

Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht

Fachvortrag



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Moritz Springer
Bonn | 21./22.09.2020



NETZWERK
TEILCHENWELT

Elementarteilchenphysik im neuen Rahmenlehrplan in NRW

Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik Das Inhaltsfeld *Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik* beinhaltet den Aufbau des Atoms, seiner Hülle und seines Kerns sowie den **Aufbau der Materie im Kleinsten nach dem sogenannten Standardmodell**. Inhalte sind außerdem ionisierende Strahlung und radioaktiver Zerfall von Atomkernen sowie Kernumwandlungen durch Kernspaltung und Kernfusion. Die Behandlung von Atom- und Kernphysik bietet einerseits einen Einblick in den Aufbau der Materie unter dem Aspekt des Wandels historischer Atommodelle und liefert andererseits Entscheidungsgrundlagen für die Einschätzung des Für und Wider im Umgang mit ionisierender Strahlung und der Nutzung von Kernenergie.

Quelle: http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf, 15.02.2016

Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik

Inhaltliche Schwerpunkte	Mögliche Kontexte
<p>Atomaufbau</p> <p>Ionisierende Strahlung</p> <p>Radioaktiver Zerfall</p> <p>Kernspaltung und Kernfusion</p> <p>Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen</p>	<p>Geschichte der Atommodelle</p> <p>Lichtquellen und ihr Licht</p> <p>Physik in der Medizin (Bildgebende Verfahren, Radiologie)</p> <p>(Erdgeschichtliche) Altersbestimmungen</p> <p>Energiegewinnung durch nukleare Prozesse</p> <p>Forschung an Teilchenbeschleunigern</p>
<p>Basiskonzept Wechselwirkung</p>	<p>Kernkräfte</p> <p>Kettenreaktion</p> <p>Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen</p> <p>Konzept der Austauschteilchen vs. Feldkonzept</p>
<p>Basiskonzept Energie</p>	<p>Linienpektren</p> <p>Energiequantelung der Hüllelektronen</p> <p>Dosimetrie</p> <p>Bindungsenergie</p> <p>Äquivalenz von Masse und Energie</p>
<p>Basiskonzept Struktur der Materie</p>	<p>Kern-Hülle-Modell</p> <p>Bohr'sche Postulate</p> <p>Strahlungsarten</p> <p>Zerfallsprozesse</p> <p>Massendefekt</p> <p>Kernbausteine und Elementarteilchen</p>

Quelle: http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOST_Physik.pdf, 15.02.2016



**FOLGENDE BÄNDE
SIND VERFÜGBAR:**

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen
und Teilchen

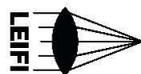


**KOSTENFREI
ERHÄLTlich!**

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@leifiphysik.de angefordert oder unter www.leifiphysik.de/tp heruntergeladen werden.



PHYSIK



NETZWERK
TEILCHENWELT



Band 1: Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

- ▶ Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- ▶ Einführung in das Standardmodell
- ▶ Spiralcurriculum, didaktische und fachliche Hinweise
- ▶ Aufgabenblätter bald online
 - Werden hier teilweise eingesetzt

Was ist Physik?

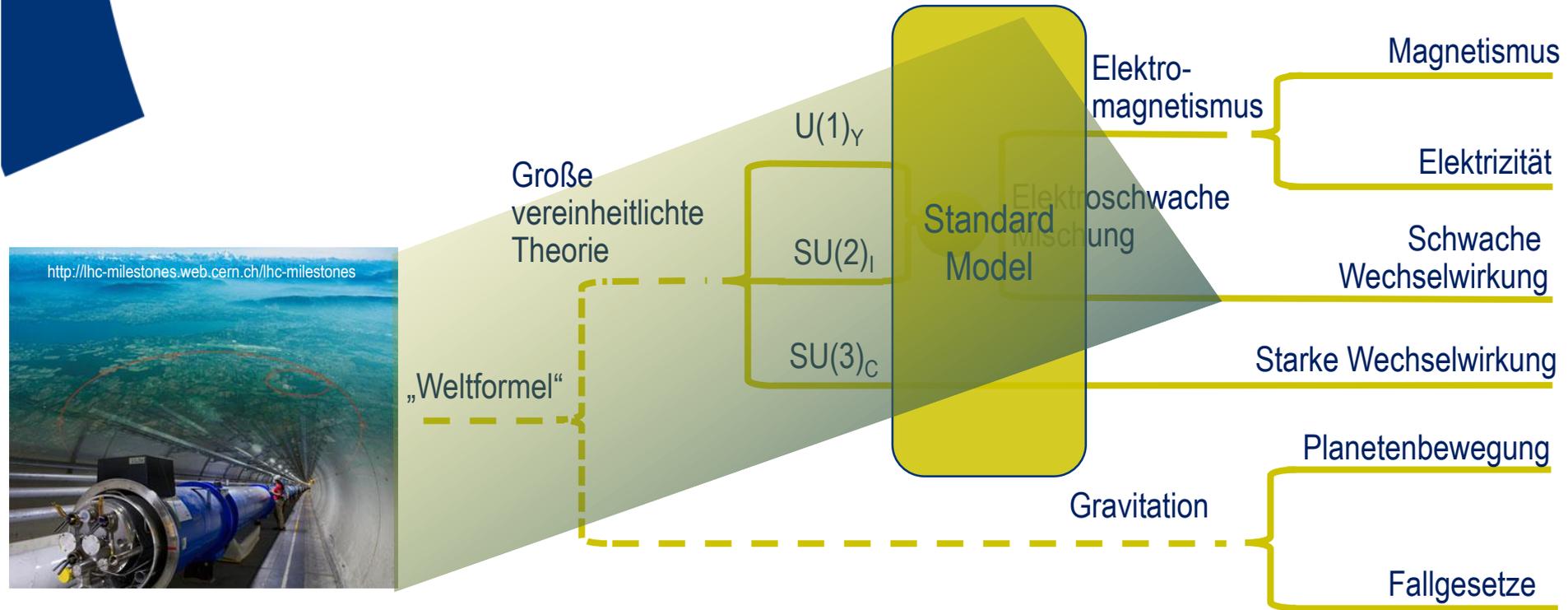
- ▶ Physik versucht die Wirklichkeit / Welt zu beschreiben
- ▶ Am Besten: Möglichst einfach



Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung von Raum und Zeit zur *Raumzeit* und von Masse und Energie ($E = mc^2$) durch A. Einstein

Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



Vereinheitlichungen

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

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



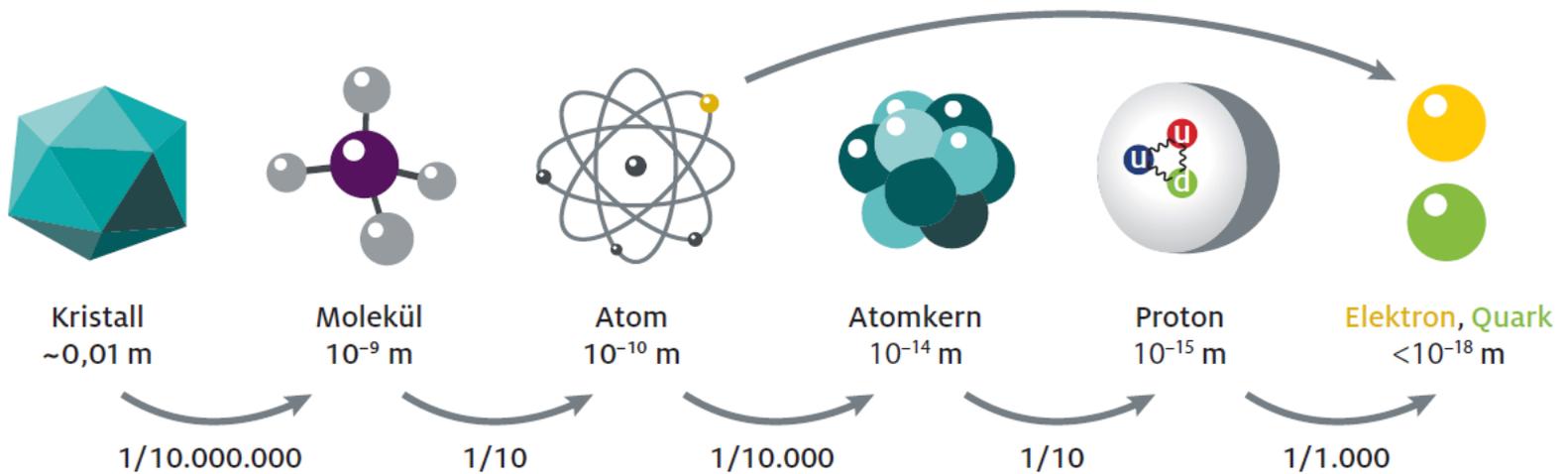
**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**

Das Standardmodell der Teilchenphysik

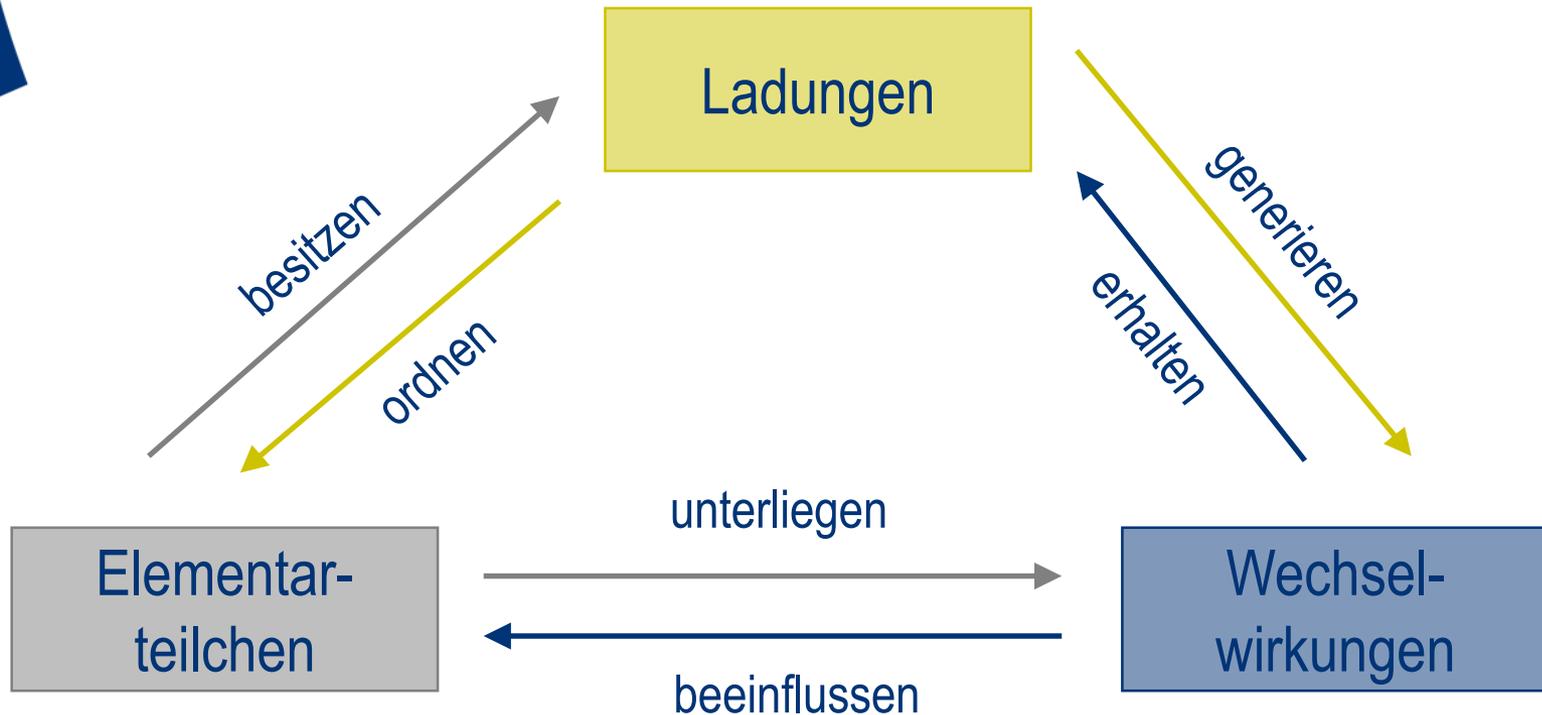
► Das Standardmodell

- 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 und bestätigt

Einschub: Größenordnungen



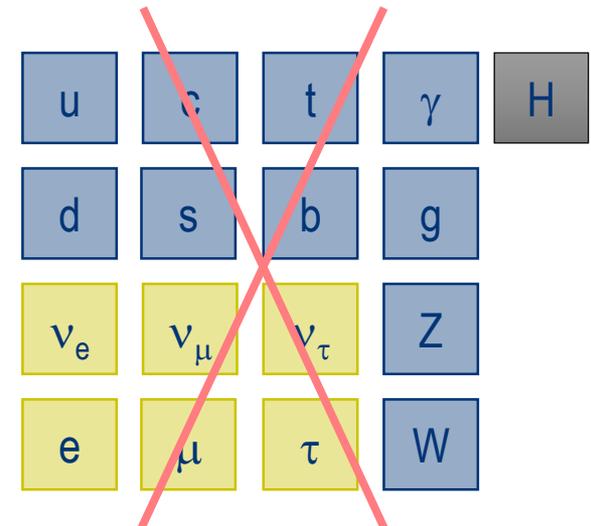
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



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 genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)

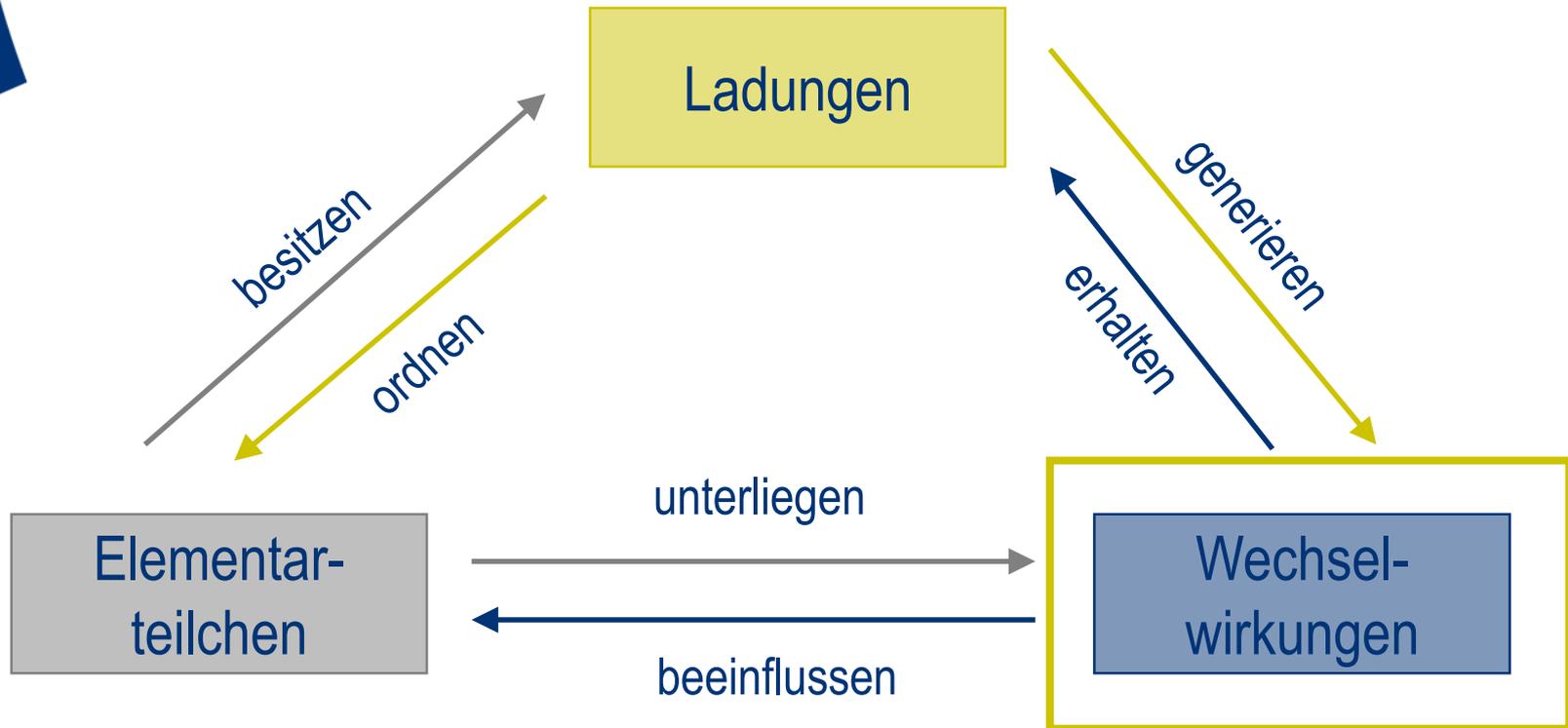


Das Standardmodell der Teilchenphysik

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

u	c	t	γ	H
d	s	b	g	
ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	
e	μ	τ	W	

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Basiskonzept: Wechselwirkung

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

► Umfasst die Phänomene

- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. β -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

Vereinheitlichungen

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

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



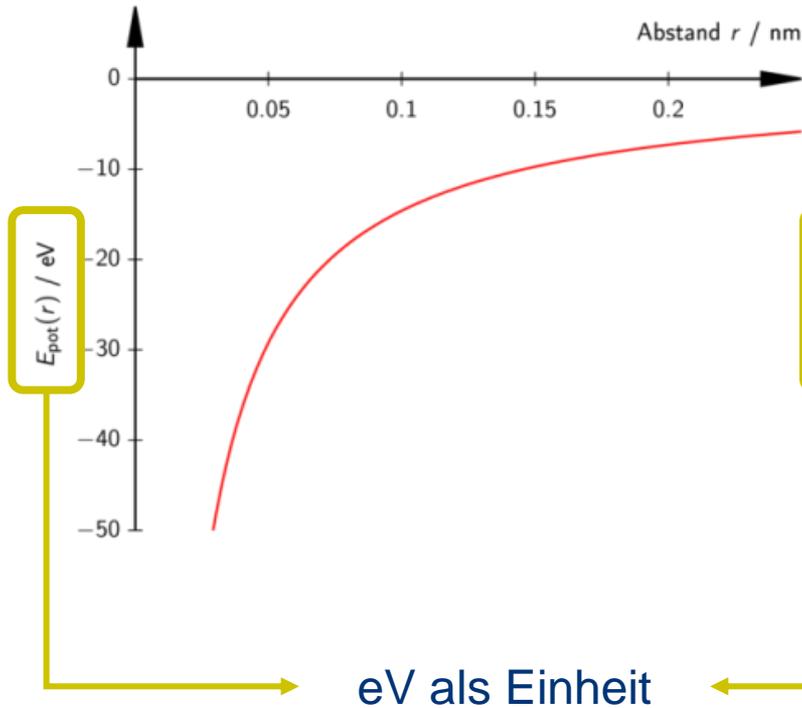
**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**



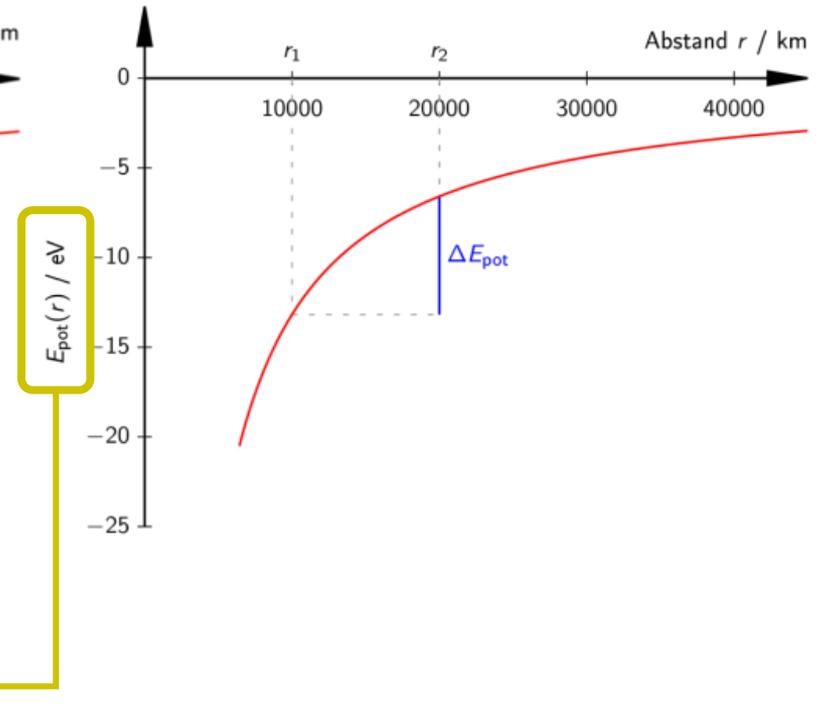
**Standardmodell
(ohne Gravitation)**

Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



► Gravitation (O_2 und Erde)



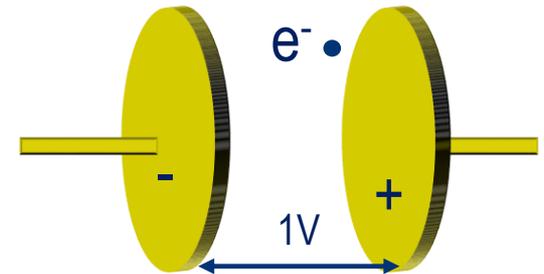
Einschub: Elektronenvolt

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

- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$
- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
- $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

▶ Wegen $E=mc^2$ können Massen in eV/c^2 angegeben werden! (c: Lichtgeschwindigkeit)

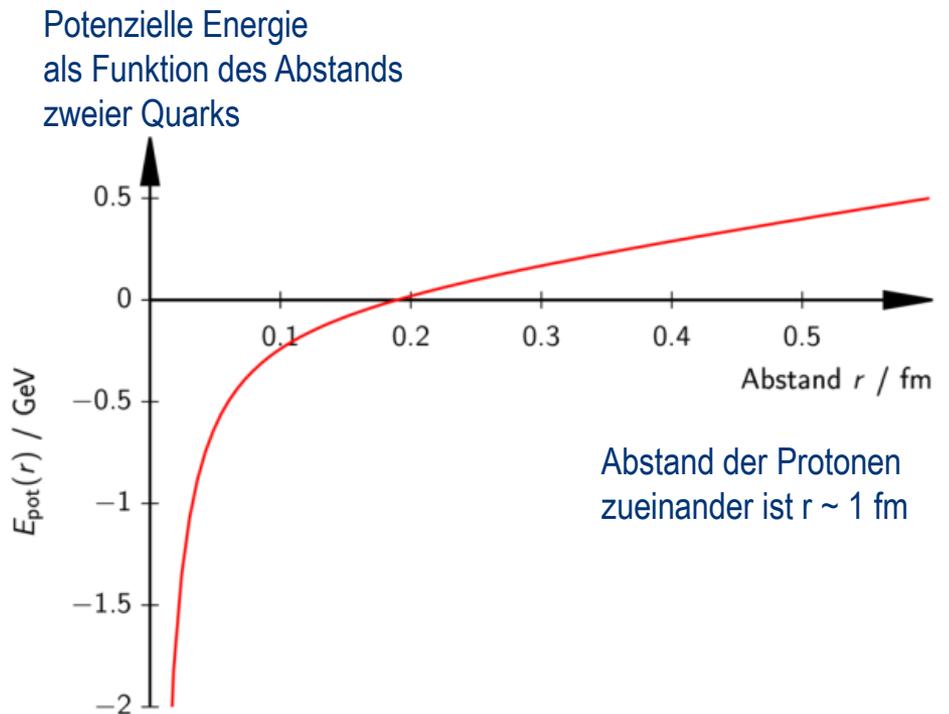
- Elektron $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Proton $938 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$
- Higgs-Teilchen $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$



Die Starke Wechselwirkung

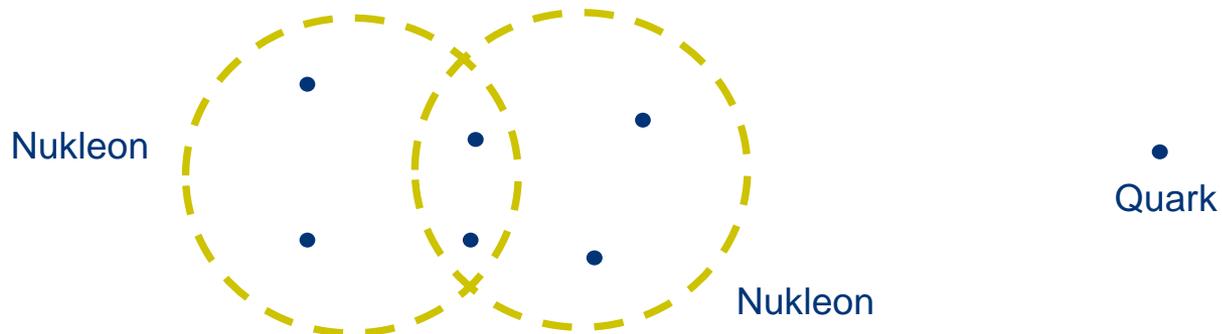
- ▶ Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

- ▶ **Substruktur:**
Nukleonen bestehen aus Quarks, die „neue“ starke Wechselwirkung spüren.
Kernkraft geht auf diese Substruktur zurück
(Ähnlich Molekül ↔ Atom)



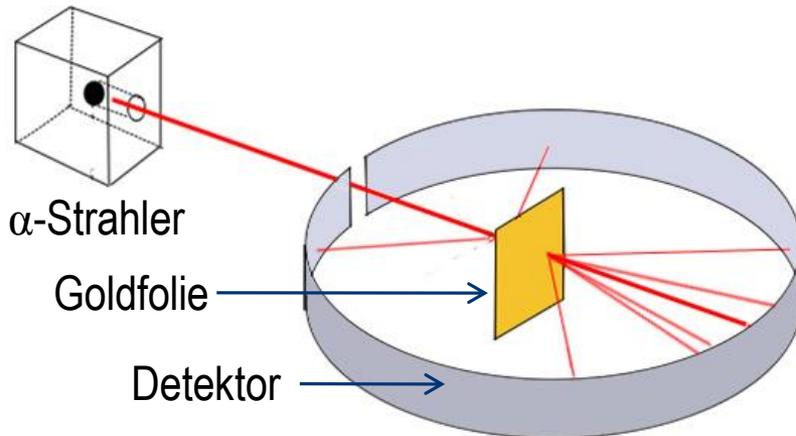
Bindung von Nukleonen

- ▶ Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen
 - Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar

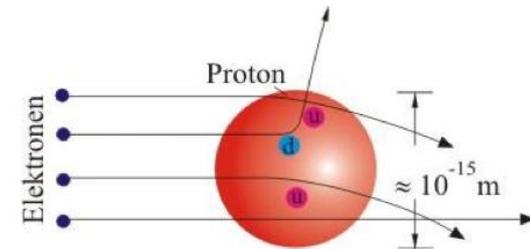


- Bessere Vorstellung: Nukleonengas
- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb. $q\bar{q}$ Zustände)

Einschub: Experimenteller Nachweis von Quarks



Rutherford-Streuexperiment (1911)
Streuung von α -Teilchen an Goldatomen
→ Entdeckung des Atomkern



Experiment am SLAC (1969)
Streuung von Elektronen an Protonen
→ Entdeckung der Quarks

Mehr zu Forschungsmethoden gibt es morgen!

Die Schwache Wechselwirkung

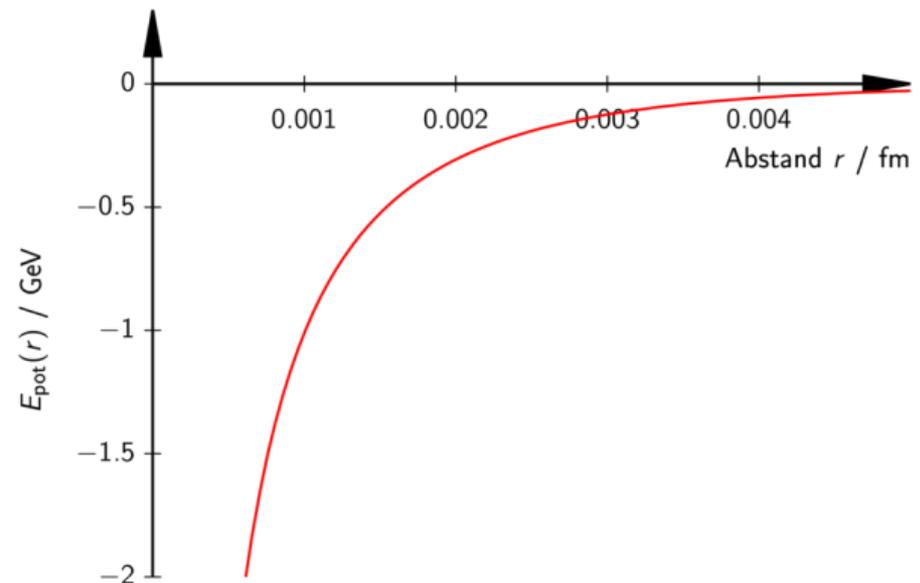
► Warum scheint die Sonne?

- 4 Protonen fusionieren zu ${}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$
- Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?

► Einführung:

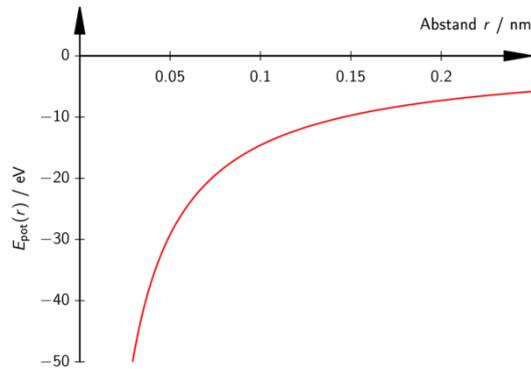
schwache Wechselwirkung
(z.B. Quarks der Nukleonen bei
 $r \sim 0.001 \text{ fm}$)

- z.B. β^+ -Umwandlung
 $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$

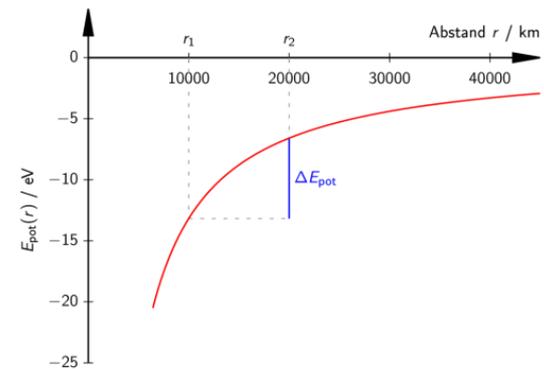


Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

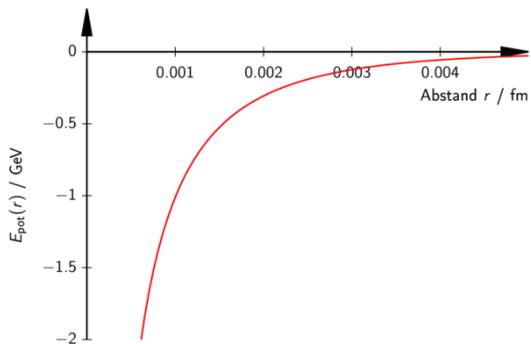
► Elektromagnetische WW



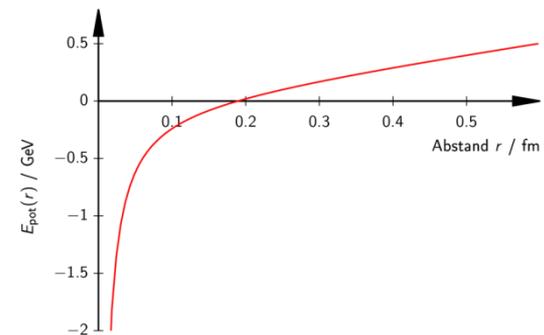
► Gravitation



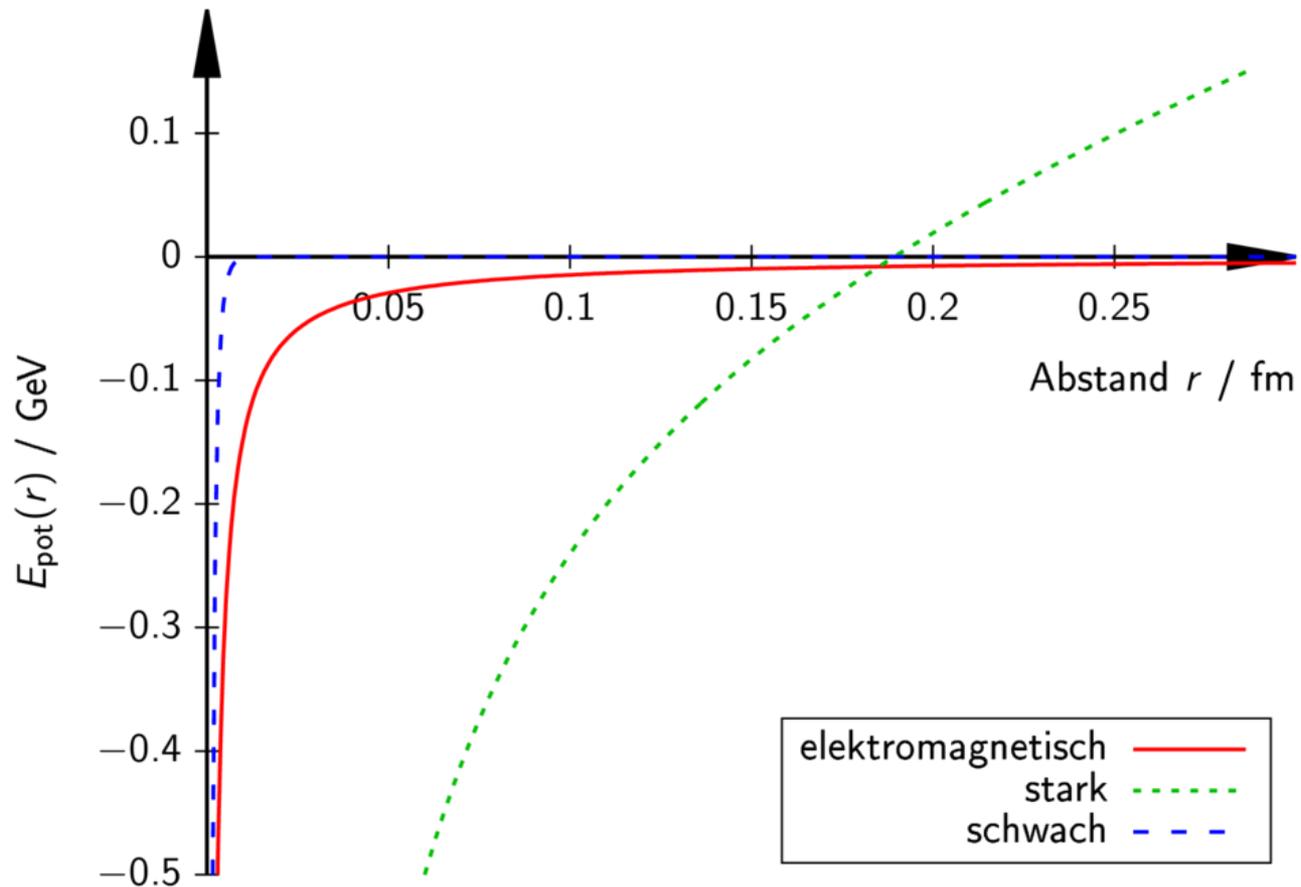
► Schwache WW



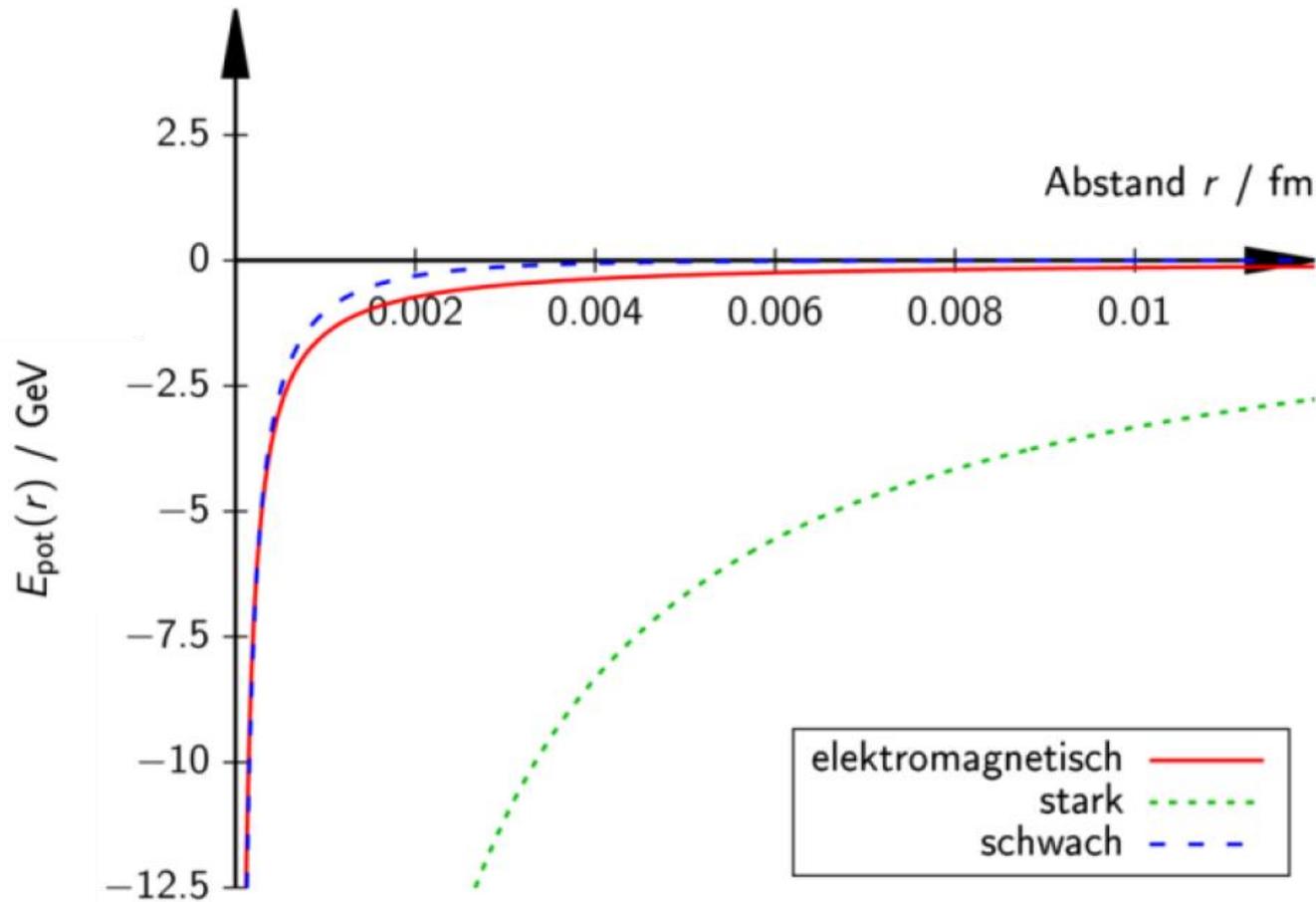
► Starke WW



Vergleich der potenziellen Energien



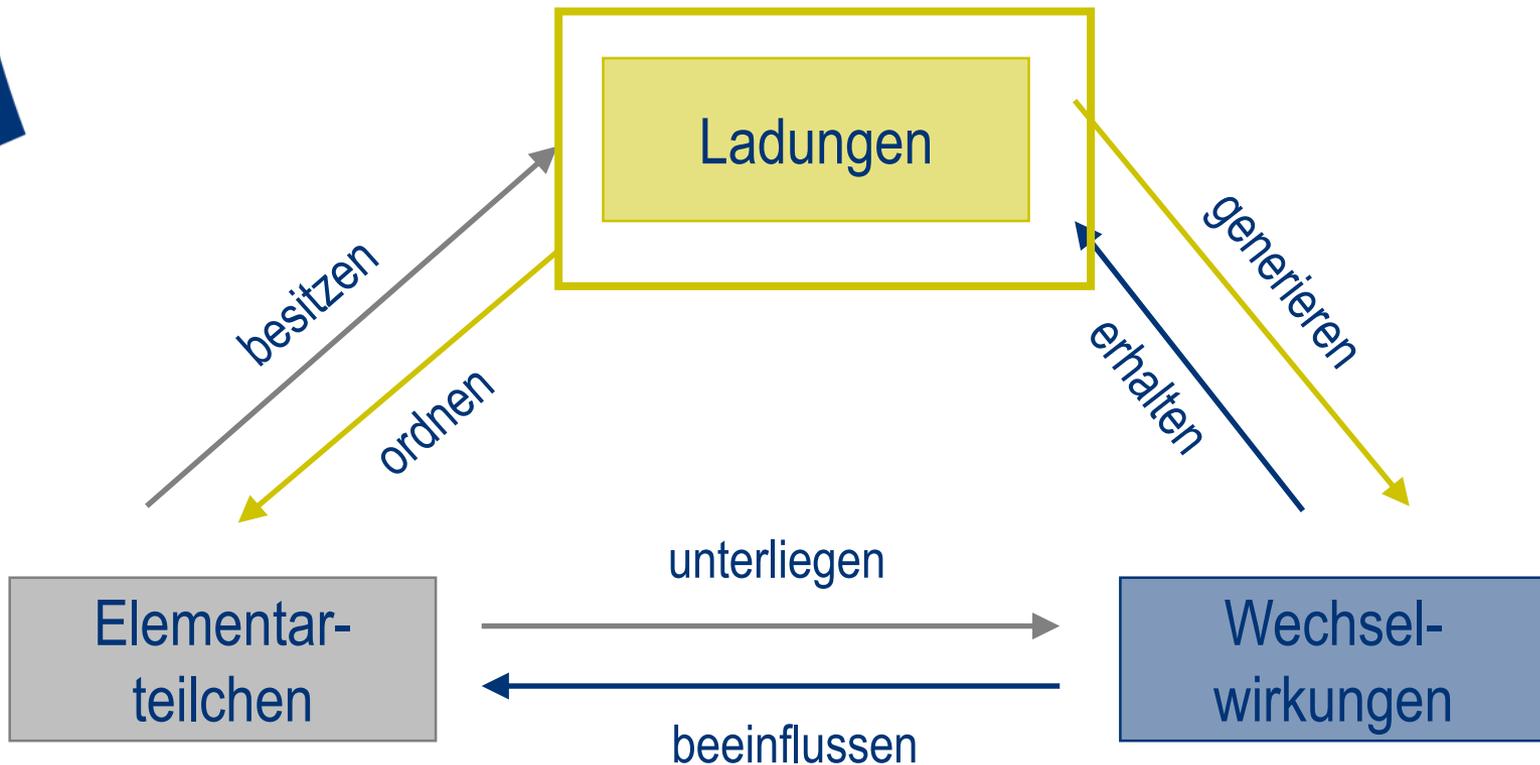
Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen (Achsen jeweils mit Faktor 25 gedehnt bzw gestaucht)



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	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



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** α auch für andere Wechselwirkungen

■ $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

Erweiterung: Konzept der Ladung

► Einführung: eines Kopplungsparameters α auch für andere Wechselwirkungen

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

Wechselwirkung	Kopplungsparameter α
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

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 α 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

Und Gravitation?

- ▶ Ladung und Kopplungsparameter der Gravitation quantenfeldtheoretisch (noch) nicht definierbar
- ▶ Keine Elementarmasse → Kein teilchenunabhängigen Kopplungsparameter.
- ▶ Praktikabel: zwischen Teilchen 1 und Teilchen 2:

$$\alpha_{grav}^{1,2} = G \frac{m_1 m_2}{\hbar c}$$

- ▶ Beispiel: α_{grav} zwischen Proton (p) und Elektron (e⁻)

- $\alpha_{grav}^{p,e} = G \frac{m_p m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$
- Erinnerung elektromagnetisch: $\alpha_{em}^{p,e} \approx \frac{1}{137}$
- Vergleich: $\frac{\alpha_{em}^{p,e}}{\alpha_{grav}^{p,e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$



Erweiterung: Konzept der Ladung

Wechselwirkung	Kopplungsparameter α
gravitativ	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Ladung der Gravitation?

Warum kann die Masse m eines Teilchens nicht die Ladung der Gravitation sein?

▶ Schulniveau:

- Masse ist keine Erhaltungsgröße
- Produkt zweier Massen kann nicht negativ sein

▶ Theorie:

- Massen können keine Eichsymmetrie **in** Raum und Zeit erzeugen, denn Raum und Zeit selbst müssen „verdreht“ werden

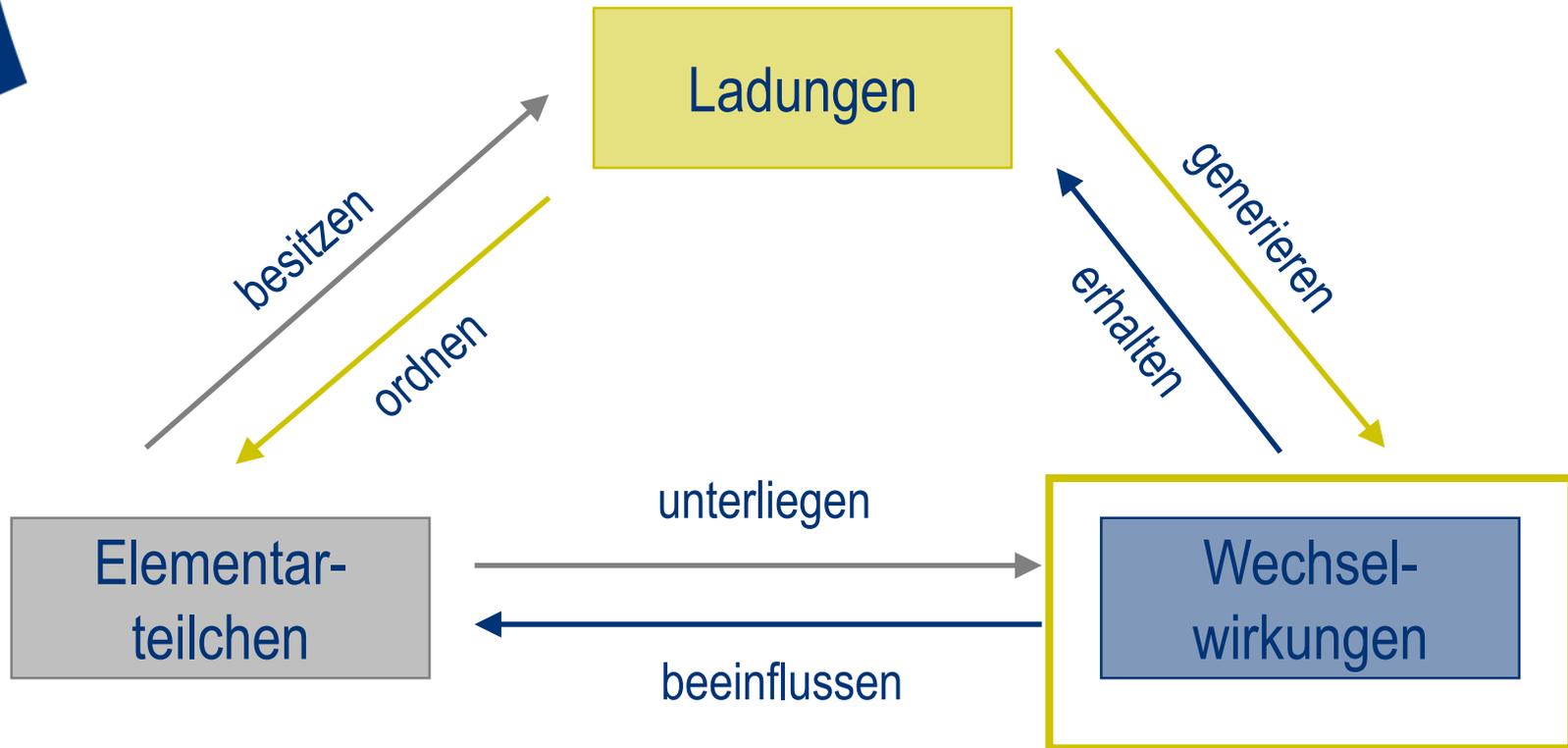
Konzept der Ladung

- ▶ 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

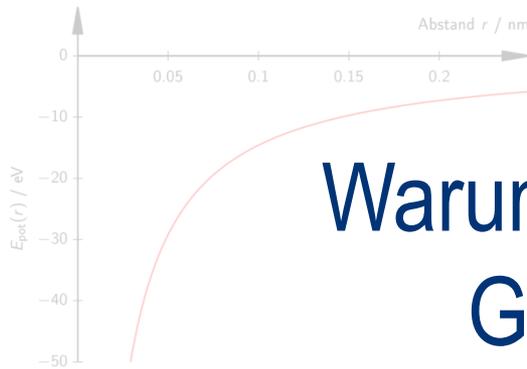
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

► Gravitation

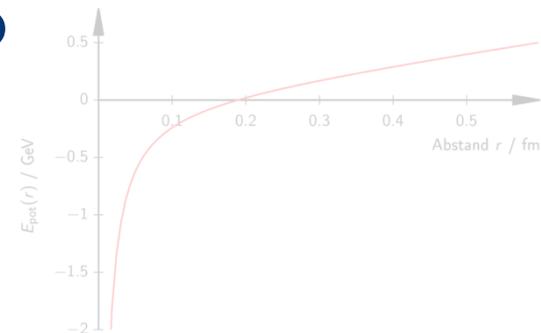
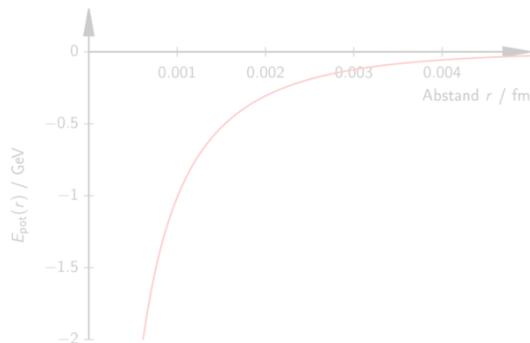


Warum erfahren wir nur
Gravitation und

► Schwache WW

Elektromagnetismus

im Alltag?



Kräfte der Wechselwirkungen

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

Grenze exper. Auflösung
(stark, schwach, em)

Protondurchmesser

*Wir sind ~1m weiter dort →

