

# Forschung trifft Schule

## Lehrerfortbildungen zur Teilchenphysik

Philipp Lindenau, Michael Kobel

TU Dresden, Netzwerk Teilchenwelt

GDCP Jahrestagung | Kiel | 17.09.2018



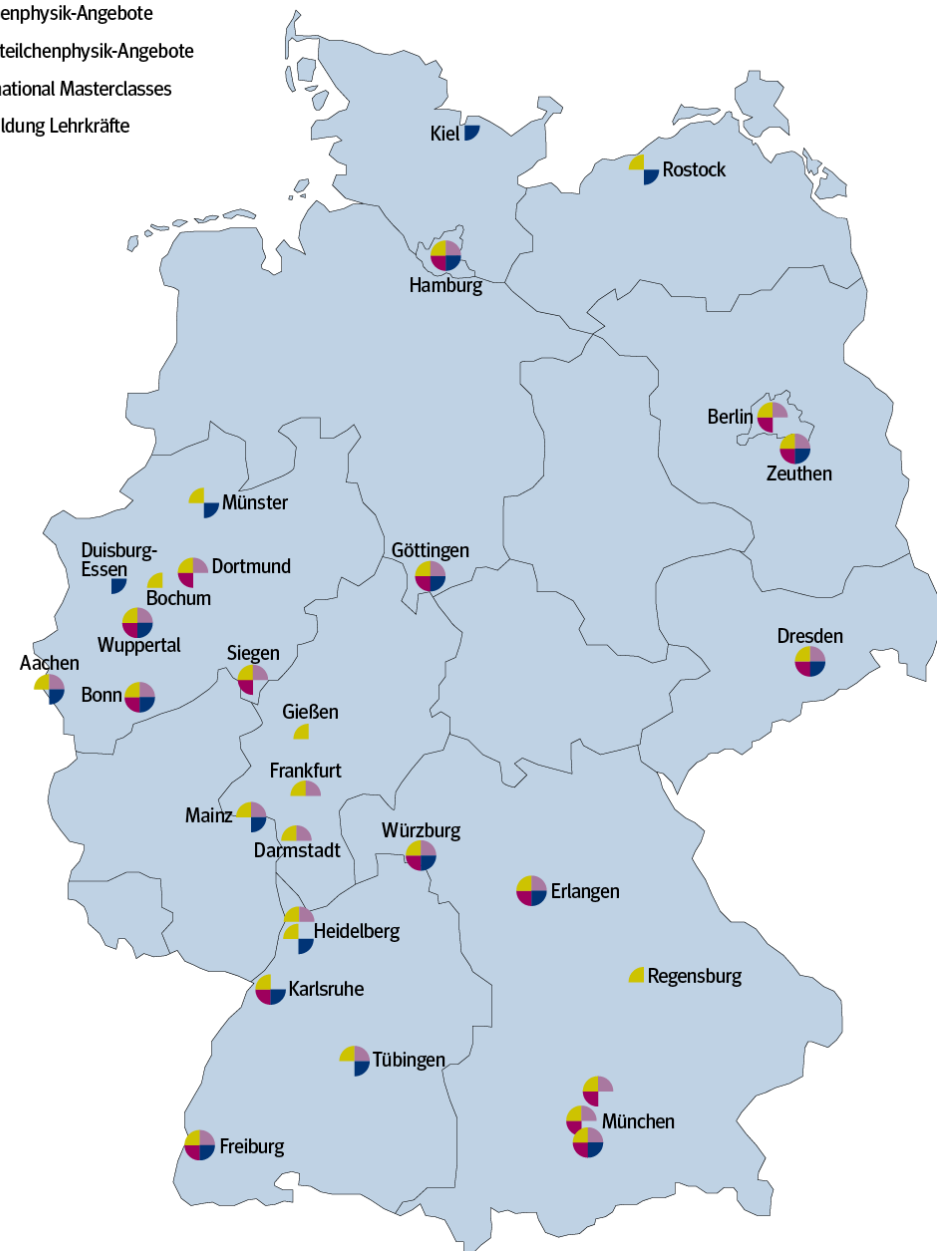
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Netzwerk Teilchenwelt

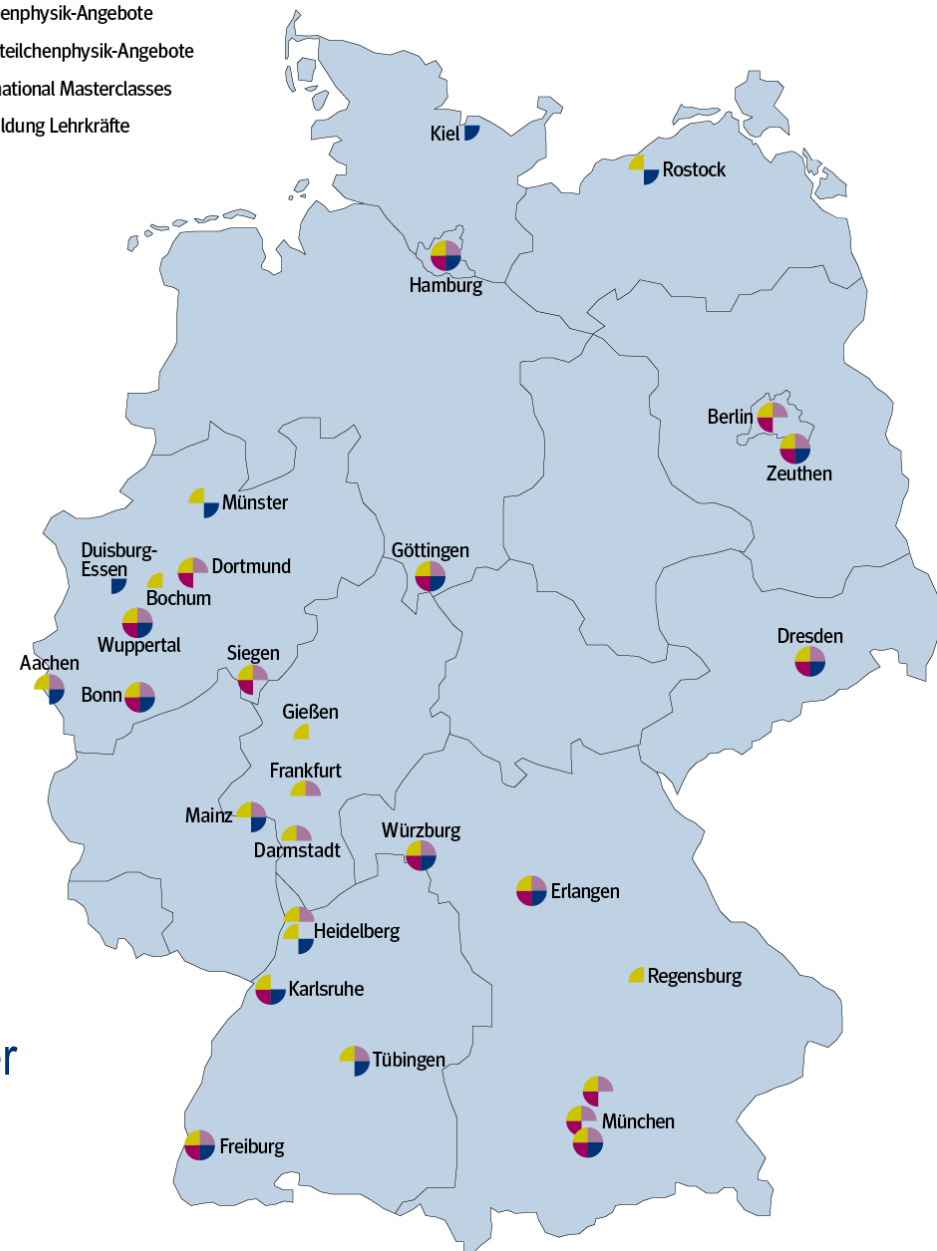
- Teilchenphysik-Angebote
- Astroteilchenphysik-Angebote
- International Masterclasses
- Fortbildung Lehrkräfte



- Teilchenphysik-Angebote
- Astroteilchenphysik-Angebote
- International Masterclasses
- Fortbildung Lehrkräfte

# Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ Netzwerk zwischen
  - Wissenschaftlern
  - Jugendlichen & Studierenden
  - **Lehrkräften**
- ▶ 31 Institute in 12 Bundesländern + CERN
  - Leitung: TU Dresden
  - Seit 2010
  - Seit 02/17 Outreach-Projekt der 4 großen LHC-Experimente





# Netzwerk Teilchenwelt

Kiel

- ▶ Spitzenforschung, Erkenntnisvermittlung und Nachwuchsgewinnung aus einer Hand
- ▶ Projektziele:
  - Faszination von Astro-/Teilchenphysik erleben
  - Forschung vor Ort und im Unterricht
  - Wissenschaft kommunizieren
  - Wertschätzung von Erkenntnisgewinn durch Grundlagenforschung



# Warum Fortbildungen zur Teilchenphysik?

- ▶ Teilchenphysik in unterschiedlichem Umfang  
Teil der deutschen Lehrpläne
- ▶ Hohe mediale Präsenz in den vergangenen Jahren
- ▶ Interesse seitens der Schülerinnen und Schüler

# Warum Fortbildungen zur Teilchenphysik?

- ▶ Teilchenphysik in unterschiedlichem Umfang Teil der deutschen Lehrpläne
- ▶ Hohe mediale Präsenz in den vergangenen Jahren
- ▶ Interesse seitens der Schülerinnen und Schüler
  
- ▶ Aber:
  - Wenig Erfahrung seitens der Lehrkräfte
  - Vorhandenes Unterrichtsmaterial häufig inkonsistent

# Forschung trifft Schule

- ▶ Lehrerfortbildungen zur Teilchenphysik in Kooperation mit Dr. Hans Riegel-Stiftung
- ▶ Seit Anfang 2017, deutschlandweit
- ▶ Verschiedene Formate
  - Basisprogramm (2 Tage)
  - Multiplikatorenschulung (3 Tage)
  - CERN-Summerschool (6 Tage)



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

# Forschung trifft Schule

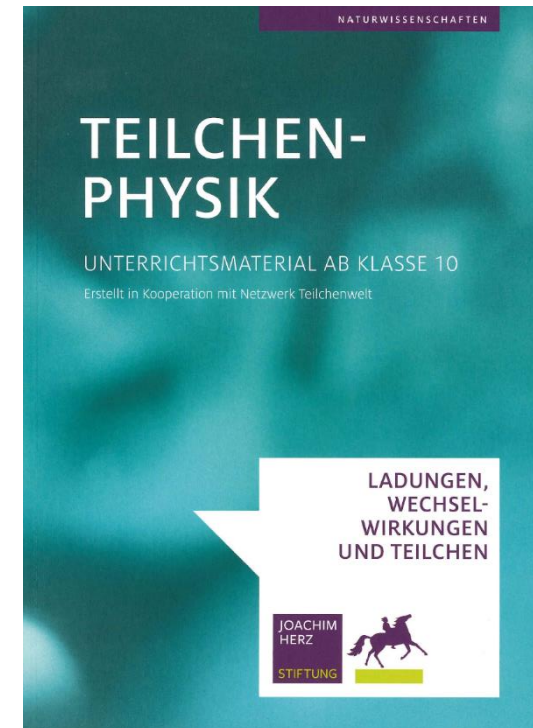
- ▶ Lehrerfortbildungen zur Teilchenphysik in Kooperation mit Dr. Hans Riegel-Stiftung
- ▶ Seit Anfang 2017, deutschlandweit
- ▶ Verschiedene Formate
  - Basisprogramm (2 Tage)
  - Multiplikatorenschulung (3 Tage)
  - CERN-Summerschool (6 Tage)
- ▶ Mehrfach methodische und inhaltliche Anpassungen



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

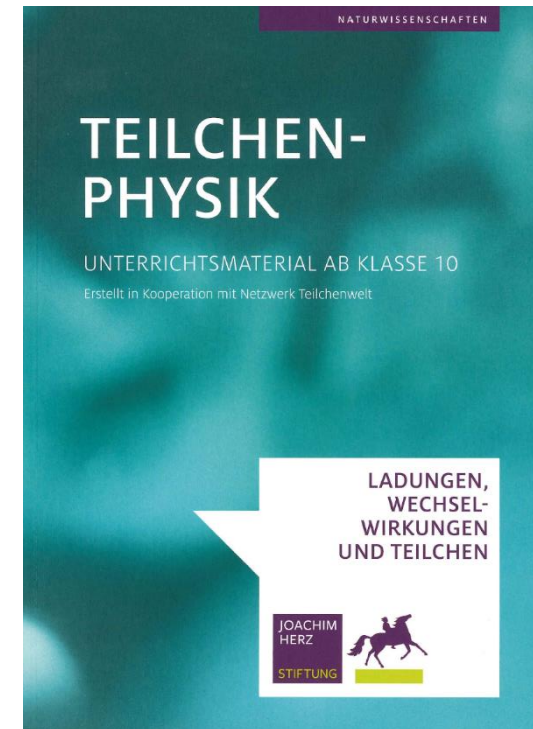
# Grundlage für Fortbildungen

- ▶ Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik
  - Entwickelt zwischen 2013 und 2017 in Kooperation mit der Joachim Herz Stiftung und Lehrkräften
- ▶ 4 Bände
  - Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen
  - Forschungsmethoden
  - Kosmische Strahlung
  - Mikrokurse
- ▶ Kostenlos verfügbar als PDF ([teilchenwelt.de/tp](http://teilchenwelt.de/tp)) oder gedruckte Version



# Grundlage für Fortbildungen

- ▶ Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik
  - Entwickelt zwischen 2013 und 2017 in Kooperation mit der Joachim Herz Stiftung und Lehrkräften
- ▶ 4 Bände
  - **Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen**
  - Forschungsmethoden
  - Kosmische Strahlung
  - Mikrokurse
- ▶ Kostenlos verfügbar als PDF ([teilchenwelt.de/tp](http://teilchenwelt.de/tp)) oder gedruckte Version





# Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

- ▶ Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- ▶ Einführung in das Standardmodell



# Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

- ▶ Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- ▶ Einführung in das Standardmodell
- ▶ Spiralcurriculum, didaktische und fachliche Hinweise
- ▶ Anknüpfungspunkte an typische Lehrplaninhalte
- ▶ Konsistente und anschlussfähige Begriffsbildung



# Gewählter Zugang zum Standardmodell



# Gewählter Zugang zum Standardmodell

- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Formation und Positionen, sondern mit den Grundregeln



# Gewählter Zugang zum Standardmodell

- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Formation und Positionen, sondern mit den Grundregeln
  - Spieler = Elementarteilchen
  - Regeln = Wechselwirkungen (WW), Erhaltungssätze,...

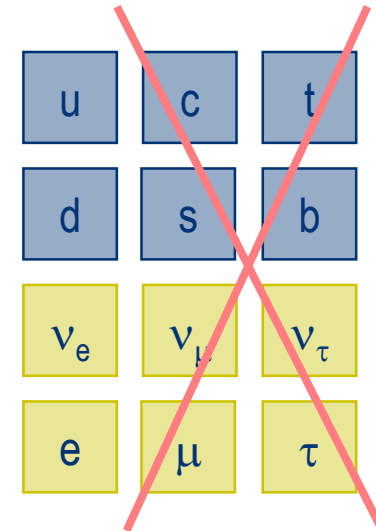
# Gewählter Zugang zum Standardmodell

- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Formation und Positionen, sondern mit den Grundregeln
  - Spieler = Elementarteilchen
  - Regeln = Wechselwirkungen (WW), Erhaltungssätze,...
- ▶ Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen?

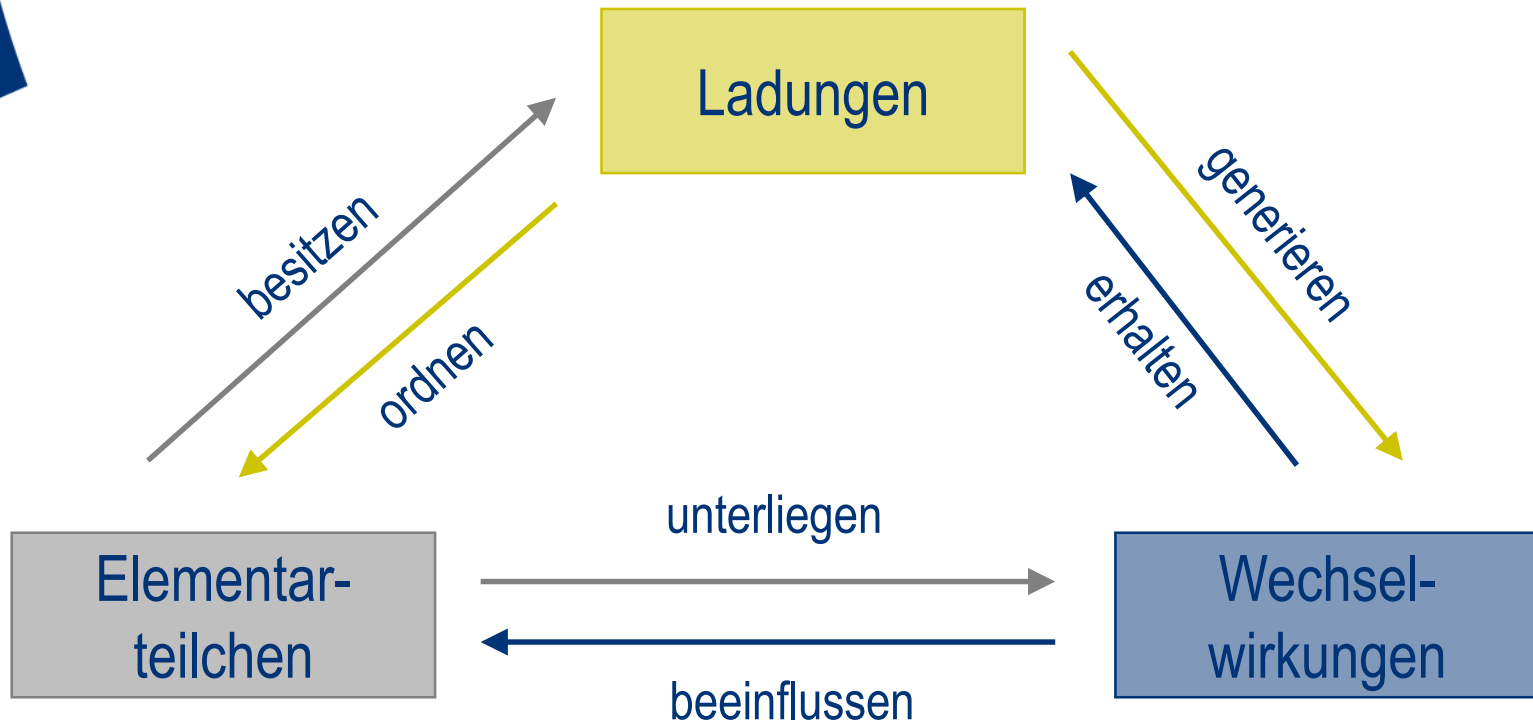
u	c	t
d	s	b
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
e	$\mu$	$\tau$

# Gewählter Zugang zum Standardmodell

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



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Konsistente Begriffsbildung: Wechselwirkungen

## ► Umfasst die Phänomene

- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. Beta-Umwandlung)
- Erzeugung von Materie + Antimaterie (z.B. Elektron + Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

# Konsistente Begriffsbildung: Wechselwirkungen

## ► Umfasst die Phänomene

- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. Beta-Umwandlung)
- Erzeugung von Materie + Antimaterie (z.B. Elektron + Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

► Begriffe Kraft und Wechselwirkung sind klar zu trennen

► Kraft ist nur ein Aspekt von Wechselwirkung

► Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Elementarteilchenphysik im Rahmenlehrplan in NRW



## Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik

### Inhaltliche Schwerpunkte

Atomaufbau  
Ionisierende Strahlung  
Radioaktiver Zerfall  
Kernspaltung und Kernfusion  
Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

### Mögliche Kontexte

Geschichte der Atommodelle  
Lichtquellen und ihr Licht  
Physik in der Medizin (Bildgebende Verfahren, Radiologie)  
(Erdgeschichtliche) Altersbestimmungen  
Energiegewinnung durch nukleare Prozesse  
Forschung an Teilchenbeschleunigern

### Basiskonzept Wechselwirkung

Kernkräfte  
Kettenreaktion  
Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen  
Konzept der Austauschteilchen vs. Feldkonzept

### Basiskonzept Energie

Linienspektren  
Energiequantelung der Hüllelektronen  
Dosimetrie  
Bindungsenergie  
Äquivalenz von Masse und Energie

### Basiskonzept Struktur der Materie

Kern-Hülle-Modell  
Bohr'sche Postulate  
Strahlungsarten  
Zerfallsprozesse  
Massendefekt  
Kernbausteine und Elementarteilchen

Quelle: [http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_GOST\\_Physik.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOST_Physik.pdf), 15.02.2016

# Vereinheitlichungen

- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

Hangabtriebskraft,  
Wasserkraft,  
Gasdruck,  
Radiowellen,  
Luftreibung,  
Radioaktive  
Umwandlungen,  
...



**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**



**Standardmodell  
(ohne Gravitation)**

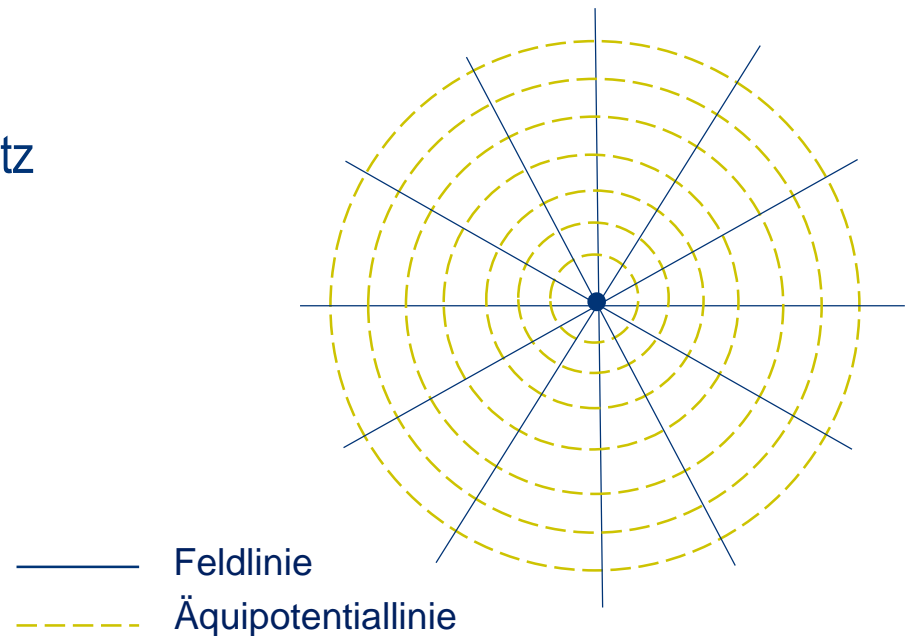
# Reichweiten der Kräfte und Botenteilchen

- ▶ Unendlich: im Alltag spürbar

Kraft	Reichweite
Gravitativ	unendlich
Elektromagnetisch	unendlich
Stark	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Schwach	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

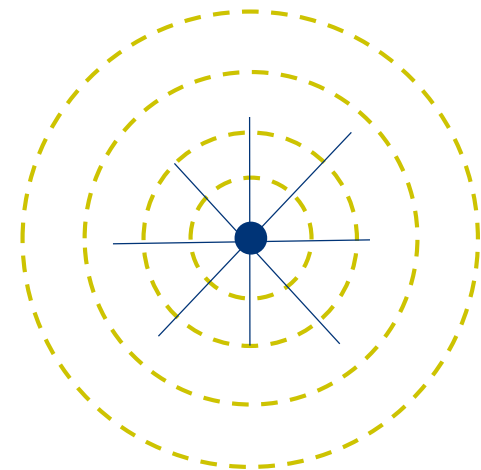
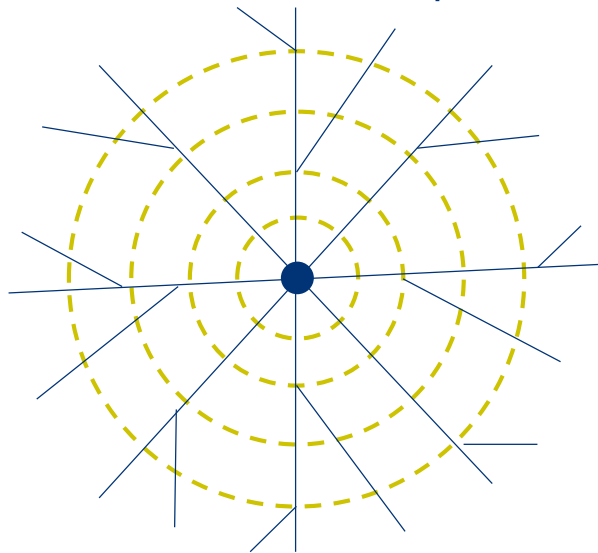
# Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

- ▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW
- ▶ **Dichte** der Feldlinien ist **proportional** zur Kraft
  - Idee: geladenes Teilchen im Zentrum
  - Kugeloberfläche  $A = 4\pi r^2$
  - $F \sim \frac{1}{r^2}$
- ▶ Stimmt bei Coulombschem Gesetz
  - $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



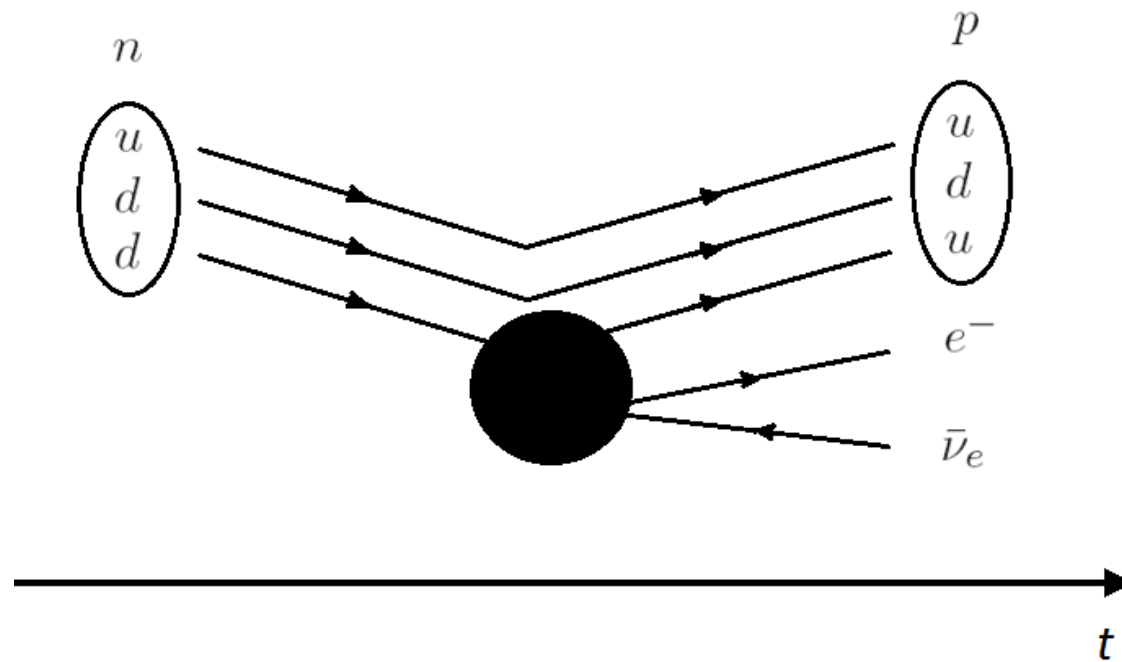
# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

- ▶ Ungewöhnliche Feldlinienbilder für Kräfte, die von  $1/r^2$ -Abhängigkeit abweichen
- ▶ Starke Wechselwirkung
  - Kraft konstant (Confinement)  
→ Feldliniendichte wird konst.
  - Feldlinien entstehen spontan
- ▶ Schwache Wechselwirkung
  - Kraft strebt rasch gegen Null
  - Feldlinien enden „im Nichts“



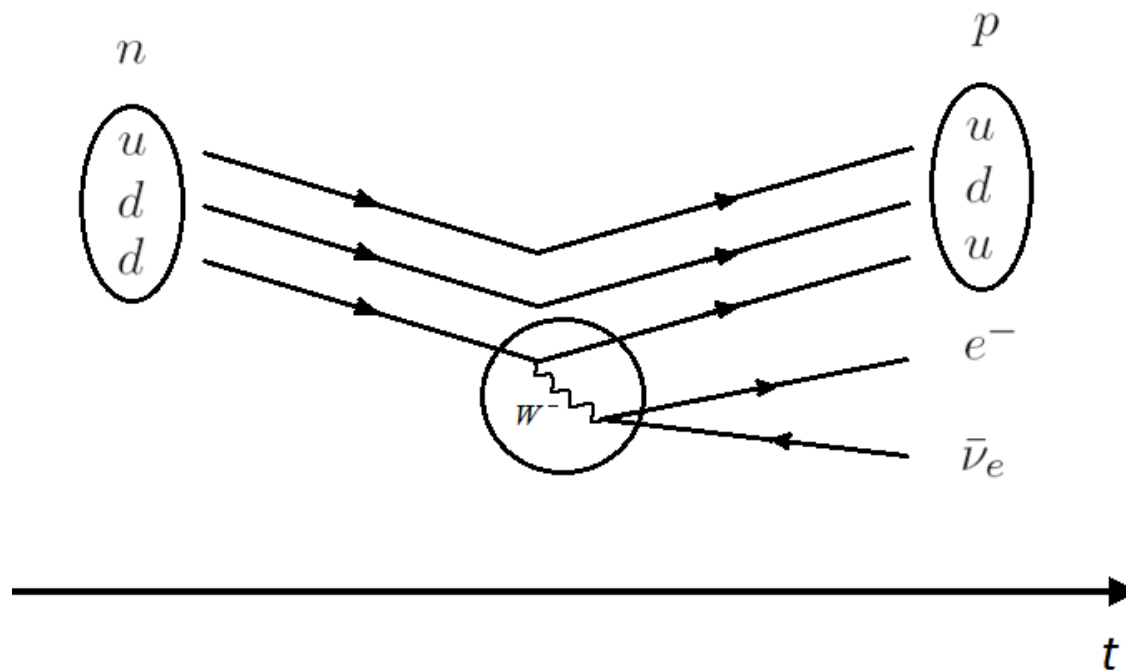
# Beispiel für Spiralansatz: Feynman-Diagramme

- ▶ Beta-Umwandlung mit Blackbox



# Beispiel für Spiralansatz: Feynman-Diagramme

## ► Beta-Umwandlung

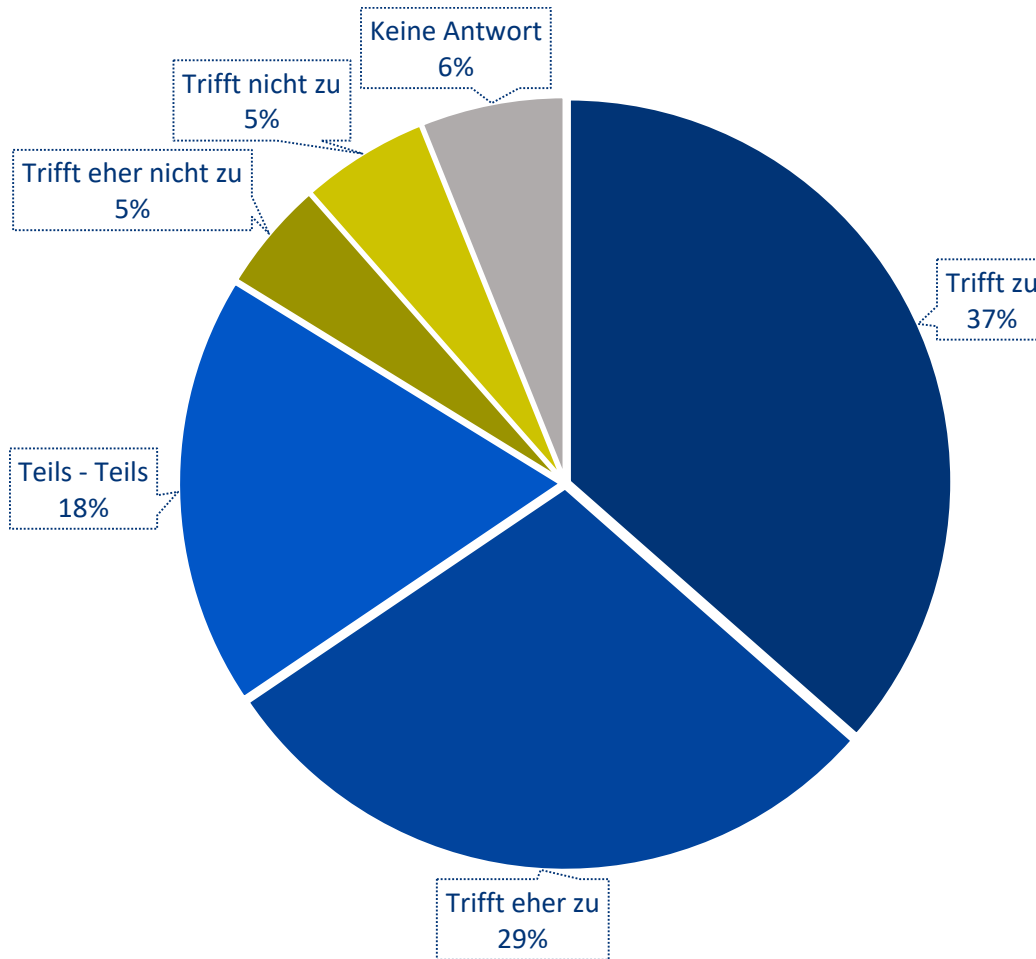




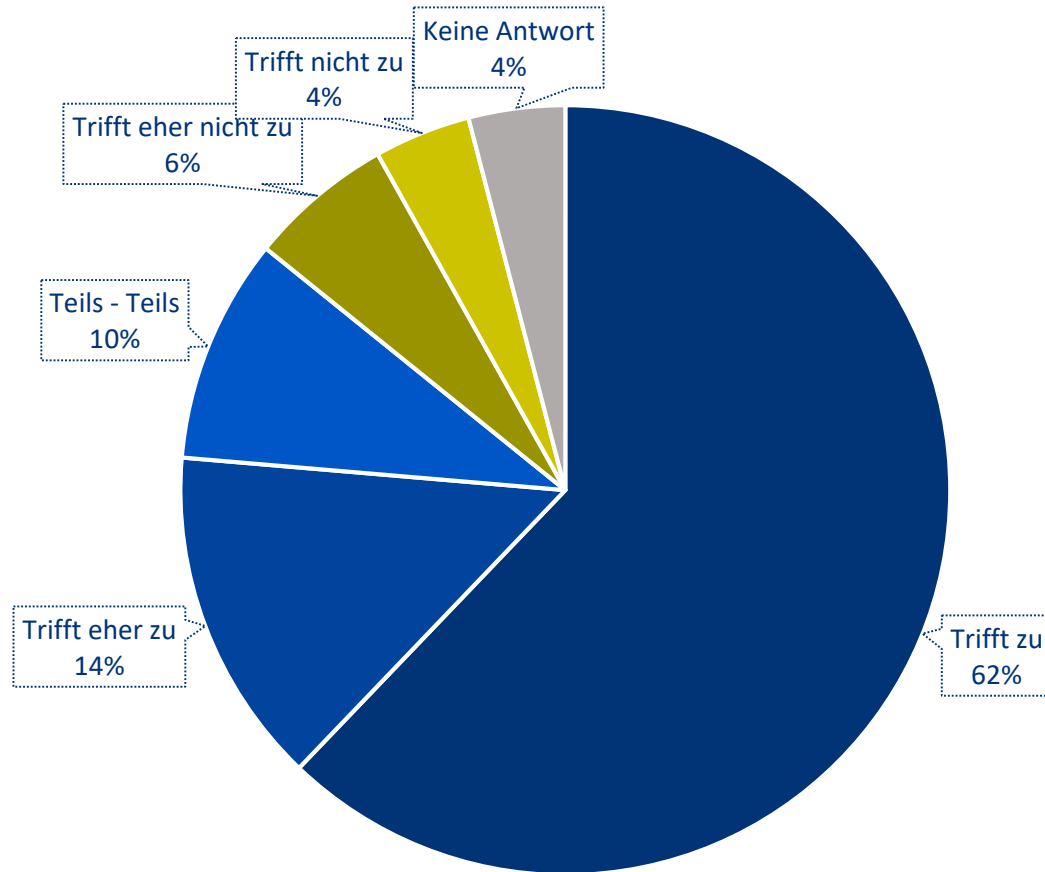
# Evaluation des Fortbildungskonzeptes

- ▶ Fragebogen nach der Veranstaltung
- ▶ Insgesamt ca. 150 Teilnehmer in 2017
- ▶ Bewertung von Aussagen auf einer fünf-stufigen Likert-Skala
- ▶ Weitere offene Fragen und mündliches Feedback
- ▶ Resonanz insgesamt sehr positiv

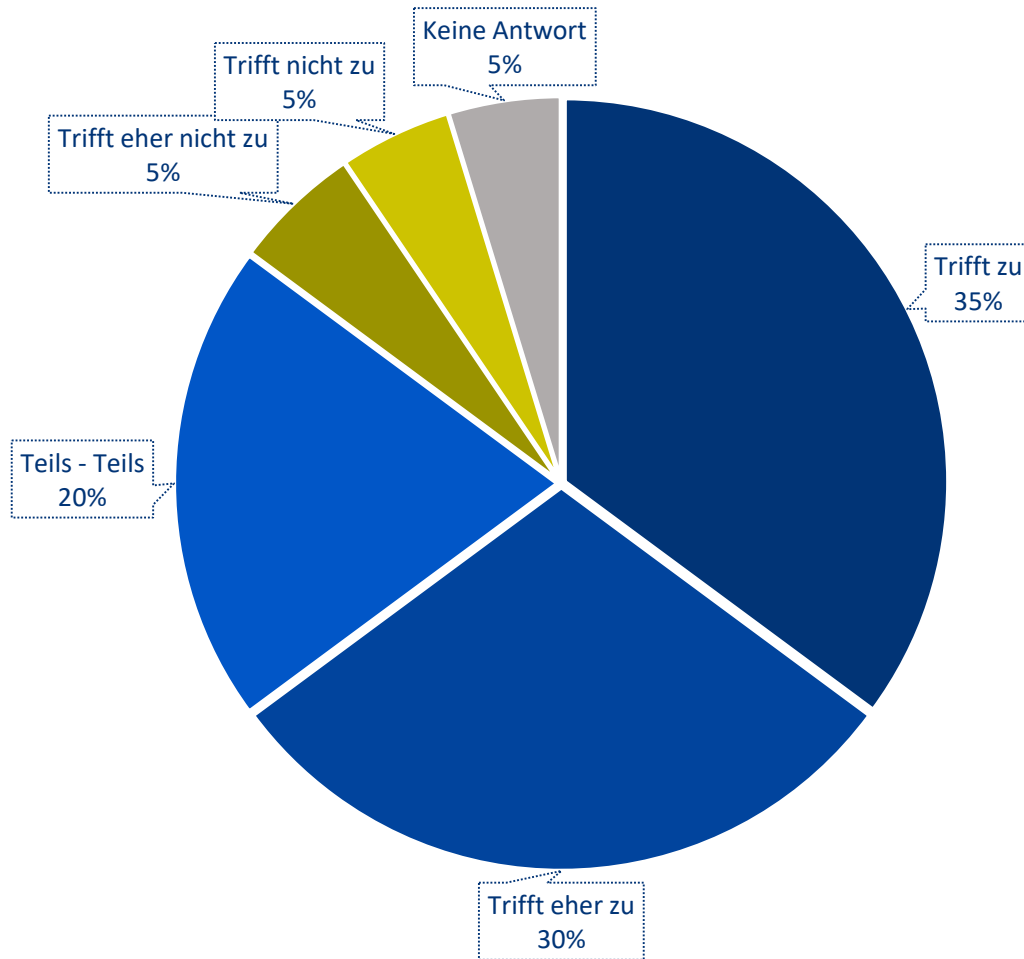
# Das Fortbildungsthema hat für mich eine hohe Relevanz für die Schularbeit



# Die Fortbildung hat mir Wissen vermittelt, dass für mich neu war

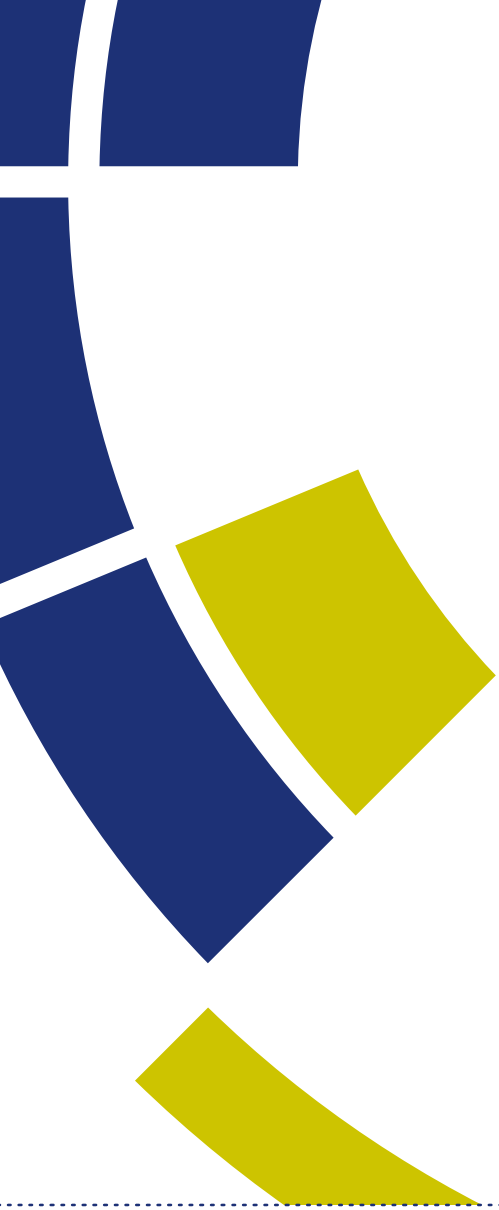


# Nach der Fortbildung traue ich mir zu Teilchenphysik zu unterrichten



# Zusammenfassung

- ▶ Gestiegener Bedarf an Informationen zur Teilchenphysik
- ▶ Entwicklung eines umfangreichen Fortbildungskonzeptes basierend auf den vorhandenen Unterrichtsmaterialien
  - Spiralcurriculum
  - Anknüpfungspunkte an Lehrpläne
  - Konsistente Begriffsbildung
  - Fokus auf Wechselwirkungen und Ladungen
- ▶ Intensive Durchführung der Fortbildungen seit 2017
  - Unbefristet Unterstützung seitens der Dr. Hans Riegel-Stiftung
  - Sehr positive Resonanz seitens der Lehrkräfte



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

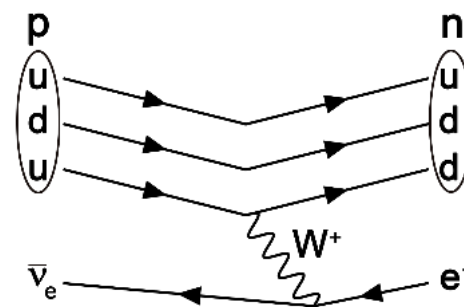
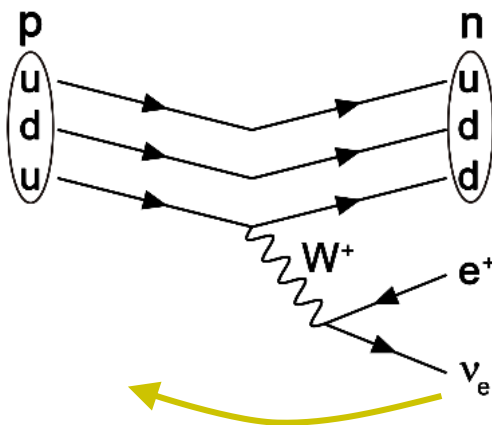


NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Backup

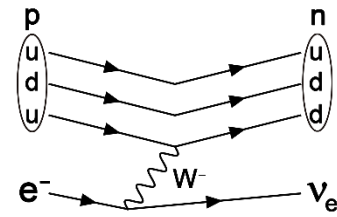
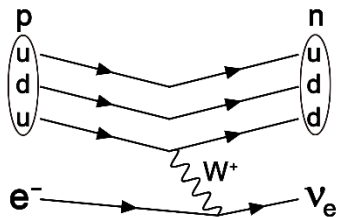
# „Umklappen“ von Linien

- ▶ Durch “umklappen” von Linien können mögliche Prozesse vorhergesagt werden
- ▶ Beispiel:
  - Von der  $\beta^+$  Umwandlung zum Nachweis der Elektron Anti Neutrinos

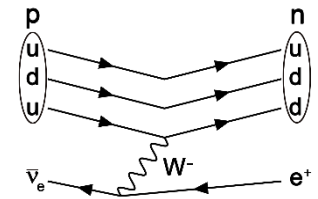
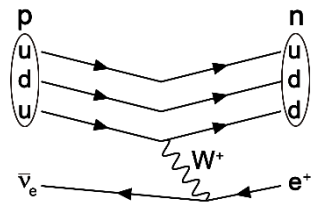


# „Umklappen“ von Linien

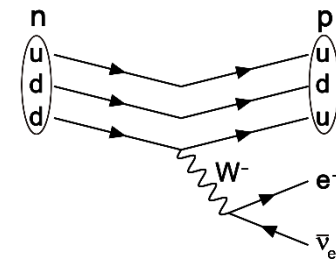
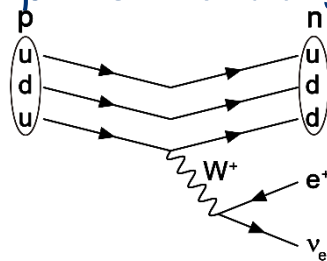
- ▶ Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- ▶ Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953



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



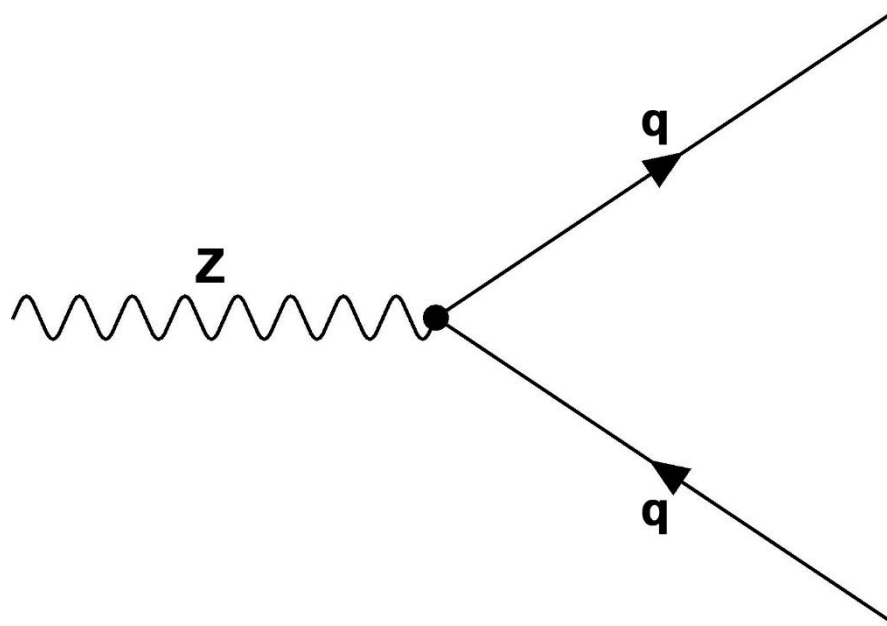
# Mögliche Diskussionspunkte für den Unterricht

Woher weiß man,:

- ▶ dass es Quarks gibt?
- ▶ dass es drei verschiedenen Farbladungen gibt?
- ▶ dass Farbladungen vektoriellen Charakter haben?
- ▶ dass die Leptonenuniversalität gilt?
- ▶ dass es drei Arten leichter Neutrinos gibt?
- ▶ Welche Werte die Kopplungsparameter der fundamentalen Wechselwirkungen haben?

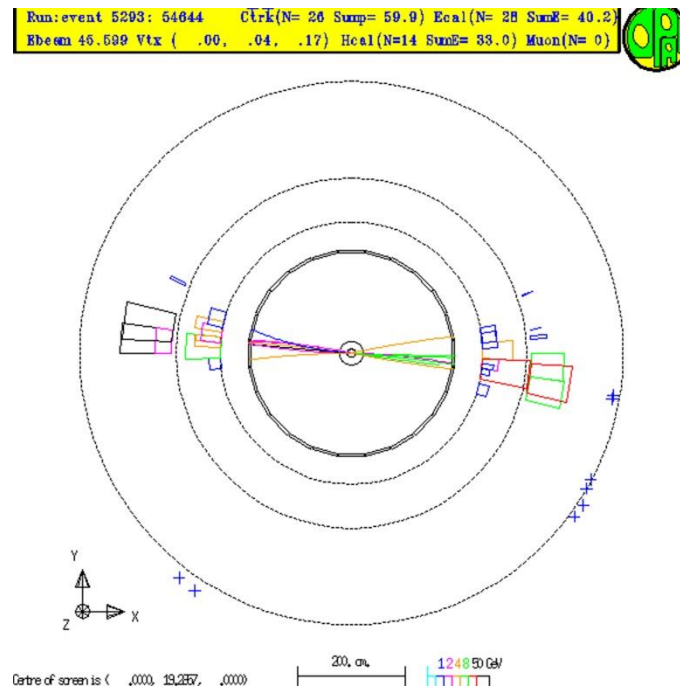
# Was hat man gemessen?

- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?



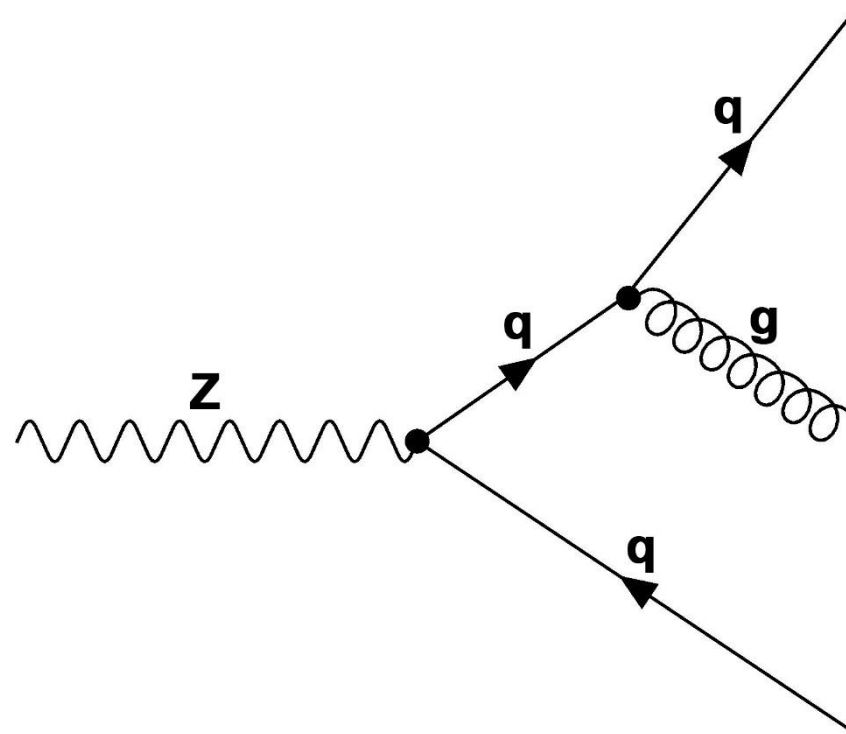
# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?



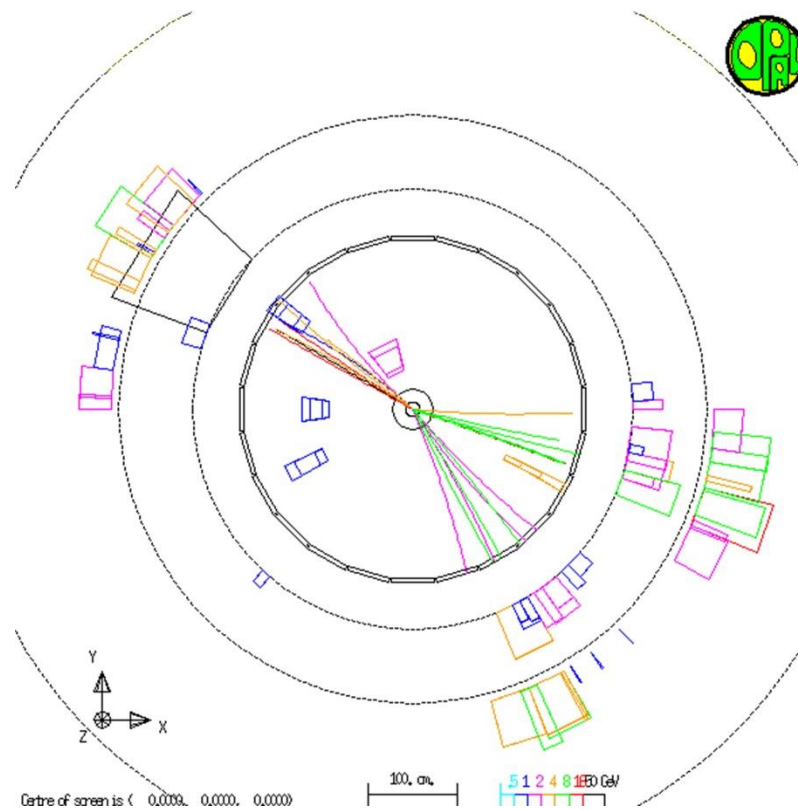
# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:

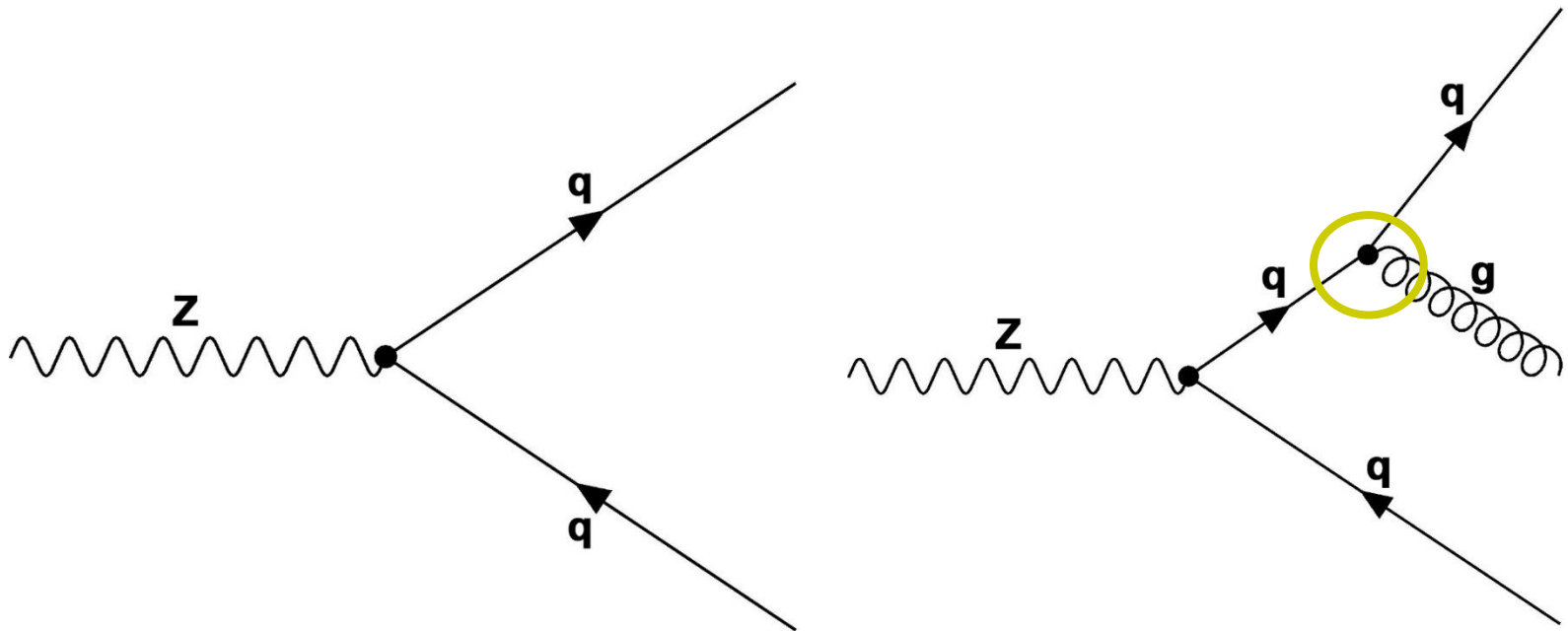


# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:



# Bestimmung des starken Kopplungsparameters



- Feynman-Diagramme unterscheiden sich nur durch einen zusätzlichen Vertex, an dem ein Prozess der starken WW stattfindet

# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozess der starken Wechselwirkung abläuft ist direkt proportional zum starken Kopplungsparameter

$$P(3 - Jet) = P(2 - Jet) \cdot k \cdot \alpha_s$$

$$\alpha_s \sim \frac{P(3 - Jet)}{P(2 - Jet)}$$

- ▶ Dabei ist  $k$  ein Faktor, der durch weitere Kennwerte des Prozesses bestimmt wird und berechnet werden kann

# Beispielagenda

- ▶ 10:00 – 11:15 Begrüßung, Vorstellung NTW, Warm-Up
- ▶ 11:15 – 12:15 Fachvortrag I - Wechselwirkungen und Ladungen
- ▶ 12:15 – 13:00 Mittagspause
- ▶ 13:00 – 17:30 Fachvortrag II - Teilchen und Feynman-Diagramme inkl. Übungen und Pausen
- ▶ 17:45 – 18:30 Überblick: Materialien und Quellen
- ▶ Ab 19:00 Gemeinsames Abendessen
- ▶ Danach Gemütlicher Ausklang mit Getränken und Gesprächen

# Beispielagenda

- ▶ 09:00 – 10:00 Kosmische Strahlung: Materialien und Experimente
- ▶ 10:00 – 11:00 Vortrag: Forschungsmethoden I
- ▶ 15 Min. Kaffeepause
- ▶ 11:15 – 12:15 Vortrag: Forschungsmethoden II
- ▶ 12:15 – 13:00 Mittagspause
- ▶ 13:00 – 14:45 Erprobung Unterrichtsmaterialien
- ▶ 15 Min. Kaffeepause
- ▶ 15:00 – 16:00 Backup und offene Fragen
- ▶ 16:00 – 16:30 Abschlussrunde und Evaluation



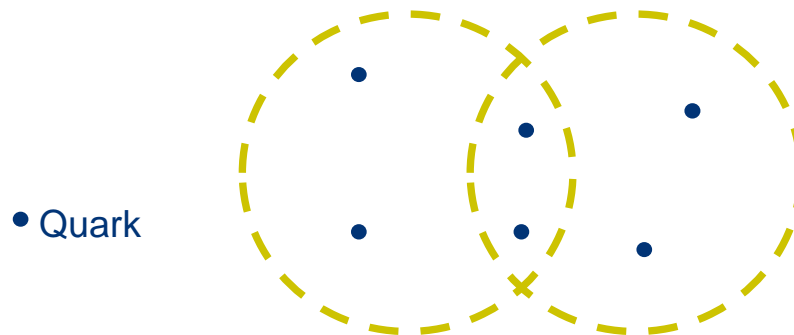
# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

▶ Bereits bekannt:

- Gravitation (nicht im Standardmodell)
- Elektromagnetische Wechselwirkung (Coulombsches Gesetz)

# Die starke Wechselwirkung

- ▶ Warum sind viele Atomkerne stabil trotz elektromagnetischer Abstoßung der Protonen ?
  - Gravitation zu schwach
  - **Starke WW führ zu anziehender Kraft**
  - Analog zur kovalenten Elektronenpaarbindung
  - Ursache ist eine andere Ladungsart (starke Ladung/Farbladung).



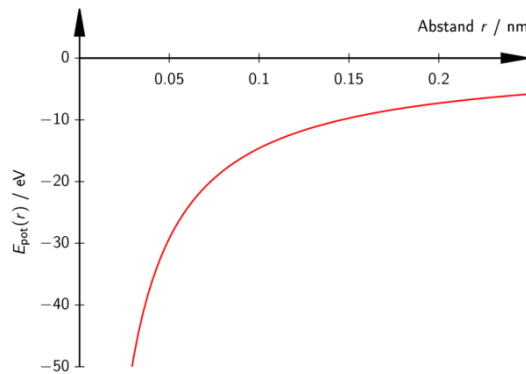


# Die schwache Wechselwirkung

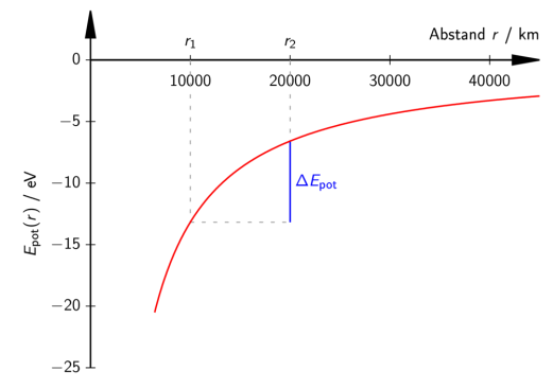
- ▶ Zugang schwieriger als bei starker WW
- ▶ 2 unterschiedliche Zugänge
- ▶ Ansatzpunkt sind jeweils Beta-Umwandlungen und das entstehende Neutrino

# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

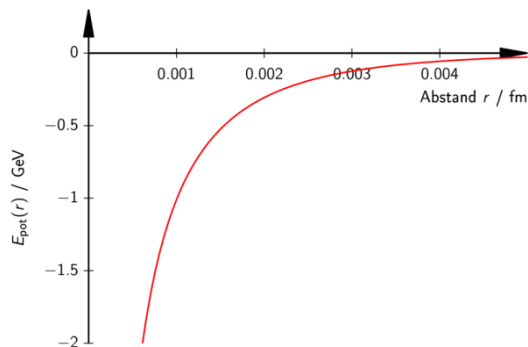
## ► Elektromagnetische WW



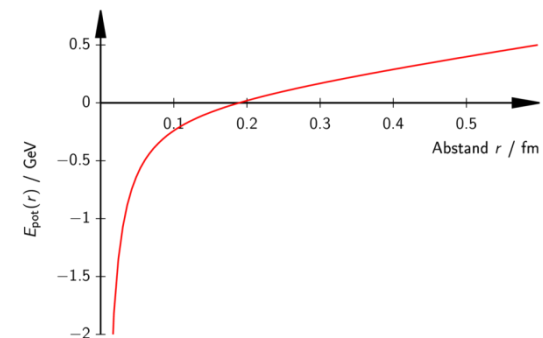
## ► Gravitation



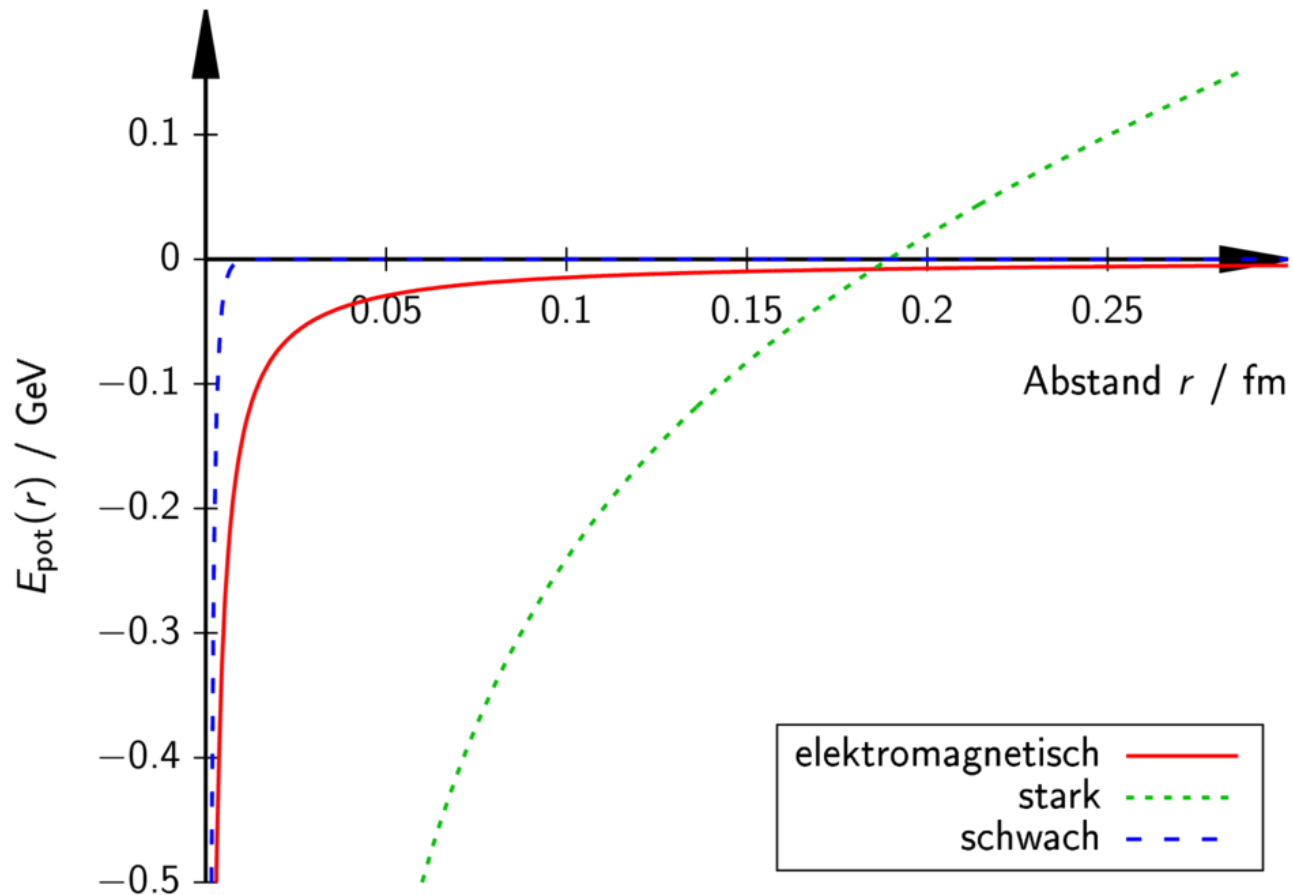
## ► Schwache WW



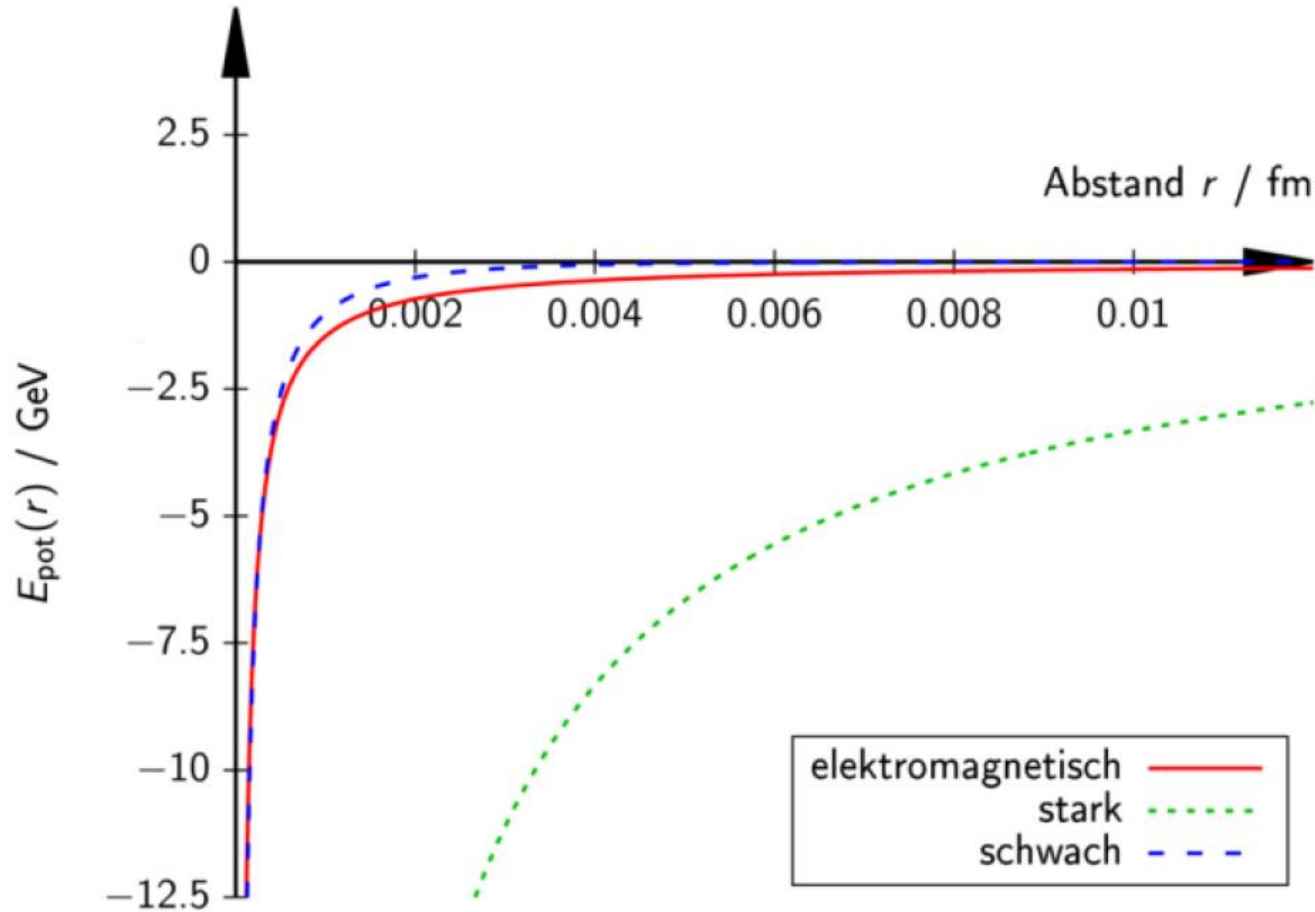
## ► Starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien



## Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen (Achsen jeweils mit Faktor 25 gedehnt bzw gestaucht)



# Potenzielle Energien bei sehr kleinen Abständen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{\text{grav}} \frac{-1}{r}$
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

# Potenzielle Energien und Reichweiten

Wechselwirkung	Potenzielle Energie	Reichweite
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$	unendlich
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$	unendlich
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r} + kr$	$5 \cdot 10^{-15} \text{m}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{m}$

# Basiskonzept der Ladung

▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

▶ Bekannt:

■ Elektrische Ladung  $Q = Z \cdot e$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

► Coulombsches Gesetz:  $F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r^2} = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$

■  $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$

Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)

► Einführung eines **Kopplungsparameters**  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

■  $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

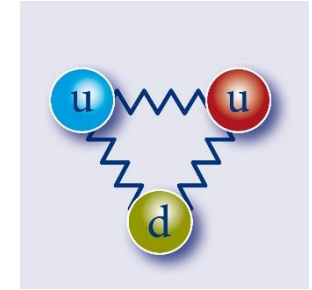
- ▶ Coulombsches Gesetz:  $F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r^2} \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$ 
  - $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$   
Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)
- ▶ **Einführung** eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen
  - $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$
- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**
  - Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
  - ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften
  - ▶ Bekannt:
    - Elektrische Ladung
  - ▶ Neu:
    - Schwache Ladung
    - Starke (Farb-)Ladung
- |                           |           |
|---------------------------|-----------|
| elektrische Ladungszahl   | $Z$       |
| schwache Ladungszahl      | $I$       |
| starker Farbladungsvektor | $\vec{C}$ |
- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

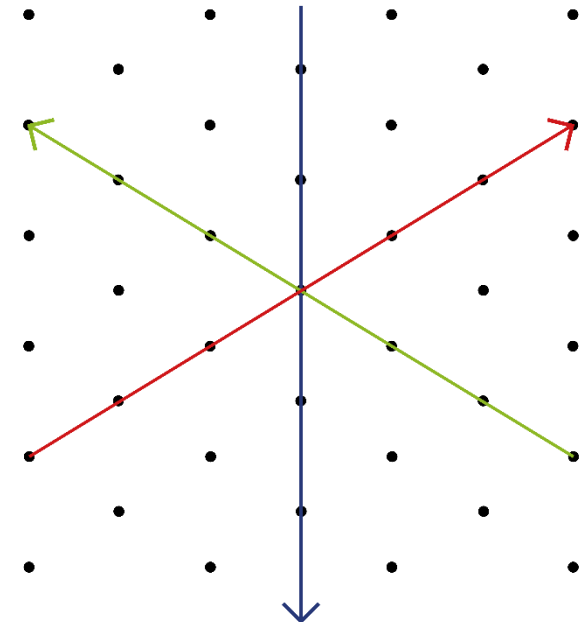
# Starke Ladung

▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung (auch: starke „Farbladung“)



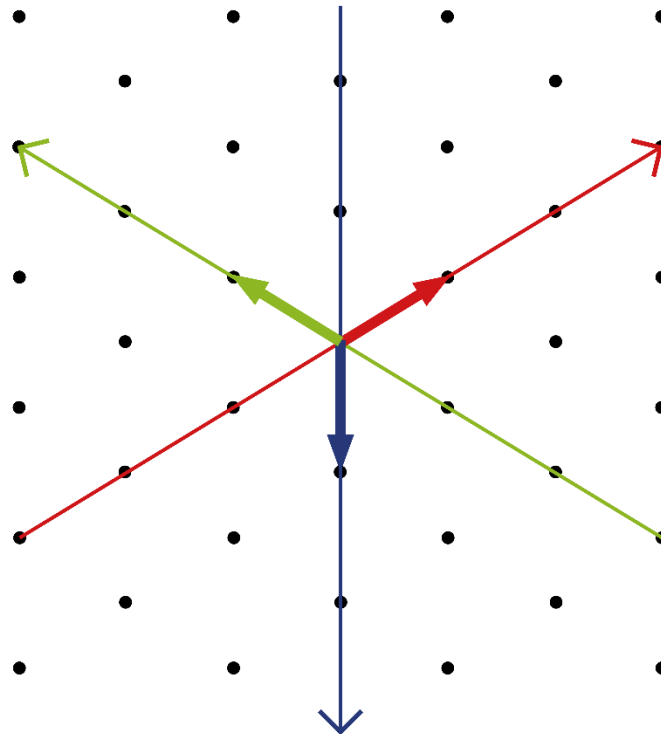
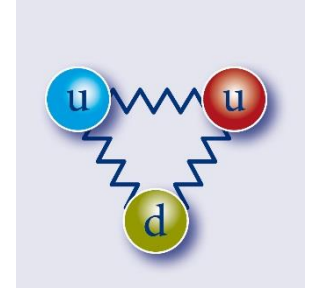
▶ Farbgitter:

- Experimentell nachgewiesen: Alle starken Ladungen haben gleichen Betrag
- 3 Ladungen addieren sich zu 0 (Protonen und Neutronen bspw. bestehen aus 3 Quarks)  
→ geht nur mit Vektoren
- Theorie: 2 Komponenten messbar  
→ 2-dim Farbgitter



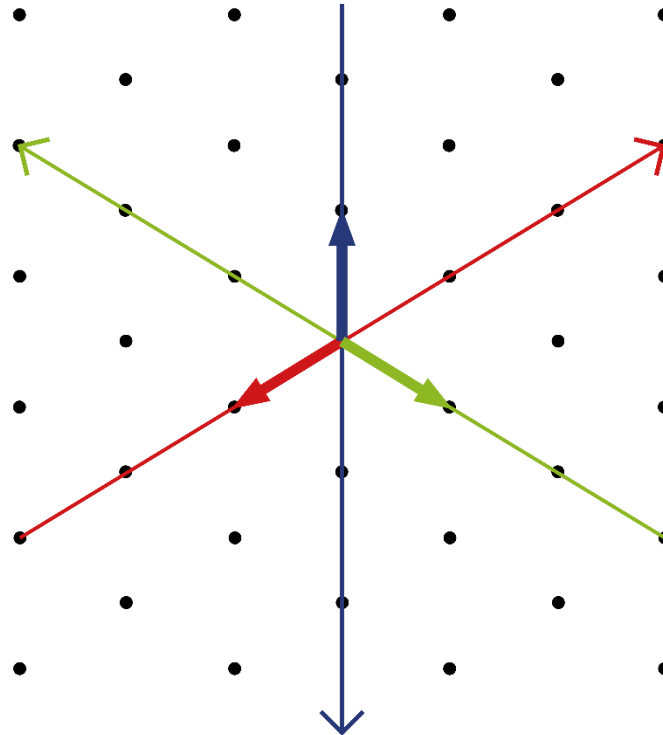
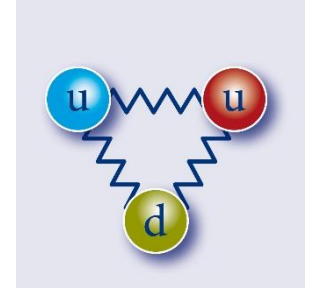
# Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Quarks



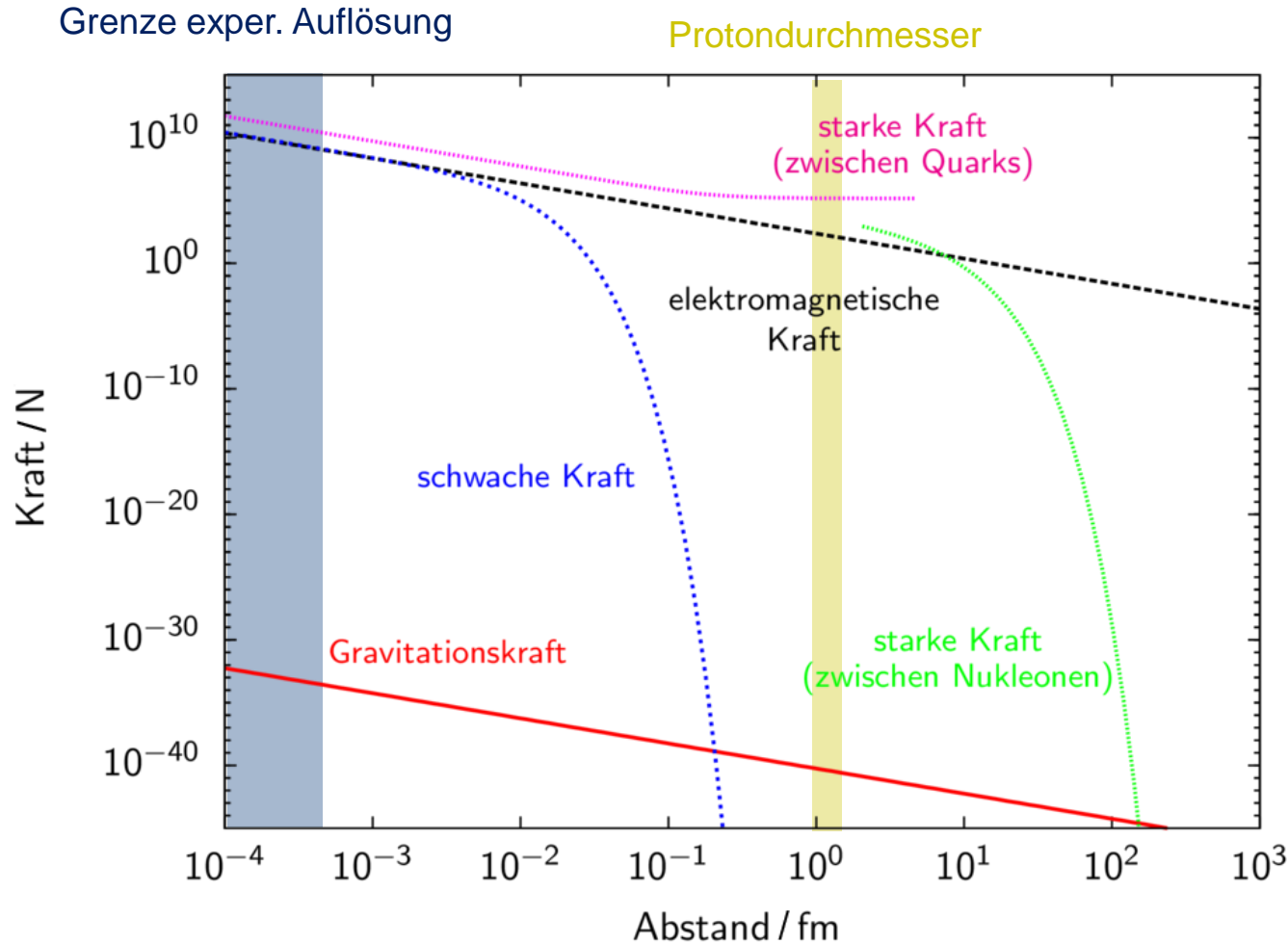
# Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks



# Kräfte der Wechselwirkungen

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



# Klassisches Analogon:

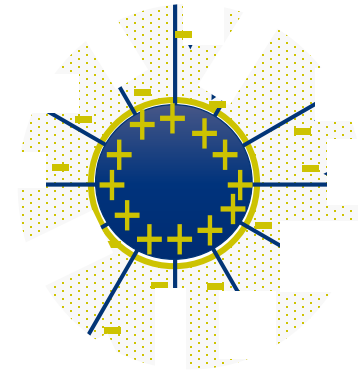
## ► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

- Einfügen von Dielektrikum
- Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch Polarisation
- Abgeschirmtes Feld  
→ Endliche Reichweite  $\lambda$

## ► Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

- Polarisierbares Medium der Schwachen Wechselwirkung → „Dischwachladikum“
- Abgeschirmtes Feld  
→ Masse der Botenteilchen

$$m_W c^2 = \frac{\hbar c}{\lambda_W} = \frac{0,2 \text{ GeV fm}}{\lambda_W}$$



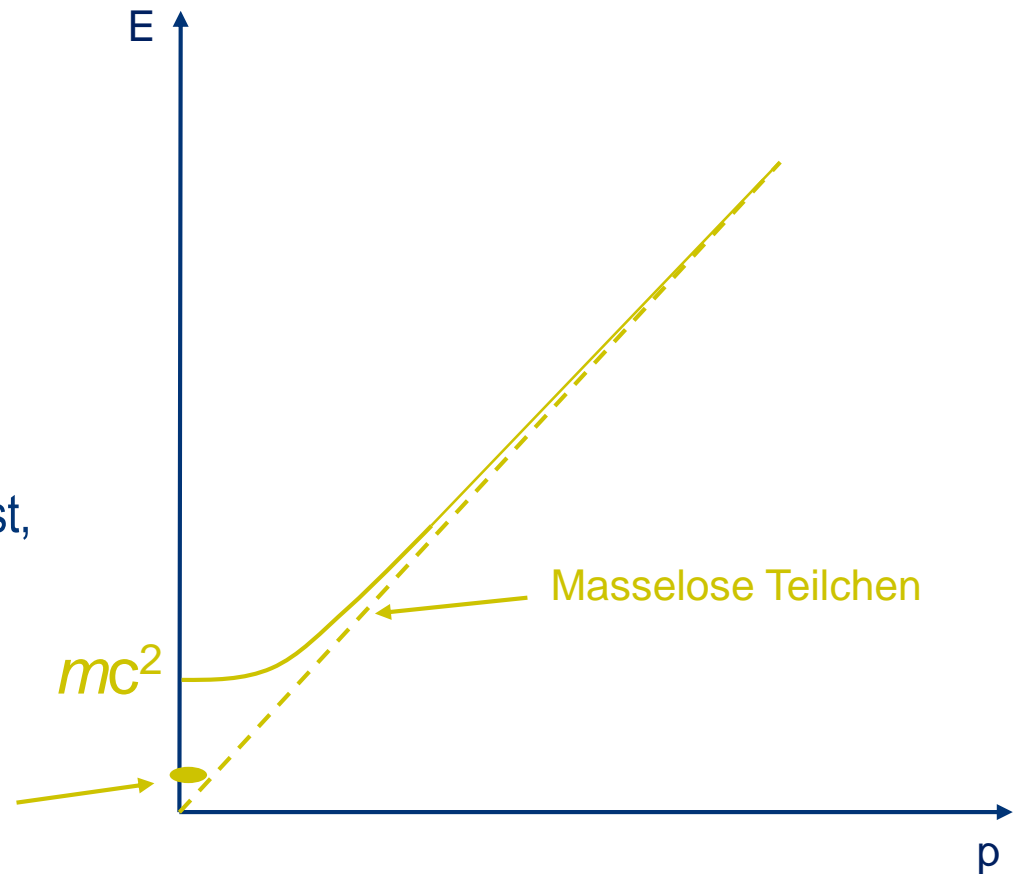
# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

- ▶ Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt
- ▶ Eigenschaften der Botenteilchen bestimmen Reichweiten der Wechselwirkungen
- ▶ Schwache Wechselwirkung
  - Massereiche Botenteilchen (W- und Z-Teilchen)
  - Compton-Wellenlänge  $\lambda_W = \frac{\hbar}{m_W c} \approx 0,0024 \text{ fm}$
- ▶ Starke Wechselwirkung
  - Stark geladenen Botenteilchen (Gluonen)
  - Können untereinander wechselwirken

# Virtuelle Teilchen

- ▶ Für reelle Teilchen muss die Energie-Impuls Beziehung gelten:  
$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$
- ▶ Für virtuelle Teilchen ist dies nicht der Fall
- ▶ Je weiter ein virtuelles Teilchen von der Energie-Impuls Beziehung entfernt ist, desto unwahrscheinlicher wird der Prozess

W Botenteilchen der  $\beta$ -Umwandlung



# Virtuelle Teilchen

- ▶ Analogie: Erzwungene Schwingung vs. Teilchenphysik

$$\sim \frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega_0^2 \gamma^2}$$

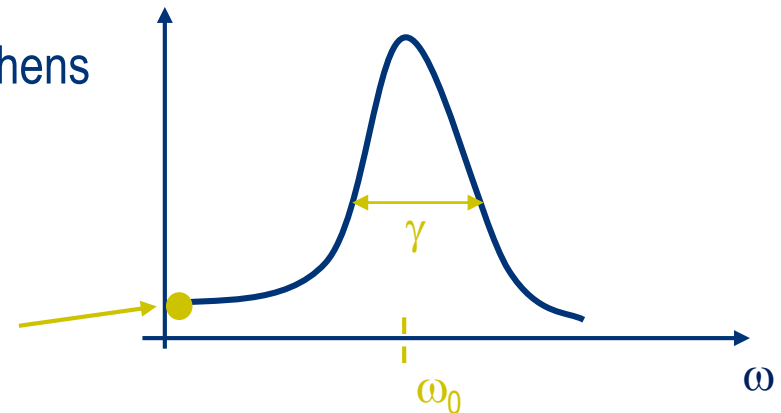
von außen Vorgegeben →  $\omega^2 - \omega_0^2$   
 Eigenfrequenz →  $\omega_0^2$   
 Dämpfung = 1/Lebensdauer →  $\gamma^2$

$$\sim \frac{1}{(E^2 - (mc^2)^2)^2 + (mc^2)^2 \Gamma^2}$$

von außen Vorgegeben →  $E^2 - (mc^2)^2$   
 Ruheenergie →  $(mc^2)^2$   
 Breite  $\sim 1/\text{Lebensdauer}$  →  $\Gamma^2$

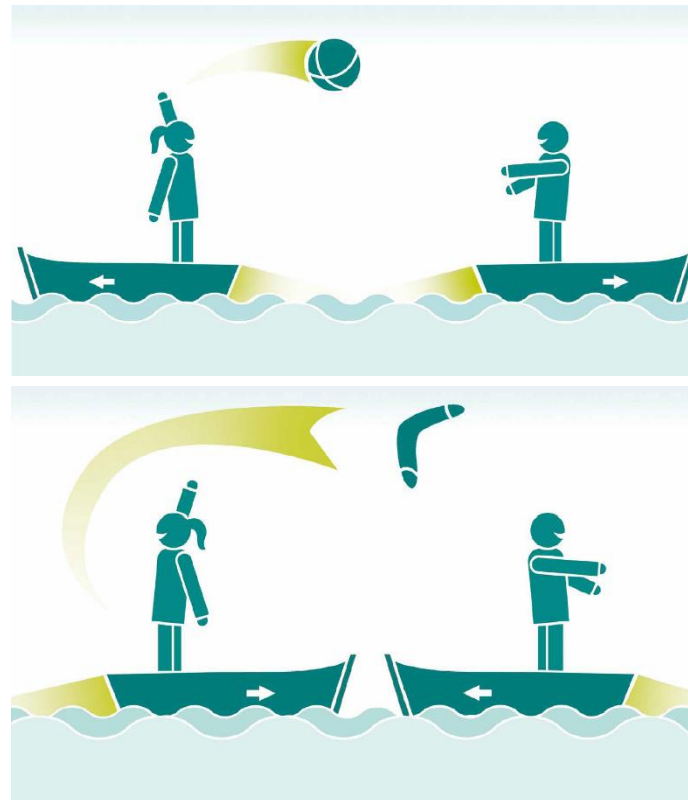
- ▶ „Erzwungene“ Ruheenergie des W Teilchens in der Beta Umwandlung ist weit weg von seiner „nominellen Ruheenergie“ (Resonanz)

W Botenteilchen der  $\beta$ -Umwandlung



# Darstellung von Wechselwirkungen

- ▶ Probleme mit klass. Bildern für quantenphysikalische Prozesse

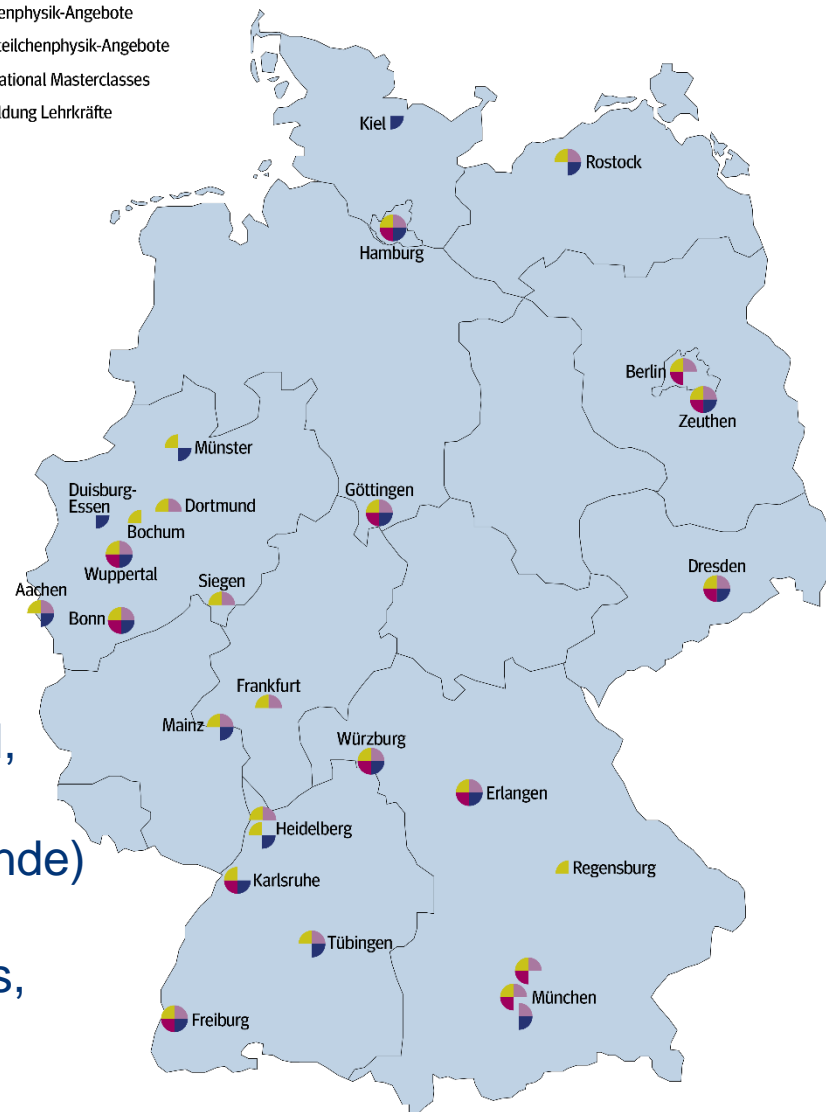


# Netzwerk Teilchenwelt

► pro Jahr arbeiten mit Originaldaten und/oder Teilchendetektoren

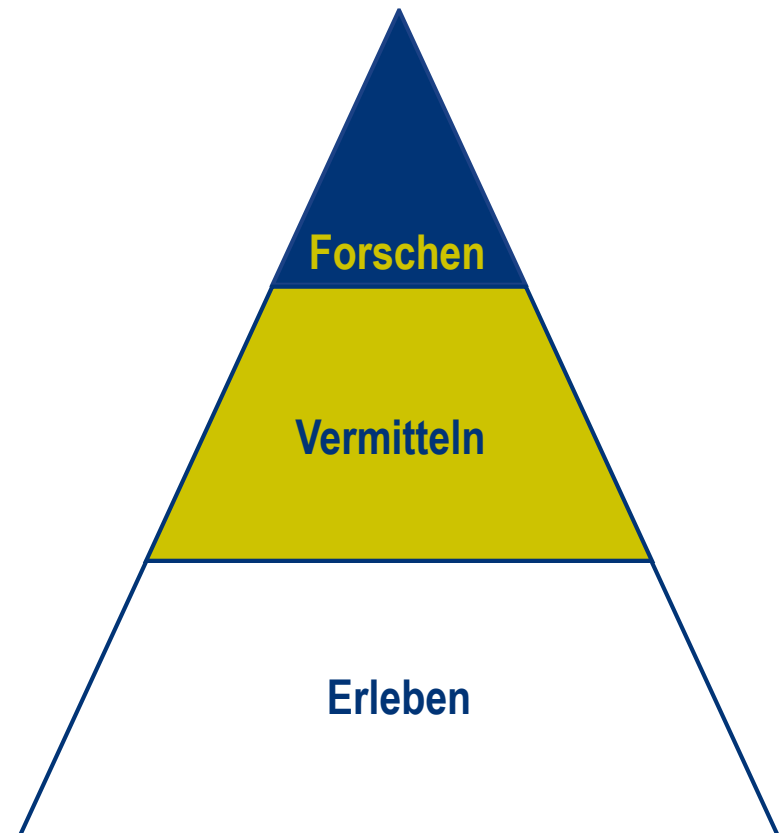
- > 5000 Jugendliche
- ca. 250 in Vertiefungsstufen, 60 bei CERN-Workshops
- 10 Forschungsprojekte am CERN, 8 an den Standorten
- 120 registrierte Fellows (Studierende)
- Aktivitäten für ca. 300 Lehrkräfte (Fortbildungen, CERN-Workshops, Unterrichtsmaterial)

- ▲ Teilchenphysik-Angebote
- Astroteilchenphysik-Angebote
- International Masterclasses
- Fortbildung Lehrkräfte



# Das Konzept: Stufenprogramm

- ▶ Vertiefungsprogramm
- ▶ Qualifizierungsprogramm
- ▶ Basisprogramm



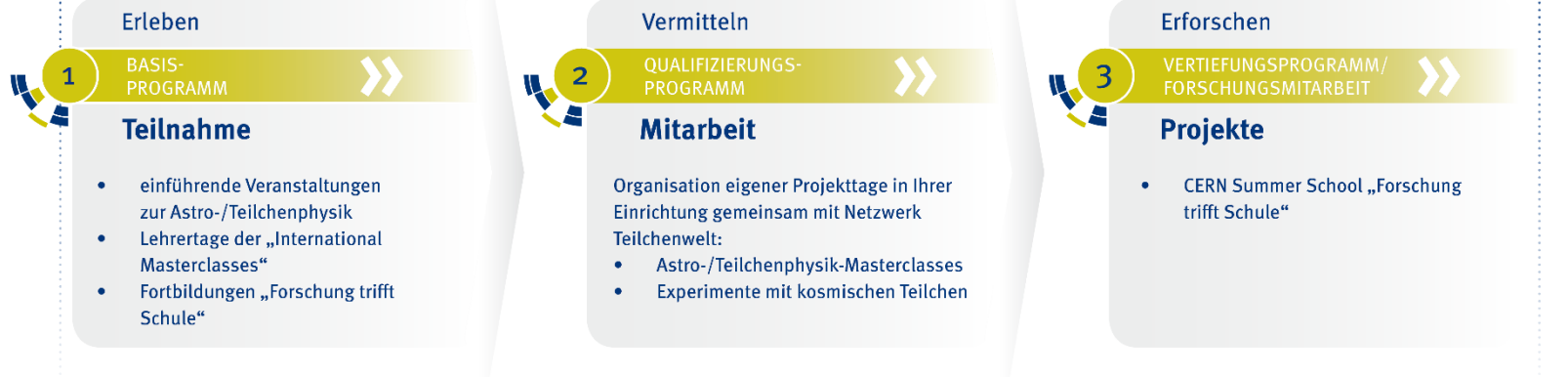
# Mehrstufiges Angebot für Jugendliche

## Mehrstufiges Angebot für Jugendliche im Überblick



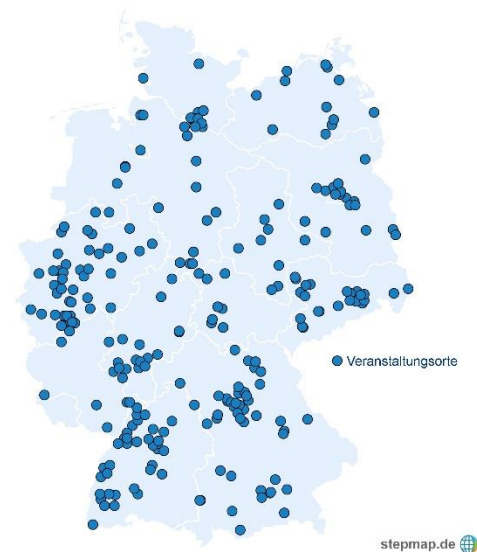
# Mehrstufiges Angebot für Lehrkräfte

## Mehrstufiges Angebot für Lehrkräfte im Überblick



# Basisprogramm: Masterclass

- ▶ Eintägige Veranstaltung in Schulen
  - Durchgeführt von Nachwuchs-wissenschaftler/inne/n
  - Einführungsvorträge
  - Eigene Auswertung von Daten
    - der LHC-Experimente
    - des Pierre Auger Observatoriums
    - des IceCube Experiments
- ▶ Auch als **Lehrerfortbildung**
- ▶ Über 700 Masterclasses wurden bisher durchgeführt



# Qualifizierungsprogram: Astroteilchen-Projekte

- ▶ Szintillator-Experiment „CosMO“ und „Kamiokanne“-Experiment
  - Zur Ausleihe nach vorheriger Fortbildung
  - Geeignet für kleinere Gruppen in allen Programmstufen
  - Verschiedene Messungen (Winkel, Lebensdauer, Abschirmung)
- ▶ Nebelkammer-Sets
- ▶ Mehr dazu morgen...



Kamiokannen



Szintillationszähler



Nebelkammer