

# Netzwerk Teilchenwelt

Ladungen, Wechselwirkungen  
und Teilchen

Arbeitsblätter



Stand: Januar 2022

Erstellt von Rahel Andreas und dem Netzwerk Teilchenwelt Team

## Inhalt

<b>Wechselwirkungen – Hinweise für Lehrkräfte .....</b>	<b>3</b>
KENNEN DER WECHSELWIRKUNGEN – MEMORY /MINDMAP .....	3
<b>Aufgabenstellung und Hinweise .....</b>	<b>4</b>
<b>Die Basiskonzepte des Standardmodells – Hinweise für Lehrkräfte .....</b>	<b>11</b>
ZUSAMMENHÄNGE VON LADUNGEN, WECHSELWIRKUNGEN UND ELEMENTARTEILCHEN.....	11
<b>Die Basiskonzepte des Standardmodells .....</b>	<b>12</b>
ZUSAMMENHÄNGE VON LADUNGEN, WECHSELWIRKUNGEN UND ELEMENTARTEILCHEN.....	12
<b>Ladungen – Hinweise für Lehrkräfte .....</b>	<b>13</b>
EIGENSCHAFTEN DER LADUNGEN UND LADUNGEN ZUSAMMENGESETZTER TEILCHEN .....	13
<b>Ladungen .....</b>	<b>14</b>
EIGENSCHAFTEN DER LADUNGEN UND LADUNGEN ZUSAMMENGESETZTER TEILCHEN .....	14
<b>Wechselwirkungen und Potenzielle Energien – Hinweise für Lehrkräfte.....</b>	<b>15</b>
VERGLEICH DER POTENZIELLEN ENERGIEN DER VIER FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN.....	15
<b>Wechselwirkungen und Potenzielle Energie .....</b>	<b>16</b>
VERGLEICH DER POTENZIELLEN ENERGIEN DER VIER FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN.....	16
<b>Ordnungsschema des Standardmodells – Hinweise für Lehrkräfte .....</b>	<b>18</b>
MULTIPLЕТTS DER SCHWACHEN UND DER STARKEN WECHSELWIRKUNG .....	18
<b>Ordnungsschema des Standardmodells.....</b>	<b>19</b>
MULTIPLЕТTS DER SCHWACHEN UND DER STARKEN WECHSELWIRKUNG .....	19
<b>Botenteilchen – Hinweise für Lehrkräfte .....</b>	<b>22</b>
BERECHNEN UND ERLÄUTERN MÖGLICHER TEILCHENUMWANDLUNGEN .....	22
<b>Botenteilchen .....</b>	<b>23</b>
<b>Grundbausteine der Feynman-Diagramme – Hinweise für Lehrkräfte .....</b>	<b>25</b>
DARSTELLUNG DER VERTICES FÜR WECHSELWIRKUNGEN VON ANTI-TEILCHEN UND MATERIETEILCHEN.....	25
<b>Grundbausteine der Feynman-Diagramme.....</b>	<b>26</b>
DARSTELLUNG DER VERTICES FÜR WECHSELWIRKUNGEN VON ANTI-TEILCHEN UND MATERIETEILCHEN.....	26
<b>Erwartungsbilder und Lösungen .....</b>	<b>29</b>
ZUORDNUNG DER AUSSAGEN UND WECHSELWIRKUNGEN .....	29
DIE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS .....	30
LADUNGEN .....	31
METHODISCHE HINWEISE ZU LADUNGEN .....	33
WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN .....	34
ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS .....	36
BOTENTEILCHEN .....	39
METHODISCHE HINWEISE ZU BOTENTEILCHEN .....	43
GRUNDBAUSTEINE DER FEYNMAN-DIAGRAMME.....	45
METHODISCHE HINWEISE ZU FEYNMAN-DIAGRAMMEN.....	47

# WECHSELWIRKUNGEN – HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

## Kennen der Wechselwirkungen – Memory /Mindmap

Level 1

### **Lernziel und Voraussetzungen**

**Lernziel:** Die Schülerinnen und Schüler ordnen Phänomene aus der Umwelt den vier Wechselwirkungen zu.

### **Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die Existenz der vier fundamentalen Wechselwirkungen und deren Kräfte
- Kenntnisse über Phänomene der Kernphysik (insb.  $\beta$ -Umwandlung und Kernfusion)

## AUFGABENSTELLUNG UND HINWEISE

In dieser Aufgabe stehen zwei verschiedene Arten von Karten zur Verfügung. Einerseits gibt es Karten, auf denen je eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen steht, andererseits sind Aussagen, die sich einer fundamentalen Wechselwirkung zuordnen lassen, auf die Karten geschrieben.

Es gibt zwei Möglichkeiten die Karten zu nutzen:

- Als Mindmap:
 

*Je eine Karte der fundamentalen Wechselwirkung ist sichtbar, alle Aussagekarten befinden sich gemischt auf einem Stapel. Die jeweils oberste Aussage wird gelesen und der jeweiligen Wechselwirkung zugeordnet. Die Mindmap kann individuell, mit mehreren Personen oder als Vorzeigaufgabe an der Tafel entwickelt werden, die folgende Aufgabenstellung ist für die Partnerarbeit gedacht.*
- Mögliche Aufgabenstellung
 

Arbeitet mit eurer Banknachbarin/eurem Banknachbarn zusammen!  
Legt vier Wechselwirkungskarten, für jede Wechselwirkung eine, mit etwas Abstand nebeneinander (die zusätzlichen Wechselwirkungskarten werden nicht benötigt). Mischt alle Aussagenkarten und lege sie verdeckt auf einen Stapel.  
Nun wird abwechselnd die oberste Karte des Stapels aufgedeckt und einer Wechselwirkung zugeordnet, bis die Karten aufgebraucht sind.  
Beratet euch untereinander, falls ihr Probleme mit der Zuordnung habt.
- Als Memory:
 

*Die Anzahl der Karten zu einer bestimmten Wechselwirkung richtet sich nach der Anzahl der zugehörigen Aussagen, die sich einer der Wechselwirkungen zuordnen lassen. Die Karten werden verdeckt gemischt, verteilt und nach dem Prinzip des Memorys wird versucht, eine Wechselwirkungskarte mit einer dazugehörigen Aussage aufzudecken.*
- Mögliche Aufgabenstellung
 

Bildet Vierergruppen und mischt alle Wechselwirkungskarten und alle Aussagenkarten. Reiht die Karten verdeckt nebeneinander auf.  
Nun werden in der Runde herum zwei Karten mit unterschiedlichen Rückseiten (also eine Aussagenkarte und eine Wechselwirkungskarte) aufgedeckt. Passt die Aussage zu der Wechselwirkung, darf man beide Karten an sich nehmen und zwei weitere Karten aufdecken. Passen Aussage und Wechselwirkung nicht zusammen, ist die nächste Spielerin/der nächste Spieler an der Reihe.  
Alle Gruppenmitglieder dürfen mit beraten, ob die Zuordnung richtig ist oder nicht. Wenn keine Karten mehr übrig sind hat diejenige/derjenige mit den meisten Kartenpaaren gewonnen.

Ein Apfel fällt vom Baum.

Sterne bilden Galaxien.

Der Mond bewegt sich auf einer Umlaufbahn um die Erde.

Planeten bewegen sich auf Bahnen um die Sonne.

Ein Heißluftballon steigt auf.

Das Surfen im Internet ist mit dem Handy möglich.

Nervenimpulse werden von den Füßen ins Gehirn geleitet.

Eine Kompassnadel richtet sich in Nord-Süd-Richtung aus.

Eisenspäne haften an einem Magneten.

Im Magen wird ein Apfel verdaut.

Natrium und Chlor verbinden sich zu Natriumchlorid.

Magnesium kann unter Wasser brennen.

Einige Atomkerne sind stabil.

Zwei Down-Quarks und ein Up-Quark schließen sich zusammen.

Ein Proton wird durch drei Quarks gebildet.

Ein Myon wandelt sich in ein Elektron und zwei Neutrinos um.

$\beta$ -Strahlung wird von einem radioaktiven Atomkern ausgesendet.

Umwandlung eines Protons in ein Neutron bei der Kernfusion in der Sonne.

Ein Kern fängt ein Elektron aus der Atomhülle ein, wobei sich ein Proton in ein Neutron umwandelt und ein Neutrino ausgesendet wird (K-Einfang).

Gravitation



Gravitation



Gravitation



Gravitation



Gravitation



Elektromagnetische Wechselwirkung



Elektromagnetische Wechselwirkung



Elektromagnetische Wechselwirkung



Elektromagnetische Wechselwirkung

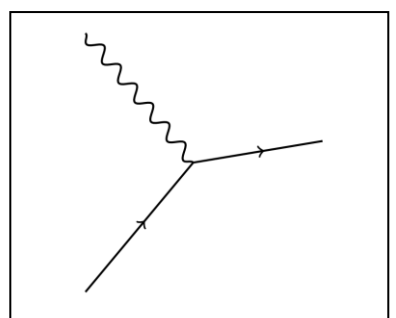
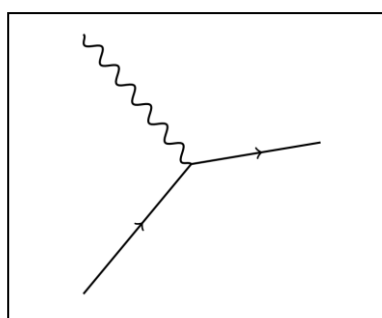
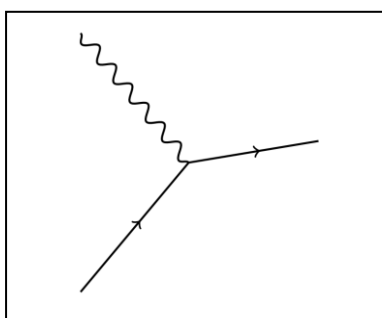
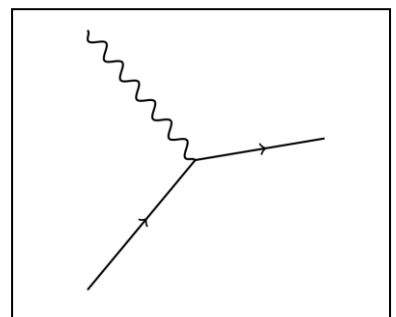
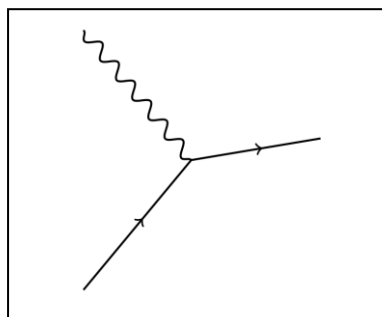
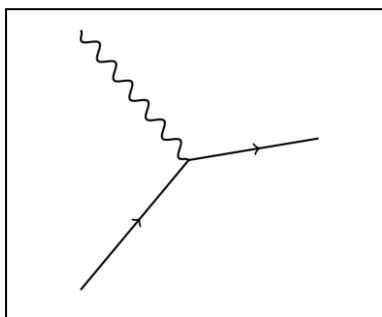
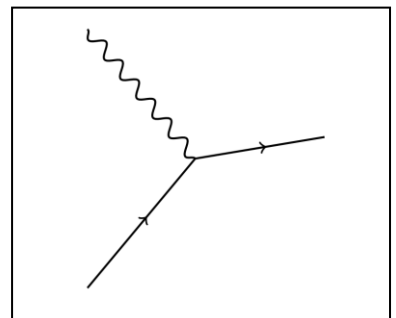
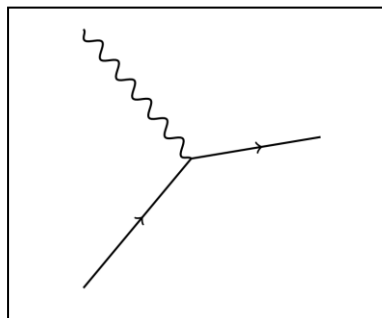
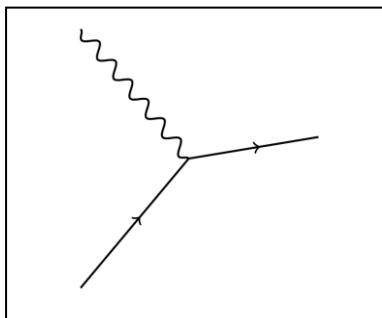
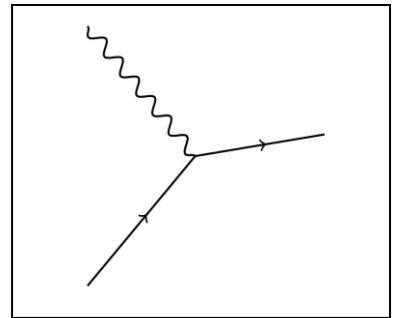
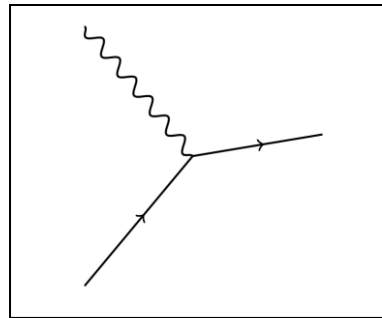
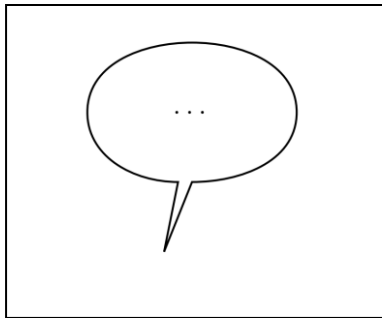
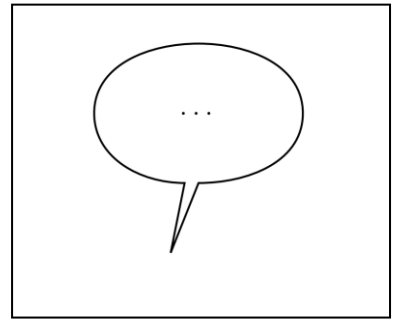
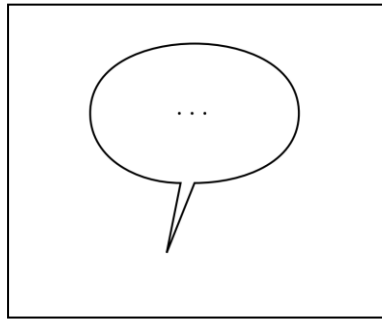
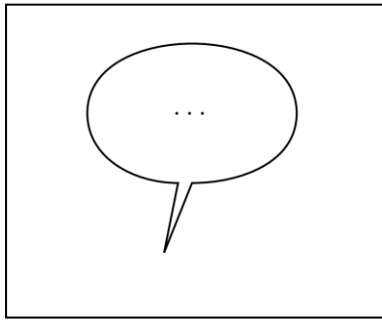


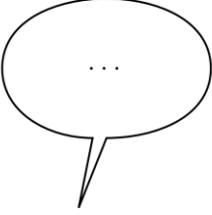


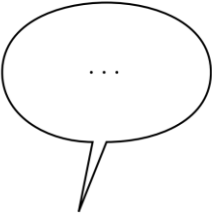
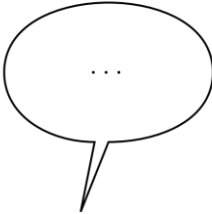
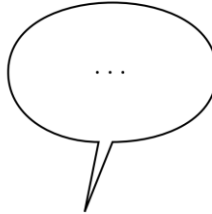

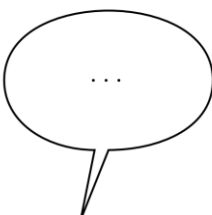
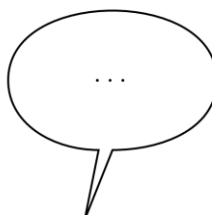

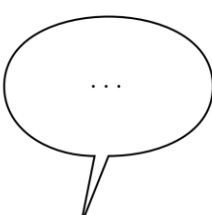
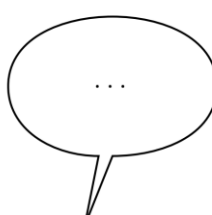
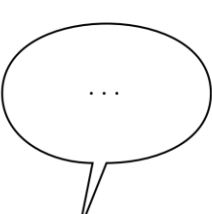
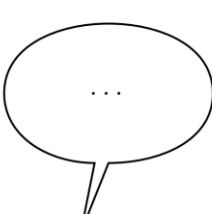
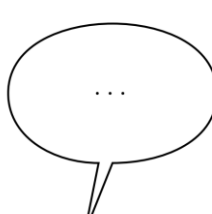
Elektromagnetische Wechselwirkung



Elektromagnetische Wechselwirkung





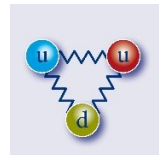
		
		
		
		
		



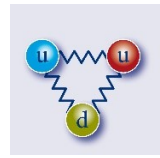
Elektromagnetische  
Wechselwirkung



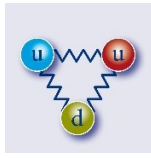
Starke Wechselwirkung



Starke Wechselwirkung



Starke Wechselwirkung



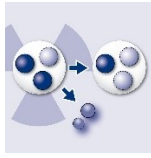
Schwache Wechselwirkung



Schwache Wechselwirkung

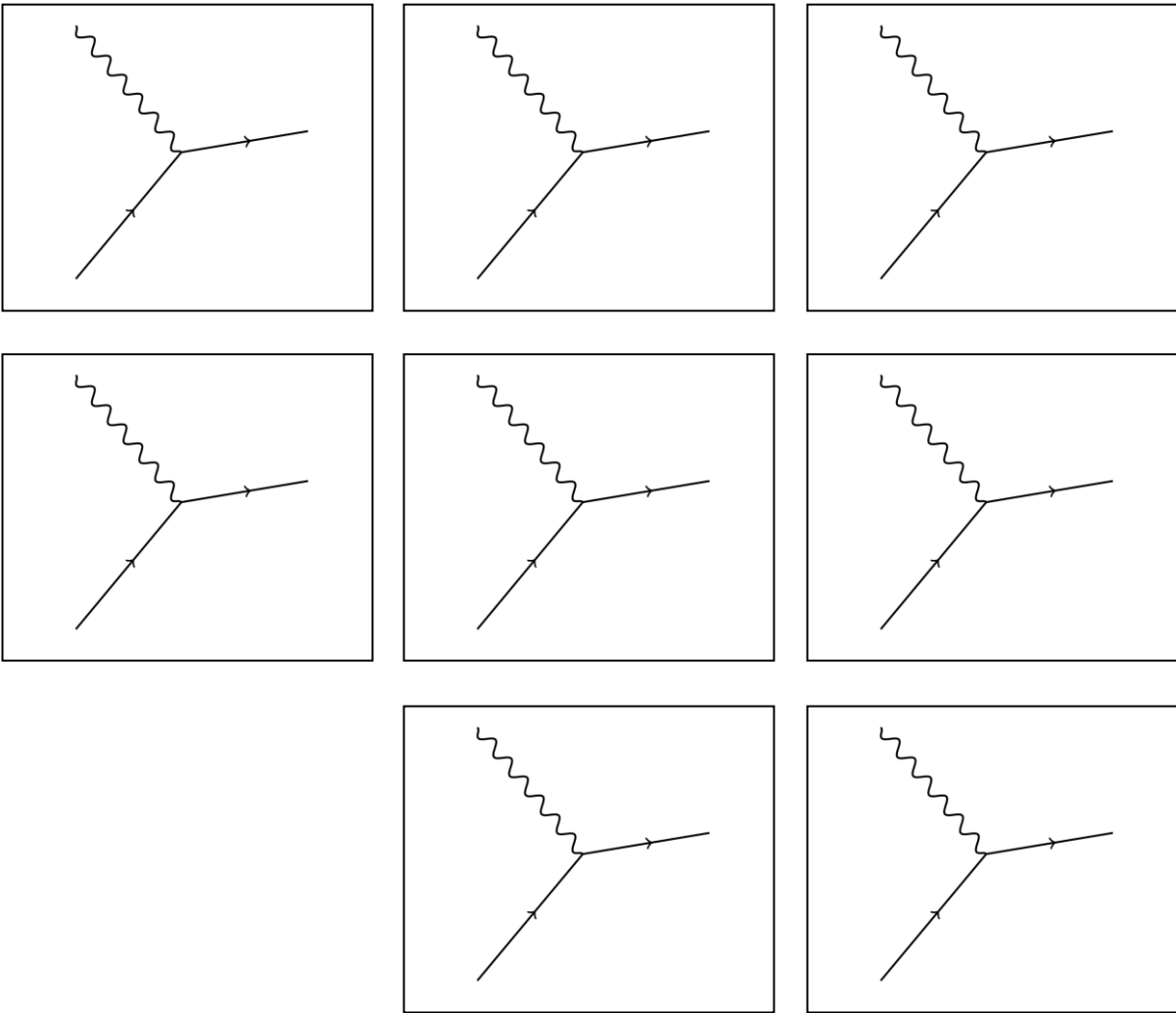


Schwache Wechselwirkung



Schwache Wechselwirkung





# DIE BASISKONZEPTE DES STANDARDMODELLS – HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

## Zusammenhänge von Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen

Level 1

### **Lernziel und Voraussetzungen**

**Lernziel:** Die Schülerinnen und Schüler stellen die Zusammenhänge zwischen den Basiskonzepten des Standardmodells - Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen - dar.

### **Vorkenntnisse:**

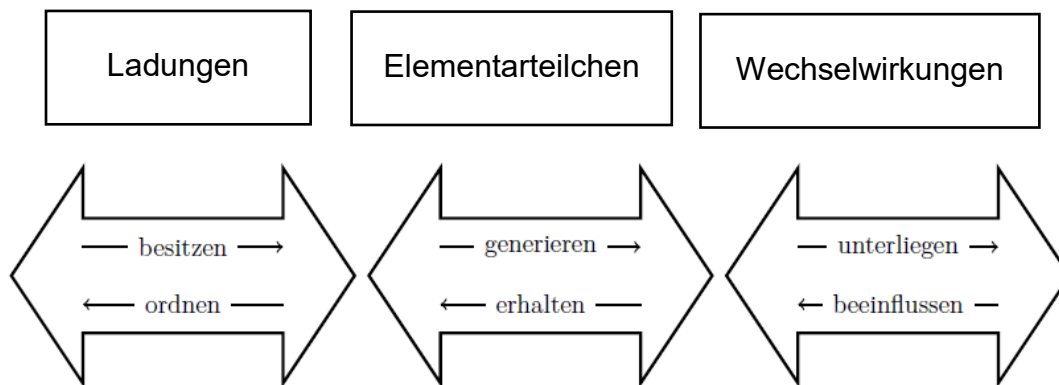
- Kenntnisse über die Bedeutung der Begriffe Ladung, Wechselwirkung und Elementarteilchen

## DIE BASISKONZEPTE DES STANDARDMODELLS

### Zusammenhänge von Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen

Die Begriffe „Ladungen“, „Elementarteilchen“ und „Wechselwirkungen“ stehen in Beziehung zueinander.

Stelle zwischen diesen drei Begriffen mithilfe der Pfeile eine sinnvolle Beziehung her.



# LADUNGEN – HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

## Eigenschaften der Ladungen und Ladungen zusammengesetzter Teilchen

Level 2

### Lernziele und Voraussetzungen

Lernziele: Die Schülerinnen und Schüler

- nennen grundlegende Eigenschaften der schwachen, der elektromagnetischen Ladung und der starken Ladung.
- erläutern die Besonderheit der starken Ladung anhand eines Beispiels.
- erläutern, warum die Masse keine „Ladung der Gravitation“ sein kann.
- untersuchen zusammengesetzte Teilchen anhand ihrer Ladungen.

### Vorkenntnisse:

- Kenntnisse der grundlegenden Eigenschaften (Additivität, Quantisierung, Erhaltungsgröße) der elektromagnetischen, schwachen und starken Ladungen
- Kenntnisse über die Materieteilchen und zugehörigen Anti-Teilchen der ersten Generation und ihren Eigenschaften Ladung und Masse

# LADUNGEN

## Eigenschaften der Ladungen und Ladungen zusammengesetzter Teilchen

Die Elementarteilchen werden durch ihre Ladungen im Standardmodell der Teilchenphysik geordnet. Durch diese fundamentalen und unveränderlichen Eigenschaften und seine Masse wird ein Elementarteilchen eindeutig charakterisiert.

- Beschreibe, welche grundlegenden Eigenschaften die elektrische und die schwache Ladung haben.
  
- Nenne pro Eigenschaft ein Beispiel.
  
- Gelten die oben genannten Eigenschaften auch für die starke Ladung?
  
- Beschreibe die Besonderheit der starken Ladung und finde ein Beispiel.
  
- Begründe, warum bei der Gravitation, der vierten fundamentalen Wechselwirkung, die Masse nicht die zugeordnete Ladung sein?

*Tipp: Überprüfe die Erhaltung dieser „Ladung“, also die Massenerhaltung, am Beispiel der Umwandlung eines Myons.*

*Hierfür gilt folgende Reaktionsgleichung:  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ .*

- Ein aus Quarks der ersten Generation zusammengesetztes Teilchen ist das elektrisch positiv geladene Pion  $\pi^+$ . Die elektrische Ladungszahl dieses Pions ist  $Z_{\pi^+} = +1$ , die starke Ladung  $\vec{C}_{\pi^+} = \vec{0}$  und die schwache Ladungszahl  $I_{\pi^+} = +1$ .

Finde heraus, welche Quarks dieses Pion bilden können.

# WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN – HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

## Vergleich der potenziellen Energien der vier fundamentalen Wechselwirkungen

Level 2-3

### Lernziele und Voraussetzungen

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

- erklären den Verlauf der Graphen der potenziellen Energien der fundamentalen Wechselwirkungen und erkennen, dass aus dem gleichem Verlauf für kleine Abstände Gemeinsamkeiten bei der Kraftwirkung der Wechselwirkungen resultieren.
- beschreiben den Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Kurvenverläufen für große Abstände und dem unterschiedlichen Verhalten der Kräfte.
- erklären das Verhalten von Teilchen anhand der Kurvenverläufe.

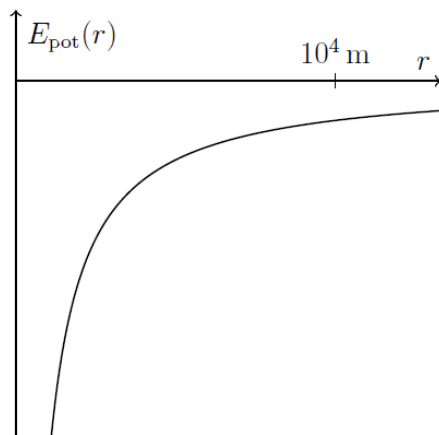
**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die mathematische Interpretation von Graphen
- Generelle Kenntnisse darüber, welche Teilchen welcher Wechselwirkung unterliegen und wie sie sich verhalten
- Kennen der Zusammenhänge zwischen Kraft und Potenzial

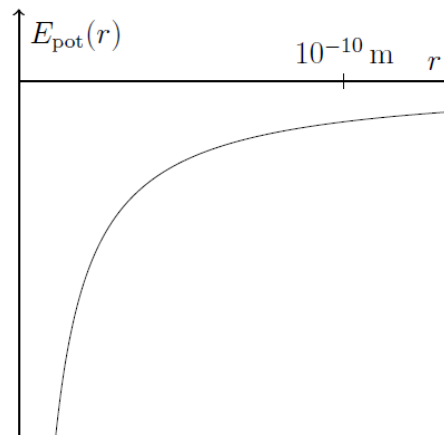
# WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIE

## Vergleich der potenziellen Energien der vier fundamentalen Wechselwirkungen

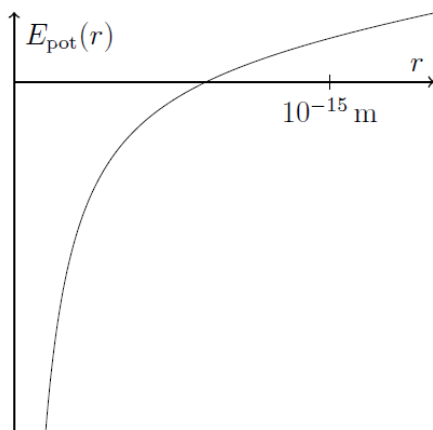
Abbildungen a) bis d): Darstellung der potenziellen Energie  $E_{\text{pot}}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  für die vier fundamentalen Wechselwirkungen



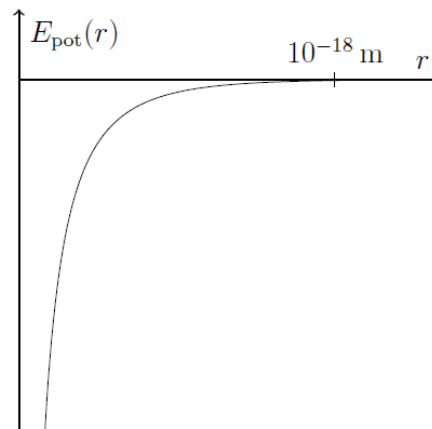
a) Gravitationswechselwirkung zwischen der Erde und einem Satelliten



b) Elektromagnetische Wechselwirkung zwischen einem elektrisch positiv geladenen Proton und einem elektrisch negativ geladenen Elektron



c) Starke Wechselwirkung zwischen zwei Quarks mit unterschiedlicher Farbladung



d) Schwache Wechselwirkung zwischen einem Elektron mit der schwachen Ladungszahl  $I = -\frac{1}{2}$  und einem Neutrino mit der schwachen Ladungszahl  $I = +\frac{1}{2}$



1. Beschreibe den Verlauf der potenziellen Energie  $E_{\text{Pot}}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  für die Gravitation.
2. Interpretiere diesen Verlauf! Betrachte dazu das Beispiel Erde – Satellit.
3. Vergleiche das Diagramm der Gravitation mit denen der anderen Wechselwirkungen. Nenne Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Beschreibe die physikalische Bedeutung der erkennbaren Unterschiede.

# ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS – HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

## Multipletts der schwachen und der starken Wechselwirkung

Level 2-3

### Lernziele und Voraussetzungen

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

- erarbeiten das Prinzip von Multipletts anhand der Dupletts der schwachen Ladung.
- wenden das Prinzip der Multipletts auf die Tripletts der starken Ladung an.
- stellen ihr Wissen über Multipletts und die Zusammenhänge strukturiert dar.

**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die Elementarteilchen und deren Ladungen
- Berechnen der Ladungen und Anwendung des Prinzips der Ladungserhaltung

# ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS

## Multipletts der schwachen und der starken Wechselwirkung

- Folgende Paare von Teilchen sind vorgegeben: Elektron-Neutrino  $\nu_e$  und Elektron  $e^-$  sowie Up-Quark und Down-Quark (beliebige aber gleiche Farbladung).

- a) Notiere die elektrischen und schwachen Ladungszahlen dieser Teilchen. Bestimme anschließend jeweils den Betrag der Differenz der elektrischen und der schwachen Ladungszahlen.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}: \quad \begin{array}{l} Z_{\nu_e} = \\ Z_{e^-} = \end{array} \quad |\Delta Z| =$$

$$\begin{array}{l} I_{\nu_e} = \\ I_{e^-} = \end{array} \quad |\Delta I| =$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}: \quad \begin{array}{l} Z_u = \\ Z_d = \end{array} \quad |\Delta Z| =$$

$$\begin{array}{l} I_u = \\ I_d = \end{array} \quad |\Delta I| =$$

- b) Durch Abstrahlung welches Botenteilchens kann eine Umwandlung von  $e^-$  zu  $\nu_e$  und von  $d$  zu  $u$  stattfinden?  
Hinweis: Die Ladungszahlen des Botenteilchens ergeben sich aus den Erhaltungssätzen für die Ladungen.

- c) Ergänze die folgenden Sätze.

Die Umwandlung von dem unteren Teilchen zum oberen Teilchen in der Gruppierung geschieht durch Abstrahlung eines \_\_\_\_\_, einem Botenteilchen der \_\_\_\_\_.  
Die umgekehrte Umwandlung geschieht, wenn das obere Teilchen ein \_\_\_\_\_ abstrahlt oder ein \_\_\_\_\_ absorbiert.

Man nennt diese Gruppierungen aus zwei Materieteilchen **Dupletts** (lat. *duplex* = doppelt) **bezüglich der \_\_\_\_\_ Ladung**.

Die Teilchen innerhalb der Dupletts unterscheiden sich in ihrer schwachen und ihrer elektrischen Ladungszahl betragsmäßig jeweils um \_\_\_\_\_.

Dabei steht das Teilchen mit \_\_\_\_\_ schwacher Ladung oben.

Nur über die \_\_\_\_\_ Wechselwirkung können Teilchen im selben Duplett ineinander umgewandelt werden.

- a) Finde weitere Beispiele für die eben beschriebenen Dupletts.
- b) Für die starke Wechselwirkung existiert ebenfalls ein Ordnungsschema: die Anordnung der Quarks in Triplets (lat. triplex = dreifach).  
Notiere ein Beispiel für ein solches Triplet. Durch Abstrahlung welcher Botenteilchen können die Teilchen im Triplet ineinander umgewandelt werden?
- c) Erstelle ein Begriffsnetz mit den vorgegebenen Bausteinen. Nutze Linien und eigene Beschriftungen zur Strukturierung der Begriffe, um eine zusammenhängende Übersicht zu erstellen.

## Bausteine

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$

$$(u^{\uparrow}, u^{\leftarrow}, u^{\downarrow})$$

$$(\bar{d}^{\leftarrow}, \bar{d}^{\rightarrow}, \bar{d}^{\uparrow})$$

$$\Delta Z = +1$$

$$\Delta I = +1$$

$$Z_{W^+} = +1$$

$$I_{W^+} = +1$$

$W^+$

g

Beispiele für Dupletts bezüglich der schwachen Ladung.

Teilchen, die sich über die schwache Wechselwirkung ineinander umwandeln, befinden sich in einem Duplett.

Beispiele für Tripletts bezüglich der starken Ladung.

Teilchen, die sich über die starke Wechselwirkung ineinander umwandeln, befinden sich in einem Triplet.

# BOTENTEILCHEN – HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

## Berechnen und Erläutern möglicher Teilchenumwandlungen

Level 2

### Lernziele und Voraussetzungen

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

- geben folgende Eigenschaften ausgewählter Elementarteilchen an: Ladungen, Wechselwirkungen, denen es unterliegt, und die zur Wechselwirkung gehörenden Botenteilchen.
- erkennen, dass die Ladungserhaltung aller Ladungen die möglichen Teilchenumwandlungen stark einschränkt und sie bestimmt.
- überprüfen und erläutern mithilfe der Ladungserhaltung, ob vorgegebene Teilchenumwandlungen stattfinden können.

**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die Ladungen der Anti-Teilchen und Materieteilchen der ersten Generation
- Verständnis der Zusammenhänge von Ladungen, Wechselwirkungen und Botenteilchen
- Kenntnisse der Botenteilchen der elektromagnetischen, starken und schwachen Wechselwirkung und ihren Eigenschaften (Ladungen und Masse) und den physikalischen Größen Energie, Impuls
- Anwendung des Prinzips der Ladungserhaltung.
- Kenntnisse über das ausschließliche Vorkommen von Quarks in gebundenen Zuständen (Confinement)

## BOTENTEILCHEN

1.
  - a) Gib allgemein an, welche Eigenschaften eines Teilchens sich durch die Emission bzw. Absorption eines Botenteilchens ändern können.
  - b) Nenne Eigenschaften, die sich ändern müssen, damit eine Teilchenumwandlung stattfindet?
2. Wähle eines der folgenden Anti-Teilchen oder Materieteilchen aus dem Standardmodell der Teilchenphysik aus: Elektron  $e^-$ , Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , Positron  $e^+$ , grünes Down-Quark  $d^{\uparrow}$ .

Notiere das gewählte Teilchen: \_\_\_\_\_

Gib zu diesem Teilchen jeweils an:

- a) Welche Ladungen es besitzt:

$$Z = \quad \quad \quad I = \quad \quad \quad \vec{C} =$$

- b) welchen Wechselwirkungen es unterliegt.

- c) welche der folgenden Botenteilchen es abstrahlen oder absorbieren kann: Photonen, Z-Teilchen, W-Teilchen, Gluonen

3. Für die Umwandlung des in Aufgabe 2 gewählten Teilchens  $x$  ( $x$  steht hier stellvertretend für die unterschiedlichen möglichen Teilchensymbole, zum Beispiel ein Elektron) in ein anderes Teilchen unter Abstrahlung des Botenteilchens  $W^-$  lässt sich eine Umwandlungsgleichung in folgender Form formulieren:

$$\text{Teilchen } x \rightarrow \text{Botenteilchen } W^- + ?$$

Berechne, welche elektrische, starke und schwache Ladung das gesuchte Teilchen auf der rechten Seite der Reaktionsgleichung besitzen müsste.




$$\text{Elektrische Ladung: } Z_x = Z_{W^-} + Z_? \quad \quad Z_? =$$

$$\text{Starke Ladung: } \vec{C}_x = \vec{C}_{W^-} + \vec{C}_? \quad \quad \vec{C}_? =$$

$$\text{Schwache Ladung: } I_x = I_{W^-} + I_? \quad \quad I_? =$$

Ist ein entsprechendes Teilchen bekannt? Wenn ja, welches?

4. Vervollständige die Tabelle und beurteile jeweils, ob die vorgegebenen Abstrahlungen möglich sind. Prüfe dafür, ob du ein Teilchen oder ein Anti-Teilchen kennst, welches die notwendigen Eigenschaften besitzt.

	Anti-/ Materieteilchen	Abgestrahltes Botenteilchen	Gesuchtes Teilchen
a)	$d$ 	$W^-$	
el. Ladungszahl $Z$ starker Farbladungsvektor $\vec{C}$ Schwache Ladungszahl $I$			
b)	$e^-$	$W^+$	
el. Ladungszahl $Z$ starker Farbladungsvektor $\vec{C}$ schwache Ladungszahl $I$			
c)	$e^-$	$W^-$	
el. Ladungszahl $Z$ starker Farbladungsvektor $\vec{C}$ schwache Ladungszahl $I$			
d)	$e^+$	$\gamma$	
el. Ladungszahl $Z$ starker Farbladungsvektor $\vec{C}$ schwache Ladungszahl $I$			
e)	$\bar{u}$ 	$g$ 	
el. Ladungszahl $Z$ starker Farbladungsvektor $\vec{C}$ schwache Ladungszahl $I$			



# GRUNDBAUSTEINE DER FEYNMAN-DIAGRAMME – HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

Darstellung der Vertices für Wechselwirkungen von Anti-Teilchen und Materieteilchen

Level 2-3

## Lernziele und Voraussetzungen

**Lernziele:** die Schülerinnen und Schüler

- verknüpfen die Namen der Prozesse der Grundbausteine mit einem Beispiel.
- zeichnen die Grundbausteine für die Darstellung der Wechselwirkung von Anti-Teilchen und Materieteilchen nach Beschreibungen.
- stellen Wechselwirkungen durch den Austausch eines Botenteilchens (zusammengesetzte Vertices) nach einer Beschreibung dar.

**Vorkenntnisse:**

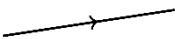
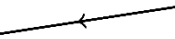

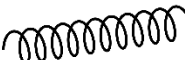
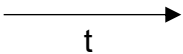
- Kenntnisse über die Elementarteilchen und ihren Eigenschaften  
Ladungen und Masse

# GRUNDBAUSTEINE DER FEYNMAN-DIAGRAMME

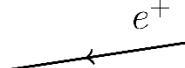
## Darstellung der Vertices für Wechselwirkungen von Anti-Teilchen und Materieteilchen

Mit Feynman-Diagrammen bieten eine Übersetzung der mathematischen Beschreibung des Standardmodells und der fundamentalen Wechselwirkungen in schematische Abbildungen.

Für die Darstellung nutzt man folgende Symbole:

	eine durchgezogene Linie mit einem Pfeil in Zeitrichtung für ein Materieteilchen
	eine durchgezogene Linie mit einem Pfeil gegen Zeitrichtung für ein Anti-Materieteilchen
	eine gewellte Linie für die $W^+$ -, $W^-$ - und $Z$ -Teilchen sowie das Photon $\gamma$
	eine Spirallinie für das Gluon $g$
	Auf diesem Arbeitsblatt wird die Konvention verwendet, dass die Zeitachse von links nach rechts verläuft.

*Beispiel:*

	die Darstellung eines Positrons $e^+$ in einem Feynman-Diagramm
---	---

Feynman-Diagramme lassen sich aus vier Grundbausteinen zusammensetzen, bei denen jeweils zwei Anti-/Materieteilchen und ein Botenteilchen beteiligt sind. Ein Grundbaustein besteht also aus 3 Linien und deren Schnittpunkt und wird Vertex (plural: Vertices) genannt.

Im Folgenden werden exemplarisch vier Vertices beschrieben, die, wenn sie verallgemeinert werden, jeweils einen Wechselwirkungs-Grundbaustein darstellen.

1. Ordne dem Beispiel den passenden Namen des Prozesses zu und zeichne den zugehörigen Vertex (Baustein).

Folgende Bezeichnungen stehen zur Auswahl: *Paarvernichtung, Absorption eines Botenteilchens, Paarerzeugung, Abstrahlung eines Botenteilchens*

Bezeichnung des Bausteins	Beispiel	Vertex
	Ein Elektron strahlt ein Z-Teilchen ab.	
	Ein Up-Quark fängt ein $W^-$ -Teilchen ein. Dabei wandelt es sich in ein Down-Quark um.	
	Ein Up-Quark und ein Anti-Up-Quark vernichten sich unter Entstehung eines Gluons.	
	Aus einem Photon entsteht ein Elektron-Positron-Paar.	

2. Mit diesen vier Arten von Grundbausteinen (Vertices) können kompliziertere Diagramme gebildet werden, indem man zwei oder mehrere zusammenfügt.

Zeichne zwei Wechselwirkungsprozesse nach den folgenden Beschreibungen.

Sie bestehen jeweils aus zwei zusammengefügt Vertices.

Die Reaktionsgleichungen dienen als zusätzliche Orientierung. Diese beschreiben aber nur die Teilchen vor und nach der Wechselwirkung, nicht die Botenteilchen. Beachte die Zeitrichtung bei der Zeichnung von Materie- und Anti-Materieteilchen.

- a) Ein Elektron  $e^-$  und ein Positron  $e^+$  treffen vernichten sich gegenseitig. Dabei entsteht ein Photon  $\gamma$ . Das Photon wandelt sich in ein Elektron und ein Positron um.

Reaktionsgleichung:  $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$

- b) Ein Myon  $\mu^-$  strahlt ein  $W^-$ -Teilchen ab und wandelt sich in ein Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  um. Das  $W^-$  wandelt sich in ein Elektron  $e^-$  und ein Anti-Elektron-Neutrino  $\bar{\nu}_e$  um.

Reaktionsgleichung:  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$

# ERWARTUNGSBILDER UND LÖSUNGEN

## Zuordnung der Aussagen und Wechselwirkungen

Die Zuordnung der Aussagen des Spiels ist wie folgt vorgesehen:

### Gravitation

- Ein Apfel fällt vom Baum.
- Sterne bilden Galaxien.
- Der Mond bewegt sich auf einer Umlaufbahn um die Erde.
- Planeten bewegen sich auf Bahnen um die Sonne.
- Ein Heißluftballon steigt auf.

### Elektromagnetische Wechselwirkung

- Das Surfen im Internet ist mit dem Handy möglich.
- Nervenimpulse werden von den Füßen ins Gehirn geleitet.
- Eine Kompassnadel richtet sich in Nord-Süd-Richtung aus.
- Eisenspäne haften an einem Magneten.
- Im Magen wird ein Apfel verdaut.
- Natrium und Chlor verbinden sich zu Natriumchlorid.
- Magnesium kann unter Wasser brennen.

### Starke Wechselwirkung

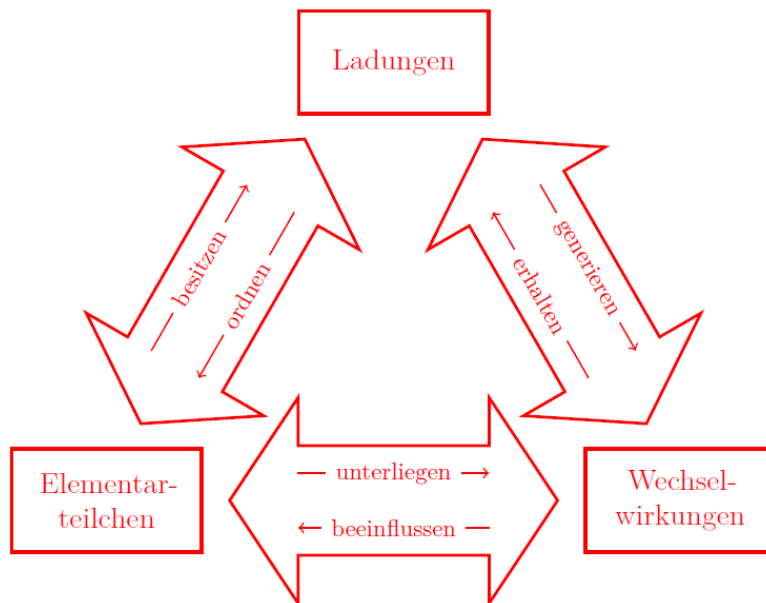
- Einige Atomkerne sind stabil.
- Ein Proton wird durch drei Quarks gebildet.
- Zwei Down-Quarks und ein Up-Quark schließen sich zusammen.

### Schwache Wechselwirkung

- $\beta$ -Strahlung wird von einem radioaktiven Atomkern ausgesendet.
- Umwandlung eines Protons in ein Neutron bei der Kernfusion in der Sonne.
- Ein Myon wandelt sich in ein Elektron und zwei Neutrinos um.
- Ein Kern fängt ein Elektron aus der Atomhülle ein, wobei sich ein Proton in ein Neutron umwandelt und ein Neutrino ausgesendet wird (K-Einfang).

## Die Grundpfeiler des Standardmodells

Mit Hilfe der gegebenen Begriffe kann folgendes Schema aufgestellt werden:



## Ladungen

1. Die elektromagnetische und die schwache Ladung sind:

- gequantelt: Es existieren kleinste und nur diskrete Werte.

Beispiel: Für die schwache Ladungszahl ist der kleinste Wert  $I = \pm \frac{1}{2}$ , für die elektrische Ladungszahl  $Z = \pm \frac{1}{3}$ .

- additiv: Die Summe der Einzelladungen zusammengesetzter Teilchen ist gleich der Gesamtladung des Teilchens.

Beispiel: Ein Neutron setzt sich aus einem Up-Quark und zwei Down-Quarks zusammen. Hierbei gilt für die schwache und die elektrische Ladungszahl:

$$I_n = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -\frac{1}{2} \text{ und } Z_n = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0.$$

- erhalten: Bei Teilchenumwandlungen ist die Summe der Ladungszahlen vor der Reaktion gleich der Summe der Ladungszahlen nach der Reaktion.

Beispiel: Für die Emission eines Photons durch ein Positron  $e^+ \rightarrow \gamma + e^+$  gilt

$$I_{\text{vor}} = \frac{1}{2} = I_{\text{nach}} \text{ und } Z_{\text{vor}} = 1 = Z_{\text{nach}}.$$

2. Die starke Ladung ist ebenfalls gequantelt, erhalten und additiv, außerdem besitzt sie Vektorcharakter, kann also nicht durch eine einzelne Zahl vollständig beschrieben werden.

Die starke Ladung eines Teilchens kann nur aus der Summe von Vielfachen der Farbladungsvektoren bestehen. Die Summe einzelner starken Ladungen wird vektoriell addiert.

Alle drei Farben (und ebenfalls alle drei Anti-Farben) ergeben in Summe  $\vec{0}$ , auch als farbladungsneutral bezeichnet. Gleiches gilt für die Summe einer Farbe und einer Anti-Farbe

Beispiel: Ein Neutron ist aus drei Quarks zusammengesetzt: einem Up-Quark und zwei Down-Quarks. Diese besitzen jeweils eine andere Farbladung, z. B.  $u \downarrow, d \uparrow, d \leftarrow$ .

Die Summe der vektoriell addierten starken Ladungen ergibt den Nullvektor:

$$\uparrow + \downarrow + \leftarrow = \vec{0}.$$

3. Die Masse ist bei Teilchenumwandlungen keine Erhaltungsgröße, sonst

müsste gelten:  $m_{\mu^-} = m_{e^-} + m_{\bar{\nu}_e} + m_{\nu_{\mu}}$  aber  $105,6 \frac{\text{MeV}}{c^2} \neq 0,5 \frac{\text{MeV}}{c^2}$  mit  $m_{e^-} = 0,5 \frac{\text{MeV}}{c^2}$  und  $m_{\bar{\nu}_e} = m_{\nu_{\mu}} < 0,000\,000\,1 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ .

Im Gegensatz zu den Ladungen der elektromagnetischen, starken und schwachen Wechselwirkung existieren bei der Gravitation nur positive Massen. Außerdem gibt es nur gravitative Anziehung zwischen massebehafteten Körpern und Teilchen. Wenn die Masse die Ladung der

Gravitation wäre, dann müsste auch Abstoßung möglich sein. Dies wurde allerdings bisher noch nicht beobachtet.

4. Das  $\pi^+$  besteht aus einem Up-Quark  $u$  und einem Anti-Down-Quark  $\bar{d}$ .

Für die elektromagnetische Ladung gilt:  $Z_u + Z_{\bar{d}} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = 1$ .

Für die starke Ladung gilt:  $\vec{C}_u + \vec{C}_{\bar{d}} = \downarrow + \uparrow = \vec{0}$  (Annahme, dass  $u$  einen blauen Farbladungsvektor besitzt;  $\bar{d}$  muss die entsprechende Anti-Farbe besitzen.)

Für die schwache Ladung gilt:  $I_u + I_{\bar{d}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ .



## Methodische Hinweise zu Ladungen

Für die vierte Aufgabe könnte versucht werden eine Lösung nur mit Quarks und ohne Anti-Quarks zu finden. Damit würden die gesuchte elektrische Ladungszahl sowie der Farbladungsvektor zwar übereinstimmen, für die schwache Ladung kann dies allerdings nicht erreicht werden.

drei Quarks: mit jeweils einer der drei Farbladungen (uud):  $I_{uud} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) = +\frac{1}{2}$

sechs Quarks: mit jeweils 2 Quarks mit der gleichen Farbladung (uuuddd):

$$I_{uuuddd} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) = 0$$

neun Quarks: mit jeweils 3 Quarks mit der gleichen Farbladung (uuuuddddd):

$$I_{uuuuddddd} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2}$$

(usw.)

Ein weiteres Teilchen, dessen Bestandteile aus der Ladungssumme des zusammengesetzten Teilchens berechnet werden können, ist das  $\alpha$ -Teilchen:

Dieses besitzt folgende Eigenschaften:  $Z_{\alpha} = +2$ ,  $\vec{C}_{\alpha} = \vec{0}$  und  $I_{\alpha} = 0$ .

Das  $\alpha$ - Teilchen ist ein Heliumkern, welcher aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Das Proton setzt sich aus drei Quarks zusammen: zwei Up-Quarks und ein Down-Quark und besitzt die Ladungszahlen  $Z_p = +1$ , und  $I_p = +\frac{1}{2}$  sowie den Farbladungsvektor  $\vec{C}_p = \vec{0}$ .

Das Neutron besteht auch aus drei Quarks: einem Up-Quark und zwei Down-Quarks. Somit besitzt es die Ladungszahlen  $Z_n = 0$ , und  $I_n = -\frac{1}{2}$  sowie den Farbladungsvektor  $\vec{C}_n = \vec{0}$ .

Der Heliumkern kann nicht nur aus zwei Protonen zusammengesetzt sein, da dann die schwache Ladungszahl nicht mit der tatsächlichen übereinstimmen würde.

## Wechselwirkungen und potenzielle Energien

1. Die Funktion besitzt einen hyperbolischen Verlauf. Für sich verkleinernde Abstände  $r$  geht  $E_{\text{pot}}$  gegen minus unendlich, für sich vergrößernde Abstände  $r$  geht sie gegen 0 (so wurde der Nullpunkt definiert)
2. Soll der Abstand eines Satelliten von der Erde um  $\Delta r$  vergrößert werden, muss Arbeit verrichtet werden. Die potenzielle Energie  $E$  des Satelliten nimmt zu. Die Änderung der potenziellen Energie  $\Delta E$  bei einer gleichen Abstandsänderung ist umso größer, je näher sich der Körper am Erdmittelpunkt befindet.

Für den Satelliten bedeutet dies: es wird mehr Energie benötigt den Satelliten um  $\Delta r = 600\text{km}$  von der Erdoberfläche weg ins All zu befördern als ihn im Weltraum weitere  $\Delta r = 600\text{km}$  von der Erde zu entfernen.

Wenn sich der Satellit immer weiter von der Erde entfernt, wird die Energiezunahme pro zurückgelegter Strecke immer geringer.

3. Die Kurvenverläufe bei der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung sehen qualitativ identisch aus, unterscheiden sich aber bezüglich der aufgetragenen Abstände.

Genau wie bei der Gravitation erkennt man bei der elektromagnetischen Wechselwirkung einen hyperbolischen Verlauf. Die Zunahme der potenziellen Energie bei Vergrößerung des Abstandes ist also umso kleiner, je größer der Abstand bereits ist. Bei der starken Wechselwirkung ist dies nur bei kleinen Abständen der Fall. Bei der schwachen Wechselwirkung hat die Kurve ebenfalls nur bei sehr kleinen Abständen einen hyperbolischen Verlauf. Bei der starken Wechselwirkung steigt die potenzielle Energie ab einem Abstand von etwa  $10^{-15}\text{ m}$  bei sich vergrößernden Abständen linear an. Die Zunahme der potenziellen Energie wird also nicht wie bei der Gravitation (und den anderen fundamentalen Wechselwirkungen) immer kleiner und die potenzielle Energie nähert sich somit nicht asymptotisch einem Grenzwert an. Physikalisch betrachtet bedeutet dies: Wenn sich ein Quark von einem anderen Quark entfernt, so nimmt die durch die starke Wechselwirkung bedingte potenzielle Energie in diesem Bereich gleichmäßig zu. Um die durch die starke Wechselwirkung verursachte Anziehung zu überwinden, also den Abstand um einen bestimmten Wert zu vergrößern, ist demnach immer die gleiche Energie notwendig bzw. es muss die gleiche Arbeit verrichtet werden. Der Verlauf der potenziellen Energie der schwachen Wechselwirkung geht mit wachsendem Abstand  $r$  sehr schnell gegen 0. Sie erreicht also bereits bei extrem kleinen Abständen (im Bereich von  $10^{-18}\text{ m}$ ) einen annähernd konstanten Wert. Das bedeutet, dass bereits bei diesen kleinen Abständen sehr wenig Energie nötig ist bzw. sehr wenig Arbeit verrichtet werden muss, um die Anziehung durch die schwache Wechselwirkung zu überwinden und den Abstand zu vergrößern. Daher müssten über diese Wechselwirkung zusammengesetzte Teilchen auf Abständen von weniger als  $10^{-18}\text{ m}$

gebunden sein. Solche Bindungsabstände lassen sich mit bekannten Teilchen nicht realisieren, da alle bekannten Teilchen zu leicht dafür sind.

## Ordnungsschema des Standardmodells

1. Es ergibt sich folgende Lösung:

$$\begin{aligned} \text{a) } \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}: \quad & Z_{\nu_e} = 0 & |\Delta Z| = 1 \\ & Z_{e^-} = -1 & \\ & I_{\nu_e} = +\frac{1}{2} & |\Delta I| = 1 \\ & I_{e^-} = -\frac{1}{2} & \end{aligned}$$

Die Umwandlung ist durch Abstrahlung eines  $W^-$ -Teilchens mit  $Z_{W^-} = -1$  und  $I_{W^-} = -1$  möglich:  $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$ .

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}: \quad & Z_u = +\frac{2}{3} & |\Delta Z| = 1 \\ & Z_d = -\frac{1}{3} & \\ & I_u = +\frac{1}{2} & |\Delta I| = 1 \\ & I_d = -\frac{1}{2} & \end{aligned}$$

b) Die Umwandlung ist durch Abstrahlung eines  $W^-$ -Teilchens mit  $Z_{W^-} = -1$  und  $I_{W^-} = -1$  möglich:  $d \rightarrow W^- + u$ .

2. Die Umwandlung von dem unteren Teilchen zum oberen Teilchen in der Gruppierung geschieht durch Abstrahlung eines  **$W^-$ -Teilchens**, einem Botenteilchen der **schwachen Wechselwirkung**.

Die umgekehrte Umwandlung geschieht, wenn das obere Teilchen ein  **$W^+$ -Teilchen** abstrahlt oder ein  **$W^-$ -Teilchen** absorbiert.

Man nennt diese Gruppierungen aus zwei Materieteilchen Dupletts (lat. duplex = doppelt) bezüglich der **schwachen** Ladung.

Die Teilchen innerhalb der Dupletts unterscheiden sich in ihrer schwachen und ihrer elektrischen Ladungszahl betragsmäßig jeweils um **1**.

Dabei steht das Teilchen mit **positiver** schwacher Ladung oben.

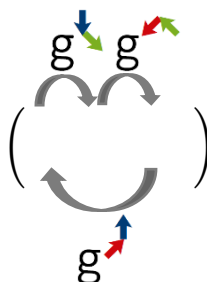
Nur über die **schwache** Wechselwirkung können Teilchen im selben Duplett ineinander umgewandelt werden.

3. weitere mögliche Dupletts:

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \text{ oder } \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \bar{s} \\ \bar{c} \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} \bar{b} \\ \bar{t} \end{pmatrix} \text{ oder } \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix} \text{ oder } \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$

4. Die Umwandlung der Quarks innerhalb eines solchen Triplets geschieht durch Abstrahlung (oder auch Absorption) von Gluonen.

Beispiel für Umwandlungen von Down-Quarks durch Abstrahlung der entsprechenden Gluonen:



#### 4. Mögliches Begriffsnetz:

**Beispiele für Dupletts bezüglich der schwachen Ladung.**

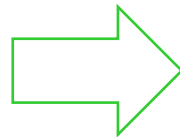
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} I_{\nu_e} = +\frac{1}{2} & Z_{\nu_e} = 0 \\ I_{e^-} = -\frac{1}{2} & Z_{e^-} = -1 \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} I_u = +\frac{1}{2} & Z_u = +\frac{2}{3} \\ I_d = -\frac{1}{2} & Z_d = -\frac{1}{3} \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} I_{e^+} = +\frac{1}{2} & Z_{e^+} = +1 \\ I_{\bar{\nu}_e} = -\frac{1}{2} & Z_{\bar{\nu}_e} = 0 \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} I_p = +\frac{1}{2} & Z_p = +1 \\ I_n = -\frac{1}{2} & Z_n = 0 \end{matrix}$$

**Teilchen, die sich über die schwache Wechselwirkung ineinander umwandeln befinden sich in einem Duplett.**



$$\Delta Z = +1$$

$$Z_{W^+} = +1$$

$W^+$

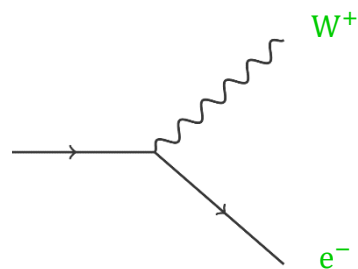
$$\Delta I = +1$$

$$I_{W^+} = +1$$

**Die Differenz der elektrischen und der schwachen Ladung vom oberen zum unteren Teilchen beträgt immer +1. Austauschteilchen der schwachen WW.**

Bsp.:

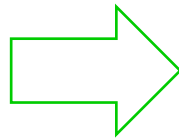
$\nu_e$



Beispiele für  
Tripletts bezüglich  
der starken Ladung.

$(u^{\uparrow}, u^{\leftarrow}, u^{\downarrow})$

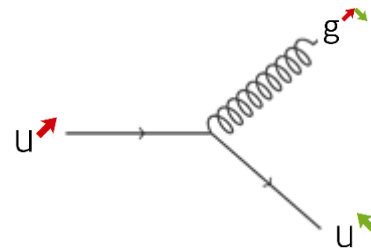
$(\bar{d}^{\leftarrow}, \bar{d}^{\downarrow}, \bar{d}^{\uparrow})$



$g$

Teilchen, die sich über die  
starke Wechselwirkung in-  
einander umwandeln be-  
finden sich in einem  
Triplet.

Bsp.:  $u^{\uparrow} \rightarrow g^{\leftarrow} + u^{\downarrow}$



## Botenteilchen

1.

- Durch Emission bzw. Absorption eines Botenteilchens können sich Energie, Impuls und Ladungen des Materieteilchens ändern.
- Es findet eine Teilchenumwandlung statt, falls sich mindestens eine Ladung des Materieteilchens ändert.

Anmerkungen:

zu b) Ein Teilchen unterliegt immer den Wechselwirkungen, deren Ladung es besitzt.

zu c) Die Botenteilchen, welches ein Teilchen abstrahlen oder absorbieren kann, richten sich nach den vorhandenen Ladungen des Teilchens.

2. In der folgenden Übersicht sind die Lösungen zu den möglichen Teilchen dargestellt:

	$e^-$	$\nu_e$	$e^+$	$d^{\bar{u}}$
el. Ladungszahl $Z$	-1	0	+1	$-\frac{1}{3}$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{C}$
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
elektromagnetische WW	ja	nein	ja	ja
starke WW	nein	nein	nein	ja
schwache WW	ja	ja	ja	ja
Mögliche Botenteilchen	$\gamma, W^+, W^-, Z$	$W^+, W^-, Z$	$\gamma, W^+, W^-, Z$	$\gamma, g, W^+, W^-, Z$

3. Für die vorgegebenen Teilchen können folgende Reaktionsgleichungen formuliert werden:

- Elektron:  $e^- \rightarrow W^- + ?$

Berechnung der Ladung des gesuchten Teilchens:

$$\text{Elektrische Ladung: } -1 = -1 + Z_? \quad Z_? = 0$$

$$\text{Starke Ladung: } \vec{0} = \vec{0} + \vec{C}_? \quad \vec{C}_? = \vec{0}$$

$$\text{Schwache Ladung: } -\frac{1}{2} = -1 + I_? \quad I_? = +\frac{1}{2}$$

Das gesuchte Teilchen ist ein Elektron-Neutrino:  $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$ .

- Elektron-Neutrino:  $\nu_e \rightarrow W^- + ?$

Berechnung der Ladung des gesuchten Teilchens:

$$\begin{array}{lll} \text{Elektrische Ladung:} & 0 = -1 + Z_\gamma = & Z_\gamma = +1 \\ \text{Starke Ladung:} & \vec{0} = \vec{0} + \vec{C}_\gamma & \vec{C}_\gamma = \vec{0} \\ \text{Schwache Ladung:} & +\frac{1}{2} = -1 + I_\gamma & I_\gamma = +\frac{3}{2} \end{array}$$

Es existiert kein bekanntes Elementarteilchen mit den errechneten Eigenschaften.

- Positron:  $e^+ \rightarrow W^- + ?$

Berechnung der Ladung des gesuchten Teilchens:

$$\begin{array}{lll} \text{Elektrische Ladung:} & +1 = -1 + Z_\gamma = & Z_\gamma = +2 \\ \text{Starke Ladung:} & \vec{0} = \vec{0} + \vec{C}_\gamma & \vec{C}_\gamma = \vec{0} \\ \text{Schwache Ladung:} & +\frac{1}{2} = -1 + I_\gamma & I_\gamma = +\frac{3}{2} \end{array}$$

Es existiert kein bekanntes Elementarteilchen mit den errechneten Eigenschaften.

- Grünes Down-Quark:  $d^{\downarrow} \rightarrow W^- + ?$











Berechnung der Ladung des gesuchten Teilchens:

$$\begin{array}{lll} \text{Elektrische Ladung:} & -\frac{1}{3} = -1 + Z_\gamma = & Z_\gamma = +\frac{2}{3} \\ \text{Starke Ladung:} & \downarrow = \vec{0} + \vec{C}_\gamma & \vec{C}_\gamma = \downarrow \\ \text{Schwache Ladung:} & -\frac{1}{2} = -1 + I_\gamma & I_\gamma = +\frac{1}{2} \end{array}$$

Das gesuchte Teilchen ist ein grünes Up-Quark:  $d^{\downarrow} \rightarrow W^- + u^{\downarrow}$ .



4.

	Anti-/ Materieteilchen	Abgestrahltes Botenteilchen	Gesuchtes Teilchen (?)
a)	$d$ 	$W^-$	$u$ 
el. Ladungszahl $Z$	$-\frac{1}{3}$	$-1$	$+\frac{2}{3}$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$		$\vec{0}$	
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$-1$	$+\frac{1}{2}$
b)	$e^-$	$W^+$	<b>Nicht möglich</b>
el. Ladungszahl $Z$	$-1$	$+1$	$-2$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$+1$	$-\frac{3}{2}$
c)	$e^-$	$W^-$	$\nu_e$
el. Ladungszahl $Z$	$-1$	$-1$	$0$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$-1$	$+\frac{1}{2}$
d)	$e^+$	$\gamma$	$e^+$
el. Ladungszahl $Z$	$+1$	$0$	$+1$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$
schwache Ladungszahl $I$	$+\frac{1}{2}$	$0$	$+\frac{1}{2}$
e)	$\bar{u}$ 	$g$ 	$\bar{u}$ 
el. Ladungszahl $Z$	$-\frac{2}{3}$	$0$	$-\frac{2}{3}$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$			
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$0$	$-\frac{1}{2}$

### Erklärungen zu den einzelnen Reaktionen:

- a) Das  $W^-$ -Teilchen besitzt eine elektrische und eine schwache Ladung, aber keinen Farbladungsvektor.  
Die Darstellung in der Lösung mit einem roten Farbladungsvektor zeigt, dass die starke Ladung gleichbleibt, nur die elektrische und die schwache Ladungszahl ändern sich.  
Das Down-Quark wandelt sich durch Abstrahlung eines  $W^-$ -Teilchens in ein Up-Quark um. In der Natur ist dieser Prozess nicht isoliert möglich, da Quarks nur in gebundenen Zuständen vorkommen.
- b) Es gibt kein Elementarteilchen mit der elektrischen Ladungszahl  $-2$  oder der schwachen Ladungszahl  $+\frac{2}{3}$ , somit ist dieser Prozess nicht möglich.
- c) Das Elektron strahlt ein  $W^-$ -Teilchen ab. Durch die Änderung der elektrischen und der schwachen Ladung wird es in ein Elektron-Neutrino umgewandelt.
- d) Ein Positron strahlt ein Photon ab, wodurch sich Energie und Impuls des Positrons ändern.
- e) Man nimmt an, dass ein Anti-Up-Quark einen anti-blauen Farbladungsvektor besitzt. Durch das Aussenden eines grün-anti-blauen Gluons ändert sich die Farbladung des Anti-Up-Quarks zu anti-grün.  
Da das Gluon nur starke Ladung besitzt, ändern sich die elektromagnetische und die schwache Ladung nicht. In der Natur ist dieser Prozess nicht isoliert möglich, da Quarks nur in gebundenen Zuständen vorkommen.

### Hinweis:

So gut wie alle Abstrahlungen (und auch Absorptionen) von Botenteilchen, insbesondere alle hier gegebenen, finden nicht isoliert statt, sondern stets gekoppelt an einen weiteren Prozess, wie zu Beispiel die Absorption eines Botenteilchens. Damit Energie- und Impulserhaltung bei den gegebenen Prozessen gleichzeitig erfüllt sein können, muss es sich bei mindestens einem der beteiligten Teilchen um ein virtuelles Teilchen handeln. Das bedeutet, im Feynman-Diagramm wird dieses Teilchen durch eine innere Linie dargestellt. Dies geht nur, wenn ein weiterer Prozess stattfindet. Weitere Informationen zu virtuellen Teilchen sind im Kapitel 2.5.6 *Energie-Impuls-Erhaltung und virtuelle Teilchen* im Band *Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen* unserer Unterrichtsmaterialien zu finden ([www.teilchenwelt.de/tp](http://www.teilchenwelt.de/tp)).

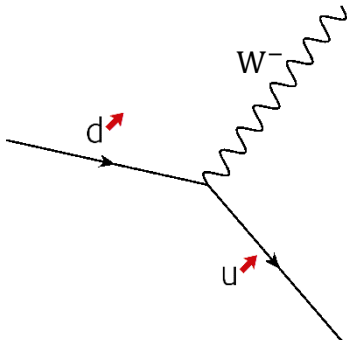
## Methodische Hinweise zu Botenteilchen

Aufgabe 3 und Aufgabe 4 lassen mehrere Lösungen zu, sofern bereits die Materieteilchen und Anti-Materieteilchen der zweiten und dritten Generation bekannt sind. Da es sich bei diesen Teilchen nur um „schwerere Kopien“ der Teilchen der ersten Generation (Up-Quark, Down-Quark, Elektron und Elektron-Neutrino) handelt, gibt es jeweils drei Teilchen mit exakt gleichen Ladungen aber unterschiedlichen Massen. Ist eine gegebene Botenteilchenabstrahlung oder -absorption prinzipiell möglich, gibt es also jeweils drei mögliche Teilchen, die die notwendigen Kriterien bezüglich der Ladungen erfüllen.

Sofern nur die erste Generation der Materieteilchen bekannt ist, ist die Lösung jedoch eindeutig. Damit die Lösung in jedem Fall eindeutig ist, muss weiterhin bekannt sein, dass Teilchenumwandlungen über Botenteilchen nicht generationsübergreifend (also lediglich innerhalb der Multipletts) stattfinden. Dieses Konzept kann unter Nutzung dieser Aufgaben eingeführt werden.

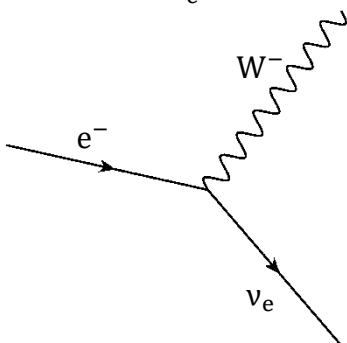
Die vierte Teilaufgabe kann erweitert werden, indem die Feynman-Diagramme für die Prozesse dargestellt werden:

a)  $d \rightarrow W^- + u$

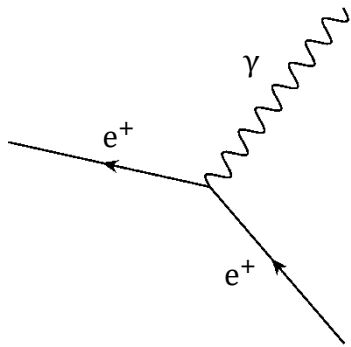


b) Nicht möglich.

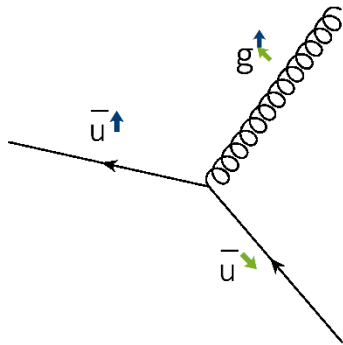
c)  $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$



d)  $e^+ \rightarrow \gamma + e^+$

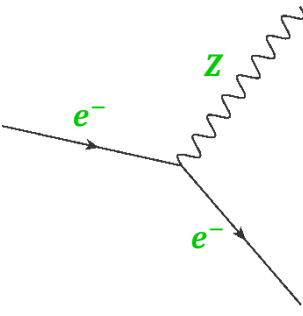
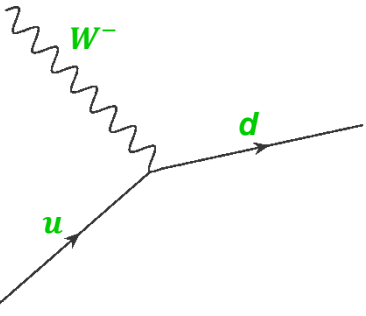
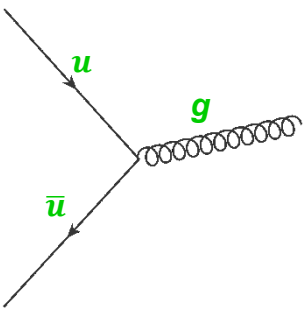
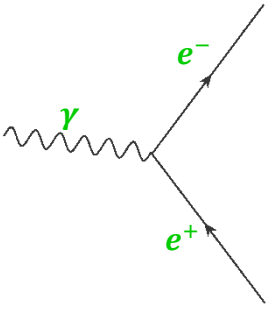


e)  $\bar{u} \uparrow \rightarrow g \uparrow + \bar{u} \downarrow$



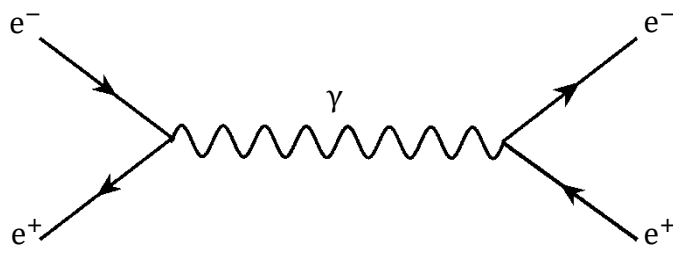
# Grundbausteine der Feynman-Diagramme

1. Die Tabelle ist wie folgt auszufüllen:

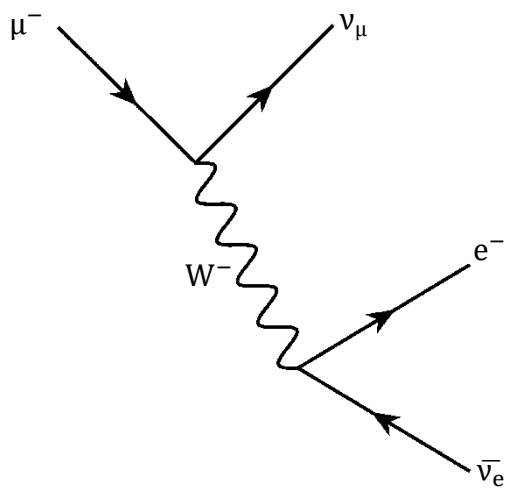
Bezeichnung des Bausteins	Beispiel	Vertex
<b>Abstrahlung eines Botenteilchens</b>	Ein Elektron strahlt ein Z-Teilchen ab.	
<b>Absorption eines Botenteilchens</b>	Ein Up-Quark fängt ein W <sup>-</sup> -Teilchen ein. Dabei wandelt es sich in ein Down-Quark um.	
<b>Paarvernichtung</b>	Ein Up-Quark und ein Anti-Up-Quark vernichten sich unter Entstehung eines Gluons.	
<b>Paarerzeugung</b>	Aus einem Photon entsteht ein Elektron-Positron-Paar.	

2. Es entstehen folgende Feynman-Diagramme:

a)

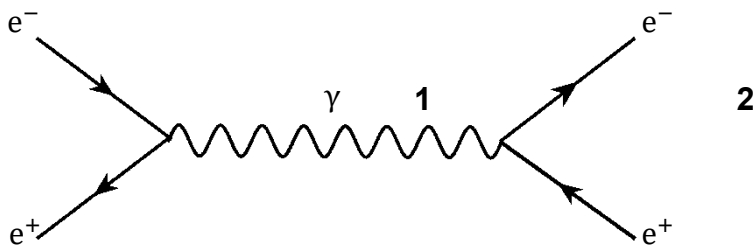


b)

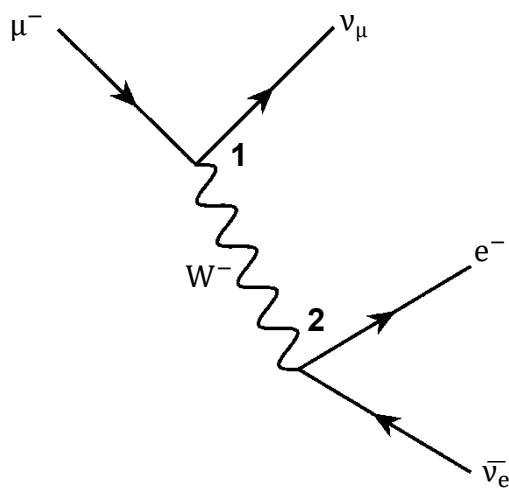


## Methodische Hinweise zu Feynman-Diagrammen

Eine Möglichkeit zur Erweiterung der Aufgabe besteht in der Berechnung der Ladungserhaltung an jedem Vertex und für den gesamten Prozess.



	<b>1:</b> $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$	<b>2:</b> $\gamma \rightarrow e^- + e^+$
el.:	$-1 + 1 = 0$	$0 = -1 + 1$
stark:	$\vec{0} + \vec{0} = \vec{0}$	$\vec{0} = \vec{0} + \vec{0}$
schwach:	$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 0$	$0 = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$



<b>1:</b>	$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^-$
el.:	$-1 = 0 + (-1)$
stark:	$\vec{0} = \vec{0} + \vec{0}$
schwach:	$-\frac{1}{2} = +\frac{1}{2} + (-1)$
<b>2:</b>	$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$
el.:	$-1 = -1 + 0$
stark:	$\vec{0} = \vec{0} + \vec{0}$
schwach:	$-1 = -\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right)$

**Gesamtprozess:**  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-$

el.:	$-1 = 0 + 0 + (-1)$
stark:	$\vec{0} = \vec{0} + \vec{0} + \vec{0}$
schwach:	$-\frac{1}{2} = +\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right)$