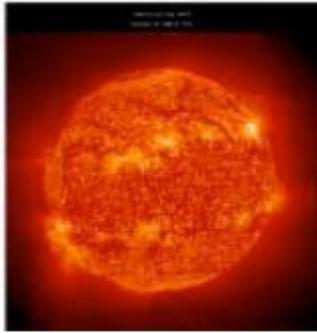
# Virtuelle Teilchen

- ▶ Definition Virtuelle Teilchen:= Innere Linien von Feynmandiagrammen
  - Massendifferenz  $\beta^-$ -Umwandlung:  $\Delta E/c^2 = m_n - m_p = 1,3 \text{ MeV}/c^2$
  - Aber: Masse(W-Boson) =  $80400 \text{ MeV}/c^2 \gg 1,3 \text{ MeV}/c^2$  ??
- ▶ Lösung:
  - Virtuelle Teilchen erfüllen Energie- und Impulserhaltung an Vertices
  - Damit ist der Wert ihrer Masse „von außen“ aufgezwungen
  - Analogie: erzwungene Schwingung (Frequenz von außen festgelegt)
- ▶ Grafik links: erzwungene Schwingung (Amplitude  $A$  in Abhängigkeit von Anregungsfrequenz  $\omega$ )



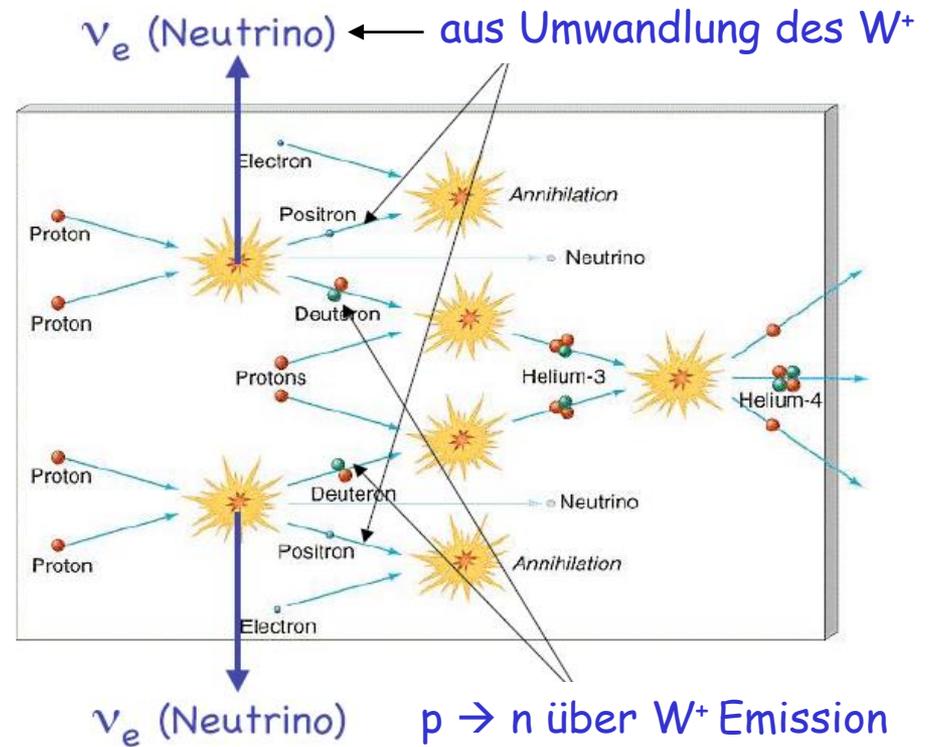
# langsameres Brennen der Sonne

- ▶  $p + p \rightarrow D + e^+ + n$  (Energiegewinn:  $\Delta E = 0,9 \text{ MeV}$ )
- ▶ Massenenergie des Zwischenzustands  $m_W c^2 = 80400 \text{ MeV}$
- ▶ Rate unterdrückt um  $\sim (\Delta E / m_W c^2)^4 > 10^{-20}$



- Bei kleinerem  $m_W$  wäre die Sonne längst ausgebrannt !

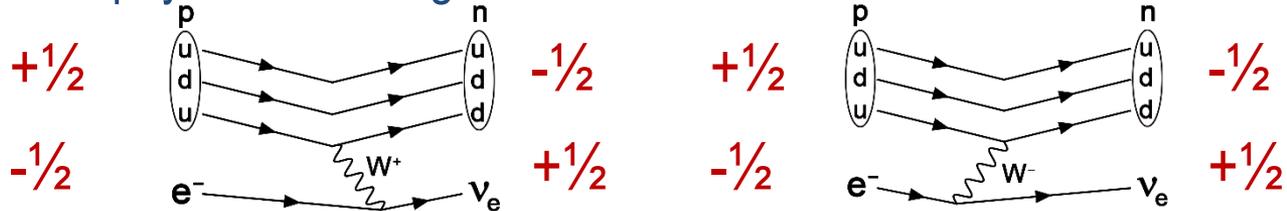
[www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn-die-teilchenmassen-und-das-universum](http://www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn-die-teilchenmassen-und-das-universum)



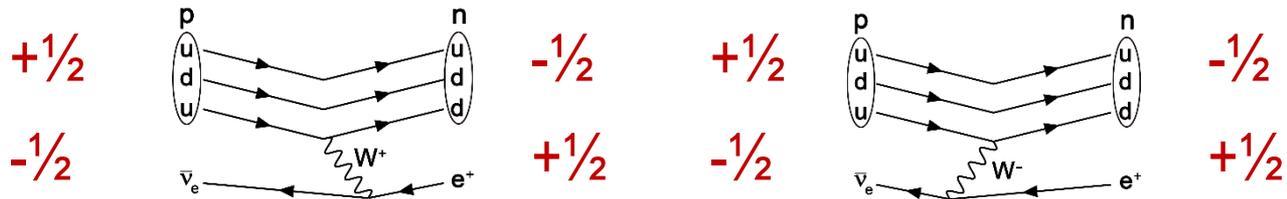
# Ladungserhaltung (z.B. schwache Ladung I)

Alle möglichen Prozesse durch „Umklappen“ von Linien:

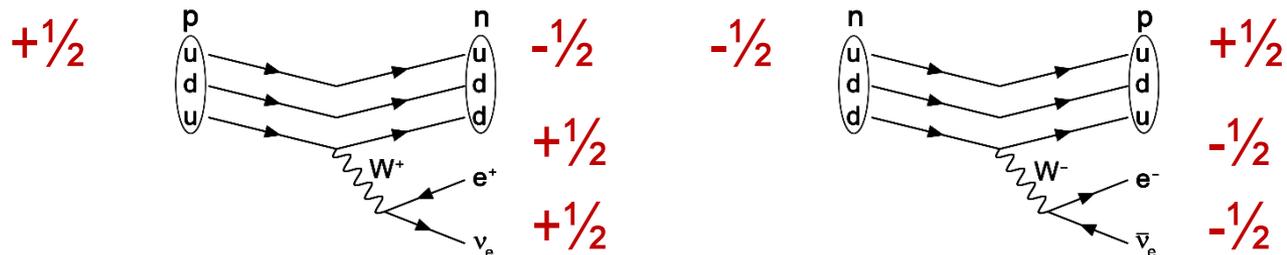
- Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953



- $\beta^+$  und  $\beta^-$  - Umwandlungen von Kernen



Die Erhaltung der schwachen Ladung erfordert Neutrinos!  
 (experimenteller Hinweis: fehlender Impuls und Energie)

# Zusammenfassung: Feynman-Diagramme

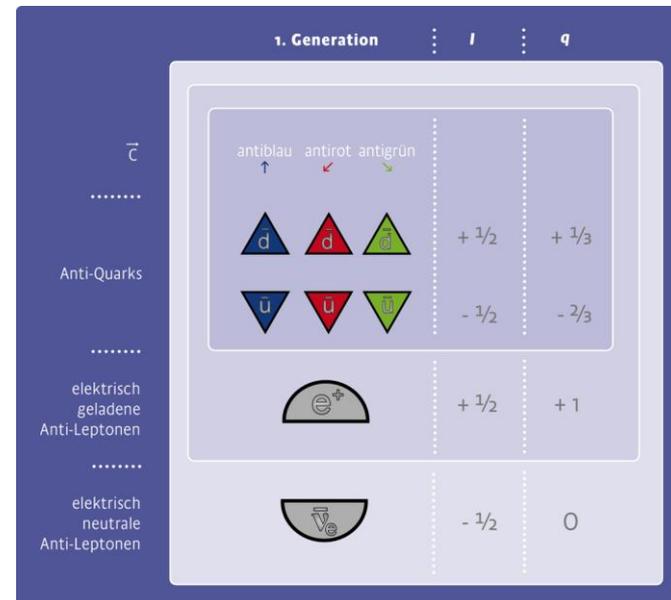
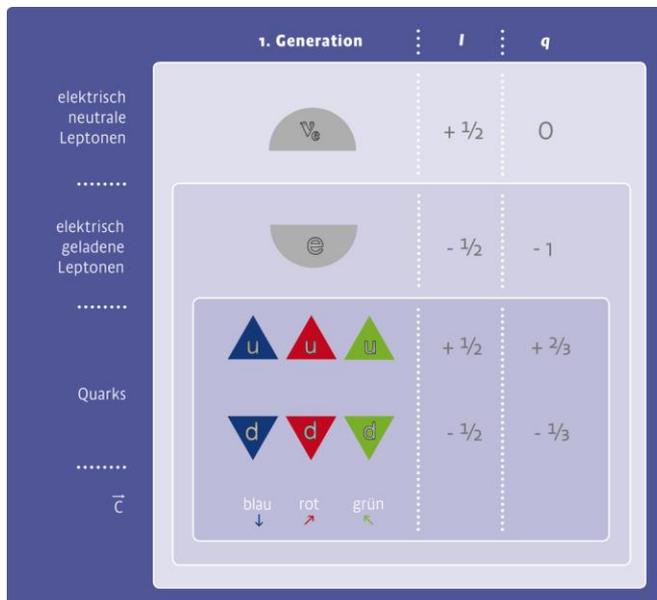
- ▶ Wechselwirkungen werden in der Teilchenphysik durch den Austausch von Botenteilchen beschrieben
- ▶ Wechselwirkungen werden mittels Feynman-Diagrammen dargestellt
  - Diese können auch zur quantitativen Berechnung dienen
- ▶ Eine Vorstufe der Feynman-Diagramme ist das x-y-Diagramm
- ▶ Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)
  - In Realität gilt natürlich quantenmech. Unbestimmtheit von (Ort, Zeit)
- ▶ Wechselwirkungen werden durch Vertices symbolisiert, an denen Teilchen emittiert, absorbiert, erzeugt oder vernichtet werden

# Basiskonzept Elementarteilchen

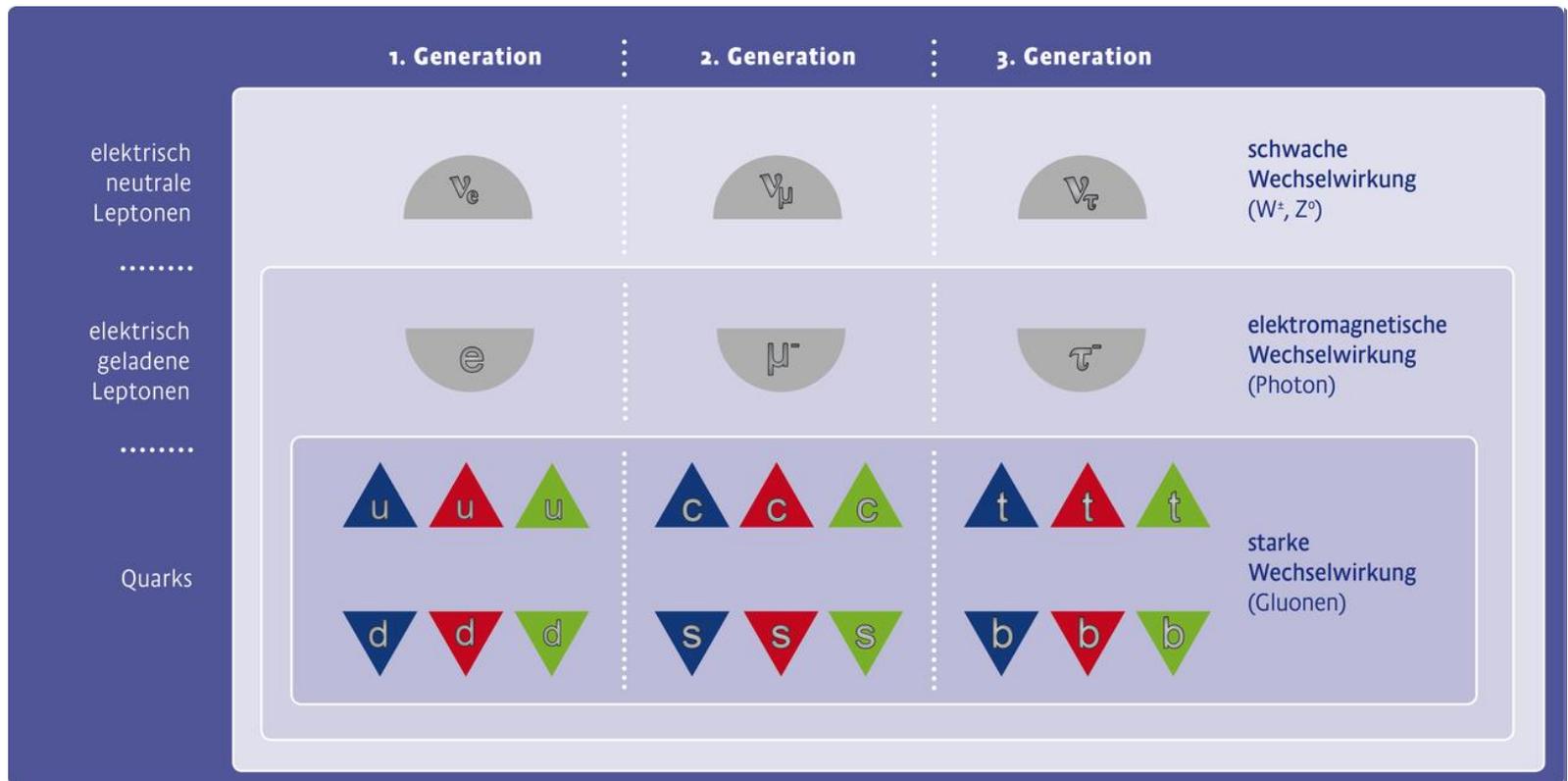
- ▶ Uns umgebende Materie besteht aus Up- und Down-Quarks, Elektronen und Elektron-Neutrinos
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons
  - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron
  - 200 Mal schwerer als das Elektron
  - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons

# Ordnung der Elementarteilchen

- ▶ Entdeckung weiterer Teilchen
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
  - Von jedem der leichten Materieteilchen ( $u, d, e^-, \nu_e$ ) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.
- ▶ Wie lassen sich Teilchen ordnen?



# Anordnung von Teilchen in Generationen



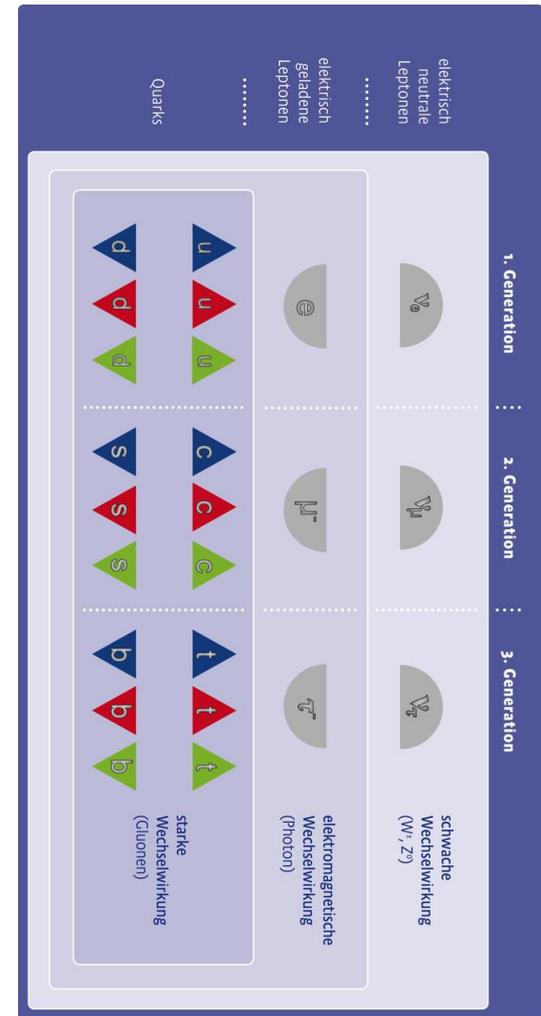
# Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

- ▶ Analogie zum Periodensystem der Elemente (PSE) in der Chemie
- ▶ Drehen der Abbildung um  $90^\circ$  im Uhrzeigersinn
  - Teilchen sind nach Ladungen geordnet analog den chemischen Elementen in die Hauptgruppen
  - Im PSE sind die chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten nach ihrer Masse aufsteigen geordnet
  - Analog dazu sind auch die Elementarteilchen in den um  $90^\circ$  gedrehten Darstellungen bezüglich der drei Generationen aufsteigend von oben nach unten nach ihrer Masse geordnet

# Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

1A																	8A
1																	2
H																	He
2A	3A											4A	5A	6A	7A	8A	
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Lv	Uus	Uuo
* lanthaniden		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
** actiniden		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

- ▶ Gleiche Ladungen <-> Gleiche Eigenschaften ("Lepton Universalität")
- ▶ Welche Plätze gefüllt sind, ist nicht vorhergesagt → Experiment !
- ▶ Muster wiederholt sich 2x für größere Massen (Grund unbekannt!)

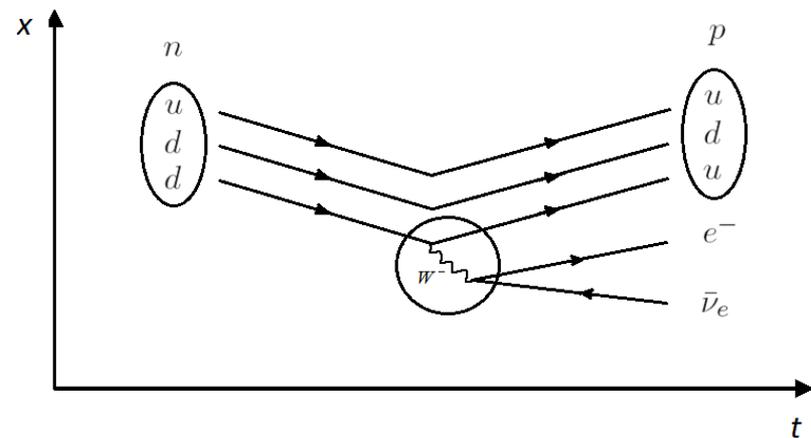


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

- Nur bestimmte Paare von Teilchen beteiligt
- Unterscheiden sich in schwacher Ladungszahl  $I$  und in elektrischer Ladungszahl  $q$  immer genau um Betrag 1
- Dupletts der schwachen Wechselwirkung

►  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} I = +1/2 & q = +2/3 \\ I = -1/2 & q = -1/3 \end{matrix}$



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

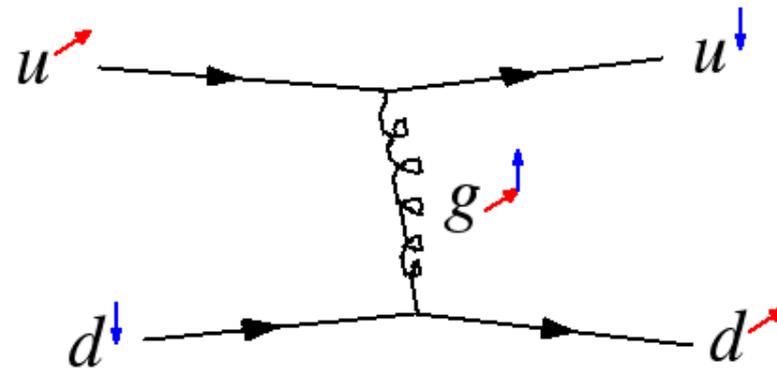
- Drei Quarks mit Farbladungsvektoren  $\rightarrow$ ,  $\leftarrow$ , oder  $\downarrow$   
Up-Quarks haben alle schwache Ladungszahl  $I = +\frac{1}{2}$ ,  
Down-Quarks haben alle schwache Ladungszahl  $I = -\frac{1}{2}$
- $\begin{pmatrix} u \rightarrow \\ d \rightarrow \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} u \leftarrow \\ d \leftarrow \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} u \downarrow \\ d \downarrow \end{pmatrix}$

# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Starke Wechselwirkung

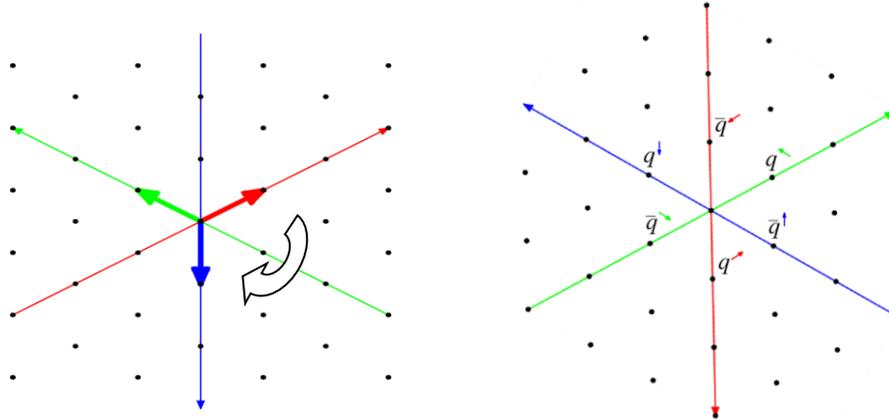
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:  
Quarks bilden Triplets bezüglich der starken Ladung

►  $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

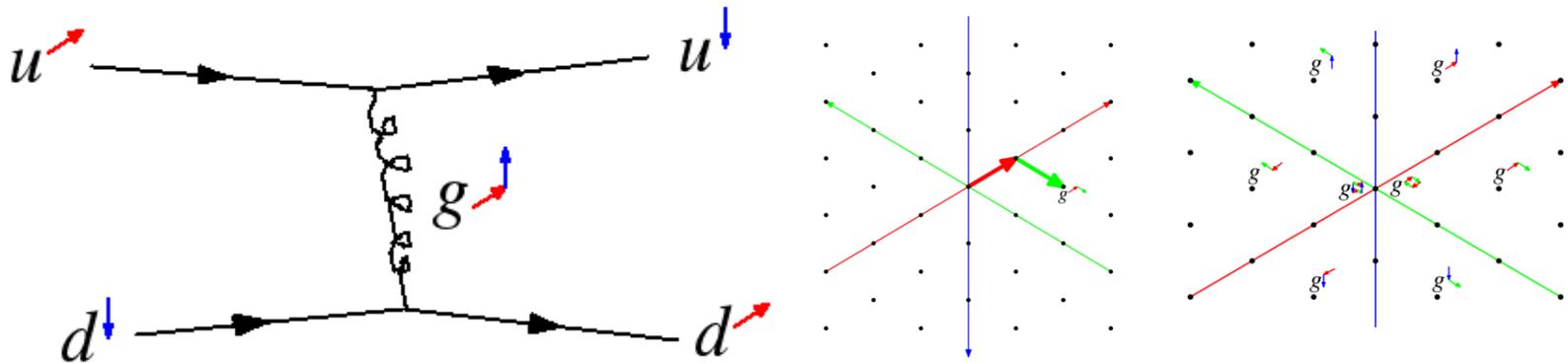


# Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

- ▶ Eine Rotation ( $\sim$ Eichsymmetrie) eines Quark-Multipletts



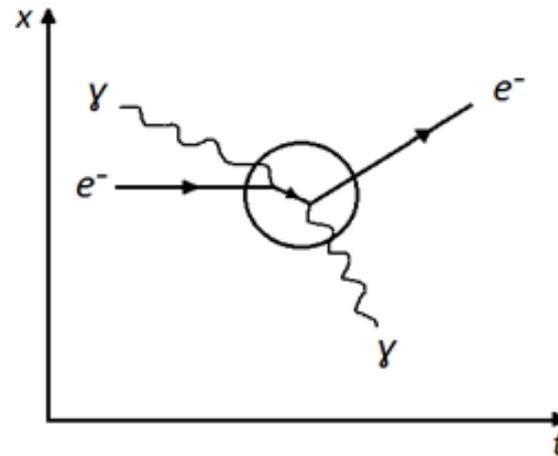
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

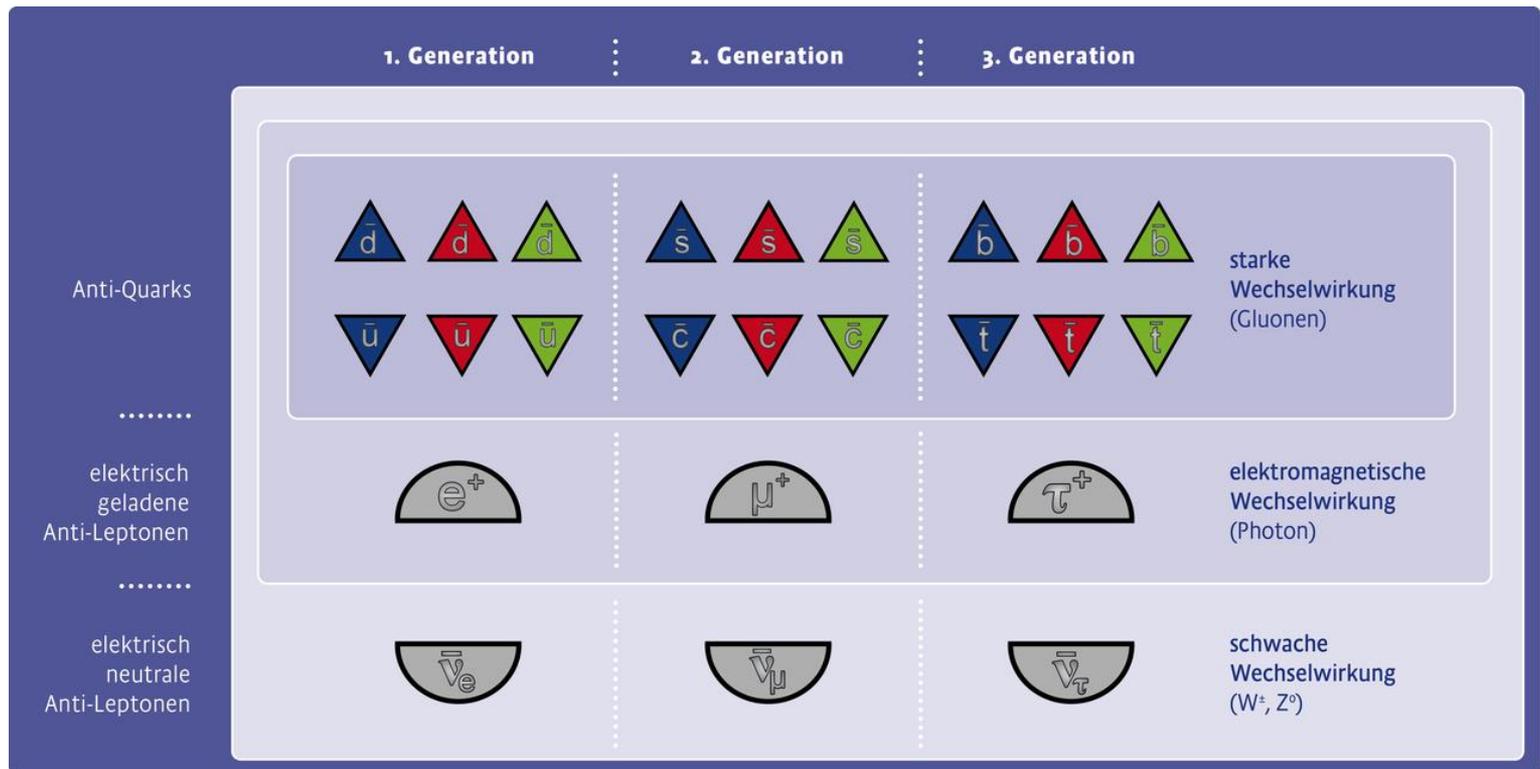
## ▶ Elektromagnetische Wechselwirkung

- Photonen tragen keine Ladungen:  
durch elektromagnetische Wechselwirkung  
können die Ladungen eines Teilchens nicht geändert werden
- Alle Teilchen sind Singulets bezüglich der elektrischen Ladung



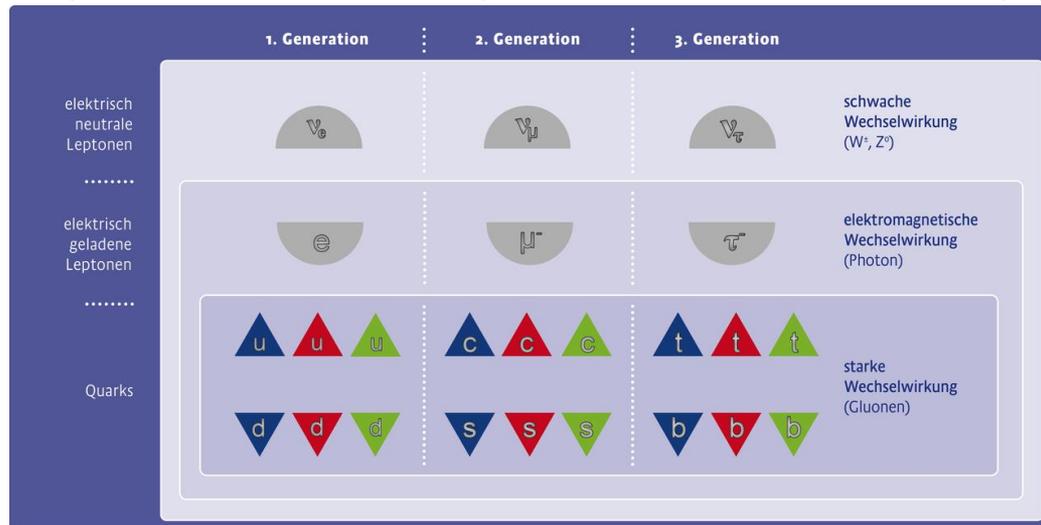
# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

- ▶ Zu jedem Teilchen gibt es ein zugehöriges Teilchen, mit gleicher Masse jedoch entgegengesetzten Ladungen
- ▶ Anti-Materieteilchen ebenfalls in drei Generationen



# Zusammenfassung: Multipletts

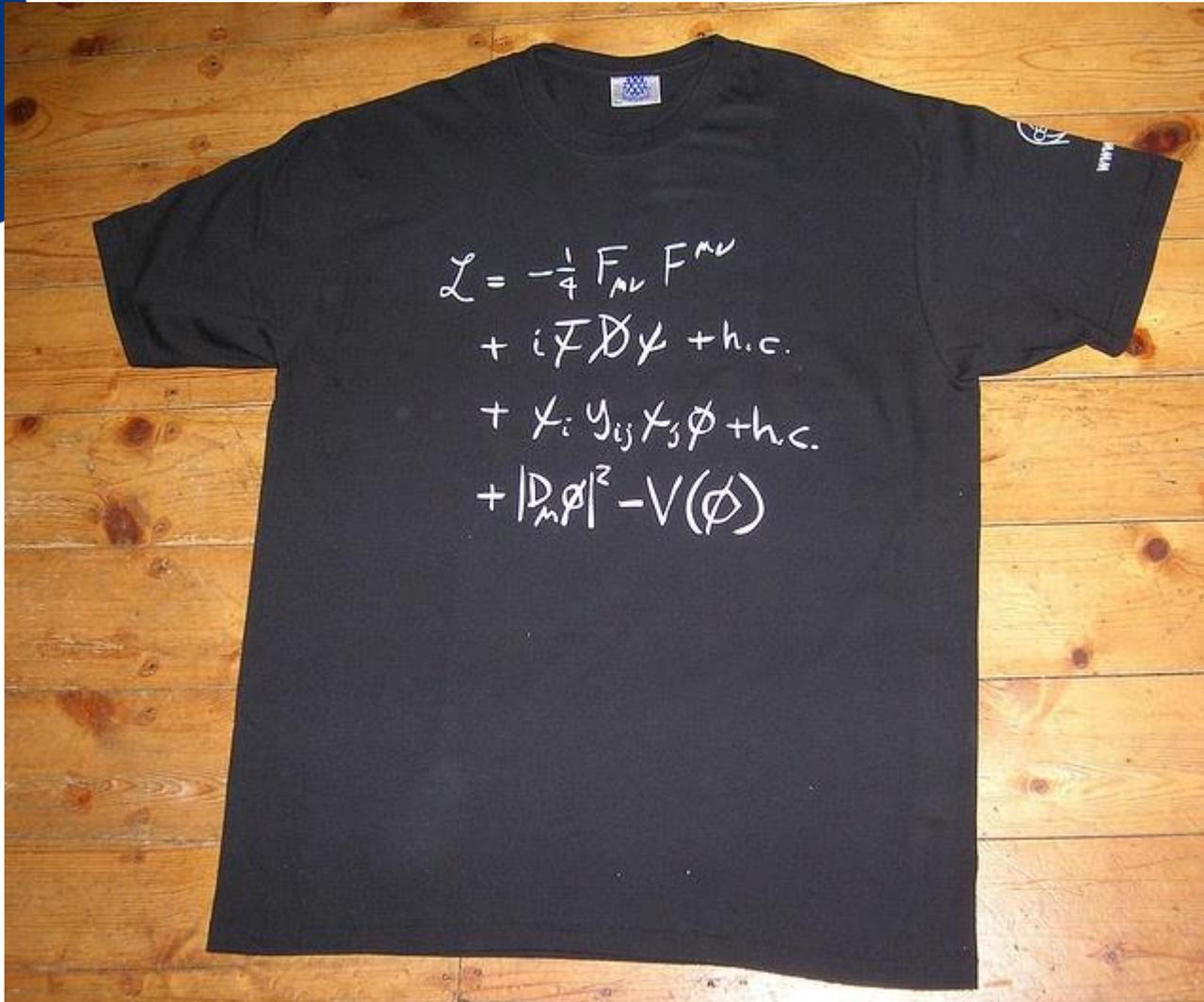
- ▶ Teilchen lassen anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Experimentell findet man
  - Dupletts der schwachen Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
  - Tripletts der starken Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
  - Singulettts der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)



- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich

# Lagrangedichte des Standardmodells = derzeitige „Weltformel“:

- Dies ist eigentlich nur eine in spezieller Form geschriebene Energiedichte !



- auf CERN  
T-shirt, Tasse und  
Mouse Pad



# Bedeutung

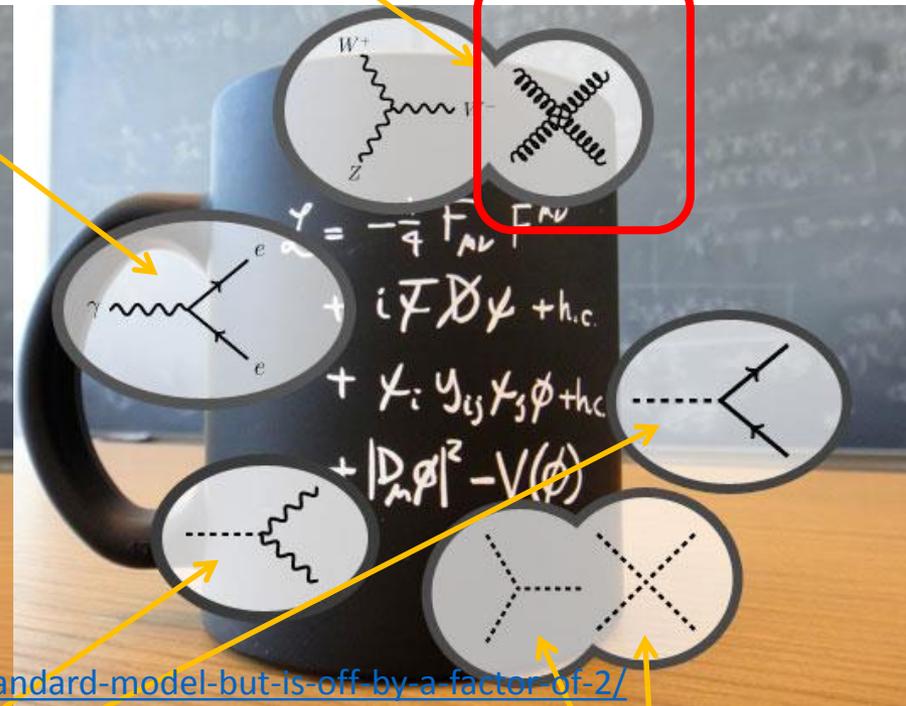
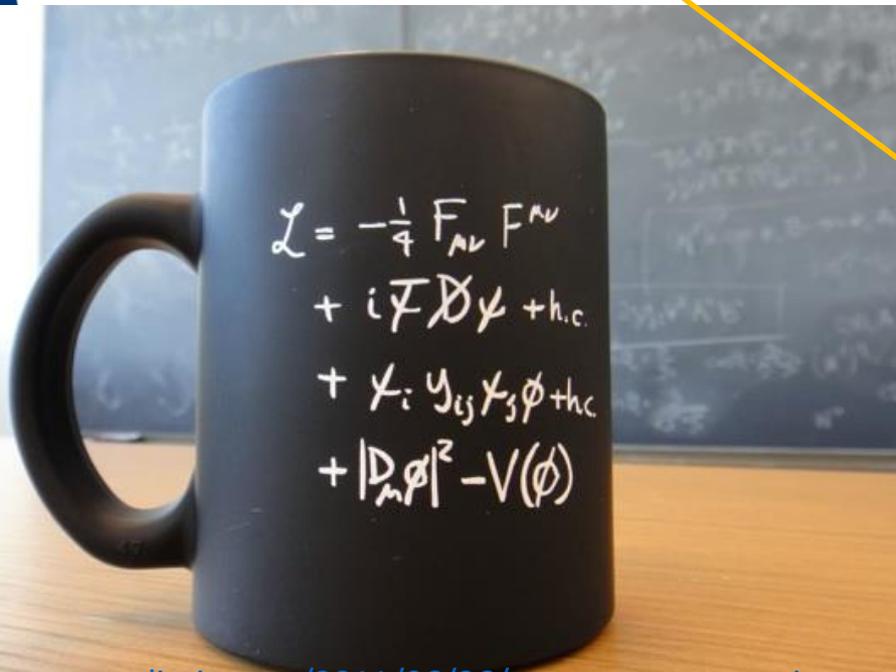
- ▶ Aufstellung der Terme dieser „Weltformel“:
  - Natur verlangt Invarianz unter 3 Symmetrien („lokalen Umeichungen“)
  - Terme, die die Symmetrie nicht erfüllen, sind verboten
  - **Symmetrie lässt sich nur mit Hilfe von Wechselwirkungen erfüllen**  
-> lokale Eichsymmetrie ist „Ursache“ der Wechselwirkungen
- ▶ Erläuterung der Formel:
  - Jedem Term entspricht in dieser Reihenfolge
    - elektromagnetische Wellen und Wechselw. zw. Botenteilchen
    - Wechselwirkung zwischen Baustein- und Botenteilchen
    - Massen der Bausteinteilchen und WW mit BEHiggs-Feld
    - WW der Botenteilchen BEHiggs-Feld und Higgs-Teilchen
  - Alle Prozesse lassen sich mit Hilfe dieser Formel vorhersagen  
(Maxwell-Gleichungen: Licht, Magnetismus, Elektromotor, Radiowellen,  
Kernphysik:  $\alpha, \beta, \gamma$  - Zerfälle, Brennen von Sternen...)

# Von der Lagrangedichte zu den Vertices

Wechselwirkungen zwischen  
**Boten und Bausteinen**  
 -> am Besten verstanden

## Unsere Forschung in Dresden

**Botenteilchen unter sich:**  
 -> emag Wellen, Selbstkopplung

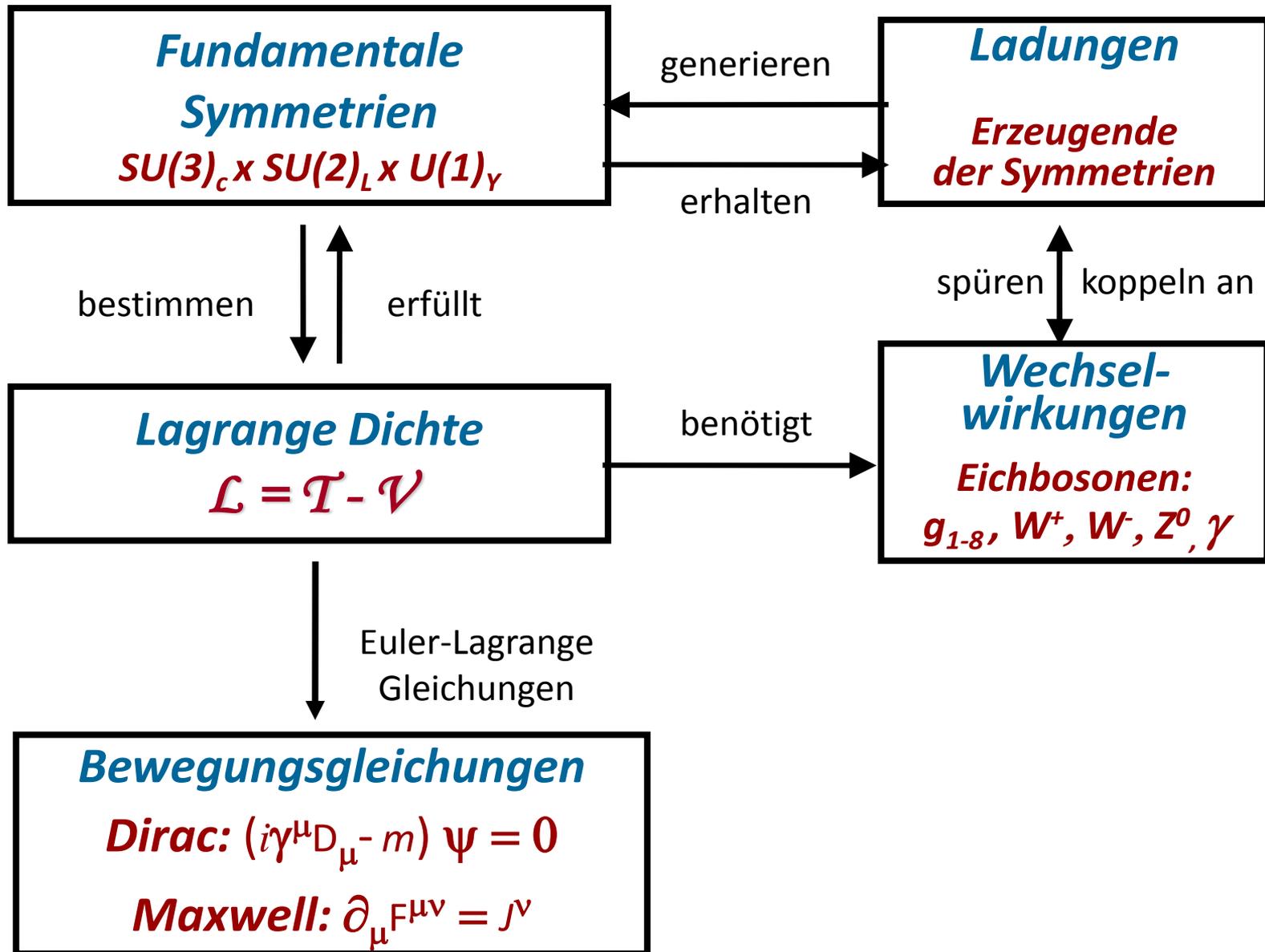


[www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/](http://www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/)

**Higgs mit Bausteinen und Boten**  
 Massen der Bausteine und Botenteilchen  
 Erzeugung und Zerfälle des Higgs Teilchens

**Higgsteilchen unter sich**  
 noch nicht beobachtet  
 -> nächster Beschleuniger

# Das Konzept des Standardmodells



# Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag 2

► Wir freuen uns auf Ihre Mitarbeit



Mittagspause: 11:30 -12:30 Uhr!



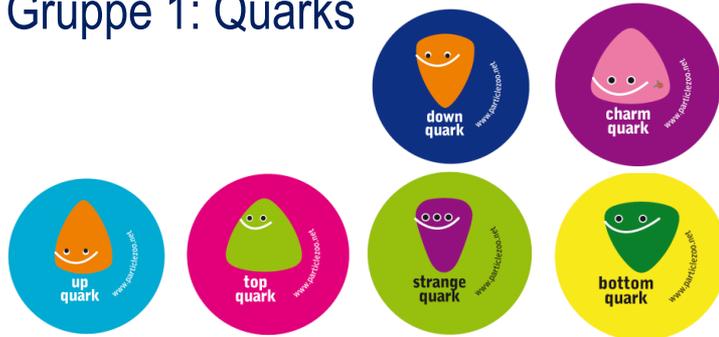
Mi 11:15 – 12:15 Uhr

Unterrichts-Sequenzplanung (in 3 Gruppen)

# Gruppenarbeit

# Gruppeneinteilung

Konzept der Wechselwirkungen  
Gruppe 1: Quarks



Ladungen als Ordnungsprinzip  
Gruppe 3: Neutrinos



Ladungen als Erhaltungsgrößen  
Gruppe 2: Neutrinos und Z-Bosonen



Darstellen von Wechselwirkungen  
Gruppe 4: Higgs und Dark Matter





Fr 11:00 – 12:00 Uhr

Jede Gruppe

# Präsentation der Ergebnisse

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ



STIFTUNG

22.03.2016



NETZWERK  
TEILCHENWELT

41