

# Basiskonzepte in Materialien zur Vermittlung von Teilchenphysik

Michael Kobel, TU Dresden

Arbeitsstreffen KoLBi

7.07.2016

Folien auf: <http://indico.cern.ch/event/545553/>



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Materialien für die Schule

## 1. Materialsammlung

[www.teilchenwelt.de/material](http://www.teilchenwelt.de/material)



- 2013 mit Uni Würzburg



### ▶ Teilchensteckbriefe

- 2 Varianten
- Gelegenheit zu eigenen Aktivitäten
- ordnen, diskutieren, vertraut werden

### ▶ Hintergrundinformationen und Arbeitsblätter

- Vor- und Nachbereitung von Masterclasses
- Methoden, Anwendungen, Kosmologie
- 72 Seiten



UP-ANTIQUARKS MOTIVID: 1968	CHARM-ANTIQUARKS MOTIVID: 1974	TOP-ANTIQUARKS MOTIVID: 1995
ANTIMATERIE TEILCHEN	ANTIMATERIE TEILCHEN	ANTIMATERIE TEILCHEN
Masse: 2 MeV/c <sup>2</sup> Elektrische Ladung: -2/3 Starke Wirkung: antwort, ungelad, antwort Schwache Ladung: -1/3	Masse: 1300 MeV/c <sup>2</sup> Elektrische Ladung: -2/3 Starke Wirkung: antwort, ungelad, antwort Schwache Ladung: -1/3	Masse: 173 000 MeV/c <sup>2</sup> Elektrische Ladung: -2/3 Starke Wirkung: antwort, ungelad, antwort Schwache Ladung: -1/3
Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt	Mittlere Lebensdauer: 10 <sup>-12</sup> s	Mittlere Lebensdauer: 6 · 10 <sup>-13</sup> s

#### ANWENDUNGEN DER TEILCHENPHYSIK MEDIZIN

**Positronen-Emissions-Tomographie (PET)**  
Die PET ist eine Diagnosemethode, mit der sich unter anderem Tumore sichtbar machen lassen. Hierfür wird dem Patienten eine Flüssigkeit gespritzt, die Positronen aussendet (ein Beta-Plus-Strahler). Dabei handelt es sich meist um eine spezielle Zuckerdosis, in der Fluor-Atome durch das radioaktive Isotop <sup>18</sup>F ersetzt wurden (Fluor-Desoxyglucose). Da Tumorzellen mehr Zucker verbrauchen als gesunde Zellen, sammelt er sich insbesondere in Tumoren an.

**Tumorthherapie mit Neutronen**  
Heute werden hauptsächlich drei Methoden verwendet, um Krebs zu behandeln: Operation, Chemotherapie und Strahlentherapie. Bei der herkömmlichen Strahlentherapie werden Tumore mit hochenergetischen Protonen oder Elektronen bestrahlt. Diese ionisieren auf ihrem Weg durch den Körper Moleküle in den Zellen, was wiederum chemische Reaktionen auslöst, welche die Zellen abtöten oder sie an der Teilung hindern. Obwohl die Strahlung möglichst stark auf den Tumor fokussiert wird, schädigt die Behandlung auch gesunde Zellen – insbesondere, wenn der Tumor tief unter der Haut liegt.

Eine neuartige Form der Strahlentherapie, die am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH in Darmstadt entwickelt wurde, verwendet Neutronen (Protonen oder andere Ionen). Hierbei lässt sich gezielt einstellen, wie tief die Teilchen ins Gewebe eindringen sollen, bevor sie den Großteil ihrer Energie abgeben. So kann gesundes Gewebe geschont werden.

• Abb. 1: Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

# 2. LEIFI Physik Portal

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



[www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik](http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik)

- 2014 mit Joachim Herz Stiftung
- über 40 Seiten Texte u. Animationen

Wechselwirkung	Starke Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Gravitation
Beispiele für Wirkung	Zusammenhalt des Protons	Betazerfall: Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um (oder umgekehrt), Kernfusion: In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern.	Magnetismus, Licht, ... Chemische Bindungen; Photoeffekt	Anziehung zwischen Massen; Schwerkraft; Umlauf der Planeten um
Reichweite	$10^{-16}$ m (Protonendurchmesser)	$10^{-18}$ m ( $\frac{1}{1000}$ Protonendurchmesser)	unbegrenzt	unbegrenzt
Botenteilchen	Gluonen	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	Photon	
Ladung	Starke Ladung (Farbladung)	Schwache Ladung	Elektrische Ladung	
Kopplungsstärkekonstante	$\alpha_g = \frac{1}{8}$	$\alpha_w = \frac{1}{30}$	$\alpha_{em} = \frac{1}{137}$	$\alpha_g \sim 10^{-44}$

## Photon - das Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung

Das Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon.



Die folgende Animation soll die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Elementarteilchen durch den Austausch von Photonen darstellen.



Grundwissen | Versuche | Aufgaben | Ausblicke | Geschichte | Weiterführende Links

● Mehr anzeigen

Die 12 Bausteinteilchen lassen sich zunächst in drei Generation (oder auch: Familien; in der Tabelle rechts die drei Spalten) einteilen. Die drei Generationen beinhalten jeweils sehr ähnliche Teilchen, lediglich die Masse der Teilchen ändert sich zwischen den Generationen erheblich.

Am geläufigsten sind die Mitglieder der 1. Generation in der 1. Spalte, denn sie sind die Grundbausteine der Materie, mit der man gewöhnlich in Berührung kommt: Für den Aufbau der Nukleonen und somit des Atomkerns dienen die Quarks u und d. Von den Leptonen gehört zur 1. Generation das Elektron e, das die Hülle eines Atoms aufbaut, sowie das nahezu masselose Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , das von den  $\beta$ -Zerfällen her bekannt ist und auch in großer Zahl von der Sonne zur Erde gelangt.

Die Mitglieder der 2. und 3. Generation in der 2. und 3. Spalte treten nur unter extremen Bedingungen auf, wie sie z.B. in Teilchenbeschleunigern oder in den oberen Schichten unserer Atmosphäre herrschen, wo die kosmische Strahlung auf Teilchen in unserer Atmosphäre trifft. Die Mitglieder der 3. Generation besitzen im Vergleich zu ihren Verwandten eine sehr große Masse und können daher nur in Teilchenbeschleunigern nachgewiesen werden, denn man benötigt sehr hohe Energien um diese Teilchen zu erzeugen.

Man kann die 12 Teilchen aber auch nach ihrer Ladung in verschiedene Gruppen einteilen (in der Tabelle rechts die drei Zeilen), wodurch ein erstaunlich übersichtliches Schema entsteht. Je höher die Teilchen in der Tabelle stehen, desto mehr unterschiedliche Ladungen besitzen sie.

Die elektrisch neutralen Leptonen in der untersten Zeile tragen lediglich eine schwache Ladung. Somit werden sie nur von der schwachen Wechselwirkung beeinflusst und tauschen nur die Botenteilchen  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  aus.

Die elektrisch geladenen Leptonen in der mittleren Zeile tragen zusätzlich eine elektrische Ladung. Somit werden sie auch von der elektromagnetischen Wechselwirkung beeinflusst und tauschen neben  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  auch Photonen als Botenteilchen aus.

Die Quarks in der obersten Zeile schließlich tragen auch noch eine starke Ladung. Sie werden also zusätzlich von der starken Wechselwirkung beeinflusst und tauschen somit außer Photonen und  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  Gluonen als Botenteilchen aus.

Das gleiche Bild ergibt sich für die jeweiligen Antiteilchen, hier sind lediglich alle Ladungen umgekehrt, statt einer elektrischen Ladung von  $+\frac{2}{3}$  trägt das

1. Generation

Quarks

2. Generation

Quarks

3. Generation

Quarks

Elektrisch geladene Leptonen

Elektrisch neutrale Leptonen

stark, elektromagnetisch (Photon)

schwach, elektromagnetisch ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ) (Gluonen)

Übersicht über die Bausteinteilchen der Materie

# 3. Astro-/Teilchenphysik im Unterricht

- ▶ Unterrichtsmaterialien 2014/15 mit Joachim Herz Stiftung



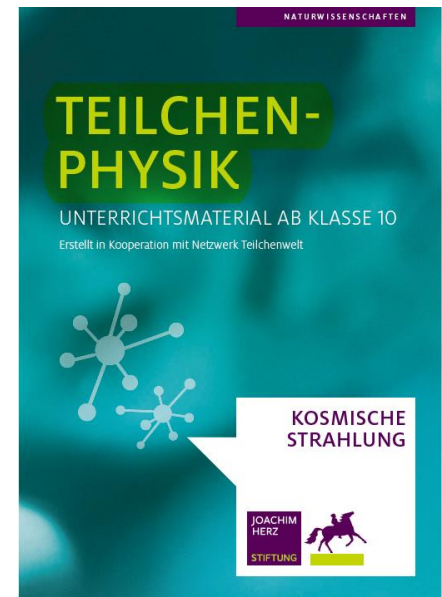
- ▶ Fachtexte, Aufgaben und Lösungen, Arbeitsblätter, Anknüpfungspunkte an den Lehrplan, Vorkenntnisse, Lernziele, methodische Hinweise, fachliche Hinweise

- ▶ Vier Bände

- Teil 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen
- Teil 2: Forschungsmethoden der Teilchenphysik
- Teil 3: Kosmische Strahlung (erschienen)
- Teil 4: Mikrokurse (erschienen)

- ▶ Erscheinungsjahr: 2016

- [www.teilchenwelt.de/tp](http://www.teilchenwelt.de/tp) o. [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.de/tp)
- Online oder als Druckexemplar



# Didaktische Ziele

- ▶ Erklärungsvermögen der Physik
  - Wenige Prinzipien → erklären viele Phänomene
- ▶ Erarbeitung dieser Grundprinzipien
  - Vermeiden von Auswendiglernen
  - Einführung der essentiellen (auch theoretischen) Grundbegriffe
- ▶ Hilfe für Herausforderungen für Lehrkräfte
  - Anschluss an bisherige Begriffe
  - Änderungen der Vorstellungen / Modelle
  - Begrenzung der Mathematisierbarkeit
- ▶ Mehrwert
  - Erlernen von Einlassen auf völlig Neues
  - Einblick in „Physikalische Eleganz“
  - Faszination der Forschungsmethoden und Erkenntnisse



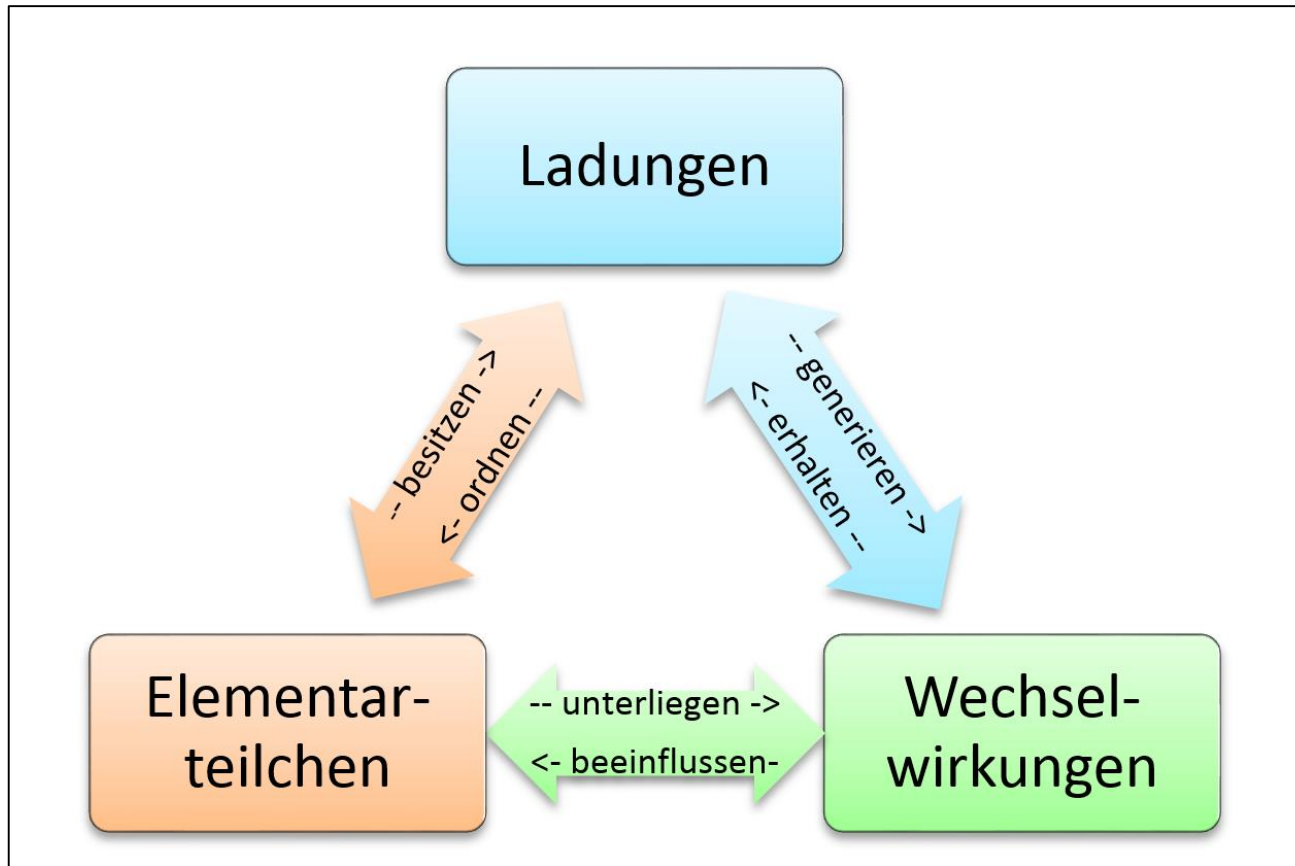
## Band 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen

- Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- Einführung in das Standardmodell über das Konzept von Ladungen und Wechselwirkungen
- Spiralcurriculum, didaktische und fachliche Hinweise
- Aufgabenblätter online

## Band 2: Forschungsmethoden

- Forschungsziele
- Beschleuniger
- Detektoren
- Zahlreiche Aufgaben

## ► Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Fußball-Analogie

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

## ▶ Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen??

- Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
- Warum es gerade diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)
- Das Standardmodell ist eine **Theorie der Wechselwirkungen!**

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	7 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
Quarks	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
Leptons	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson	
					Gauge bosons



# Basiskonzept Wechselwirkung

## Basiskonzept Wechselwirkung

= Kraft + Umwandlung + Erzeugung + Vernichtung

### ► Umfasst die Phänomene

- Kraft (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)

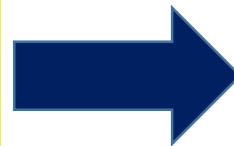
### ► Begriffe **Kraft** und **Wechselwirkung** sind klar zu trennen

### ► Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft (als Vektor) gemeint ist

# Reduktion

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

Hangabtriebskraft,  
Wasserkraft,  
Motorkraft,  
Radiowellen,  
Reibungskraft,  
Muskelkraft,  
Radioaktive Umwandlung,  
Kernfusion  
...

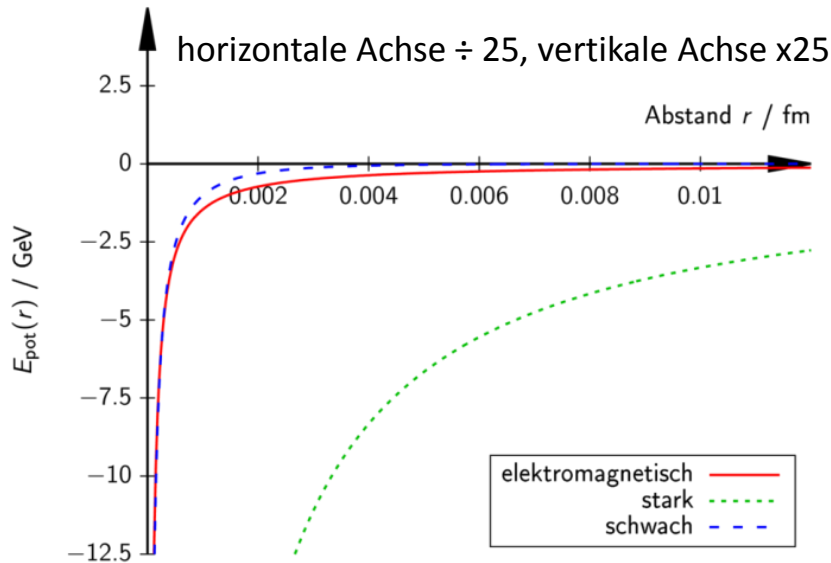
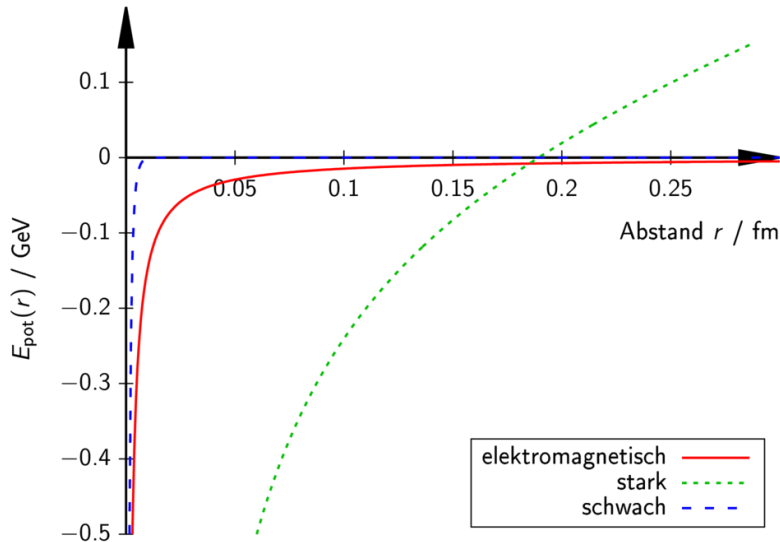


**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

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

- ▶ Schrittweise Einführung der Notwendigkeit:
  - Bekannt: Gravitation und Elektromagnetismus
  - Stabilität der Kerne -> Starke WW
  - Kernumwandlungen -> Schwache WW

# Suche nach Gemeinsamkeiten



## ► Potenzielle Energie außerhalb Kernen ( $\sim$ fm)

- alle unterschiedlich
- Charakteristische Längen
  - **elmagnetisch: keine**
  - **stark: 0,2 fm**
  - **schwach: 0,002 fm**

## ► Potenzielle Energie für sehr kleine Abstände ( $\ll$ fm)

- alle ähnlich
  - $1/r$  – Verhalten
  - Stärkeparameter  $\alpha$
  - Ladungsprodukt

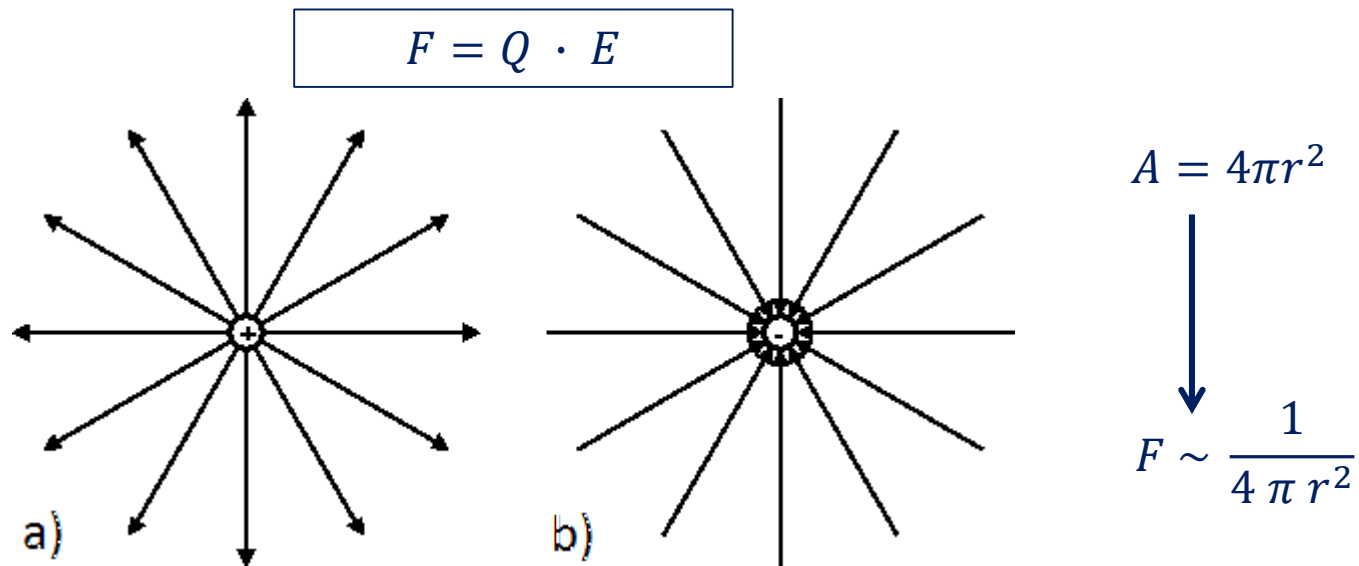
$$E_{\text{Pot}}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

$$E_{\text{Pot}}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r} + k \cdot r$$

$$E_{\text{Pot}}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$$

# Geometrische Betrachtung

- ▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW  
die **Dichte** der Feldlinien  
ist **proportional** zur **Stärke** der Kraft



- ▶  $\sim \frac{1}{r^2}$  ist Eigenschaft des 3-dim Raumes !
- ▶ In n-dim Raum würden Kräfte  $\sim \frac{1}{r^{n-1}}$  abfallen

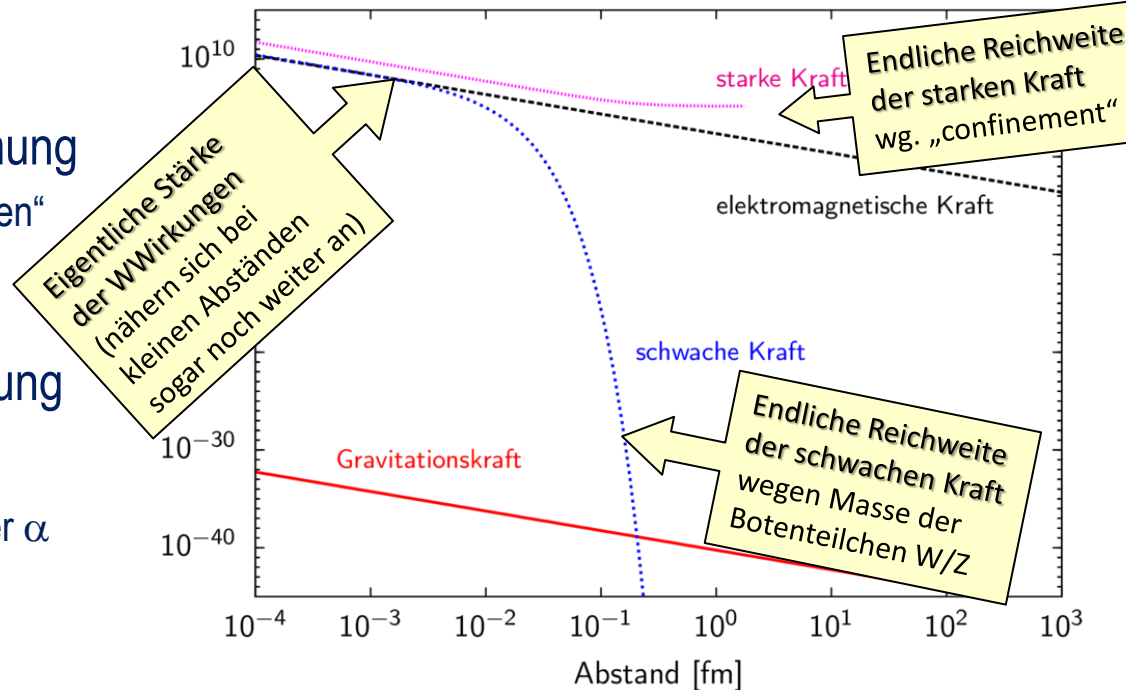
# Wechsel des Beobachter-Standpunkts

## ► Makroskopische Wahrnehmung

- Kleine Reichweiten „verstecken“ WWirkungen im Alltag

## ► Mikroskopische Wahrnehmung

- Alle Kräfte  $F \sim \frac{1}{r^2}$
- Ähnliche Kopplungsparameter  $\alpha$ 
  - Ausnahme: Gravitation

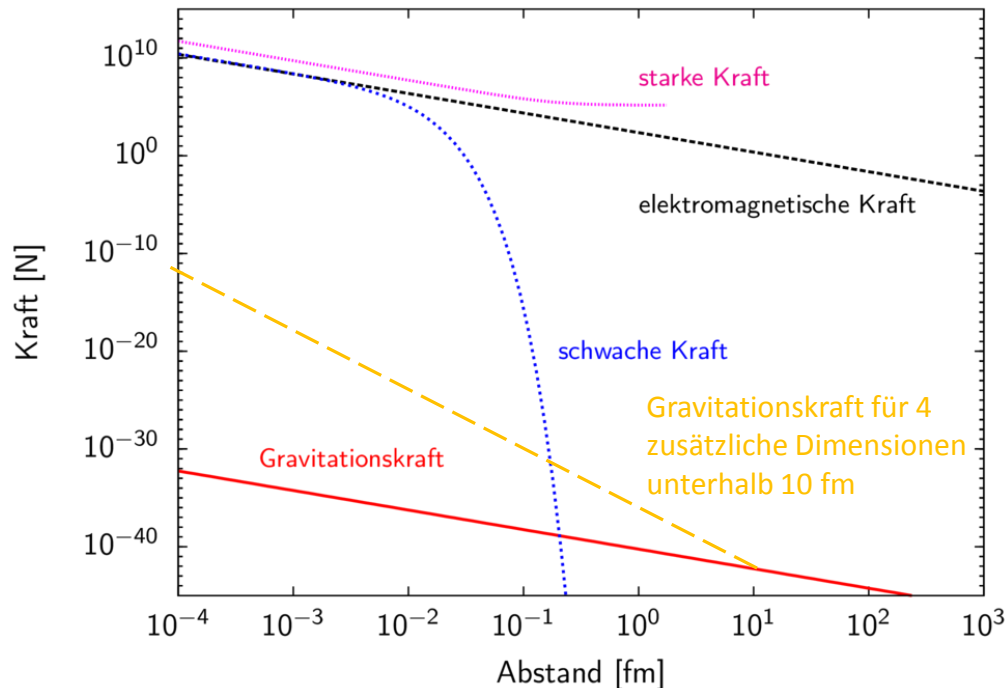
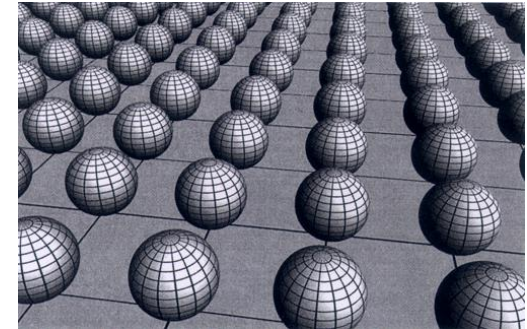


Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

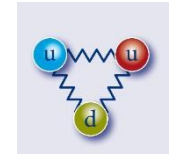
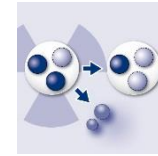
# Offene Forschungsfragen

## ► Zusätzliche Dimensionen für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“

- Bild rechts: 2 „große“ + 2 „kleine“ Dimensionen
- Bild unten: 3 „große“ + 4 „kleine“ Dimensionen (offen nur für Feldlinien/Botenteilchen der Gravitation)



# Basiskonzept Ladung



- ▶ Zu **jeder** Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladung ist eine charakteristische Teilcheneigenschaft

- ▶ Bekannt:

Elektrische Ladung

- ▶ Neu:

Schwache Ladung

Starke (Farb-)Ladung

elektrische Ladungszahl

$q$

schwache Ladungszahl

$I$

starker Farbladungsvektor

$\vec{C}$

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv und negativ sein

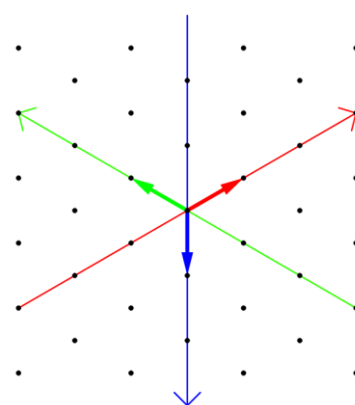
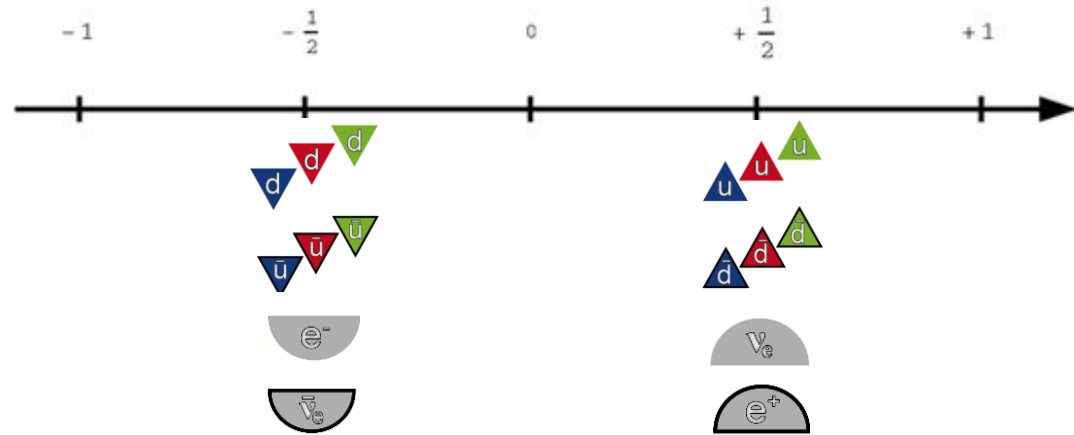
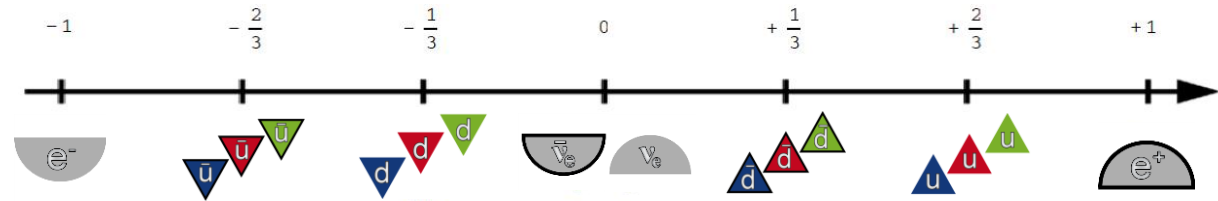
# Übersichten (Ladungen der Bausteine)

▶ elektrisch

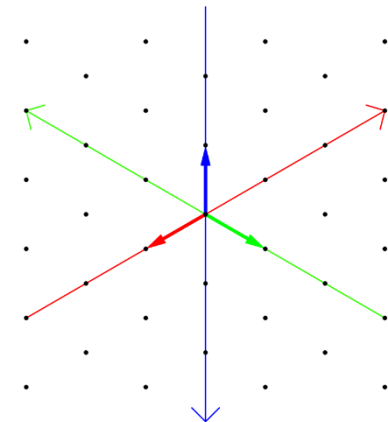
▶ Schwach

▶ Stark

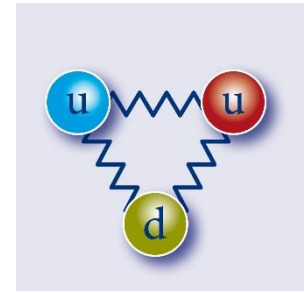
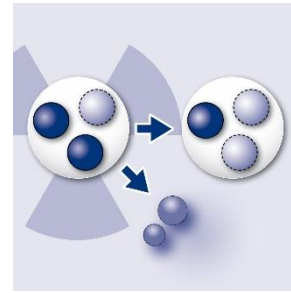
■ Quarks



Anti-Quarks







- ▶ Alle drei Ladungen sind additiv

Beispiel: Ladungszahlen eines Protons  $p(u, u, d)$

- Elektrische Ladungszahl:

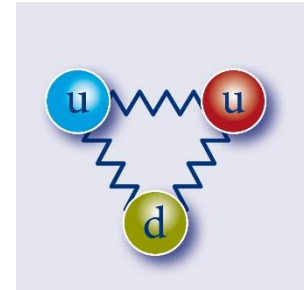
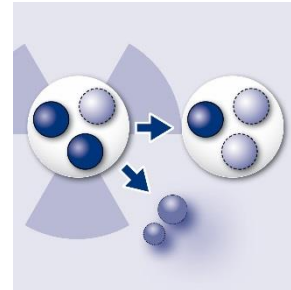
$$q_p = q_u + q_u + q_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

$$I_p = I_u + I_u + I_d = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = +\frac{1}{2}$$

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \vec{e}_1 + \vec{e}_2 + \vec{e}_3 = \vec{0}$$



► Alle drei Ladungen sind erhalten

- Zusammen mit Energie- und Impulserhaltung erlaubt die Ladungserhaltung eine eindeutige Vorhersage, ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind

Beispiel:  $\beta$ -Umwandlung  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- Elektrische Ladungszahl:

$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- Schwache Ladungszahl:

$$-\frac{1}{2} \rightarrow +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -\frac{1}{2}$$

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{0} \rightarrow \vec{0} + \vec{0} + \vec{0} = \vec{0}$$

# Basiskonzept Elementarteilchen

- ▶ Teilchen lassen sich nach ihren Ladungen ordnen

	1. Generation	$l$	$q$	$\bar{c}$
elektrisch neutrale Leptonen	$\bar{\nu}_e$	$+\frac{1}{2}$	0	$\bar{0}$
.....				
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\bar{0}$
.....				
Quarks	$u$ $\bar{u}$ $u$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\nwarrow$
	$d$ $\bar{d}$ $d$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\nwarrow$

starke Wechselwirkung  
elektromagnetische Wechselwirkung  
schwache Wechselwirkung

	1. Generation	$l$	$q$	$\bar{c}$
Quarks	schwache Wechselwirkung elektrische Wechselwirkung starke Wechselwirkung			
	$\bar{d}$ $\bar{d}$ $\bar{d}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	antiblau $\uparrow$ antirot $\nwarrow$ antigrün $\swarrow$
	$\bar{u}$ $\bar{u}$ $\bar{u}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	antiblau $\uparrow$ antirot $\nwarrow$ antigrün $\swarrow$
.....				
elektrisch geladene Leptonen	$e^+$	$+\frac{1}{2}$	+1	$\bar{0}$
.....				
elektrisch neutrale Leptonen	$\bar{\nu}_e$	$-\frac{1}{2}$	0	$\bar{0}$

- ▶ Entdeckung weiterer Teilchen

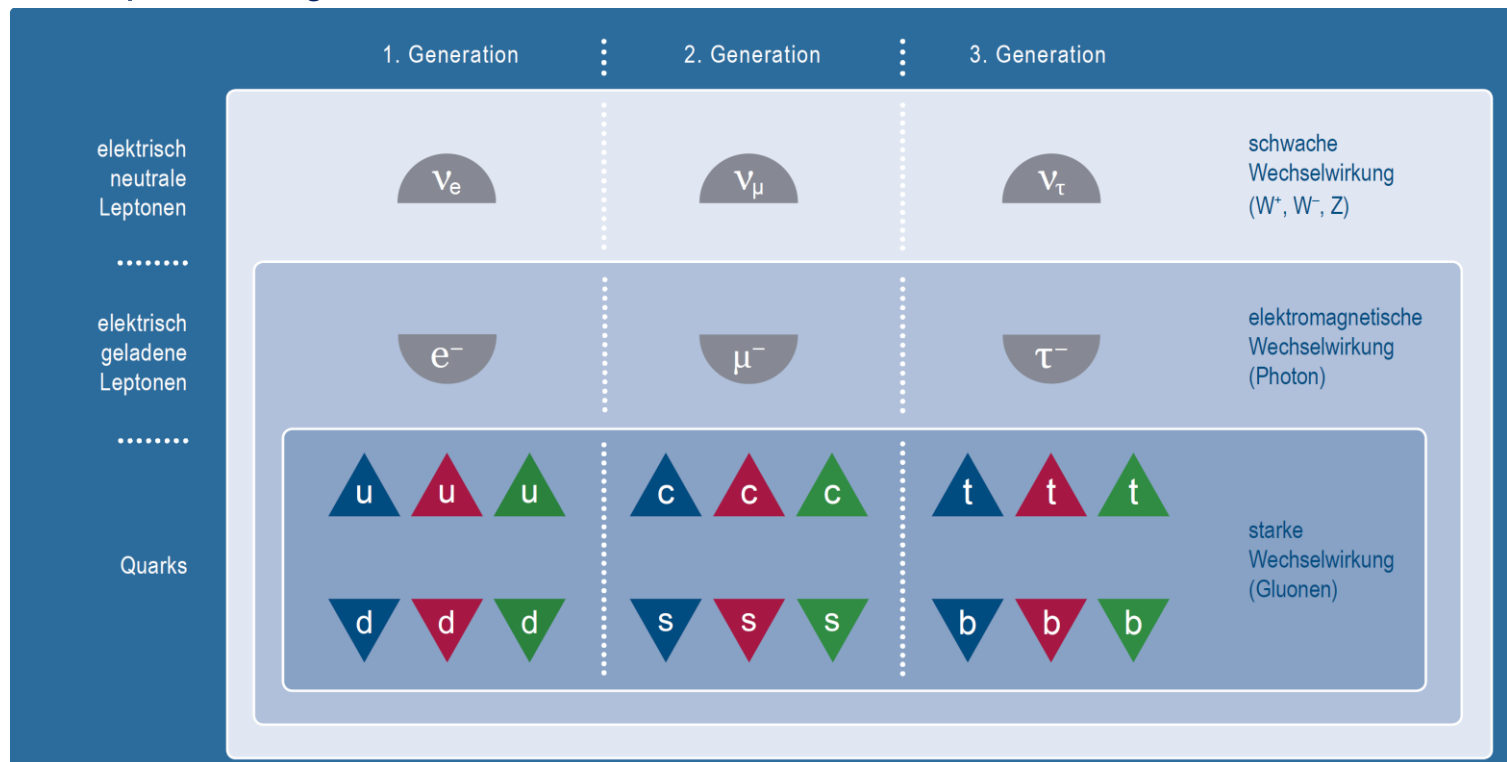
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos

- Von jedem der leichten Materieteilchen ( $u, d, e^-, \nu_e$ ) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.

# Anordnung von Teilchen in Generationen

## ► Entdeckung weiterer Teilchen

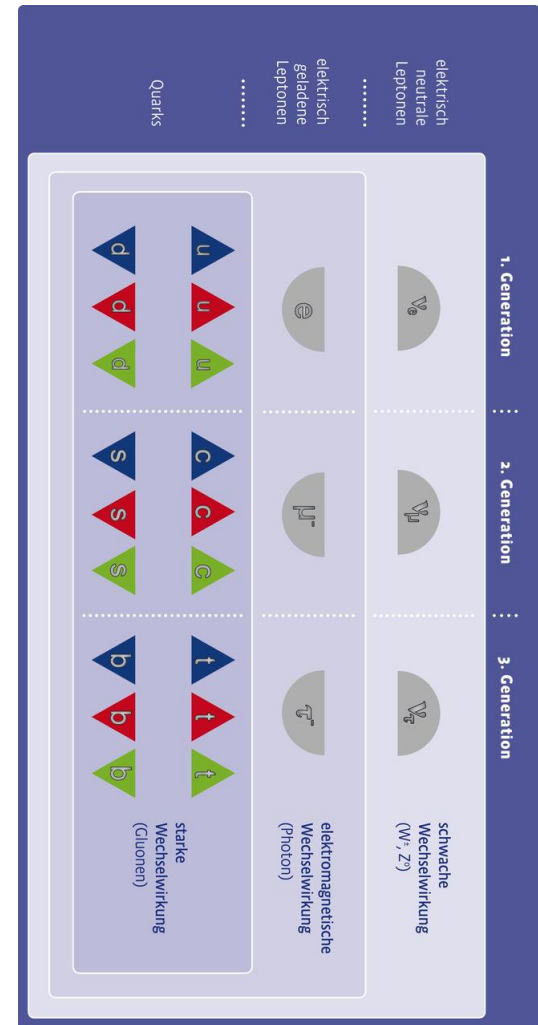
- ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
- Von jedem der leichten Materieteilchen ( $u, d, e^-, \nu_e$ ) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.



# Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

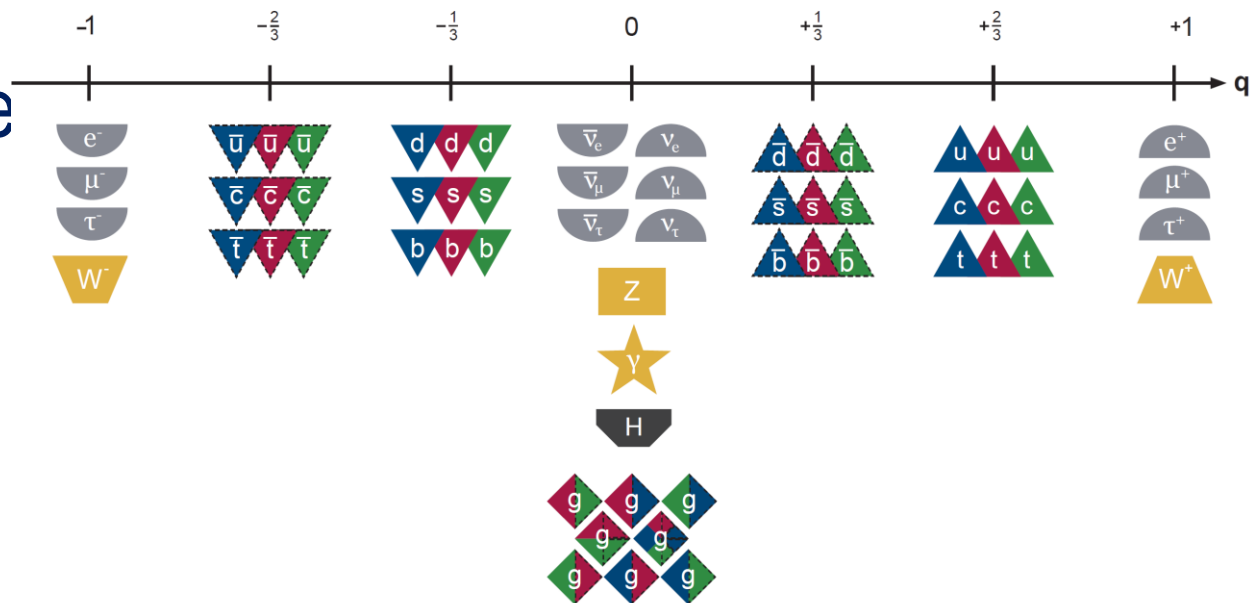
1A																	2A		
1																	2		
1	H																	He	
2A	3A											4A	5A	6A	7A	8A			
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo	
* lanthanoid			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
** actinoid			89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
			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!)

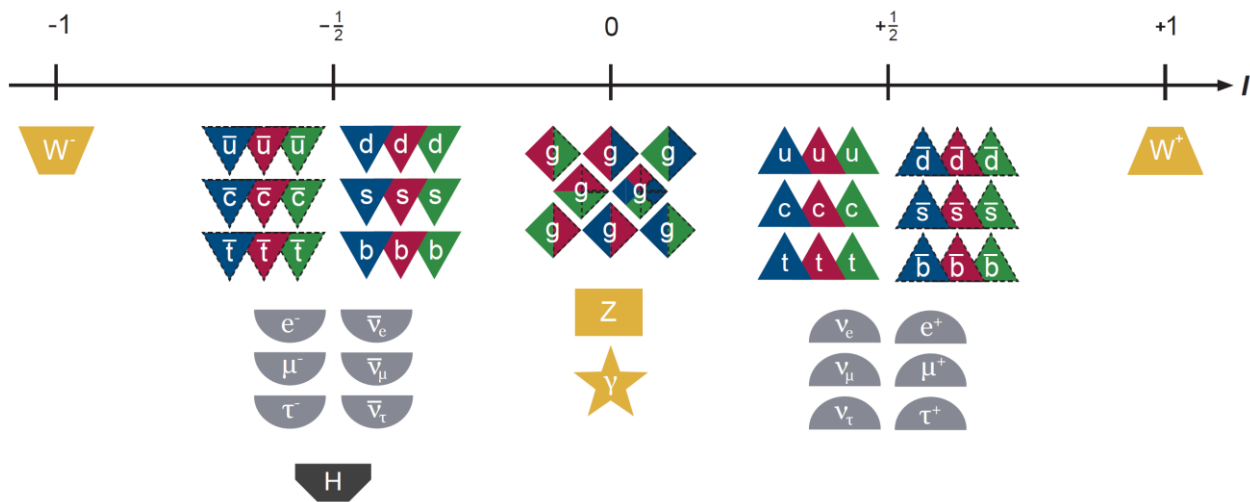


Späte

► q



► l



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

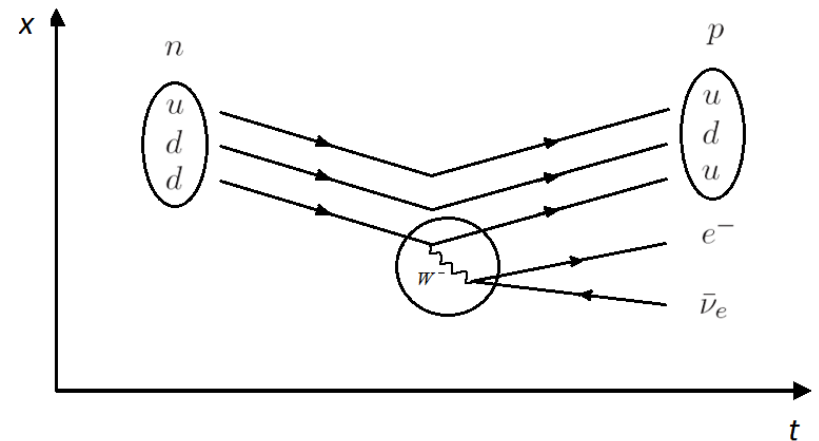
- Nur bestimmte Paare von Teilchen beteiligt
- Unterscheiden sich in schwacher Ladungszahl  $I$  und in elektrischer Ladungszahl  $q$  immer genau um Betrag 1
- Dupletts der schwachen Wechselwirkung

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

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

## ► Grund: Eigenschaften des $W^\pm$

$$\begin{pmatrix} I \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{pmatrix}$$

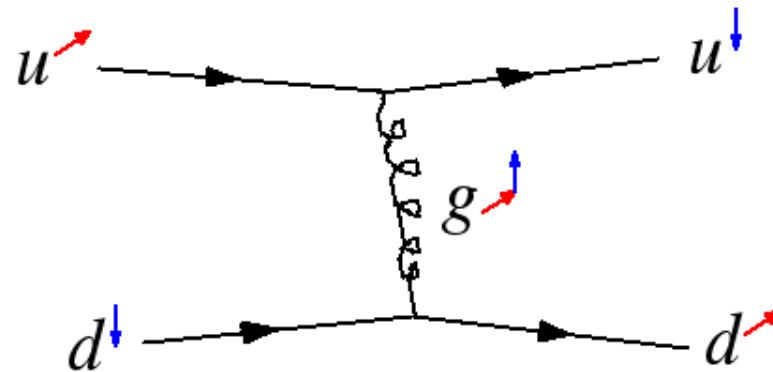


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Starke Wechselwirkung

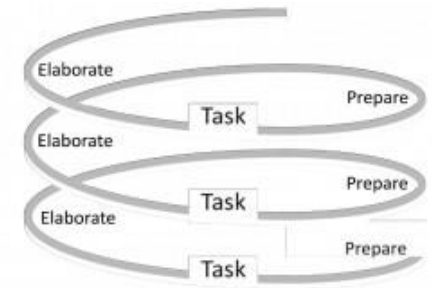
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:  
Quarks bilden Triplets bezüglich der starken Ladung

►  $(u \rightarrow u \rightarrow u)$



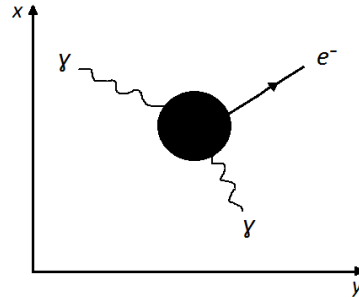


# Konzept Spiralkurriculum:

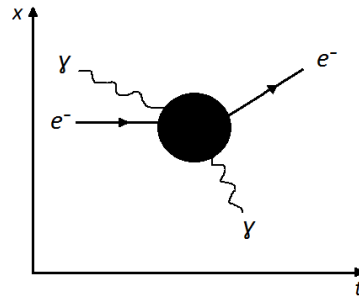


## ▶ Beispiel: Drei Stufen von Diagrammen

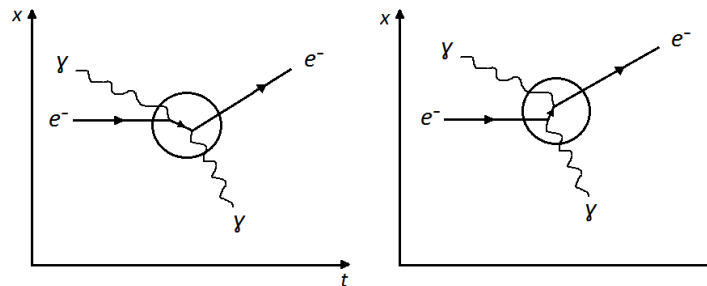
- Stufe 1: x-y



- Stufe 2: x-t ohne Feynman- Diagramme



- Stufe 3: x-t mit Feynman- Diagrammen



# Band 2: Forschungsmethoden

## ► Beschleuniger als Mikroskop: Strukturauflösungen

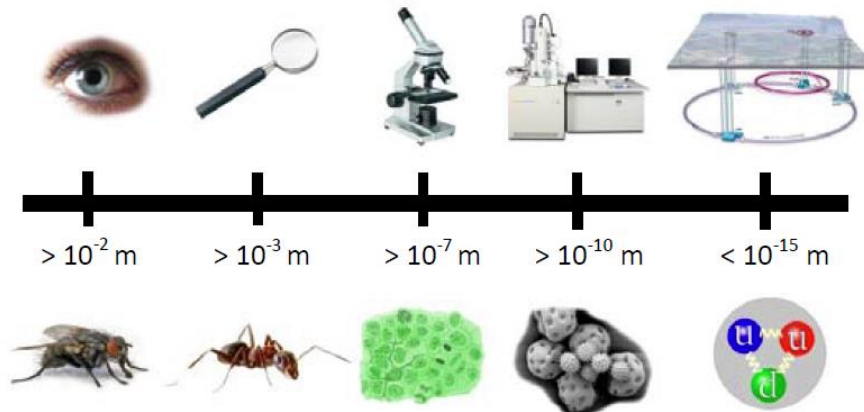


Abbildung 2: Messinstrumente und damit beobachtbare Objekte

## ► Sehr gut anbindbar über E- und B-Felder

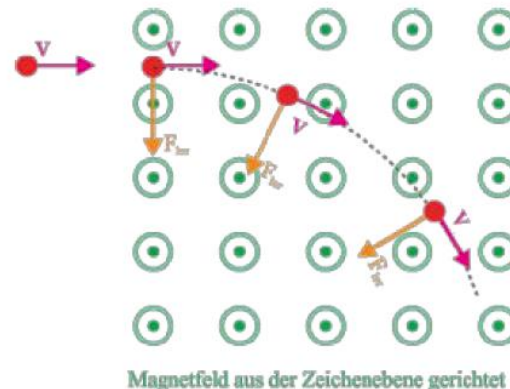
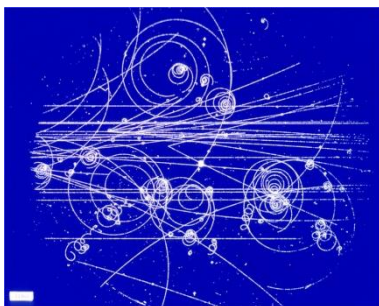


Abbildung 7: Wirkung der Lorentzkraft auf ein sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegendes positiv elektrisch geladenes Teilchen in einem homogenen Magnetfeld  
(modifizierte Abbildung von [http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/g8\\_2011\\_ph11\\_1\\_05\\_spezrelatheorie\\_auf.gif](http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/g8_2011_ph11_1_05_spezrelatheorie_auf.gif))

# Detektoren

## Bildgebend

z.B.: Nebelkammer, Blasenkammer

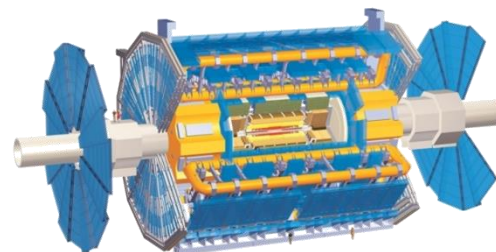


▶ sichtbare Teilchenspuren

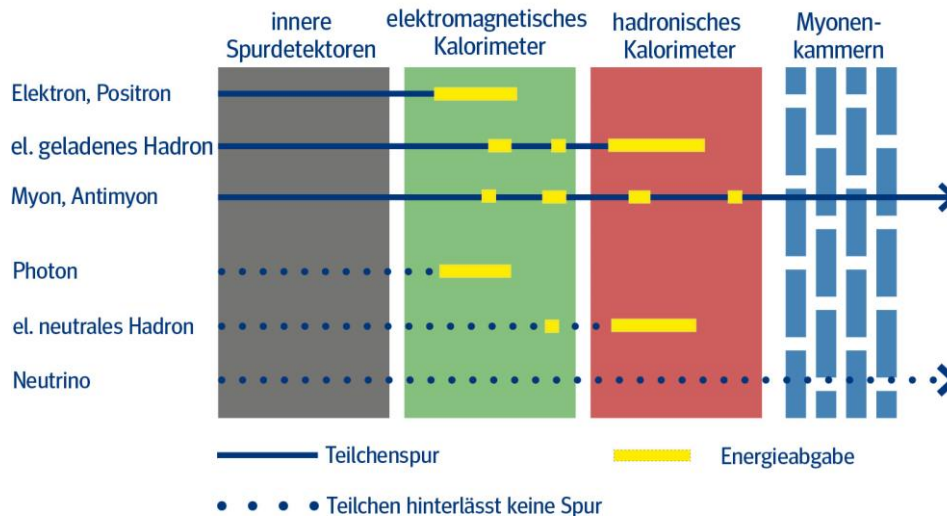
▶ Teilchenidentifikation durch Mustererkennung

## Elektronisch

z.B: **ATLAS**-Detektor, Geigerzähler



▶ elektrische Signale



# TEILCHENPHYSIK

UNTERRICHTSMATERIAL AB KLASSE 10  
Erstellt in Kooperation mit Netzwerk Teilchenwelt

KOSMISCHE STRAHLUNG



# Band 3: Kosmische Strahlung

- 32 Seiten
- Fokus: Untersuchung von Myonen
- Hintergrundinfos für Lehrkräfte
- Fachtext für Schüler/innen
- Aktivitäten, Aufgaben und Lösungen

## 2 INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE

### 2.1 INHALTLICHE ANKÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN

Die Kernphysik (speziell die Myonen) ist ein zentraler Bestandteil der Teilchenphysik und der Kosmischen Strahlung. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

### 2.2 WISSENSINISSE

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:

- Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur.
- Die Myonen sind ein Beispiel für die Messung ihrer Eigenschaften in der Teilchenphysik.

### 2.3 LEHRZIELE

Die Schüler/innen sollen die folgenden Ziele erreichen:

- Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur.
- Die Myonen sind ein Beispiel für die Messung ihrer Eigenschaften in der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

### 3.3 WOHER KOMMEN DIE MYONEN?

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.



Abb. 10: Myonenentstehung

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

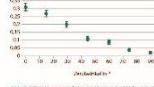


Abb. 11: Myonenfluss

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

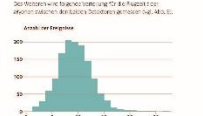


Abb. 12: Myonenfluss

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

## AUFGABEN

### 1 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

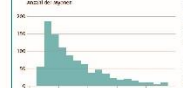


Abb. 13: Myonenlebensdauer

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

### 2 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

# Nebelkammern (auch zum Selbstbau)

- ▶ Teilchen in unserer Umgebung
- ▶ Selbst messbar



Abb. 1 Blick in eine Nebelkammer  
(Quelle: Universität Göttingen, Markus Osterhoff)

Es lassen sich verschiedene Teilchenspuren identifizieren:



Abb. 2 Nebelkammerspuren von Alpha-Teilchen (links), Protonen (Mitte) und Elektronen (rechts). (Quelle: KIT)

# Eigene Datenaufnahme und Auswertungen

## ► Winkelverteilung

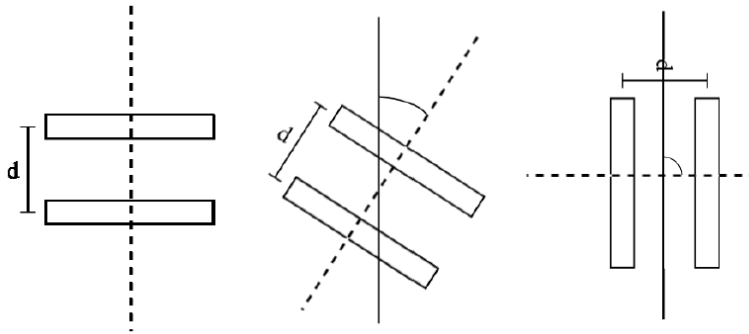


Abb. 5 Winkelmessung: Die beiden Detektoren werden zur (durchgezogene Linie) verkippt. Die gestrichelte Linie zeigt die Richtung gemessenen Myonen.

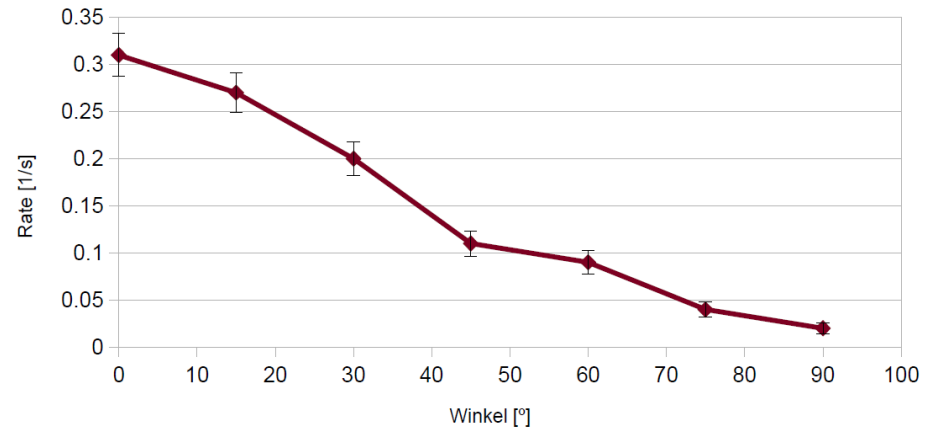


Abb. 6 Winkelmessung: Rate der Myonen in Abhängigkeit des Zenitwinkels.

## ► Lebensdauer

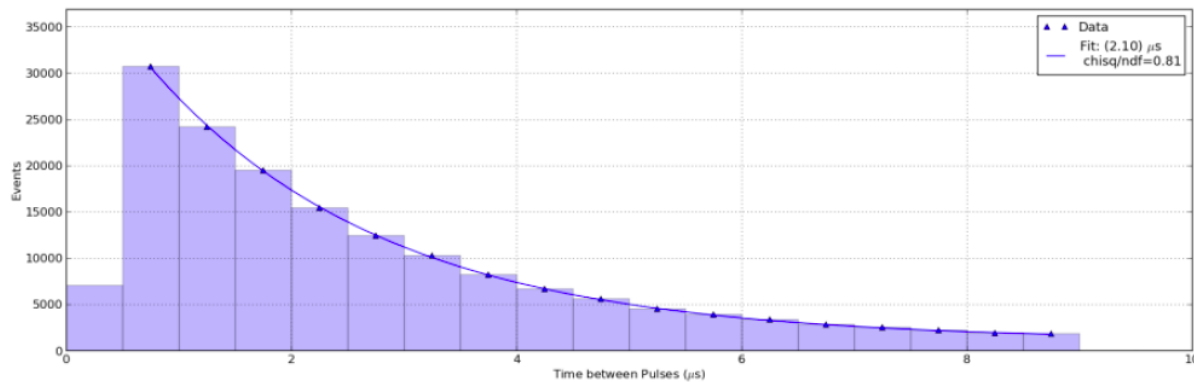


Abb. 10 Verteilung der Zeitunterschiede zwischen den zwei Pulsen mit Anzahl Myonen  $N(t)$  mit  $\Delta t = t_e - t_0$ .

# TEILCHEN- PHYSIK

UNTERRICHTSMATERIAL AB KLASSE 10  
Erstellt in Kooperation mit Netzwerk Teilchenwelt

## MIKROKURSE



# Band 4: Mikrokurse

- 28 Seiten
- 4 Kurse
- Zeitbedarf 1-2 Unterrichtsstunden
- Anknüpfung an klassische Lehrplanthemen, z.B. waagerechter Wurf mit Anti-Wasserstoff
- mit Aufgaben und Lösungen

## 2 DAS AEGIS EXPERIMENT

### 2.1 EINSATZMÖGLICHKEITEN / ANKNÜPFUNGSPUNKTE

Das AEGIS-Experiment wird häufig als Link zur Anknüpfung von Vorwissen, z.B. zur Erhaltung der Impulsenergie, genutzt. Es eignet sich für die Anknüpfung an klassische Themen der Mechanik, wie z.B. die Bewegungsgleichungen für einen Teilchenwurf. Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt. Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt.

Der Wurf des Anti-Wasserstoffs wird als Beispiel für die Erhaltung der Impulsenergie genutzt. Es eignet sich für die Anknüpfung an klassische Themen der Mechanik, wie z.B. die Bewegungsgleichungen für einen Teilchenwurf.

Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt. Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt.

### 2.2 WAAGERECHTER WURF MIT ANTI-WASSERSTOFF – DAS AEGIS-EXPERIMENT AM CERN

Das AEGIS-Experiment am CERN ist ein Experiment zur Erzeugung und Messung von Anti-Wasserstoff. Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt.

**INFOBOX: AEGIS EXPERIMENT**  
Auffällige Informationen zum AEGIS-Experiment findet man auf der Website von AEGIS (<http://aegis.web.cern.ch/aegis/>) und der Website des CERN (<http://www.cern.ch/>).  
Quelle: <http://www.cern.ch/press/2005/05/050505a.html>

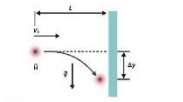


Abb. 1: Vertikale Ablenkung des AEGIS-Experimentes

Die Ablenkung des Teilchens wird durch die Lorentzkraft verursacht. Die Lorentzkraft ist eine Kraft, die auf ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld wirkt. Die Lorentzkraft ist eine Kraft, die auf ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld wirkt.

Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt. Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt.

### INFOBOX: ANTITEILCHEN

Zu jedem Materieteilchen existiert ein Antiteilchen, das sich ähnlich verhält, aber jeweils genau die entgegengesetzten Ladung und andere Eigenschaften besitzt. Ein Teilchen und sein Antiteilchen können durch die Bildung eines Teilchen-Antiteilchen-Paares entstehen. Ein Teilchen und sein Antiteilchen können durch die Bildung eines Teilchen-Antiteilchen-Paares entstehen.

## AUFGABEN

1. Berechnung der Ablenkung des Teilchens durch das Magnetfeld. Die Ablenkung des Teilchens durch das Magnetfeld wird durch die Lorentzkraft verursacht. Die Lorentzkraft ist eine Kraft, die auf ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld wirkt.
2. Berechnung der Zeitdauer, die das Teilchen benötigt, um die Ablenkungshöhe  $\Delta y$  zu erreichen. Die Zeitdauer, die das Teilchen benötigt, um die Ablenkungshöhe  $\Delta y$  zu erreichen, wird durch die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmt.
3. Berechnung der Ablenkung des Teilchens durch das Magnetfeld. Die Ablenkung des Teilchens durch das Magnetfeld wird durch die Lorentzkraft verursacht. Die Lorentzkraft ist eine Kraft, die auf ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld wirkt.
4. Berechnung der Zeitdauer, die das Teilchen benötigt, um die Ablenkungshöhe  $\Delta y$  zu erreichen. Die Zeitdauer, die das Teilchen benötigt, um die Ablenkungshöhe  $\Delta y$  zu erreichen, wird durch die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmt.

### PROBLEMLÖSUNGSPHASE

Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt. Die Aufgabenstellung ist so gestaltet, dass sie sich gut in den Kontext eines Projekts einfügen lässt.

- ▶ Beispiel: Horizontaler Wurf von Anti-Wasserstoff Atomen

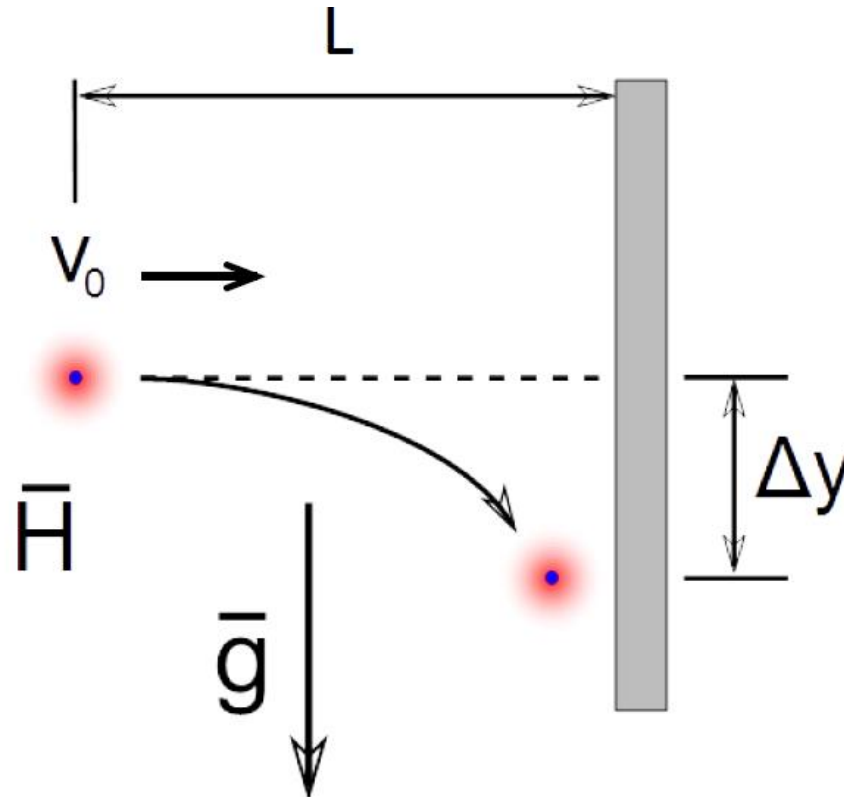


Abbildung 1: Schematisches Messprinzip des AEGIS Experiments

(Abbildung modifiziert; Quelle: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik/lb/musteraufgaben-aegis-experiment>)



# Unsere Wünsche / Ziele

- ▶ Vermittlung der \*wirklichen\* Forschungserkenntnisse
  - Übergreifende Zusammenhänge
  - Kein Auswendiglernen von Teilchen
- ▶ Standards der Begriffsbildung
  - Ladungen und Wechselwirkungen als zentrale Begriffe
  - Klärung von verbreiteten Irrtümern
- ▶ Anschlussfähigkeit in Schulen
  - Potenzielle Energien
  - Feldlinien, ...
- ▶ Möglichst breite Verwendung in Fortbildungen
  - Erste Tests:  
DESY/Zeuthen 26.2, Bensberg, NRW, 9.3., Dresden 12.3, CERN 21.-23.3
  - Ab 2017: Vorauss. viele Fortbildungen in D mit Hans-Riegel Stiftung