

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

Technische Universität Dresden

Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften

Fachrichtung Physik

Institut für Kern- und Teilchenphysik

Masterarbeit im Fach Physik

Lehramtsbezogener Studiengang Allgemeinbildende Schulen

# **Erstellung von Arbeitsblättern zur Einführung des Standardmodells der Teilchenphysik im Schulunterricht**

vorgelegt von

Rahel Andreas

geboren am 21. März 1988 in Leipzig

1. Gutachter: Prof. Dr. Michael Kobel

2. Gutachter: Prof. Dr. Gesche Pospiech

Eingereicht am 29. September 2015

# INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	5
2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1. Das Standardmodell	7
2.2. Wechselwirkungen	8
2.2.1. Gravitationswechselwirkung	10
2.2.2. Elektromagnetische Wechselwirkung	10
2.2.3. Starke Wechselwirkung	10
2.2.4. Schwache Wechselwirkung	11
2.2.5. Stärke, Reichweite und $E_{\text{pot}}$ der Wechselwirkungen	11
2.3. Die Ladungen und die Ordnung des Standardmodells	16
2.3.1. Die elektrische Ladung	17
2.3.2. Die starke Ladung	17
2.3.3. Die schwache Ladung	19
2.4. Materie- und Anti-Materieteilchen	20
2.5. Botenteilchen	23
2.6. Feynman-Diagramme	26
3. DIDAKTISCHE GRUNDLAGEN	31
3.1. Rolle der Aufgabe	31
3.2. Charakterisierung	32
3.2.1. Funktion der Aufgabe im Unterricht	32
3.2.2. Einordnung in Kompetenzbereiche	34
3.2.3. Aufgabentypen	34
3.3. Aufgabenkultur	35
3.4. Aufgabenqualität	35
4. FACHLICH-FACHDIDAKTISCHE ÜBERLEGUNGEN	39
4.1. Strukturierung und Fachbegriffe	39
4.2. Motivation des Themas für den Unterricht	41
4.3. Einordnung in übergeordnete Standards	44

4.4.	Mögliche Anknüpfungspunkte im Lehrplan . . . . .	47
4.4.1.	Lehrplan ohne direkten Themenbezug . . . . .	47
4.4.2.	Lehrplan mit dem Thema Standardmodell . . . . .	48
5.	DIDAKTISCHE ANALYSE DER AUFGABEN	51
5.1.	Allgemeine Anmerkungen zur Umsetzung . . . . .	51
5.1.1.	Vorkenntnisse . . . . .	52
5.1.2.	Lernziele . . . . .	52
5.1.3.	Methodik . . . . .	53
5.1.4.	Differenzierung . . . . .	53
5.2.	Anmerkungen zur Umsetzung der erstellten Aufgaben . . . . .	53
5.2.1.	Wechselwirkungen . . . . .	53
5.2.2.	Die Grundpfeiler des Standardmodells . . . . .	55
5.2.3.	Ladungen . . . . .	56
5.2.4.	Wechselwirkungen und potenzielle Energien . . . . .	57
5.2.5.	Ordnungsschema des Standardmodells . . . . .	58
5.2.6.	Botenteilchen . . . . .	59
5.2.7.	Grundbausteine der Feynman-Diagramme . . . . .	61
A.	ANHANG	63
A.1.	Aufgabe Kennen der Wechselwirkungen . . . . .	64
A.2.	Aufgabe Grundpfeiler des Standardmodells . . . . .	72
A.3.	Aufgabe Ladungen . . . . .	76
A.4.	Aufgabe Wechselwirkungen und potenzielle Energien . . . . .	83
A.5.	Aufgabe Ordnungsschema des Standardmodells . . . . .	89
A.6.	Aufgabe Botenteilchen . . . . .	99
A.7.	Aufgabe Feynman-Diagramme . . . . .	110
A.8.	Übersicht über die Elementarteilchen des Standardmodells . . . . .	118
A.9.	Glossar der physikalischen Begriffe . . . . .	124

# 1. EINLEITUNG

Die Kern- und Teilchenphysik ist ein Themengebiet, welches sich mit wenigen Worten gut umreißen lässt: Der Aufbau der Materie, die kleinsten Teilchen und deren Zusammenwirken stehen im Mittelpunkt. Die mathematische Beschreibung erfolgt durch das Standardmodell, eine Theorie, deren genaue Erläuterung vertiefte Kenntnisse in Physik und Mathematik voraussetzt. Vor allem für Personen, die kein vertieftes Fachwissen besitzen, erschwert dies den Zugang zur Teilchenphysik. Dabei ist das öffentliche Interesse an diesem Forschungsgebiet vorhanden, wie sich zuletzt 2012 bei der Entdeckung des Higgs-Teilchens durch die Resonanz in den Medien zeigte. Die schulische Relevanz wird ebenfalls durch die Einführung des Themas der Elementarteilchen und Wechselwirkungen in den ersten Lehrplan im Bundesland Nordrhein-Westfalen deutlich. Damit ist der Bedarf an übersichtlichen und verständlichen Materialien für die Schule vorhanden, in denen die mathematischen Hürden außen vor gelassen werden.

Einen Ansatz zur deutlichen und vertieften Beschreibung der Konzepte und Aussagen des Standardmodells bieten die „Schulmaterialien zur Teilchenphysik“ des Netzwerks Teilchenwelt (Netzwerk Teilchenwelt 2015). Die Erstellung passender Arbeitsblätter zu diesen Materialien, die für den Einsatz in der Sekundarstufe II geeignet sind, dient als Grundidee der vorliegenden Masterarbeit. Die für die Arbeitsblätter ausgewählten Teilgebiete ermöglichen einen Einblick in die grundlegenden Prinzipien des Standardmodells.

Das notwendige physikalische Grundwissen zum Verstehen der Aufgaben wird in dem Kapitel **PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN** beschrieben. In der Umwelt und in Experimenten beobachtbare Phänomene werden auf vier fundamentale Wechselwirkungen zurückgeführt. Mittels der Beschreibung der typischen Eigenschaften werden Gemeinsamkeiten dargestellt, welche eine vereinheitlichte „Weltenformel“ als Erweiterung des Standardmodells als wahrscheinlich erscheinen lassen. Bisher konnten alle entdeckten Teilchen durch das Standardmodell beschrieben werden. Und obwohl dadurch vorhergesagte Teilchen in Experimenten nachgewiesen wurden, gibt es trotzdem nicht erklärbare Phänomene, wie beispielsweise die dunkle Energie. Die Elementarteilchen werden durch ihre Ladungen und Massen charakterisiert, sowie nach den aus den mathematischen Beschreibungen stammenden Ladungssymmetrien geordnet. Dabei werden Materieteilchen (mit den dazugehörigen Anti-Materieteilchen) und Botenteilchen unterschieden, die, je nach Ladungen, miteinander in Wechselwirkung treten können. Durch Feynman-Diagramme

können diese Wechselwirkungsprozesse graphisch dargestellt werden.

Das im 3. Kapitel erläuterte didaktische Grundwissen beschreibt die Aufgabe als wichtiges Strukturierungsmittel des Unterrichts. Die Ansprüche an Aufgaben variieren abhängig von der Lerngruppe und dem Lernziel, trotzdem lassen sich allgemeine Kriterien zur Beschreibung der Qualität finden. Durch die Differenzierung der Aufgaben werden diese variiert und an den gewünschten Einsatz angepasst.

Die Verbindung zwischen den physikalischen und der didaktischen Grundlagen wird in FACHLICH-FACHDIDAKTISCHE ÜBERLEGUNGEN geschaffen. Die Wichtigkeit der anfänglichen Erläuterung der Ladungseigenschaften, um zur resultierenden Betrachtung des Ordnungsschemas der Elementarteilchen hin zu führen, wird als zentraler Punkt betrachtet. Mit dieser Strukturierung, der auch im Kapitel 2 gefolgt wird, wird die grundlegende Logik bewusst gemacht. Diese verständliche Herangehensweise motiviert vielleicht, die Thematik des Standardmodells vertiefen zu wollen. Außerdem werden weitere Aspekte zur MOTIVATION DES THEMAS FÜR DEN UNTERRICHT genannt, welche die Relevanz und die Möglichkeiten der Teilchenphysik herausstellen. Für den Unterricht werden Anknüpfungspunkte aufgezeigt, an denen die in der vorliegenden Masterarbeit vertieften Grundlagen des Standardmodells vermittelt werden können. Einerseits wird dazu der sächsische Lehrplan betrachtet, der das Thema nicht im Curriculum verankert hat. Andererseits wird am nordrhein-westfälischen Lehrplan der Inhaltsbereich *Standardmodell* mit den vorliegenden Aufgaben verknüpft.

Die DIDAKTISCHE ANALYSE DER AUFGABEN beschreibt die verfolgten Lernziele und das zu den Arbeitsblättern notwendige Vorwissen. Der methodische Aufbau wird analysiert und Differenzierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Arbeitsblätter mit und ohne Musterlösung sind im ANHANG zu finden. Die Elementarteilchen mit ihren charakterisierenden Eigenschaften werden im Abschnitt A.8 aufgelistet. Diese Übersicht kann zur Unterstützung der erstellten Aufgaben dienen, da spezifische Ladungszahlen oder Massen nachgeschlagen werden können. Das A.9 schließt diese Arbeit mit einer kurzen Beschreibung der wichtigsten Fachbegriffe ab.

## 2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Kenntnisse dargestellt, welche für Lehrkräfte notwendig sind, um die Teilchenphysik vertiefter zu verstehen. Die Physik hinter dem Standardmodell ist sehr komplex und vor allem mathematisch anspruchsvoll. Das Ziel ist eine verständliche und greifbare Darstellung der Grundlagen durch Verallgemeinerungen und qualitativen Beschreibungen, welche die mathematischen Komponenten ersetzen.

Im Abschnitt 2.1. DAS STANDARDMODELL wird einerseits die Bedeutung dieser Theorie für die Teilchenphysik dargestellt. Andererseits werden die Grenzen aufgezeigt und weiterführende Modelle angesprochen. Mit den WECHSELWIRKUNGEN wird der erste Grundbaustein des Standardmodells im Abschnitt 2.2 erläutert. Die Phänomene der vier fundamentalen Wechselwirkungen werden beschrieben und die Eigenschaften STÄRKE, REICHWEITE UND  $E_{\text{pot}}$  DER WECHSELWIRKUNGEN im Abschnitt 2.2.5 verglichen. Die Ladungen sind der zweite Grundbaustein, nach denen die Elementarteilchen strukturiert werden, wie im Abschnitt 2.3. DIE LADUNGEN UND DIE ORDNUNG DES STANDARDMODELLS gezeigt wird. Der dritte Grundbaustein des Standardmodells sind die Elementarteilchen, sie werden in den Kapiteln 2.4. MATERIE- UND ANTI-MATERIETEILCHEN und 2.5. BOTENTEILCHEN vorgestellt. Zur graphischen Veranschaulichung der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen werden FEYNMAN-DIAGRAMME genutzt. Grundlegende Regeln und Darstellungen werden im Abschnitt 2.6 erläutert.

### 2.1. DAS STANDARDMODELL

Die Erklärung des Standardmodells wirft häufig die Frage auf woher die Gewissheit stammt, dass diese Theorie richtig ist und warum keine andere Beschreibung gültig sein kann. Exakt lassen sich diese Fragen nicht beantworten. Das Standardmodell der Teilchenphysik, womit umgangssprachlich oft das Ordnungsschema der Elementarteilchen bezeichnet wird, ist das bisher erfolgreichste Modell zur Beschreibung der kleinsten bisher in Experimenten entdeckten Teilchen und deren Zusammenwirken. Das Standardmodell konnte Teilchen durch die ordnenden Symmetrien vorhersagen, welche in Experimenten bestätigt werden konnten, so zum Beispiel 1995 das Top-Quark, dessen Existenz seit der Entdeckung des Bottom-Quarks durch Lederman 1977 vermutet wurde (Ne'eman und Kirsh 1995, S. 258 f.). Auch die Entdeckung des von Higgs schon in den 1960er Jahren postulierten

Higgs-Teilchens zur Erklärung der elektroschwachen Symmetriebrechung wurde 2012 unter großem medialen Interesse verkündet.

Durch das Standardmodell der Teilchenphysik werden drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen (Grundkräfte) beschrieben: die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung. Die Vereinheitlichung aller Grundkräfte in einer Formel ist bisher nicht gelungen. Eine andere Theorie, in der die Zusammenführung aller Grundkräfte in einem Modell angestrebt wird, ist die Stringtheorie, welche die kleinsten Teilchen als schwingende Saiten (Strings) beschreibt. Diese ist bisher allerdings laut Ellanger (2008, S. 194) weder konsistent noch trifft sie Aussagen, die sich durch Experimente überprüfen lassen (Bleck-Neuhaus 2010, S. 661). Dafür könnte mit ihr die Gravitationswechselwirkung durch den Austausch eines Gravitons erklärt werden.

Warum aber genau die Theorie des Standardmodells richtig sein soll, kann nicht beantwortet werden, es ist eine bisher funktionierende Theorie, welche durch noch kein Experiment widerlegt werden konnte. Trotzdem gibt es ungeklärte Fragen, die durch das Standardmodell nicht beantwortet werden können: Ob es noch weitere, schwerere Teilchengenerationen gibt<sup>1</sup>, die *Baryonenasymmetrie*<sup>2</sup> und die dunkle Energie und dunkle Materie. Mit der das Standardmodell erweiternden Theorie der Supersymmetrie könnte ein Teil dieser Probleme gelöst werden. Die von dieser Theorie vorhergesagten supersymmetrischen Teilchen konnten jedoch noch nicht nachgewiesen werden.

Im folgenden Text werden die in den erstellten Aufgaben angesprochenen Themen grundlegend erklärt und bis zu einem gewissen Grad vertieft dargestellt. Das oft als Standardmodell bezeichnete Ordnungsschema der Elementarteilchen in einer Übersicht bildet dabei nicht, wie oft üblich, den Ausgangspunkt der Erläuterungen. Die Grundlage stellt vielmehr die angesprochene ordnende Symmetrie dar, aus der die Ladungen der drei Wechselwirkungen resultieren und von der ausgehend die Elementarteilchen im Standardmodell angeordnet werden.

## 2.2. WECHSELWIRKUNGEN

Es gibt vier fundamentale Wechselwirkungen: Die Gravitationswechselwirkung, die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung und die schwache Wechselwirkung. Um die beobachtbaren und durch Experimente wahrnehmbaren Phänomene dieser Welt und des Universums auf vier zugrunde liegende Kräfte zurückzuführen, haben Forscher lang gearbeitet und Theorien aufgestellt. Die Beschreibung der irdischen Fallgesetze und der

---

<sup>1</sup> Die Teilchengenerationen werden in 2.4. MATERIE- UND ANTI-MATERIETEILCHEN erläutert.

<sup>2</sup> Bei der Entstehung des Universums ist mehr Materie als Antimaterie entstanden, aus der unsere Welt besteht. Warum die Materie und Antimaterie nicht zu gleichen Teilen aus Energie erzeugt wurde, ist ungeklärt.

Planetenbewegungen als Gravitation durch Newton und Einstein war eine erste Zusammenführung zweier anfangs unterschiedlicher Theorien. Eine weitere Vereinfachung ergab sich in der Zusammenführung des Magnetismus und der Elektrizität zum Elektromagnetismus von Maxwell. Während Yukawa 1935 erstmals eine Theorie der starken Wechselwirkung für Nukleonen (Atomkernbausteine) präsentierte, formulierten Gell-Mann und Zweig 1964 eine Theorie kleinerer Bausteine namens Quarks, die allerdings noch nicht erklären konnte, wie drei gleiche Quarks, von denen mindestens zwei denselben Zustand<sup>3</sup> einnehmen, am selben Ort existieren können (Ne'eman und Kirsh 1995, S. 236 f.). Eine zusätzliche Quantenzahl der Quarks mit drei Zuständen zur Erklärung der Beobachtung wurde von Nambu und Han *Farbe* genannt. Als Theorie der Quantenchromodynamik erklärt sie die Kraft zwischen den Quarks durch den Austausch von Gluonen, den Botenteilchen der starken Wechselwirkung (ebd.).

Die erste Formulierung der schwachen Wechselwirkung zur Erklärung des  $\beta$ -Zerfalls unter Aussendung eines Teilchens, welches nicht elektrisch geladen ist, geschah 1934 durch Fermi im Zuge der Beschreibung des Neutrinos (Ne'eman und Kirsh 1995, S. 73). Die Zusammenführung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung in einer einheitlichen Theorie fand in den 1960er und 1970er Jahren statt, sie wurde die elektroschwache oder auch Weinberg-Salam-Glashow-Theorie genannt (Ne'eman und Kirsh 1995, S. 131). Aus diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, weshalb es nun genau vier fundamentale Wechselwirkungen gibt, wenn Vereinfachungen in einheitlichen Theorien möglich sind. Nach Ne'eman und Kirsh (1995, S. 124) sind die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung nur zwei Erscheinungsformen einer fundamentalen elektroschwachen Wechselwirkung. Andererseits sind die Kopplungsparameter in den zugrunde liegenden Kraftgesetzen unterschiedlich (siehe Tabelle 2.1).

Die Zusammenführung aller Wechselwirkungen in einer großen einheitlichen Theorie, der „Theory of everything“, ist eines der Ziele der modernen Teilchenphysik.

Diese Theorie sollte alle vier der uns heute bekannten Wechselwirkungen sowie alle entdeckten Teilchen beschreiben. Die Annahme, dass solch eine Beschreibung tatsächlich möglich ist, ist unter anderem darin begründet, dass man vermutet, dass es zum Zeitpunkt des Urknalls nur eine einzige Wechselwirkung gegeben hat. (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 9)

Die vier fundamentalen Wechselwirkungen sind nicht alle gleich durch den Menschen wahrnehmbar.

---

<sup>3</sup> Nach dem Pauli-Prinzip können keine zwei Teilchen am selben Ort sein, die in allen Quantenzahlen übereinstimmen. Diese erst nur für Elektronen geltende Formulierung wurde für alle Teilchen mit nicht ganzzahligem Spin erweitert und deren Verhalten wird durch die Fermi-Dirac-Statistik beschrieben, weswegen sie Fermionen genannt werden (Ne'eman und Kirsh 1995, S. 63). Dazu zählen auch alle Anti-/Materieteilchen des Standardmodells, also alle elementaren Materieteilchen und Anti-Materieteilchen mit Ausschluss der Botenteilchen und des Higgs-Teilchens.

### 2.2.1. GRAVITATIONSWECHSELWIRKUNG

Die Gravitation wird vom Menschen als sehr starke Kraft wahrgenommen. Die Anziehung Richtung Erdmittelpunkt ist beim freien Fall ähnlich beeindruckend wie die Kraftstoffmengen, die für den Transport einer Rakete von der Erdoberfläche Richtung Weltall notwendig sind. Selbst die Atmosphäre wird durch die Gravitation auf der Erde gehalten, Satelliten umkreisen sie ohne in den Weiten des Alls zu verschwinden und Galaxien bilden sich aufgrund der Gravitationswechselwirkung. Die Gravitation wird im Allgemeinen als die schwächste der Grundkräfte bezeichnet, weil sie bei Abständen und Energien, wie sie in der Teilchenphysik üblich sind, um viele Größenordnungen schwächer als alle anderen Kräfte ist.

### 2.2.2. ELEKTROMAGNETISCHE WECHSELWIRKUNG

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist der Verursacher aller Phänomene, die offensichtlich mit Elektrizität und Magnetismus zu tun haben, wie Ströme, Magnetfelder und elektromagnetische Wellen. Auch die Kräfte zwischen Molekülen und die Übertragung von Nervenimpulsen haben hier ihren Ursprung. Für den Menschen sind elektrische Phänomene spürbar, zum Beispiel bei elektrostatisch aufgeladenen Haaren. Hingegen gibt es für den Magnetismus keine Rezeptoren im Körper, wodurch dieser nicht wahrgenommen werden kann. Dass die elektromagnetische Kraft stärker ist als die Gravitationskraft wird bei elektrischen Hubmagneten sichtbar. Eine noch deutlichere Veranschaulichung bringt die Einsicht, dass die Atome des Stuhls, auf dem man sitzt, durch die elektromagnetische Wechselwirkung zusammenhalten.

### 2.2.3. STARKE WECHSELWIRKUNG

Auch das elektrisch neutrale Atom ist unter anderem aus elektrisch geladenen Teilchen aufgebaut, den Protonen, die mit den elektrisch neutralen Neutronen den Atomkern bilden, der von den elektrisch negativ geladenen Elektronen umgeben ist. Die elektrisch gleich geladenen Protonen sollten sich eigentlich gegenseitig abstoßen. Weil Atomkerne trotzdem stabil sind, wird auf die Existenz einer noch stärkeren Kraft geschlossen, der sogenannten starken Kraft. Diese wirkt zwischen den Quarks, den Bestandteilen, aus denen Proton und Neutron aufgebaut sind, und hält den Atomkern zusammen (vergleiche Abbildung 2.1). Obwohl für die Nukleonen die Summe der starken Ladungen gleich Null ist (sie sind stark neutral geladen), finden starke Wechselwirkungen zwischen den Quarks zweier benachbarter Nukleonen, ähnlich der Elektronenpaarbindung im Molekülverbund, statt. Die starke Kraft ist ebenfalls für die Kernfusion verantwortlich, bei der sich die elektrisch gleich geladenen Kerne eigentlich gegenseitig abstoßen sollten. Treffen sie mit genügend

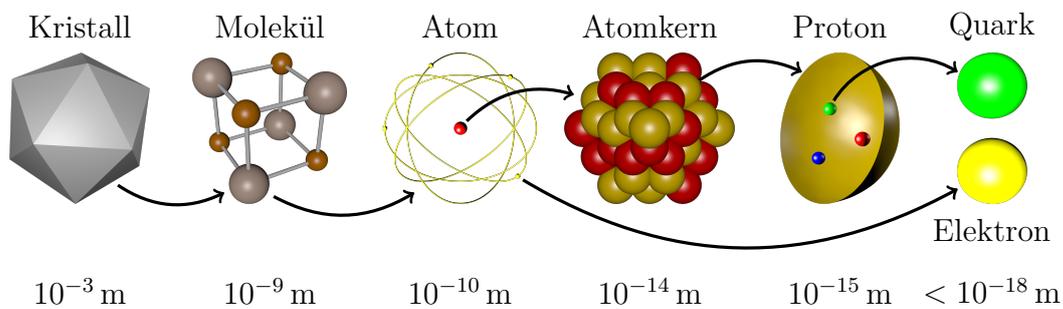


Abbildung 2.1.: Der Aufbau der Materie vom Kristall bis hin zu den Quarks (nach Hacker 1999).

hoher Energie aufeinander können sie sich soweit nähern, dass die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks die Fusion ermöglicht. Dadurch wird klar, dass die Reichweite der starken Wechselwirkung sehr begrenzt sein muss, mindestens kleiner als ein Atomradius, da sonst spontane Kernfusionen auf der Erde beobachtbar wären (vergleiche Abschnitt 2.2.5. STÄRKE, REICHWEITE UND  $E_{\text{pot}}$  DER WECHSELWIRKUNGEN).

#### 2.2.4. SCHWACHE WECHSELWIRKUNG

Die schwache Wechselwirkung ist, ebenso wie die starke Wechselwirkung, für den Menschen nicht spürbar. Beim  $\beta$ -Zerfallsexperiment, bei dem sich ein Neutron unter Aussendung eines Elektrons in ein Proton umwandelt, konnten die Auswirkungen der schwachen Kraft nur indirekt durch eine vorerst nicht erklärbare Energiedifferenz beobachtet werden, aus welcher Fermi das Neutrino vorhersagte. Die umgekehrte Umwandlung eines Protons in ein Neutron, wie es bei der Kernfusion in der Sonne bei der Verschmelzung zweier Wasserstoffkerne unter Aussendung eines Positrons und eines Neutrinos geschieht, kann dadurch erklärt werden. Ein weiteres Beispiel ist der sogenannte K-Einfang. In einem Atomkern wandelt sich ein Proton in ein Neutron um, indem ein Elektron von der am nächsten am Kern gelegenen Schale (der K-Schale) eingefangen wird. Dabei wird zur Erhaltung der schwachen Ladung ein Neutrino ausgesendet. Im Myonzerfall konnte eine weitere Teilchenumwandlung über die schwache Wechselwirkung beobachtet werden, allerdings „[ist es] allen schwachen Wechselwirkungen eigen, daß die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens ziemlich gering ist, was auf die relative Schwäche der schwachen Wechselwirkung im Vergleich zur starken und elektromagnetischen Wechselwirkung schließen läßt“ (Ne’eman und Kirsh 1995, S. 131).

#### 2.2.5. STÄRKE, REICHWEITE UND $E_{\text{pot}}$ DER WECHSELWIRKUNGEN

Im vorangegangenen Abschnitt 2.2 wurde von der relativ schwachen Gravitation gesprochen, die nicht so stark ist wie die elektromagnetische Wechselwirkung, ganz abgesehen von der starken Wechselwirkung deren Name schon beschreibt, dass sie wohl die Stärkste ist. Der

Vergleich der Stärken der Wechselwirkungen unter gleichen Bedingungen ist nicht möglich, da sie verschiedene Eigenschaften haben. Ne’eman und Kirsh (1995, S. 134) erläutern die Probleme folgendermaßen:

Die Trennung des Protons vom Neutron im Deuteriumkern, der durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten wird, würde eine Energie von 2 MeV erfordern, während die Trennung zweier Atome in einem durch elektrostatische Kraft zusammengehaltenen Molekül eine Energiezufuhr der Größenordnung 2 eV erfordert. (...) Zwei benachbarte Protonen können keine stabile Struktur bilden. Bedeutet dies, daß ihre gegenseitige elektrostatische Abstoßung größer ist als die starke Kraft, die sie anzieht?

Eine (unter anderem) nicht beachtete Größe in diesem Beispiel ist der unterschiedliche Abstand zwischen den genannten Teilchen, aber auch Ladungseigenschaften spielen eine hier nicht näher genannte Rolle. Eine Möglichkeit der Gegenüberstellung der Stärken bieten die sogenannten Kopplungsparameter  $\alpha_{WW}$  (auch Kopplungskonstanten). Durch sie lässt sich die Stärke der vier Wechselwirkungen vergleichen, da „[die] einer Kraft zugeordnete Kopplungskonstante bestimmt, wie stark ein Teilchen mit einem Feld wechselwirkt (...)“ (Coughlan und Dodd 1996, S. 312).

In Tabelle 2.1 sind die Kopplungsparameter der vier Wechselwirkungen im Vergleich dargestellt. Der Kopplungsparameter der Gravitationswechselwirkung hat einen verschwindend geringen Wert, der durch die Massenabhängigkeit nicht konstant ist. Die Wechselwirkungen können nach der Kopplungskonstante für sehr kleine Abstände von der stärksten zur schwächsten folgendermaßen geordnet werden: Starke Wechselwirkung > schwache Wechselwirkung > elektromagnetische Wechselwirkung > Gravitation.

Die in der Tabelle ebenfalls aufgeführten Reichweiten sind für die Gravitation und für die elektromagnetische Wechselwirkung unendlich, während die starke und die schwache sehr kurze Reichweiten haben. Das Photon, das Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung, trägt weder eine Ladung noch eine Masse<sup>4</sup>, wodurch die unendliche Reichweite erklärt wird. Vergleicht man die Reichweite der starken Wechselwirkung mit den Größenordnungen beim Aufbau der Materie in Abbildung 2.1, wird festgestellt, dass sie mit etwa  $2 \cdot 10^{-15}$  m auf die Größe eines Protons begrenzt ist. Gluonen, die Botenteilchen der starken Wechselwirkung, sind ebenso wie das Photon masselos, da sie jedoch selbst eine starke Ladung tragen wechselwirken sie auch miteinander. Die Reichweite der starken Wechselwirkung wird durch die immer größer werdende Kraft beim Versuch die Quarks zu trennen beschränkt. Durch den Zusammenhang  $F_G = -\frac{\Delta E_{pot}}{\Delta r}$  kann aus der potentiellen Energie (vergleiche Tabelle 2.1) das Kraftgesetz abgeleitet werden.

---

<sup>4</sup> Es ist in der gesamten vorliegenden Arbeit immer die Ruhemasse des Teilchens gemeint. Die Masse hat die Einheit MeV /  $c^2$ , die sich durch Umstellen der Formel  $E = mc^2$  ergibt. Der Ausdruck der Einheit der Energie in Elektronenvolt (eV) ist in der Teilchenphysik üblich.  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Wechselwirkung	$E_{pot}(r)$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$E_{pot} = -G \frac{m_1 \cdot m_2}{r}$	$\infty$	$\alpha_G \approx \frac{1}{10^{38}} - \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetische	$E_{pot} = \hbar c \alpha_{em} \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$	$\infty$	$\alpha_C \approx \frac{1}{137}$
starke	$E_{pot} = \hbar c \alpha_S \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r} + k \cdot r$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_S \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{10}$
schwache	$E_{pot} = \hbar c \alpha_W \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot e^{-\frac{r}{\lambda_W}}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_W \approx \frac{1}{30}$

Tabelle 2.1.: Für die vier fundamentalen Wechselwirkungen sind die Gleichungen für die potenziellen Energien, die Kopplungsparameter und die Reichweiten im Vergleich dargestellt (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 24).

Abbildung 2.3 zeigt bei c) den Graphen der  $E_{pot}$  der starken Wechselwirkung. Es ist deutlich, dass die Kurve keinem Grenzwert zustrebt wie es bei den anderen Wechselwirkungen in den Graphen a), b) und c) zu beobachten ist, sondern immer weiter ansteigt. Mit wachsendem Abstand steigt die Energie, die benötigt wird um Quark von einem Anti-Quark zu entfernen, ins Unendliche. Ab einem Abstand von etwa  $10^{-15} \text{ m}$  würde die Energie ausreichen, um daraus ein neues Quark-Anti-Quark-Paar zu erzeugen, welches mit den ursprünglichen voneinander entfernten Quark-Anti-Quark-Paar eine Bindung eingeht, so dass nun zwei aus jeweils einem Quarks und einem Anti-Quark bestehende Teilchen existieren (vergleiche Abbildung 2.2). Je nach Bindungsabstand der jeweiligen Quarks und zusätzlicher ausreichender Entfernung voneinander zur Erzeugung eines neuen Paares, wird die Reichweite der starken Wechselwirkung somit auf maximal  $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  festgelegt (mit Beispielrechnung Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 19 f.). Eine weitere Schlussfolgerung daraus ist, dass Quarks (und Anti-Quarks) niemals einzeln existieren können, ein Phänomen, welches als Confinement (engl. Gebundenheit, Haft) bezeichnet wird.

Die Reichweite der schwachen Wechselwirkung ist auf einen noch kürzeren Bereich beschränkt. Durch den exponentiellen Faktor  $e^{-\frac{r}{\lambda_W}}$  in der Formel der potenziellen Energie (siehe Tabelle 2.1) strebt die Kurve mit wachsendem Abstand sehr schnell gegen 0 (vergleiche Graph d) in Abbildung 2.3). Diese extrem kurze Reichweite von  $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$  resultiert aus den sehr schweren Botenteilchen (deren Masse liegt bei 80 bzw. 90  $\text{GeV}/c^2$ ), welche die schwache Wechselwirkung vermitteln und deren Einfluss in dem Faktor  $\lambda_W$  zum Tragen kommt (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 47). Für die Naturwissenschaften Biologie und Chemie sind aus den vorausgehenden Gründen zum Beispiel nur die Gravitations- sowie die elektromagnetischen Wechselwirkungen entscheidend.

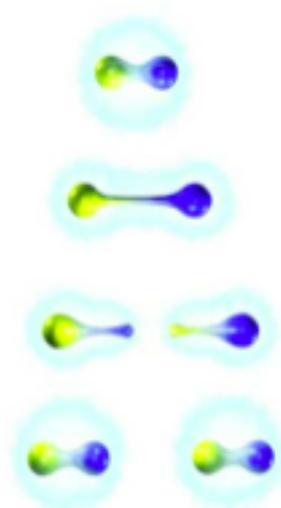
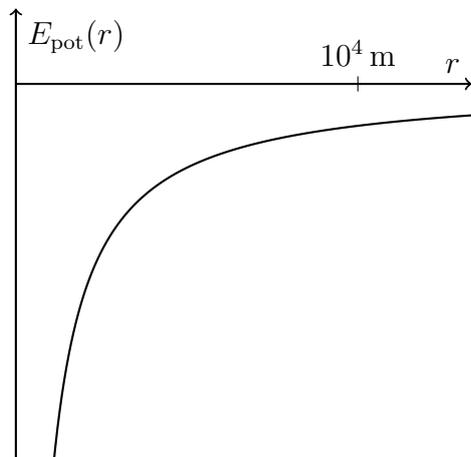


Abbildung 2.2.: „Quarks lassen sich nicht räumlich voneinander trennen. Stattdessen entstehen neue Paare aus einem Quark und Anti-Quark, die mit den ursprünglichen Quarks wieder gebundene Zustände bilden“ (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 21). (Grafik nach Stohl 2010)

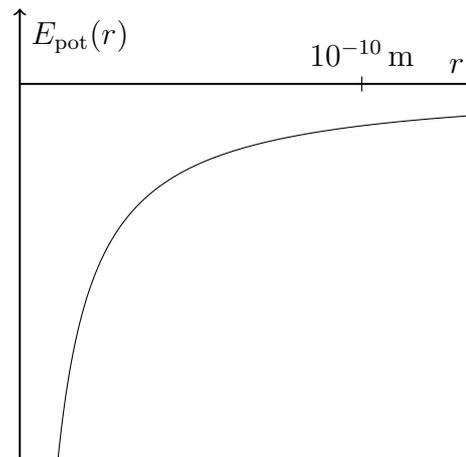
Dass die vier fundamentalen Wechselwirkungen neben den unterschiedlichen Eigenschaften auch Gemeinsamkeiten aufweisen wird an den Darstellungen der Kurven in Abbildung 2.3 deutlich, in denen die Abhängigkeit der potenziellen Energien zum Abstand dargestellt ist. Dabei wird jeweils die Anziehung zwischen zwei unterschiedlich geladenen Teilchen veranschaulicht. Alle vier Kurven verlaufen für kleine Abstände  $r$  hyperbolisch, für sich verkleinernde Abstände  $r$  geht  $E_{\text{pot}}$  gegen  $-\infty$ , für sich vergrößernde Abstände  $r$  geht sie gegen 0, mit Ausnahme der starken Wechselwirkung. Bei dieser steigt die potenzielle Energie bei sich vergrößernden Abständen linear an, was in der Formel in Tabelle 2.1 durch den addierten Term  $k \cdot r$  sichtbar ist<sup>5</sup>. Je weiter sich ein Quark von einem anderen Quark entfernt, umso mehr nimmt die potenzielle Energie zu, bis sie groß genug ist, um ein neues Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen.

Für die Gravitation werden Aussagen am Beispiel Erde-Satellit getroffen. Soll der Abstand eines Satelliten von der Erde um  $\Delta r = r'' - r'$  vergrößert werden, muss Arbeit verrichtet werden, die potenzielle Energie  $\Delta E_{\text{pot}}$  des Satelliten nimmt zu. Die Änderung der potenziellen Energie  $\Delta E_{\text{pot}}$  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, um ihn von 600 km auf 1200 km zu befördern, als von 6000 km auf 6600 km. Wenn sich der Satellit immer weiter von der Erde entfernt, strebt die potenzielle Energie gegen einen Grenzwert und nimmt nicht (merkbar) weiter zu.

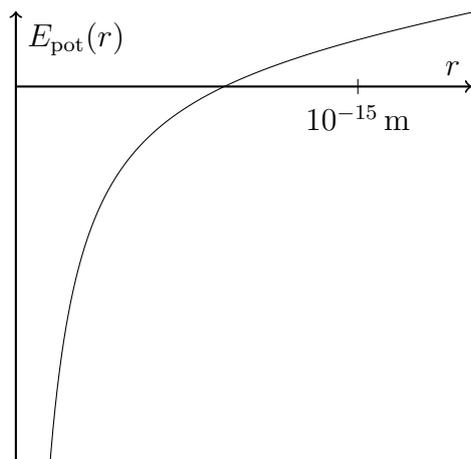
<sup>5</sup> $k$  ist eine Konstante die sich aus der Theorie ergibt. Sie liegt in der Größenordnung 1 GeV /fm.



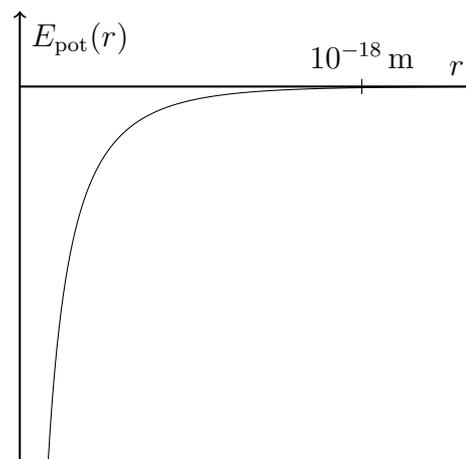
(a) Gravitationswechselwirkung zwischen zwei Körpern (z. B. Erde und Satellit) mit einer Masse  $m \neq 0$



(b) Elektromagnetische Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen mit entgegengesetzten elektrischen Ladungszahlen, wie Proton und Elektron



(c) Starke Wechselwirkung zwischen zwei Quarks mit unterschiedlich geladenem starken Ladungsvektor



(d) Schwache Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen mit unterschiedlichen schwachen Ladungszahlen

Abbildung 2.3.: Die Graphen der potenziellen Energien in Abhängigkeit vom Abstand der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Dabei ist jeweils nur die Anziehung betrachtet (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 13-23). Die Größenordnungen für das starke (c) und schwache (d) Potential sind die Reichweiten. Für die Gravitation (a) liegt das System Erde-Satellit zugrunde, bei der elektromagnetischen Wechselwirkung (b) das Wasserstoffatom.

## 2.3. DIE LADUNGEN UND DIE ORDNUNG DES STANDARD-MODELLS

Die Elementarteilchen sind im Standardmodell nach ihren Eigenschaften angeordnet, also nach Unterschieden und Gemeinsamkeiten in den Ladungen, die sie tragen und der Masse, die sie besitzen. Symmetrien sind die Grundlagen der Ordnung des Standardmodells und werden „in der Mathematik durch die *Gruppentheorie* beschrieben“ (Coughlan und Dodd 1996, S. 61). Daraus sind die Eigenschaften der Elementarteilchen erkennbar und die Erhaltungssätze, welche bei Umwandlungen gelten müssen (Coughlan und Dodd 1996, S. 67). Es wird zwischen der elektrischen, der starken und der schwachen Ladung unterschieden, wobei die Eigenschaften der elektrischen und der schwachen Ladung folgendermaßen beschrieben werden können: Für beide Ladungen existieren kleinste Ladungseinheiten, das heißt sie sind gequantelt. Bei zusammengesetzten Teilchen entspricht die Gesamtladung der Summe der Einzelladungen, die Ladungen sind also additiv. Außerdem bleiben die Ladungen bei Teilchenumwandlungen erhalten, dieser Grundsatz der Ladungserhaltung gilt genauso wie die Impuls- und Energieerhaltung. Für die starke Ladung gilt die Erhaltung ebenso, wie auch die Addition der Ladungen bei zusammengesetzten Teilchen. Im Gegensatz zur elektrischen und zur schwachen Ladung besitzt sie Vektorcharakter, das heißt die Summe der Einzelladungen errechnet sich nach der vektoriellen Addition. Die starke Ladung ist nicht gequantelt und es gibt nur drei verschiedene Zustände (und Anti-Zustände), was in 2.3.2. DIE STARKE LADUNG genauer erklärt wird.

Bei dem Vergleich mit der Gravitation fällt auf, dass bei der Beschreibung der potenziellen Energien an der Stelle der Ladungen die Massen der beiden aufeinander wirkenden Körper stehen (vergleiche Tabelle 2.1). Die Masse kann jedoch nicht der Ladung entsprechen, da sie die Ladungserhaltung nicht erfüllen würde: Wird als Beispiel die Umwandlung eines Myons genauer betrachtet, welches sich in ein Myon-Neutrino, ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino umwandelt, ergibt sich bei der Aufsummierung der Massen ein gewaltiger Unterschied zur Myonenmasse. Die Masse kann deswegen keine Erhaltungsgröße sein<sup>6</sup>. Zudem existieren im Gegensatz zu den anderen Ladungen keine „Anti-Massen“, wie es sich äquivalent bei dem entgegengesetzt geladenen Anti-Teilchen zum Teilchen verhält. Von der Gravitationswechselwirkung ist bisher außerdem nur eine anziehende, nie eine abstoßende Kraft beobachtet worden.

---

<sup>6</sup> Der Vergleich der Massen zeigt  $m_\mu = 105,6 \text{ MeV}/c^2 \neq 0,5 \text{ MeV}/c^2 = m_e + m_{\bar{\nu}_e} + m_{\nu_\mu}$ , warum die Masse des Myons so groß ist kann nicht erklärt werden. Die Energiedifferenz ist in der kinetischen Energie des Elektrons und der Neutrinos zu finden.

### 2.3.1. DIE ELEKTRISCHE LADUNG

Im Standardmodell werden die Elementarteilchen durch die elektrische Ladung geordnet. Es gibt eine elektrische Ladung, die Elementarladung  $e$ . Elektrisch geladene Teilchen tragen eine ganzzahlige vielfache Ladungszahl  $Q_n = q_n \cdot e$  der Elementarladung als Gesamtladung. Die elektrische Ladungszahl der elektrisch geladenen Materieteilchen, also für das Elektron und die schwereren Generationen<sup>7</sup> ist  $q_{e^-} = -1$ , die der Anti-Materieteilchen, zu denen das Positron zählt,  $q_{e^+} = +1$ . Quarks und Anti-Quarks, die auch zu den elektrisch geladenen Anti-/Materieteilchen zählen, tragen drittelzahlige elektrische Ladungszahlen, das Up-Quark  $q_u = +\frac{2}{3}$  und das Down-Quark  $q_d = -\frac{1}{3}$ . Die ganzzahlige elektrische Ladung des Protons, des Neutrons und weiterer zusammengesetzter Teilchen wird mit der Festlegung, dass  $q_{\text{Quarks}}$  nicht ganzzahlig ist, erklärt, da Quarks durch das Confinement nicht isoliert vorkommen. Trägt ein Teilchen eine elektrische Ladung, unterliegt es der elektromagnetischen Wechselwirkung. Durch den Austausch eines Photons, dem Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung, kann es mit anderen Teilchen in Wechselwirkung treten. Dies gilt für Anti-/Materieteilchen, zusammengesetzte Teilchen und auch für Botenteilchen, solange sie eine elektrische Ladung tragen (darauf wird im Abschnitt 2.5. BOTENTEILCHEN genauer eingegangen). „[Hinsichtlich] der elektrischen Ladung bilden alle Teilchen ein Singulett“ (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 38). Das Photon, welches selbst keine Ladungen trägt, ändert damit weder die elektrische, noch die starke, noch die schwache Ladung wenn es abgestrahlt oder eingefangen wird.

### 2.3.2. DIE STARKE LADUNG

Die Ordnung der Elementarteilchen nach der starken Ladung stellt eine Gruppe heraus, die als Einzige diese Ladung trägt: Die Quarks und Anti-Quarks, sowie die zugehörigen Botenteilchen, die Gluonen. Es gibt drei starke Ladungen. Wie am Anfang des Kapitels bereits erwähnt wurde, sind dies keine Ladungszahlen, sondern Ladungsvektoren. Die starke Ladung wird auch als Farbladung bezeichnet und die Ladungsvektoren analog als Farbe. Dabei existiert jedoch keine Elementarladung wie bei der elektrischen Ladung. Eine verständliche und einheitliche Darstellung der dahinter liegenden Mathematik hat das Netzwerk Teilchenwelt (2015, S. 33 ff.) formuliert: Quarks tragen genau einen Farbladungsvektor  $\vec{C}$ , entweder die Farbe rot ( $\nearrow$ ), grün ( $\nwarrow$ ) oder blau ( $\downarrow$ ); Anti-Quarks tragen entsprechend eine Anti-Farbe, anti-rot ( $\swarrow$ ), anti-grün ( $\searrow$ ) oder anti-blau ( $\uparrow$ ). Die Anti-Farben werden gelegentlich auch mit den im Farbkreis gegenüberliegenden Farben cyan, magenta und gelb

---

<sup>7</sup> Die Anti-/Materieteilchen werden nach der Masse in sogenannten Generationen geordnet, siehe Kapitel 2.4. MATERIE- UND ANTI-MATERIETEILCHEN. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird nur noch das Materieteilchen bzw. Anti-Materieteilchen der ersten Generation genannt, da die Ladungszahlen für alle Generationen eines Anti-/Materieteilchens dieselben sind.

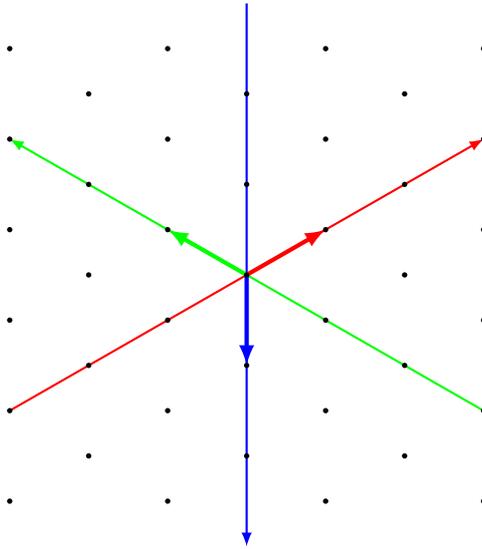


Abbildung 2.4.: Die drei Farben rot  $\nearrow$ , grün  $\nwarrow$  und blau  $\downarrow$  im zweidimensionalen Farbgitter. Der Winkel zwischen den eingezeichneten Farbladungsvektoren beträgt  $120^\circ$ . Die Antifarben wären dem jeweiligen Farbvektor entgegengesetzt gezeichnet (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 33 f.)

$$\begin{aligned}
 p &= (u \quad u \quad d) & \pi^+ &= (u \quad \bar{d}) \\
 \vec{0} &= \nwarrow + \downarrow + \nearrow & \vec{0} &= \downarrow + \uparrow
 \end{aligned}$$

Abbildung 2.5.: Beispiele für aus Quarks zusammengesetzte Teilchen. Das Proton besteht aus drei Quarks ( $uud$ ), das Pion aus einem Quark und einem Anti-Quark ( $u\bar{d}$ ).

bezeichnet. Ein Up-Quark, von dem angenommen wird, dass es einen roten Farbladungsvektor trägt, wird folgendermaßen dargestellt:  $\vec{C}_u = \nearrow$  oder  $u \nearrow$ , ein Anti-Up-Quark analog dazu:  $\vec{C}_{\bar{u}} = \swarrow$  oder  $\bar{u} \swarrow$ . Diese Symbolik der Farbladungsvektoren folgt aus der Darstellung in einem zweidimensionalen Gitter, wie Abbildung 2.4 zeigt. Damit wird deutlich, warum die Auswertung des in der Formel der potenziellen Energie eingesetzten Skalarprodukts nicht trivial möglich ist. Wie im Kapitel 2.2 bereits angesprochen wurde, müssen die Quarks eines zusammengesetzten Teilchens mindestens in einer Ladung verschieden sein. Eine weitere Bedingung ist, dass ein aus Quarks zusammengesetztes Teilchen neutral bezüglich der starken Ladung ist. Werden die Farbladungsvektoren vektoriell addiert, kann ein Teilchen entweder aus drei Quarks zusammengesetzt sein, von denen jedes eine andere Farbladung trägt. Oder es setzt sich aus einem Quark und einem Anti-Quark zusammen, die eine Farbe und die jeweilige Anti-Farbe tragen. Die resultierende Farbe ist vergleichbar mit der additiven Farbmischung und wird als weiß, oder auch  $\vec{0}$  bezeichnet. Eine mögliche Zusammensetzungen eines Protons und eines Pions (ein kurzlebiges aus Quarks zusammengesetztes Teilchen) bezüglich der Farbladungsvektoren ist in Abbildung 2.5 gezeigt. Welches Quark im Proton welche Farbladung trägt, ist nicht festgelegt. Auch

$$\begin{array}{cc} (u^{\nearrow} u^{\nwarrow} u^{\downarrow}) & (d^{\nearrow} d^{\nwarrow} d^{\downarrow}) \\ (\bar{u}^{\swarrow} \bar{u}^{\searrow} \bar{u}^{\uparrow}) & (\bar{d}^{\swarrow} \bar{d}^{\searrow} \bar{d}^{\uparrow}) \end{array}$$

Abbildung 2.6.: Die Triplets bezüglich der starken Wechselwirkung der Quarks und Anti-Quarks der ersten Generation (nach Netzwerk Teilchenwelt (2015, S. 37)).

das Pion könnte einen roten und einen anti-roten Farbladungsvektor tragen, oder einen grünen und einen anti-grünen. Durch den ständigen Austausch von Gluonen zwischen den Quarks werden daraus zusammengesetzte Teilchen zusammengehalten. Da Gluonen selbst Träger der starken Wechselwirkung sind, wechseln die Quarks somit ständig ihre Farbe. Die farbneutrale Summe aller Ladungen bleibt dabei immer erhalten. Ein Quark kann durch den Austausch von Gluonen somit alle drei Farbladungsvektoren tragen und ein Anti-Quark alle drei Anti-Farben, deswegen werden sie in Triplets (vom lateinischen *triplex* = dreifach) bezüglich der starken Wechselwirkung angeordnet<sup>8</sup>, siehe Abbildung 2.6. Durch den Austausch von Gluonen können nur die Teilchen, welche in einem Triplet angeordnet sind, ineinander umgewandelt werden (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 73). Die Gluonen tragen dafür immer einen Ladungswechsel, wie im Kapitel 2.5 beschrieben wird.

### 2.3.3. DIE SCHWACHE LADUNG

Die schwache Ladung basiert ebenfalls auf den mathematischen Symmetrien, die allerdings mit der elektrischen Ladung verknüpft sind (was das Verständnis nicht erleichtert). Eigentlich gibt es zwei schwache Ladungen. Allerdings werden in den im Rahmen dieser Masterarbeit erstellten Aufgaben und dem zugrunde liegenden Text (Netzwerk Teilchenwelt 2015) jedoch nur die schwachen Ladungszahlen  $I = +\frac{1}{2}$  und  $I = -\frac{1}{2}$  für Teilchen und Anti-Teilchen verwendet<sup>9</sup>. Das entspricht nur den dritten Komponenten des schwachen Isospins, der in der Fachliteratur mit dem Symbol  $I^{(3)}$  bezeichnet wird. Die anderen Komponenten sind für die Beschreibung der schwachen Ladung in der Schule nicht relevant. Zur Ordnung der Elementarteilchen und zur Erklärung der Teilchenzerfälle ist diese Vereinfachung ausreichend. Damit erklärt sich analog zur elektrischen (eine Ladung – Singulets) und starken Ladung (drei Ladungen – Triplets) die Anordnung der Elementarteilchen in Dupletts (lat. *duplex* = zweifach) bezüglich der schwachen Wechselwirkung. Nur innerhalb dieser Dupletts können Teilchen durch den Austausch eines Botenteilchens der schwachen Wechselwirkung ineinander umgewandelt, erzeugt oder vernichtet werden (Netzwerk Teilchenwelt 2015,

<sup>8</sup> Bei der Beschreibung der Ordnung durch das Standardmodell wird in der (meist populärwissenschaftlichen) Literatur häufig das Wort Up-Quark (äquivalent für alle anderen Quarks und Anti-Quarks) in der Einzahl benutzt. Eigentlich müsste von den Up-Quarks in der Mehrzahl die Rede sein, da immer das Farbtriplett ordnend zugrunde liegt, genauso wie das Elektron-Neutrino und das Elektron im Duplett der schwachen Wechselwirkung einzeln geordnet werden (vergleiche Abb. 2.8).

<sup>9</sup> Bei zwei schwachen Ladungen gibt es die Zustände oben und unten sowie anti-oben und anti-unten.

$$\begin{array}{l}
\left( \begin{array}{l} \nu_e \\ e^- \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} q_{\nu_e} = 0 \\ q_{e^-} = -1 \end{array} \quad \begin{array}{l} I_{\nu_e} = +\frac{1}{2} \\ I_{e^-} = -\frac{1}{2} \end{array} \quad \succ \quad q = +1, I = +1 \\
\left( \begin{array}{l} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} q_{e^+} = +1 \\ q_{\bar{\nu}_e} = 0 \end{array} \quad \begin{array}{l} I_{e^+} = +\frac{1}{2} \\ I_{\bar{\nu}_e} = -\frac{1}{2} \end{array} \quad \succ \quad q = +1, I = +1 \\
\\
\left( \begin{array}{l} u \\ d \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} q_u = +\frac{2}{3} \\ q_d = -\frac{1}{3} \end{array} \quad \begin{array}{l} I_u = +\frac{1}{2} \\ I_d = -\frac{1}{2} \end{array} \quad \succ \quad q = +1, I = +1 \\
\left( \begin{array}{l} \bar{d} \\ \bar{u} \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} q_{\bar{d}} = +\frac{1}{3} \\ q_{\bar{u}} = -\frac{2}{3} \end{array} \quad \begin{array}{l} I_{\bar{d}} = +\frac{1}{2} \\ I_{\bar{u}} = -\frac{1}{2} \end{array} \quad \succ \quad q = +1, I = +1
\end{array}$$

Abbildung 2.7.: Die Dupletts bezüglich der schwachen Wechselwirkung der ersten Generation der Anti-/Materieteilchen. Die elektrische und die schwache Ladung erhöht sich von unten nach oben um +1. Durch ein  $W^+$  und ein  $W^-$  können die Teilchen in den Dupletts ineinander umgewandelt, erzeugt oder vernichtet werden (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 30 f.).

S. 30). Damit ergeben sich die Dupletts der Anti-/Materieteilchen, wie in der Abbildung 2.7 dargestellt. Äquivalent zur Ordnung der Up-Quarks (und der anderen Quarks und Anti-Quarks) in Farb-Tripletts bilden das Elektron-Neutrino und das Elektron ein Duplett bezüglich der schwachen Wechselwirkung. Die Differenz der elektrischen Ladung  $q$  und der schwachen Ladung  $I$  von dem unten zu dem oben angeordneten Teilchen beträgt immer +1. Die Up- und Down-Quarks bilden ebenfalls ein Duplett und werden durch Austausch eines  $W^+$  oder  $W^-$ , den Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung, ineinander umgewandelt. Die Ladungsdifferenzen entsprechen genau den Ladungen der Botenteilchen, für  $W^+$  ist  $q_{W^+} = +1$ ,  $I_{W^+} = +1$ ;  $W^-$  besitzt die Ladungen  $q_{W^-} = -1$  und  $I_{W^-} = -1$ . Auch zusammengesetzte Teilchen, wie das Proton und das Neutron, stehen zusammen in einem Duplett. Die Darstellung der Umwandlungen wird im Kapitel 2.6. FEYNMAN-DIAGRAMME veranschaulicht.

## 2.4. MATERIE- UND ANTI-MATERIETEILCHEN

Fügt man die aus den Ladungssymmetrien resultierenden Ordnungen zusammen, können die Anti-/Materieteilchen der ersten Generation wie in der Abbildung 2.8 angeordnet werden. Die Quarks stehen jeweils in den Farbtupletts geordnet in einer Reihe; die Dupletts bezüglich der schwachen Wechselwirkung, also Elektron-Neutrino mit Elektron und Up mit Down-Quarks, sind untereinander angeordnet. Dasselbe Ordnungsschema wird für die dazugehörigen Anti-Teilchen angewendet. Die gespiegelte Anordnung resultiert aus der positiven Ladungsdifferenz vom unteren zum oberen Anti-Teilchen im schwachen Ladungsduplett. Durch welche Wechselwirkungen welche Anti-/Materieteilchen beeinflusst

1. Generation	$I$	$q$	1. Generation	$I$	$q$
$\nu_e$	$+\frac{1}{2}$	0	$\bar{d}^\uparrow$ $\bar{d}^\swarrow$ $\bar{d}^\searrow$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$
$e^-$	$-\frac{1}{2}$	-1	$\bar{u}^\uparrow$ $\bar{u}^\swarrow$ $\bar{u}^\searrow$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$
$u^\downarrow$ $u^\swarrow$ $u^\searrow$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	$\bar{\nu}_e$	$-\frac{1}{2}$	0
$d^\downarrow$ $d^\swarrow$ $d^\searrow$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$e^+$	$+\frac{1}{2}$	+1

Abbildung 2.8.: Die Ordnung der Teilchen der ersten Generation nach ihren Ladungen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 40 f.).

werden, ist ebenfalls erkennbar. Das Anti- und das Elektron-Neutrino unterliegen nur der schwachen Wechselwirkung, da sie nur eine schwache Ladung tragen. Die schwache Ladung ist die einzige Ladung, die alle Anti-/Materieteilchen tragen. Somit unterliegen sie alle der schwachen Wechselwirkung und können über den Austausch eines Botenteilchens der schwachen Wechselwirkung miteinander wechselwirken. Elektron, Up-Quarks, Down-Quarks und deren Anti-Teilchen tragen auch eine elektrische Ladung, womit sie zusätzlich der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen. Die Anti-/Quarks tragen als einzige Teilchen die starke Ladung.

Die Teilchen der ersten Generation bilden die Bausteine unserer Welt, alle Nukleonen sind aus Up- und Down-Quarks aufgebaut, die von Elektronen zu einem ladungsneutralen Atom ergänzt werden. Instabile Atome senden unter anderem  $\beta^+$ - und  $\beta^-$ -Strahlung aus, die aus Gründen der Ladungserhaltung immer von einem Anti-/Elektron-Neutrino begleitet werden. Ein Anti-Materieteilchen unterscheidet sich von seinem dazugehörigen Materieteilchen nur in der entgegengesetzten Ladung, es besitzt die gleiche Masse und die gleiche Lebensdauer. Treffen Teilchen mit ihren Anti-Teilchen aufeinander annihilieren sie: trifft ein Elektron auf ein Positron, vernichten sie sich gegenseitig unter Aussendung von Energie, z. B. eines Photons. Da unsere Welt aus Materie besteht, ist Anti-Materie entweder nur isoliert beobachtbar oder durch die Detektion der bei der Annihilation entstehenden Energie. Neben der ersten Generation existieren noch weitere Generationen der Anti-/Materieteilchen, wie Abbildung 2.9 zeigt. Die zweite und die dritte Generation tragen die gleichen Ladungen wie die erste Generation, sie sind quasi schwerere Kopien (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 68). Das Myon  $\mu^-$ , die zweite Generation des Elektrons, ist etwa 200 mal schwerer, das Teilchen der dritten Generation, das Tau  $\tau^-$ , ist 3500 mal schwerer als das Elektron. Diese Teilchen werden auch als elektrisch geladene Leptonen bezeichnet<sup>10</sup>. Analog bilden Positron  $e^+$ , Anti-Myon  $\mu^+$  und Anti-Tauon  $\tau^+$  die elektrisch geladenen Anti-Leptonen. Die elektrisch neutralen Anti-/Leptonen bezeichnen die Neutrinos und Anti-Neutrinos, wobei jedem elektrisch geladenen Lepton ein Neutrino zugeordnet wird. Das Verhalten und die genaue Masse der Neutrinos gibt bisher noch Rätsel auf. Lange Zeit

<sup>10</sup>Diese Bezeichnung stammt vom griechischen Wort *leptós* für klein.

	1. Generation	2. Generation	3. Generation
elektrisch neutrale Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$
Quarks	$u\downarrow u\uparrow u\leftarrow$ $d\downarrow d\uparrow d\leftarrow$	$c\downarrow c\uparrow c\leftarrow$ $s\downarrow s\uparrow s\leftarrow$	$t\downarrow t\uparrow t\leftarrow$ $b\downarrow b\uparrow b\leftarrow$
Anti-Quarks	$\bar{d}\uparrow \bar{d}\swarrow \bar{d}\searrow$ $\bar{u}\uparrow \bar{u}\swarrow \bar{u}\searrow$	$\bar{s}\uparrow \bar{s}\swarrow \bar{s}\searrow$ $\bar{c}\uparrow \bar{c}\swarrow \bar{c}\searrow$	$\bar{b}\uparrow \bar{b}\swarrow \bar{b}\searrow$ $\bar{t}\uparrow \bar{t}\swarrow \bar{t}\searrow$
elektrisch geladene Anti-Leptonen	$e^+$	$\mu^+$	$\tau^+$
elektrisch neutrale Anti-Leptonen	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$

Abbildung 2.9.: Die drei Generationen der Materie- und Anti-Materieteilchen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 68 f.).

wurde vermutet, dass ihre Masse gleich null ist, da die relativistische Berechnung der Energie verglichen mit dem Impuls nur eine sehr kleine Masse zulassen würde. In darauf folgenden Experimenten wurden Neutrino-Oszillationen beobachtet, also die Umwandlungen einer Neutrinoart in eine andere, aus diesem Grund ist auch die Lebensdauer der Neutrinos nicht definierbar. „[Interessanterweise] verlangt eine theoretische Beschreibung dieses Phänomens, dass Neutrinos nicht exakt masselos sein können“, aus der Theorie können allerdings nur Massendifferenzen  $\Delta m^2$  vorhergesagt werden (Ellanger 2008, S. 118 ff.). Auch bei den Quarks existieren drei Generationen, die schwereren Varianten der Up-Quarks  $u$  sind die Charm-Quarks  $c$  und die Top-Quarks  $t$ , wobei die Masse eines Top-Quark sogar die eines Goldatoms übersteigt. Die Down-Quarks  $d$  werden in der zweiten Generation von den Strange-Quarks  $s$  und den Bottom-Quarks  $b$  in der dritten ergänzt, wobei die Anti-Quarks in Analogie dazu existieren.

Bei allen Anti-/Materieteilchen lässt sich beobachten, dass die Lebensdauer mit zunehmender Masse abnimmt. Ein schweres Teilchen strebt eine Umwandlung zu einem stabileren und energieärmeren Teilchen an, bis ein stabiler Grundzustand erreicht ist. Da Quarks durch das Confinement nur in gebundenen Zuständen auftreten, gelten sie, bis auf das Top-Quark, als stabil, ebenso wie die im Atomkern gebundenen Nukleonen. Das Top-Quark zerfällt durch sein große Masse durchschnittlich nach etwa  $0,5 \cdot 10^{-24}$  s (PDG 2013) bevor es mit anderen Quarks überhaupt eine Bindung eingehen kann. Da sich ein freies Neutron (welches aus einem Up- und zwei Downquarks besteht:  $udd$ ) nach etwa 900 s über die schwache Wechselwirkung in ein Proton ( $uud$ ) umwandelt, wird die Lebensdauer des Down-Quarks manchmal ebenfalls mit 900 s angegeben. Eine Übersicht zu allen Elementarteilchen mit ihren Eigenschaften Masse, Lebensdauer, Ladungen und das Entdeckungsdatum ist im Anhang bei A.8 zu finden.

## 2.5. BOTENTEILCHEN

Die Wechselwirkungen von Anti-/Materieteilchen geschehen über den Austausch der zur Wechselwirkung gehörenden Botenteilchen. Im Gegensatz zu den Fermionen gehören die Botenteilchen zu den Bosonen, sie besitzen also einen ganzzahligen Spin und unterliegen somit nicht dem Pauli'schen Ausschließungsprinzip (vergleiche S. 9). Folglich kann eine unbegrenzte Anzahl von Bosonen mit identischen Quantenzahlen (z. B. Photonen gleicher Energie) in einem bestimmten Raumbereich konzentriert sein (Ne'eman und Kirsh 1995, S. 63).

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die Botenteilchen und einige ihrer Eigenschaften zur Beschreibung der Ordnung der Anti-/Materieteilchen bereits eingeführt. Das Photon  $\gamma$  als Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung besitzt weder

	$W^+$	$W^-$	$Z^0$
el.	+1	-1	0
stark	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$
schwach	+1	-1	0

Tabelle 2.2.: Die Ladungszahlen der Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung.

eine Masse noch Ladungen. Jede sich beschleunigt bewegende elektrische Ladung emittiert Photonen und überträgt dadurch Energie und Impuls. Nach Ne'eman und Kirsh (1995, S. 81) wurde zwischen den 1930er und '40er Jahren die Theorie aufgestellt, dass auch ruhende elektrische Ladungen Photonen aussenden, die nicht nachweisbar sind. Dies wird durch die Heisenberg'schen Unschärferelation begründet:

Eine ruhende Ladung emittiert keine gewöhnlichen, sondern *virtuelle* Photonen. Sie existieren nur so lange, wie ihnen die Unschärferelation gestattet, ohne Nachweis zu existieren. (...) Wegen der Unschärferelation können wir auch infolge der Emission virtueller Photonen weder einen Verlust noch Schwankungen in der Masse eines ruhenden geladenen Körpers nachweisen. Je energieärmer das virtuelle Photon ist, desto länger kann es existieren und desto weiter kann es sich bewegen. Dies ist der Grund dafür, daß die elektrische Kraft mit der Entfernung abnimmt. (Ne'eman und Kirsh 1995, S. 81)

Die Aussendung eines Photon ändert somit nichts am Ladungszustand des Teilchens, wie aus Abbildung 2.12 entnommen werden kann.

Das Gluon besitzt zwar ebenfalls keine Masse, allerdings trägt es selbst die starke Ladung, oder, anschaulicher ausgedrückt, einen Ladungswechsel. Damit sich ein Up-Quark, von dem angenommen wird, dass es zu diesem Zeitpunkt einen roten Ladungsvektor trägt, zu einem Up-Quark mit einem grünen Ladungsvektor umwandeln kann, sendet es ein Gluon mit einer anti-roten und einer grünen Ladung aus (siehe Beispiel in Abbildung 2.12). Abbildung 2.10 stellt die acht verschiedenen Gluonen dar, die alle möglichen Umwandlungen zwischen den Farbladungen ermöglichen. Da Gluonen eine starke Ladung tragen, wechselwirken sie auch untereinander. Die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung sind die einzigen, die selbst eine Masse tragen. Die dadurch eingeschränkte Reichweite der Wechselwirkung wurde schon im Zusammenhang mit der potenziellen Energie angesprochen. Die Botenteilchen  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$ , deren spezifische Ladungen in Abbildung 2.2 abgebildet sind, haben jeweils ein Masse von etwa  $100 \text{ MeV}/c^2$ . Wenn sich ein Elektron mit einer Masse von ungefähr  $0,5 \text{ MeV}/c^2$  durch den Austausch eines  $W^+$  in ein Elektron-Neutrino umwandelt, muss es viel kinetische Energie besitzen, um den Wechselwirkungsprozess nach der Energie- und Impulserhaltung stattfinden zu lassen. Vor allem bei der Betrachtung des Prozesses *aus Sicht des Elektrons*, also im Ruhesystem des Elektrons in dem die kinetische

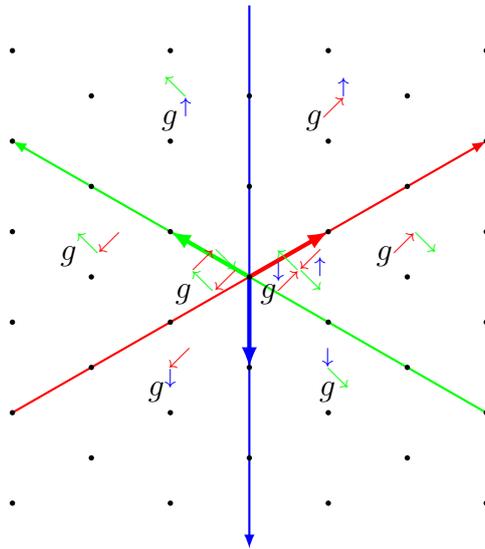


Abbildung 2.10.: Sechs der Gluonen tragen jeweils eine Farbe und eine Anti-Farbe zur Änderung der Farbladung der Quarks, zwei tragen eine Kombination aus Farben und Anti-Farben, bei deren Aussendung sich die Farbe der Quarks nicht ändert. Sie lassen sich ebenfalls in das Farbgitter einordnen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 49 f.).

Energie null beträgt, kann diese Umwandlung entsprechend der Energie-Impuls-Erhaltung nur stattfinden, wenn das  $W^+$  ein virtuelles Teilchen ist. In den Materialien des Netzwerk Teilchenwelt (2015, S. 56 f.) wird die Realisierung dieses Prozesses folgendermaßen erklärt: Die Energie eines  $W$ -Teilchens in Ruhe (die durch  $E = mc^2$  mit der Ruhemasse zusammenhängt) wird am häufigsten bei 80,4 MeV gemessen. Der Wert schwankt jedoch normalverteilt wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist. Es ist also sehr unwahrscheinlich, aber nicht ausgeschlossen, dass ein  $W^+$  mit einer niedrigen Energie ausgesendet werden kann. Das bisher selten erwähnte  $Z^0$  besitzt keine Ladungen (vergleiche Abbildung 2.2), es ist wie das Photon ein ladungsneutrales Botenteilchen mit dem Unterschied, dass es eine große Masse besitzt.

In Abbildung 2.12 sind typische Umwandlungen durch die Aussendung aller beschriebenen Botenteilchen zu sehen. Die Wechselwirkungen werden zur besseren Übersicht nur zwischen Anti-/Materieteilchen durch den Austausch eines Botenteilchens dargestellt. Die Umwandlungen sind auch jeweils in die andere Richtung möglich, wie im Abschnitt FEYNMAN-DIAGRAMME genauer beschrieben wird. Ein interessanter Gedanken zur spontanen Umwandlung von Teilchen wird von Ne'eman und Kirsh (1995, S. 124) geäußert: „Wenn ein Teilchen spontan in andere Teilchen zerfällt, kann man sich vorstellen, daß die verursachende Wechselwirkung zwischen Ausgangsteilchen und seinen eigenen Zerfallsprodukten wirkt (trotz der Tatsache, daß die Produkte vor dem Zerfall des Ausgangsteilchens nicht existieren und daß, wenn sie auftreten, das ursprüngliche Teilchen nicht mehr existiert)“.

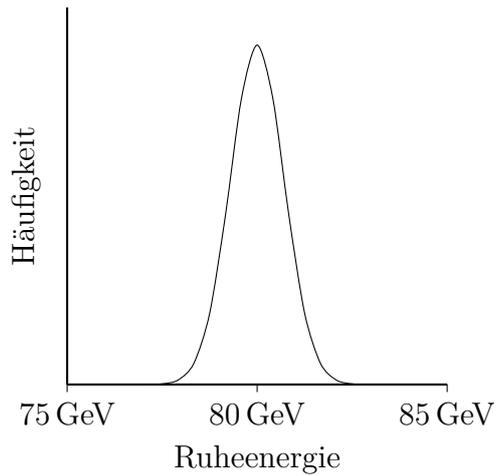


Abbildung 2.11.: Der Wert für die Häufigkeit des Auftretens eines W-Teilchens bei einer bestimmten Ruheenergie. Es entsteht eine Gauß-Glocke (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 56).

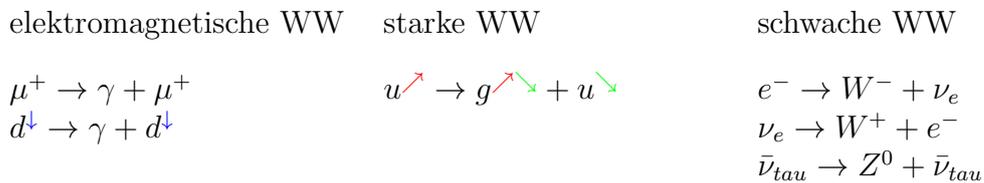


Abbildung 2.12.: Beispiele für die Abstrahlung von Botenteilchen der elektromagnetischen, starken und schwachen Wechselwirkung (durch WW abgekürzt).

## 2.6. FEYNMAN-DIAGRAMME

Um die Umwandlungen graphisch darzustellen und den Wirkungsquerschnitt berechnen zu können, werden in der Kern- und Teilchenphysik Feynman-Diagramme verwendet. Der Wirkungsquerschnitt gibt die Wahrscheinlichkeit eines Prozesses an, also wie häufig sich ein Teilchen über eine entsprechende Wechselwirkung umwandelt. Die Berechnungen erfordern ein tiefgründigeres Wissen über die beschreibende Mathematik, doch auch an der graphischen Darstellung können die Wechselwirkungen erläutert werden.

In den Feynman-Diagrammen werden die Teilchen durch folgende Symbole unterschieden:

- $\longrightarrow$  eine durchgezogene Linie mit einem Pfeil in Zeitrichtung für ein Materieteilchen,
- $\longleftarrow$  eine durchgezogene Linie mit einem Pfeil gegen Zeitrichtung für ein Antimaterieteilchen,
- $\sim$  eine gewellte Linie für  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  und das Photon und
- $\text{coiled}$  eine gekringelte Linie für das Gluon  $g$ .

Der Unterschied zwischen einem Teilchen und einem Anti-Teilchen wird durch die Zeit

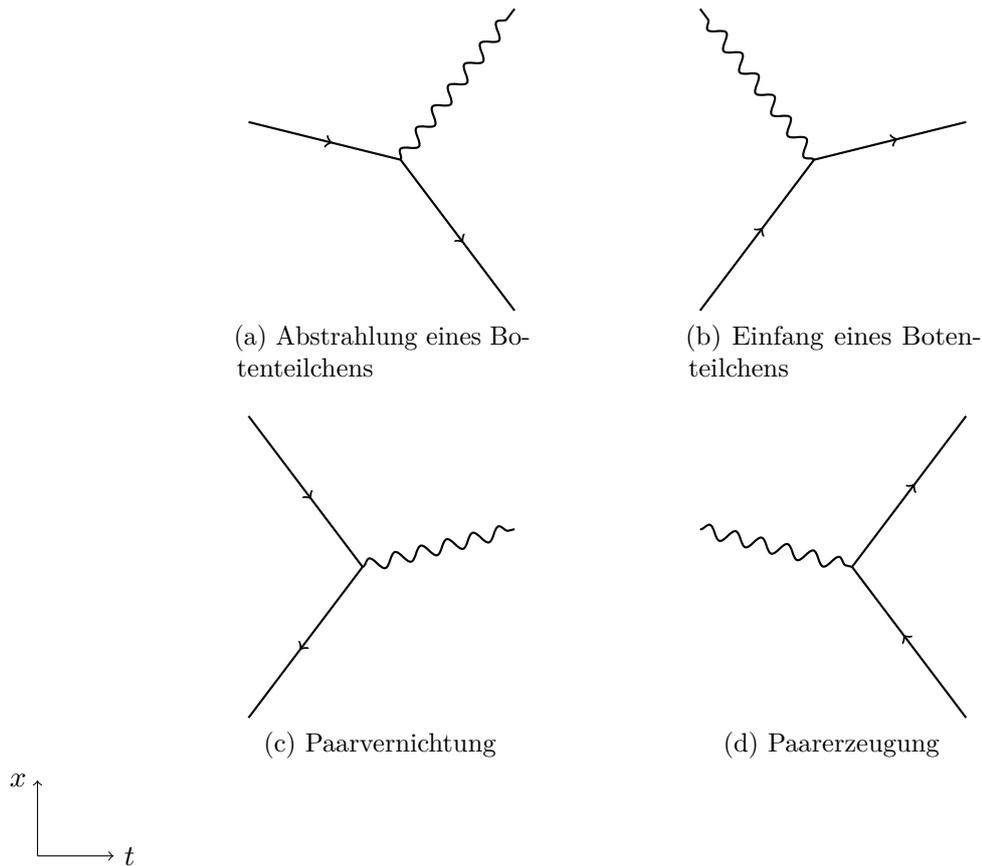


Abbildung 2.13.: Fundamentale Vertices zur Darstellung der Kraftwirkung auf Anti-/Materieteilchen, sowie der Vernichtung und Erzeugung von Anti-/Materieteilchen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 53 f.).

definiert: Bewegt sich das Objekt *mit* der Zeitrichtung dann ist es ein Teilchen, bewegt es sich *gegen* die Zeitrichtung, ist es ein Anti-Teilchen. Diese Betrachtung ist bei den später folgenden Symmetrien und Umkehrungen der Feynman-Diagramme sehr hilfreich. Der Punkt der Wechselwirkung wird Vertex (plural Vertices) genannt, wobei dieses Zusammentreffen an einem Ort zu einer Zeit nur im Diagramm, nicht aber in der Realität zu verstehen ist, da die Wechselwirkungsprozesse der quantenmechanischen Unschärfe unterliegen (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 53). In einem Vertex wird ein Vorgang abgebildet, wie zum Beispiel die Umwandlung eines Elektrons in ein Elektron-Neutrino durch Aussenden eines  $W^-$ . Die Umwandlung des kurzlebigen  $W^-$  in weitere Teilchen wird auch in einem Vertex abgebildet. Durch das Zusammenfügen der Vertices kann durch ein Feynman-Diagramm der komplette Wechselwirkungsprozess abgebildet werden. Zudem ist die zeitliche Abfolge ablesbar. An jedem Vertex gelten die Energie-, Impuls- und Ladungserhaltung. Das gilt ebenfalls in Feynman-Diagrammen, die sich aus mehreren Vertices zusammensetzen. Dabei ist es möglich, dass ein bei einer Wechselwirkung ausgetauschtes Botenteilchen ein virtuelles Teilchen ist (siehe S. 25).

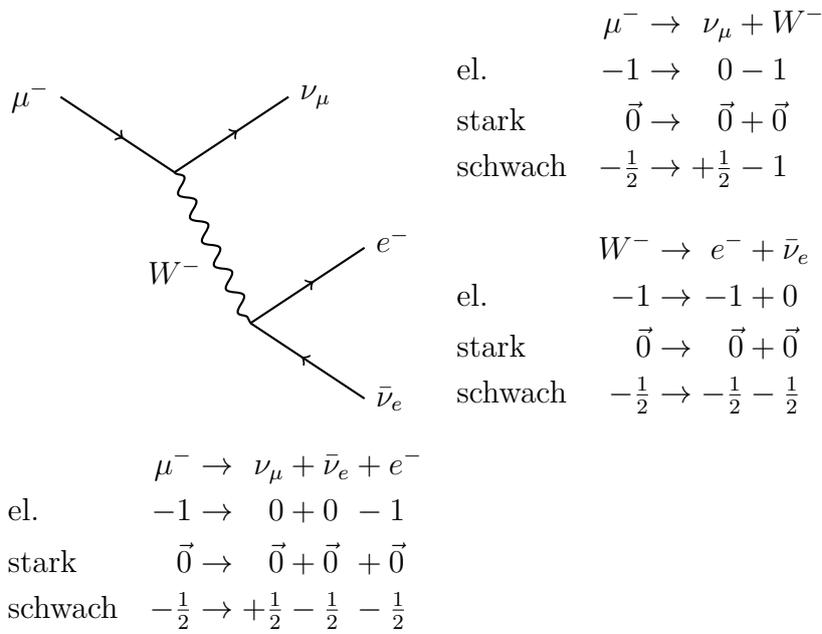


Abbildung 2.14.: Umwandlung eines Myon. Die Ladungserhaltung wird einzeln für jeden Vertex und für die gesamte Umwandlung betrachtet.

In der Abbildung 2.13 werden vier Vertices, welche grundlegende Prozesse beschreiben, dargestellt: Der Einfang und die Aussendung eines Botenteilchen, die Erzeugung und die Vernichtung von Materie- und Anti-Materieteilchen (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 53). Wenn das abgestrahlte Botenteilchen nicht neutral geladen ist, sondern eine Ladung besitzt, wandelt sich das Ausgangsteilchen zusätzlich um. Der Prozess des Einfangens ist dem sehr ähnlich; wird ein Botenteilchen eingefangen, ändern sich Energie und Impuls und, je nach Botenteilchen, auch die Ladung. Bei der Paarvernichtung, auch Annihilation genannt, treffen ein Teilchen und ein Anti-Teilchen aufeinander. Zum einen können sie ein zusammengehöriges Teilchen-Anti-Teilchen-Paar bilden, dessen entgegengesetzte Ladungen sich zu null addieren, weshalb ein neutrales Botenteilchen abgestrahlt wird. Das Botenteilchen muss dann zu einer Wechselwirkung gehören, dem das Teilchen-Anti-Teilchen-Paar unterliegt. Im Falle eines Quark-Anti-Quark-Paares kann auch ein Gluon aus der Mitte des Farbgitters ausgesendet werden (vergleiche Abb. 2.10). Oder die Teilchen stehen gemeinsam in einem Duplett der schwachen Wechselwirkung und wandeln sich so zu einem W-Teilchen um. Die Paarерzeugung ist der umgekehrte Prozess, bei dem sich das Botenteilchen in ein Teilchen und ein Anti-Teilchen umwandelt.

Werden die vier Vertices genauer betrachtet, wird festgestellt, dass ein und der selbe Vertex um den Mittelpunkt gedreht alle vier Darstellungen ergibt. Die Teilchen werden zu Anti-Teilchen und umgekehrt Anti-Teilchen zu Teilchen, je nachdem ob die Pfeile in Zeitrichtung oder gegen die Zeitrichtung weisen. Beim Zusammenfügen zweier Vertices an den Linien für die Botenteilchen können Wechselwirkungen zwischen Teilchen

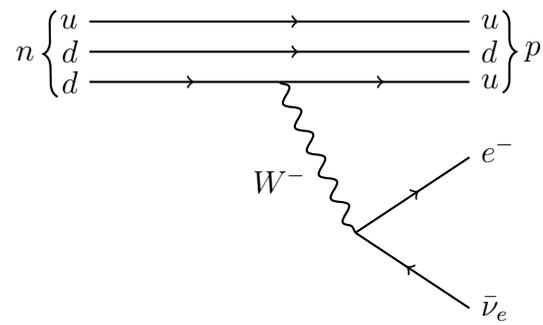


Abbildung 2.15.: Der  $\beta$ -Zerfall, bei dem sich ein Neutron in ein Proton durch Aussendung eines  $W^-$  umwandelt. Dieses zerfällt nach kurzer Zeit in ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino.

dargestellt werden, wie zum Beispiel die Umwandlung eines Myons in Abbildung 2.14. Auch der  $\beta$ -Zerfall ist durch die Darstellung in der Abbildung 2.15 als Feynman-Diagramm nachzuvollziehbar.



## 3. DIDAKTISCHE GRUNDLAGEN

Für die Entwicklung von Arbeitsblättern zur Einführung des Standardmodells ist nicht nur der physikalische Hintergrund wichtig, auch die fachdidaktische Charakterisierung und das theoretische Fundament zur Bedeutung der Aufgabe spielen eine Rolle. Dafür wird im Kapitel 3.1 die ROLLE DER AUFGABE im Physikunterricht beschrieben und nach welchen Kriterien CHARAKTERISIERUNGEN erfolgen. Dabei wird in die FUNKTION DER AUFGABE IM UNTERRICHT im Abschnitt 3.2.1, die EINORDNUNG IN KOMPETENZBEREICHE in 3.2.2 sowie AUFGABENTYPEN in 3.2.3 unterschieden.

Eine Kritik an der zu eintönigen Verwendung der Aufgaben erfolgt im Abschnitt 3.3. AUFGABENKULTUR. Zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur ist die Steigerung der Aufgabenqualität von Bedeutung, weshalb im Abschnitt 3.4 die Themenrelevanz, die Motivation und Förderung der Problemlösung, die Öffnung und Binnendifferenzierung sowie die Gruppen- und Partnerarbeit als Qualitätskriterien besprochen werden.

### 3.1. ROLLE DER AUFGABE

Zur Charakterisierung der Aufgabe ist ein einheitliches Verständnis, was als Aufgabe verstanden wird, hilfreich. Wiesner, Schecker und Hopf (2011) formulieren folgende Abgrenzung: Ein thematisch und von der Form her abgegrenzter Arbeitsauftrag, der sich aus mehreren Einzelaufträgen zusammensetzen kann und dessen Ergebnis schriftlich oder mithilfe der in der Aufgabe gegebenen Bausteine<sup>1</sup> formuliert wird. Durch die Bearbeitung der Aufgabe werden die Schülerinnen und Schüler dazu veranlasst, sich aktiv mit dem gewählten physikalischen Sachverhalt auseinander zu setzen (im Gegensatz zu einer rezeptartigen Experimentieranleitung). Die Dauer der Aufgabe ist auf einige Minuten begrenzt, sodass sie in einer Unterrichtsstunde bearbeitet werden kann. Jedes im Rahmen der Masterarbeit erstellte Arbeitsblatt entspricht einer zusammenhängenden Aufgabe, bestehend aus mehreren Teilaufgaben.

Aufgaben nehmen im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht eine bedeutsame Stellung ein. Sie sind in allen Phasen des Unterrichts präsent und strukturieren

---

<sup>1</sup>Bei zwei der vorliegenden Aufgaben sollen Zusammenhänge zwischen vorgegebenen Begriffen dargestellt werden. Diese werden entweder in die richtige Reihenfolge gelegt oder mit eigenen Pfeilen und Erklärungen verbunden.

diesen. Aufgaben haben vielseitige Funktionen; sie können zum Beispiel ein neues Thema motivieren, eine neu erlernte Formel üben, ein bekanntes Gesetz in einem neuen Zusammenhang betrachten und bekanntes Wissen im Leistungstest abfragen. Jedoch gibt es nicht einfach zum Erreichen eines gewünschten Lernziels „die“ entsprechende Aufgabe. „Inhalt und Form einer Aufgabenstellung sind immer vor dem Hintergrund der Voraussetzungen in einer bestimmten Lerngruppe einzuschätzen“ (Wiesner, Schecker und Hopf 2011, S. 123 ff.). Die Gestaltung einer Aufgabe hängt dementsprechend nicht nur davon ab, in welcher Phase des Unterrichts und wozu sie eingesetzt werden soll, sondern auch die Zusammensetzung der Lerngruppe ist ein entscheidendes Kriterium. Je nach Wissensstand, individuellem Lernfortschritt und Lernverhalten muss eine gewählte Aufgabe zusätzlich durch die Lehrperson angepasst werden, um den Bedürfnissen der Schülerinnen und Schülern gerecht zu werden. Leisen (2006, S. 260 f.) bezeichnet mit diesen Anpassungen das Kultivieren der Aufgaben, also „(...) sie für das Lernen und Leisten fruchtbar zu machen.“ Dann können leistungsschwache Lerner gefördert und unterstützt sowie leistungsstarke gefordert werden (Leisen 2006; Wiesner, Schecker und Hopf 2011).

Eine auf die Schülerinnen und Schüler und die Lernumgebung abgestimmte Aufgabe ist also zum Erreichen des Lernziels notwendig. Da der Lernprozess auch von Faktoren in der Lernsituation abhängt, ist die Umsetzung der Aufgabe im Unterricht noch bedeutsamer, wie Blömeke u. a. (2006, S. 334) herausstellt:

Beim Lernen handelt es sich um einen kognitiven Prozess, der bewusst und unbewusst, gesteuert und ungesteuert, stattfinden kann. Lehrerinnen und Lehrer streben an, Lernprozesse von Kindern und Jugendlichen gezielt anzuregen und zu unterstützen. (...) Von Seiten der Schülerinnen und Schüler erfolgt eine Auseinandersetzung mit Aufgaben vor allem dann, wenn bei ihnen ein Bedürfnis angesprochen wird. (...) Gelingt es, mit einer Aufgabe an diese [Lernvoraussetzungen, R.A.] anzuknüpfen, tragen die Lernprozesse zum Aufbau, zur Veränderung oder zur Ausdifferenzierung der kognitiven Strukturen bei.

## 3.2. CHARAKTERISIERUNG

Die Charakterisierung von Aufgaben kann nach unterschiedlichen Faktoren erfolgen, zum Beispiel nach der Funktion der Aufgabe im Kontext des Unterrichts, der angesprochenen Kompetenz oder dem Typ der Aufgabe.

### 3.2.1. FUNKTION DER AUFGABE IM UNTERRICHT

Für die Charakterisierung von Aufgaben nach ihrer Funktion unterteilen Leisen (2006) und Kauertz und Fischer (2009, S. 663 f.) nach Aufgaben zum Lernen und zum Leisten.

Die im Rahmen der Masterarbeit erstellten Aufgaben wurden nicht zur Leistungsüberprüfung konzipiert, weshalb im Folgenden nur Aufgaben zum Lernen betrachtet werden. Diese treten in allen Phasen des Unterrichts auf. Die dadurch mögliche Strukturierung wird in den folgenden Absätzen nach Häußler und Lind (1998) für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht beschrieben. Die Funktionen, welche die Aufgaben in den verschiedenen Phasen des Unterrichts übernehmen, werden für die einzelnen Phasen erläutert.

Die Motivation einer neuen Thematik kann in der Einstiegsphase durch eine Aufgabe erfolgen, deren Lösung ohne das neu zu Erlernende nicht möglich wäre. Nicht nur die sonst unlösbare Aufgabenstellung an sich motiviert das neue Thema, der Kontext sollte ebenfalls ansprechend sein, indem die Interessen der Schülerinnen und Schüler beachtet werden. Zur Verknüpfung mit bereits Bekanntem werden entsprechende Übungsaufgaben in der Übungsphase gestellt. Durch eine große Anzahl an Aufgaben mit unterschiedlichen Kontexten wird eine Motivation geschaffen, das neu Erlernte auf unbekannte Aufgabeninhalte zu transferieren. Während der Wiederholungsphase soll durch geeignete Aufgaben länger zurückliegendes Wissen aufgefrischt werden, wodurch den Lernenden auch die eigenen Fortschritte aufgezeigt werden.

In der Individualphase, einer Übungsphase, werden Schülerinnen und Schüler durch differenzierte Aufgaben gefordert und gefördert. Hilfen, wie Übersichten oder Musterlösungen, unterstützen leistungsschwache Lernen. Aufgaben mit gesteigerter Schwierigkeit, was z. B. durch offene Lösungswege erreicht wird, motivieren leistungsstarke Lerner. Durch Arbeiten in Gruppen können Aufgaben gemeinsam bearbeitet werden. Auftretende Probleme werden durch gegenseitige Erklärungen gelöst. Als letzte Phase werden von Häußler und Lind (1998) die Hausaufgaben genannt, in der die Aufgaben meist ebenfalls die Funktion der Wiederholung haben. Dabei wird an dieser Stelle besonders darauf hingewiesen, dass ein Lernfortschritt nur durch den richtigen Einsatz der Aufgaben erreicht werden kann. Die Beachtung des Zeitpunkts der Aufgabenstellung, eine angepasste Schwierigkeit und die Kontrolle der Hausaufgaben sind maßgebende Faktoren.

Aufgaben zum Lernen und zum Leisten werden nicht klar genug getrennt (Leisen 2006). Dadurch entsteht der Druck bei den Lernenden, sofort die richtige Lösung aufzuschreiben. Doch Schülerinnen und Schüler müssen sich in Lernsituationen Fehler erlauben dürfen, um dadurch Lösungsstrategien entwickeln zu können (ebd.). Deswegen ist die deutliche Vermittlung des Aufgabenziels und eine Anpassung der Aufgabe an das Ziel und die Lernenden von großer Bedeutung (vergleiche Abschnitt 3.3).

### 3.2.2. EINORDNUNG IN KOMPETENZBEREICHE

Die Charakterisierung der Aufgabe nach den angesprochenen Kompetenzen bildet eine weitere Möglichkeit. Eine Orientierung geben die Kompetenzbereiche, wie sie in den Bildungsstandards des Faches Physik für den Abschluss der 10. Klasse (KMK 2005) aufgeführt sind, da konkrete Operatoren benannt werden. Die Operatoren teilen die Kompetenzbereiche jeweils in Anforderungsbereiche der Stufe 1 bis 3 ein. Die für die Sekundarstufe II festgelegten Einheitlichen Prüfungsanforderungen für die Abiturprüfung in Physik bieten sich besser für die vorliegenden Aufgaben an, da diese für die Sekundarstufe II erstellt wurden (eine Einordnung erfolgt in Abschnitt 4.3. EINORDNUNG IN ÜBERGEORDNETE STANDARDS). Die Kompetenzbereiche werden in Fachwissen, Fachmethoden, Kommunikation und Reflexion eingeteilt. Jeder Bereich ist in vier Abstufungen untergliedert (vergleiche Tabelle 4.1).

Auch wenn die Operatoren den Anforderungsbereichen zugeordnet werden können ist diese Einteilung ungenau, da nicht nur der Operator die Aufgabe charakterisiert, sondern auch der Aufgabentext sowie die genaue Aufforderung (Kauertz und Fischer 2009, S. 665). Es gibt deswegen auch nicht zwingend einen Zusammenhang zwischen Schwierigkeitsgrad der Aufgabe und Einordnung in den Anforderungsbereich, da durch Informationen zum Kontext und Fachinhalte im Aufgabentext das Niveau variiert werden kann. Weiterhin kann das in der Aufgabe geforderte Fachwissen je nach Lernstand Vorwissen oder unbekanntes Wissen für die Lerngruppe sein.

### 3.2.3. AUFGABENTYPEN

Als letzte hier benannte Charakterisierungsmöglichkeit gibt es den Aufgabentyp, der die Form des Aufgabentextes mit der Aufgabenstellung und/oder den Lösungsweg und die Lösung beschreibt. Aufgaben mit unterschiedlichen Aufgabentexten sind zum Beispiel Zeitungsartikel, bei denen die für die Lösung benötigten Informationen in einem Fließtext stehen. Als eine Möglichkeit einer Sachaufgabe kann damit zusätzlich ein Realitätsbezug hergestellt werden, die Art der Lösung wird dadurch noch nicht eingegrenzt.

Unterschiedliche Lösungsformate fördern Problemlösestrategien und motivieren durch die wechselnde Anforderung. Bei einem Multiple-Choice-Format werden richtige und falsche Antwortmöglichkeiten vorgegeben, je nachdem ob die falsche Antwort der richtigen sehr ähnlich ist oder nicht, kann die Schwierigkeit differenziert werden. Eine Möglichkeit zur Förderung des Verständnisses für eine Problematik ist die Entwicklung eines Modells als Lösung. Dafür eignet sich auch die Erstellung eines Begriffsnetzes, in dem für ein Thema wichtige (vorgegebene) Begriffe mit Pfeilen und selbstständigen Beschreibungen verknüpft werden. Fermiaufgaben sind sehr offene Aufgaben, deren Lösungsweg daraus besteht durch Erfahrung einschätzbare Größen abzuschätzen. Die Entwicklung von

Problemlösestrategien steht bei Aufgaben, bei denen der Lösungsweg nicht vorgegeben ist, noch mehr im Vordergrund. Diese sogenannte Öffnung der Aufgabe wird im nächsten Abschnitt thematisiert.

### 3.3. AUFGABENKULTUR

Der zu gleichförmige Einsatz von ähnlichen Aufgaben zum Lernen in einer starren und typischen Unterrichtschoreographie wird vielfältig kritisiert (Leisen 2001, S. 402): Demnach ist die Aufgabenkultur zu einseitig bei der Erarbeitung und bei Übungen, da zu wenig unterschiedliche Vorgehensweisen, Lösungsmöglichkeiten und Kontexte geboten werden. Wiederholungen sind schlecht im Unterricht vernetzt, weder zur Übung und Vertiefung des neuen Stoffes, noch zur Auffrischung länger zurückliegender Themen. Zusätzlich kritisiert Leisen (2006, S. 261) die ungenügende Abdeckung der Kompetenzbereiche Kommunikation und Reflexion durch die genutzten Aufgabenformate.

Durch eine aufgelockerte Unterrichtschoreographie und abwechslungsreiche Aufgabentypen kann die Gleichförmigkeit aufgelöst werden. Dazu wird von Leisen (2001, S. 402) folgender Vorschlag eingebracht:

Nach einer ersten Information wird der neue Stoff bereits auf elementarer Basis mittels einfacher Rechenaufgaben, Einsetzaufgaben und Zeichenaufgaben eingeübt. In einer anschließenden kurzen Erarbeitungsphase unter Einbezug von Experimenten wird im Lehrer-Schüler-Gespräch neuer Stoff erarbeitet. In komplexeren Aufgaben mit Kontextbezügen wird dieser anschließend eingeübt. Eine nachfolgende Erarbeitungsphase, gegebenenfalls in Gruppenarbeit, mündet in komplexe Aufgaben und Anwendungen. Wiederholungsübungen werfen den Blick zurück und Strukturierungen bereiten zukünftiges Lernen vor.

Die kritisierten unterrepräsentierten Anforderungsbereiche Kommunikation und Reflexion werden durch veränderte Aufgabenformen und Lösungswege mehr gefordert. Die Formulierung der Antwort als Erklärung für eine fachfremde Zielperson, wie die Eltern, oder die Bewertung der eigenen Lösung unterstützen die gezielte Nutzung der Fachsprache und die Stellungnahme zu einem physikalischen Thema. Die verbale Formulierung einer Formel oder eines Diagramms eignet sich ebenfalls dazu.

### 3.4. AUFGABENQUALITÄT

Die Qualität einer Aufgabe kann nach Blömeke u. a. (2006, S. 335 ff.) mittels Analyse-kriterien beschrieben werden, die didaktische und fachliche Merkmale betrachten. Dabei

werden die Themenrelevanz, die Anregung zur Problemlösung, die Öffnung und die Bindendifferenzierung der Aufgabe sowie die Gruppen- und Partnerarbeit thematisiert. Diese Kriterien werden im folgenden beschrieben und kommentiert.

Das Erschließen eines gesellschaftlich relevanten Inhaltes steht an erster Stelle, eine vorwiegend in der MOTIVATION DES THEMAS FÜR DEN UNTERRICHT im Abschnitt 4.2 bereits diskutierte Frage. Ist die Kern- und Teilchenphysik ein gesellschaftlich relevantes Thema? Zumindest die Relevanz für die Bildung kann bivalent beantwortet werden: Ja und Nein, da das Standardmodell in den Lehrplänen erst, oder auch schon, in einem Bundesland präsent ist (Schulministerium NRW 2014). Wenn das Thema weiterhin nicht relevant für die Lernenden ist, fällt es auch schwer in den Schülerinnen und Schülern das Bedürfnis zu wecken eine Lösung finden zu wollen. Dafür ist eine Aufgabe hilfreich, die mit einem Interessensgebiet der Jugendlichen verknüpft ist. Eine provozierende Präsentation des neuen Stoffes und eine geschickte Aufgabenstellung können den Drang zur Lösung der Aufgabe unterstützen. Die Lösung darf für die Schülerinnen und Schüler nicht sofort ersichtlich sein, sie darf ihnen aber auch nicht zu schwer fallen, da sonst das Interesse wieder sinkt. Die Schülerinnen und Schüler müssen die Möglichkeit haben Fehler zu machen und daraus zu lernen, sonst würde nur Aufgaben lösen geübt werden, nicht aber die Anwendung des zur Lösung notwendigen Wissens oder der Methode (Blömeke u. a. 2006). Das kognitive Niveau der Aufgabe sollte dafür knapp über den Fähigkeiten der Lernenden liegen. Gleichzeitig ist die Präsentation neuen Inhalts oder einer neuen Methode notwendig, um mit der Erweiterung des Wissens eine Motivation zu schaffen.

Mit der Öffnung der Aufgabe wird erreicht, dass diese als zu lösendes Problem betrachtet wird. Je weniger eingeschränkt der Weg und die Anzahl der Lösungen ist, umso mehr werden die Lernenden gefordert. Vor allem das Zulassen unterschiedlicher Lösungsarten wird für Lerner mit einem niedrigen Niveau empfohlen. Wenn die Lösung durch verschiedene Wege gefunden werden kann, ist die Aufgabe leichter zugänglich und kann somit das Verständnis fördern (Häußler und Lind 1998, S. 15). Dies kann zum Beispiel durch die An- und Durchstrukturierung der Aufgabe geschehen, bei der die Aufgabe entweder offen zur Entwicklung einer Problemlösung oder geschlossen und zur strukturierten Anwendung einer Methode gestaltet ist. Mit der An- und Durchstrukturierung werden der Umfang und die Formulierung der Aufgabenstellung angepasst. Der Aufgabentext kann mit überflüssigen oder auch knappen Informationen gestaltet sein, eine Struktur wird u. a. mit deutlich machen relevanter Punkte erreicht. Die Aufforderung mit den Bearbeitungsaufträgen ist durchstrukturiert einfach lösbar. Durch Zwischenschritte wird ein geführter Lösungsweg verfolgt. Anstrukturierte Aufgaben sind offen gestellt, sodass die Lernenden die Art und den Umfang der Lösung selbst konzipieren müssen, da die Orientierung nicht an strukturierenden Vorgaben möglich ist. Dies fördert wiederum, wie bei

offenen Aufgaben, „(...) Ziele wie Eigenständigkeit, Selbstvertrauen, Problembewusstsein, Kreativität, Flexibilität“ (Leisen 2006, S. 263). Die Offenheit der Aufgabe kann in der Anzahl und Art der Lösungswege liegen oder auch durch das selbstständige Finden eines Bearbeitungsauftrages erreicht werden. Die Nutzung von Orientierungshilfen, wie Tabellen oder Sturkturdiagrammen sowie Metareflexionen geben den Schülerinnen und Schülern Anregungen zur Bearbeitung.

Die Binnendifferenzierung einer Aufgabe bietet die Möglichkeit, diese für Schülerinnen und Schüler mit unterschiedlichem Lernverhalten zu nutzen, ohne die Aufgabe modifizieren zu müssen. Durch die Vorgabe unterschiedlicher Bearbeitungszeiten oder verschiedener Teile einer Aufgabe werden vor allem mit dem Gedanken der geplanten Zeit für eine Unterrichtsphase Differenzierungsmöglichkeiten geschaffen. Sollte durch die Verkürzung der Aufgabe für Lernende mit niedrigem Niveau nur der einfachere Aufgabenteil bearbeitet werden, ist das im Hinblick auf die zu erwerbenden Kompetenzen nicht hilfreich. Steigerungen der Schwierigkeit und Transferleistungen im schwierigeren Aufgabenteil können somit nicht geübt werden. Dafür eignen sich zusätzliche Hilfsmittel wie Übersichten zur Orientierung und Leitfragen zur Strukturierung. Das Vorgeben von Lösungsansätzen als ein Beispiel gestufter Hilfen und Beispiellösungen zur Förderung des Verständnisses der Anwendung helfen ebenfalls beim Differenzieren. Das gemeinsame Arbeiten von Schülerinnen und Schülern bei der Erarbeitung der Lösung kann eine Differenzierung ebenfalls unterstützen, gezieltes Auswählen der Partner und Gruppen durch die Lehrperson beeinflusst dies eventuell positiver als die eigene Wahl.

Für eine gut lösbare Aufgabe ist die sprachlich angepasste Aufgabenstellung ebenso wichtig, wie auch ein übersichtliches und strukturiertes Format. Blömeke u. a. (2006) werden dahingehend von Kauertz und Fischer (2009, S. 666) ergänzt, dass der Aufgabentext kritisch bezüglich verwendeter (nötiger) Fremdwörter, logischer Strukturierung und sprachlicher Verständlichkeit hinterfragt wird.

Ein letztes von Blömeke u. a. (2006) genanntes Qualitätskriterium ist die Gruppen- oder Partnerarbeit als notwendige soziale Interaktion auf dem Weg zur Lösung. Durch die Zusammenarbeit werden die in der Kritik zu wenig beachteten Kompetenzbereiche Kommunikation und Reflexion angesprochen, da durch die Schülerinnen und Schüler eigene Vorschläge formuliert werden müssen und bei Verständnisproblemen gegenseitige Erklärungen weiterhelfen.

Eine qualitativ hohe Aufgabe ist also nach den erläuterten Aspekten eine schwere und offene Aufgabe die nur in Zusammenarbeit gelöst werden kann. Eine Aufgabe in der Art ist trotzdem nicht immer die Beste. Die in leichten Aufgaben geforderte Reproduktion von Wissen zur Aktivierung und Wiederholung ist ebenso nicht zu vernachlässigen. Die überwiegende Verwendung offener Aufgaben ist genauso wenig hilfreich, geschlossene

Formen werden gleichermaßen gebraucht (Leisen 2006, S. 263). Eine abwechslungsreiche Kultur ist also essenziell, dazu zählt u. a. die Ausschöpfung der Spannweite zwischen leichten und schweren sowie geschlossenen und offenen Aufgaben als auch die der individuellen und gemeinschaftlichen Bearbeitung.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit erstellten Aufgaben sind nicht mit dem Ziel entwickelt worden, möglichst unterschiedliche Typen zu repräsentieren oder um Vernetzungen untereinander oder zu anderen Themengebieten zu schaffen, trotzdem ist der Aufbau und die Form der Aufgaben nicht uniform. Mit dem Ziel, zu verschiedenen Themengebieten exemplarisch Aufgaben zu entwickeln, wurden der Aufgabentyp, die Lösungsform, die Vorkenntnisse usw. verschieden gewählt um Eintönigkeit zu vermeiden. Vorschläge zu den Punkten Differenzierung und Öffnung der Aufgaben werden in den Kapiteln 5. DIDAKTISCHE ANALYSE DER AUFGABEN und dem ANHANG gegeben.

Eine Eigenschaft eint alle Aufgaben: Das schwer greifbare und nicht einfach zu vermittelnde Fachgebiet. Aufgaben zur Anhäufung eines breit gefächerten Wissens sowie Aufgaben zur vertikalen Verknüpfung werden damit aufgrund der zeitlichen Einschränkung im Unterricht nicht möglich sein, wenn das Thema im Lehrplan im Umfang wie in Nordrhein-Westfalen (Schulministerium NRW 2014, S. 34, 47) vertreten ist.

## 4. FACHLICH-FACHDIDAKTISCHE ÜBERLEGUNGEN

Mit diesem Kapitel wird eine Verbindung zwischen dem fachlichen und dem didaktischen Hintergrund geschaffen. Der Aufbau des physikalischen Fachtextes und die Gründe für die Verwendung von der Fachliteratur abweichender Begriffe werden in Kapitel 4.1. STRUKTURIERUNG UND FACHBEGRIFFE erläutert. Die Relevanz der Thematik, und warum das Standardmodell der Teilchenphysik auch eine Rolle in der Schule spielen sollte, erläutert das Kapitel 4.2. MOTIVATION DES THEMAS FÜR DEN UNTERRICHT. Die darin genannten Aspekte dienen als erste Anknüpfungspunkte für die Einführung des Themas im Unterricht.

Die in 3.2. CHARAKTERISIERUNG formulierte EINORDNUNG IN ÜBERGEORDNETE STANDARDS erfolgt konkret für die im Rahmen der Masterarbeit erstellten Aufgaben in Kapitel 4.3. Der Fokus liegt auf der Konzeption der Aufgaben für die Sekundarstufe II. Für zwei ausgewählte Lehrpläne werden MÖGLICHE ANKNÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN gesucht, wobei für den sächsischen Lehrplan in Kapitel 4.4.1, einem LEHRPLAN OHNE DIREKTEN THEMENBEZUG, die Lernbereiche und Inhalte aufgezeigt werden die eine Möglichkeit der grundlegenden Konzepte zulassen. Im nordrhein-westfälischen LEHRPLAN MIT DEM THEMA STANDARDMODELL in den Inhaltsfeldern von Grund- und Leistungskurs wurden Anknüpfungspunkte für ausgewählte Aufgaben dieser Arbeit gefunden.

### 4.1. STRUKTURIERUNG UND FACHBEGRIFFE

Die für die physikalischen Grundlagen sowie die Aufgaben verwendeten Konzepte fußen auf den Materialien, welche durch das Netzwerk Teilchenwelt (2015) erstellt worden sind. Häufig wird in der Fachliteratur zuerst die Anordnung der Elementarteilchen dargestellt, um danach auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Eigenschaften hinzuweisen, auf denen die Ordnung basiert. Die Herangehensweise der vorliegenden Masterarbeit folgt dem Konzept, das Standardmodell der Teilchenphysik über die qualitative Beschreibung der mathematischen Grundlagen aufzubauen um anschließend die resultierende Ordnung der Elementarteilchen zu präsentieren. Die im Alltag wahrgenommenen und in Experimenten beobachteten Kraftwirkungen wurden auch historisch zuerst mathematisch beschrieben, bevor durch die Symmetrien der Ladungen eine Anordnung der Teilchen in einem Schema erst entstand.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit erstellten Aufgaben befassen sich nur mit der

ersten Generation der Materieteilchen und Anti-Materieteilchen, weshalb sich zunächst die Erläuterungen im Kapitel 2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN auch darauf beschränken. Die Aufgaben können jederzeit mit den Teilchen der zweiten und dritten Generation erweitert werden; zur Erklärung der fundamentalen Konzepte sind die erste Generation und die Botenteilchen völlig ausreichend.

Das Vermeiden der mathematischen Beschreibung der Konzepte des Standardmodells durch Formeln der Gruppentheorie und Quantenelektrodynamik birgt die Gefahr von Fehlern in quantitativen Erläuterungen, Analogien und Modellen. Eine exakte Ausdrucksweise ist notwendig, damit daraus, auch wenn das Themengebiet nur angeschnitten wird, keine falschen Vorstellungen resultieren. Ein typisches Beispiel ist der Ausdruck: Das Elektron ist geladen. Damit könnte einerseits suggeriert werden, dass ein Elektron, ähnlich einem Akku, elektrisch aufgeladen werden kann. Andererseits wird die Art der Ladung nicht spezifiziert, da das Elektron tatsächlich zwei Ladungen trägt, die elektrische und die schwache.

Viele Begriffe entstammen dem von Physikerinnen und Physikern genutzten gewohnten Wortschatz. Diese umgangssprachlichen Beschreibungen sind den im Gebiet Teilchen- und Kernphysik Forschenden klar, da sie die dahinterliegenden Konzepte kennen. Bei der Einführung dieses Themas im schulischen Kontext ist eine klare Ausdrucksweise notwendig, um richtige und wichtige Verknüpfungen der Begriffe zu forcieren und entsprechend falsche zu vermeiden. Da in der Schule bisher nur der thematisch vorausgehende Lernbereich Atom- und Quantenphysik im Lehrplan gefordert ist, gibt es auch nur dazu Untersuchungen über falsche Schülervorstellungen (Müller, Wodzinski und Hopf 2004). Bisher fundieren die *richtigen Begriffe* und *falschen Vorstellungen* bei der Kern- und Teilchenphysik auf eigenen Erfahrungen beim Lernen und mit Schülern.

Der übliche Begriff Austauschteilchen wird durch die Verwendung des Begriffes Botenteilchen ersetzt. „Die Bezeichnung *Austauschteilchen* betont die Vermittlung einer Kraftwirkung durch den Austausch von Teilchen. Eine Wechselwirkung umfasst jedoch darüber hinaus auch die Phänomene der Teilchenumwandlung, -erzeugung und -vernichtung“ (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 104). Außerdem soll damit deutlicher gemacht werden, dass die Botenteilchen erzeugt und wieder absorbiert werden und nicht im Besitz eines Elementarteilchens sind. Die Bezeichnung als Bosonen ist ebenfalls in der Fachliteratur geläufig, allerdings entwickelt der Begriff keinerlei Vorstellung für die Eigenschaften der Botenteilchen, zumal zwar alle Botenteilchen Bosonen sind, aber nicht alle Bosonen Botenteilchen.

Zudem wird in den Materialien des Netzwerk Teilchenwelt (2015) sowie in der vorliegenden Masterarbeit die Verwendung des Wortes Umwandlung statt Zerfall favorisiert. Beim Kernzerfall steht die Erhaltung der Kernladungszahlen im Vordergrund, da

ein Ursprungsatom in kleinere Atome und Atombestandteile, wie ein  $\alpha$ -Teilchen, zerfällt. Bei einem Elementarteilchen ist dies jedoch nicht durch das Zerfallen in Bruchstücke des Ursprungsteilchens zu erklären, da ein elementares Teilchen nicht aus kleineren Bestandteilen aufgebaut ist, sondern eine Umwandlung zu einem komplett anderen Elementarteilchen geschieht. Vor allem die Erhaltung aller Ladungszahlen spielt eine Rolle, wodurch die Teilchenumwandlungen beschränkt werden. Auch bei Kernzerfällen kommt es zu Umwandlungen, wie z. B. beim  $\beta$ -Zerfall. Historisch ist der  $\beta$ -Zerfall ein geprägter Begriff, die Betonung sollte bei der Erläuterung entsprechend auf der Umwandlung der Kernbestandteile liegen.

## 4.2. MOTIVATION DES THEMAS FÜR DEN UNTERRICHT

Das Themengebiet der Kern- und Teilchenphysik mit dem im Mittelpunkt der vorliegenden Masterarbeit stehenden Standardmodell ist eine komplexe Thematik, welche das alltägliche Leben nicht berührt. Sie ist schwierig zu begreifen, da kein für den Menschen erfahrbares Umweltphänomen beschrieben wird, sondern die kleinsten und größten existenten Zusammenhänge beschrieben werden, die Elementarteilchen und die fundamentalen zugrunde liegenden Kräfte. Weshalb die Mühe, sich damit zu beschäftigen? Warum sollte die Vermittlung an Schülerinnen und Schüler wichtig sein?

Die einfachste Antwort ist die drängende Frage nach dem Ursprung – dem unseres Lebens, der Welt und des Universums. Hätten die vier fundamentalen Wechselwirkungen nicht ihre Eigenschaften, wäre unsere Erde und das Leben vielleicht nie entstanden. Mit einfachen Spekulationen können die Auswirkungen, sollten die Grundkräfte andere Eigenschaften haben, diskutiert werden: Wenn die Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung nicht unendlich wäre, sondern auf wenige Kilometer begrenzt, würde die lebensnotwendige Sonnenenergie gar nicht die Erde erreichen, das Leben wäre vielleicht nur in sehr kleinem Sonnenabstand möglich. Würde die Reichweite nur wenige Meter betragen, wären alle modernen Übermittlungs- und Empfangsgeräte, die auf elektromagnetischen Wellen basieren, in ihrer heutigen Funktionsweise nicht denkbar. Kein Radio oder Fernseher und kein Handy wären zur Übertragung von Daten fähig. Eine noch stärkere Wechselwirkung (der Kopplungsparameter  $\alpha_S$  größer) hätte unter Umständen die Entstehung neuer Elemente auf der Erde zur Folge, da Atomkerne mit höheren Kernladungszahlen stabil wären.

Es wird von den theoretischen Teilchenphysikerinnen und -physikern versucht, das Standardmodell, welches als funktionierendes Modell die Elementarteilchen und drei der fundamentalen Wechselwirkungen beschreibt, in eine übergreifende Theorie zu ordnen. Leben wir nur in einem von vielen Paralleluniversen, oder ist das Universum rein zufällig

mit den richtigen Parametern für die Entwicklung entstanden<sup>1</sup>? Einen Hinweis auf die Antwort könnten neue Teilchen oder ihr Verhalten geben, welche durch eine der Theorien vorhergesagt wurde. Eine definitive Antwort, ob die von den Menschen vorgeschlagene Beschreibung der Struktur des Universums richtig ist, wird es wohl nie geben, von wem auch. Teilchenphysik beinhaltet demzufolge immer auch einen philosophischen Aspekt, der bei der Diskussion des Themas nicht außer Acht gelassen werden sollte.

Neben den fundamentalen Fragen nach der Existenz spielen jedoch auch rein ökonomische Aspekte eine Rolle. Die Suche nach neuen Teilchen am CERN zählt zur Grundlagenforschung, es wird also nichts entwickelt, was sich ökonomisch verwerten lässt und die Forschung finanziert. Die notwendigen Mittel müssen u. a. durch Förderungen akquiriert werden, wofür eine entsprechende Präsenz in der Öffentlichkeit von großer Wichtigkeit ist. Neben der Forschung wird trotzdem eine Menge entwickelt und entdeckt, was nicht nur der Menschheit dient, sondern auch Verwendung in der Industrie und Medizin findet. Als bekanntestes Beispiel ist die Entwicklung des World Wide Webs zu nennen, welches anfangs die Kommunikation der Wissenschaftler untereinander am CERN erleichtern sollte, heute ist das Internet nicht mehr wegzudenken. Neue Erkenntnisse zur Materialprüfung sowie zur Bekämpfung von Krebs wurden bei der Untersuchung von Teilchenstrahlungen ebenfalls gewonnen und nutzbringend eingesetzt werden. Selbst die immer höheren Ansprüche an die Materialien, die bei sehr hohen Energien zur Erzeugung der notwendigen Magnetfelder im Beschleunigerring bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt eingesetzt werden, fordern und fördern die Industrie bei deren Entwicklung. Aus den dabei neu erworbenen Techniken können in anderen Gebieten leistungsfähigere, leichtere, stabilere, etc. Komponenten resultieren.

Als Arbeitsplatz ist das CERN also nicht nur für Physikerinnen und Physiker interessant: von Berufen in Ingenieursbereichen bis hin zum Wissenschaftsjournalismus können vermutlich alle erdenkbaren Berufsgruppen angetroffen werden.

Eine weitere Motivation kann neben der Betrachtung verschiedener Aspekte der Organisation des Forschungszentrums die Schönheit der Teilchenkollisionen sein. In Abbildung 4.1 wurde aus Detektordaten ein Ereignis rekonstruiert, bei dem ein mögliches Higgs-Teilchen in ein Myon-Anti-Myon- und ein Elektron-Positron-Paar zerfällt. Selbst ohne viel Vorwissen kann über die in Bildern anschaulichen Teilchenkollisionen ein Zugang zur Physik des Standardmodells geschaffen werden, da es durch die Abbildung freifbar ist und Faszination hervorrufen kann. Über diesen Einstieg können an einem Event Ladungs-, Energie- und Impulserhaltung betrachtet werden.

Einer der wichtigsten Aspekte für die Motivation findet sich im Curriculum selbst.

---

<sup>1</sup> Der empfehlenswerte Film „Particle Fever“ (2013) von Marc Levinson diskutiert diese Frage und forscht nach, was die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am CERN zu ihrer Arbeit motiviert.

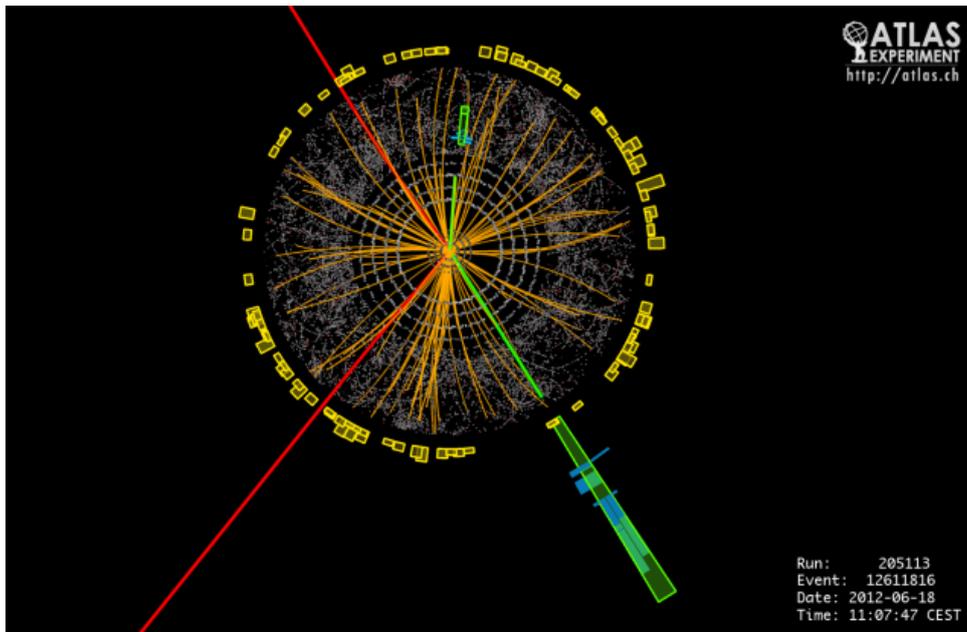


Abbildung 4.1.: In diesem Event vom 18. Juni 2012 ist der Zerfall eines Higgs-Teilchen dargestellt. Die Protonen laufen orthogonal zur dargestellten Fläche aufeinander zu und kollidieren miteinander. Das entstehende Myon-Anti-Myon-Paar ist in rot dargestellt, das Elektron-Positron-Paar in grün (ATLAS 2015).

Im Physikunterricht in Sachsen werden laut Lehrplan z. B. die Newton'schen Axiome, das Coulomb'sche Gesetz, radioaktive Zerfallsgleichungen und die Kernfusion behandelt, was Beispiele für die vier fundamentalen Wechselwirkungen sind. Der Begriff Wechselwirkung selbst wird jedoch nur bei zwei Themengebieten erwähnt: im Zusammenhang mit dem Wechselwirkungsgesetz der Mechanik und der Wechselwirkung radioaktiver Strahlung mit Materie (SMK 2011). Die Einordnung in das übergeordnete Konzept der vier Grundkräfte wird im Curriculum nicht thematisiert.

Ein ähnlicher Bruch ist bei der Beschreibung der Atome und kleinsten Teilchen zu beobachten. In verkürzter Form kann chronologisch folgendermaßen zusammengefasst werden: Das Thomson'sche Atommodell geht von einer gleichmäßig positiv und negativ geladenen Masse aus, Rutherford erkannte den Atomkern als kompakten, alle Masse tragenden Mittelpunkt des Atoms und Bohr erweiterte dies um diskrete Bahnen der Elektronen. Damit wird zwar die aus dem griechischen stammende Bedeutung des Wortes Atoms als das Unteilbare widerlegt, indem die historischen Entwicklungen gelehrt werden. Der laut Lehrplan vermittelte Stoff bricht aber vor dem aktuellen Stand der Wissenschaft ab – die elementaren Teilchen, die als die kleinsten Teilchen, aus denen sich unsere Materie aufbaut, gelten, bleiben größtenteils unerwähnt. Ohne Vermittlung aktueller Forschungsthemen und Theorien scheint der Physikunterricht ein abgeschlossenes Bild

der beschreibenden Gesetzmäßigkeiten zu schaffen<sup>2</sup>. Dabei bietet besonders die Suche elementarer Teilchen Raum für neue Ideen und Entwicklungen. Die Faszination für das lebendige Forschungsgebiet Physik kann durch die Einführung des Standardmodells neu geweckt werden.

### 4.3. EINORDNUNG IN ÜBERGEORDNETE STANDARDS

Die im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit erstellten Aufgaben wurden für die Sekundarstufe II entwickelt. Im Lehrplan selbst ist das Thema Kern- und Teilchenphysik allerdings nur im Bundesland Nordrhein-Westfalen enthalten. Zur Einordnung der Aufgaben in eine einheitliche Übersicht bieten sich die Bildungsstandards für das Fach Physik (KMK 2005) an, die allerdings für den mittleren Schulabschluss erarbeitet wurden. Besser eignen sich die ebenfalls bundesweit empfohlenen Einheitlichen Prüfungsanforderungen für die Abiturprüfung im Fach Physik (KMK 2004), um die Aufgaben zu charakterisieren. Die Kompetenzen aus den in den Bildungsstandards geforderten Bereichen sollten für Lernende in der Sekundarstufe II also vorausgesetzt sein.

Die in den Einheitlichen Prüfungsanforderungen geforderten Kompetenzen werden in die Bereiche Fachkenntnisse, Fachmethoden, Kommunikation und Reflexion unterteilt (KMK 2004, S. 3 f.). Zur besseren Übersicht werden die Kompetenzbereiche mit ihren Unterteilungen in Tabelle 4.1 dargestellt, sowie alle im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelten Aufgaben eingeordnet. Die Abstufung der Anforderungen von grundlegenden Kompetenzen bis hin zur Anwendung von Strategien zur Erfüllung einer Aufgabe wird für jeden Bereich deutlich. Die Steigerung vom ersten bis zum vierten Aufzählungspunkt steigert sich bei allen Kompetenzen gleichermaßen. Schon vor der Einordnung der Aufgaben können die sich auf das Experimentieren bezogenen Punkte bei Fachkenntnissen sowie Fachmethoden ausgeschlossen werden. Experimente werden in dem im Rahmen der Masterarbeit bearbeiteten Gebiet nicht thematisiert. Werden die im Rahmen der Masterarbeit erstellten Aufgaben eingeordnet, erkennt man deutlich eine Konzentration im Kompetenzbereich Fachkenntnisse im niedrigsten Anforderungsbereich 4.2. Diese Häufung lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass bisher noch kein „strukturiertes physikalisches Basiswissen“ (KMK 2004, S. 3) vorhanden ist. Die Kern- und Teilchenphysik ist kein zentrales physikalisches Teilgebiet der einheitlichen Prüfungsanforderungen, da es bisher nur in einem Bundesland im Curriculum vorkommt. Das Wissen zum Standardmodell der Teilchenphysik, welches sehr wenige Überschneidungen mit den anderen Sachgebieten aufweist, muss erst erarbeitet werden. Da die vorliegenden Aufgaben zur Einführung des

---

<sup>2</sup>Die Begeisterung der Schülerinnen und Schüler für ein Unterrichtsfach oder ein Thema und die Erweiterung des Wissens außerhalb vom Lehrplan (über den Tellerrand schauen) sind ebenso abhängig von der Lehrperson und nicht pauschalisiert zu betrachten.

Fachkenntnisse	Fachmethoden	Kommunikation	Reflexion
<p>Die Prüflinge</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• verfügen über ein <i>strukturiertes physikalisches Basiswissen</i> (z. B. Begriffe, Größen, Gesetze) zu den zentralen physikalischen Teilgebieten</li> <li>• haben ein gefestigtes Wissen über physikalische <i>Grundprinzipien</i> (z. B. Erhaltungssätze, Kausalität, Systemgedanke) und über zentrale historische und erkenntnistheoretische Gegebenheiten</li> <li>• kennen die <i>Funktionen</i> eines Experiments (Phänomenbeobachtung, Entscheidungsfunktion in Bezug auf Hypothesen, Initialfunktion in Bezug auf Ideen, Grundlagenfunktion in Bezug auf Theorien) und wissen, was eine physikalische <i>Theorie</i> auszeichnet (Systemcharakter), was sie zu leisten vermag und wie sie gebildet wird</li> <li>• können Strategien zur <i>Generierung</i> (z. B. Texterschließung, Informationsbeschaffung, Schlussfolgerungen aus Beobachtungen und Experimenten) und zur <i>Strukturierung</i> physikalischen Wissens nutzen.</li> </ul>	<p>Die Prüflinge</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• wissen, dass die <i>Methode der Physik</i> gekennzeichnet ist durch Beobachtung, Beschreibung, Begriffsbildung, Experiment, Reduktion, Idealisierung, Modellierung, Mathematisierung</li> <li>• können Beobachtungen und Experimente zur <i>Informationsgewinnung</i> einsetzen und Ergebnisse in vertraute Modellstrukturen einordnen</li> <li>• haben eigene Erfahrungen mit <i>Methoden des Experimentierens</i> (Planung, Durchführung, Dokumentation, Auswertung, Fehlerbetrachtung, Bewertung, moderne Messmethoden)</li> <li>• haben Erfahrungen mit <i>Strategien der Erkenntnisgewinnung</i> und <i>Problemlösung</i> (z. B. Beobachten, intuitiv-spekulatives Entdecken, Hypothesen formulieren, induktives, deduktives Vorgehen, analoges Übertragen, Modellbilden).</li> </ul>	<p>Die Prüflinge</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• verfügen über <i>Methoden der Darstellung</i> physikalischen Wissens und physikalischer Erkenntnisse in unterschiedlichen Formen (z. B. Sprache, Bilder, Skizzen, Tabellen, Graphen, Diagrammen, Symbole, Formeln)</li> <li>• verfügen über eine angemessene <i>Fachsprache</i> und wenden sie sachgerecht an</li> <li>• haben Erfahrungen im adressaten- und situationgerechten <i>Präsentieren</i> von physikalischem Wissen, physikalischen Erkenntnissen, eigenen Überlegungen und von Lern- und Arbeitsergebnissen</li> <li>• haben Erfahrungen im <i>diskursiven Argumentieren</i> auf angemessenem Niveau zu physikalischen Sachverhalten und Fragestellungen.</li> </ul>	<p>Die Prüflinge</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• haben Erfahrungen mit der <i>Natur- und Weltbe-trachtung</i> unter physikalischer Perspektive und dem Aspektcharakter der Physik</li> <li>• vermögen die wechselseitige Beziehung zwischen <i>Physik und Technik</i> aufzuzeigen</li> <li>• sind in der Lage, die historische und gesellschaftliche <i>Bedingtheiten</i> der Physik zu reflektieren</li> <li>• sind vertraut mit <i>Be-wertungsansätzen</i> und sind in der Lage, persönlich, sachbezogen und kritikof-fenen <i>Stellung</i> zu beziehen.</li> </ul>

Tabelle 4.1.: Die Kompetenzbereiche aus den einheitlichen Prüfungsanforderung für die Abiturprüfung im Fach Physik in tabellarischer Darstellung (KMK 2004, S. 3 f.).

Fachkenn- tnisse	Fachme- thoden	Kommuni- kation	Reflexion
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	7	5	1
3, 4, 6, 7	5	6	

7

Tabelle 4.2.: Die im Rahmen der Masterarbeit erstellten Aufgaben wurden nummeriert und in die tabellarische Darstellung der Prüfungsanforderungen 4.1 eingeordnet.

Die Nummerierung ist in der gesamten Arbeit konsistent folgendermaßen:

- 1 AUFGABE KENNEN DER WECHSELWIRKUNGEN
- 2 AUFGABE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS
- 3 AUFGABE LADUNGEN
- 4 AUFGABE WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN
- 5 AUFGABE ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS
- 6 AUFGABE BOTENTEILCHEN
- 7 AUFGABE FEYNMAN-DIAGRAMME

Themas im Schulunterricht erarbeitet wurden, überrascht die Einordnung der Aufgaben nach den Kompetenzbereichen in Tabelle 4.2 nicht. Die in Tabelle 4.2 vorgenommene Nummerierung der Aufgaben orientiert sich an der Reihenfolge der Aufgaben im ANHANG, bei der die thematische Ordnung maßgebend ist. Die Einordnung zeigt, dass die Aufgaben 1 und 2 nur im niedrigsten Anforderungsbereich zu finden sind, dieses Ergebnis deckt sich mit der Einstufung der Schwierigkeitslevel nach Netzwerk Teilchenwelt (2015, S. 93), vergleiche 5. DIDAKTISCHE ANALYSE DER AUFGABEN. Die Aufgaben 3 bis 7 sind zusätzlich in die nächsthöhere Schwierigkeit eingestuft, Aufgabe 7 im Bereich Fachmethoden sogar in die höchste Stufe. An dieser Einordnung ist eine leichte Tendenz der Steigerung der Schwierigkeit bei der Betrachtung aller Aufgaben sichtbar.

Die Charakterisierung in die Kompetenzbereiche deckt sich außerdem mit der im Abschnitt 3.3 besprochenen Kritik an einer ungenügenden Abdeckung der Kompetenzbereiche Kommunikation und Reflexion, da nur die Aufgabe 1 zu Wechselwirkungen in diesem Bereich angeordnet ist. Diese Bereiche können jedoch schon durch einfache Änderungen, wie die Erläuterung der Lösung für eine dritte Person (vergleiche Kapitel 3.3. AUFGABENKULTUR), erreicht werden. Damit kann die Lehrkraft bei Bedarf nachträglich Einfluss nehmen, um diese Kompetenzbereiche gezielt anzusprechen. Der Kompetenzbereich Fachmethoden charakterisiert nur zwei der im Rahmen der Masterarbeit erstellten Aufgaben. Dabei baut sich besonders die Beschreibung des Standardmodells im Schulunterricht sehr auf die

Nutzung von Modellen und qualitativen Ausdrücken für mathematische Zusammenhänge auf. Die Mathematik zur Beschreibung des Standardmodells ist wiederum aufgrund der Komplexität nicht im Unterricht vermittelbar. Die für das Ansprechen des Kompetenzbereiches erforderlichen Beobachtungen und Experimente sind vor allem dem Themengebiet Detektionsmethoden zuzuordnen, deswegen gibt es nur wenige Aufgabenzuordnungen.

#### 4.4. MÖGLICHE ANKNÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN

Da das Standardmodell als Thema im Lehrplan des Bundeslands Nordrhein-Westfalen enthalten ist, eignet sich dieser für die Betrachtung möglicher Anknüpfungspunkte. Der Lehrplan des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen ist seit August 2014 für die neu in die Sekundarstufe II eintretenden Schülerinnen und Schüler in Kraft getreten. Eine der Neuerungen betrifft die Einführung des Standardmodells der Teilchenphysik (Schulministerium NRW 2014). Verglichen mit dem sächsischen Lehrplan, der sehr detaillierte Inhalte und eine Richtstundenzahl für jedes Themengebiet vorgibt (SMK 2011), baut sich der nordrhein-westfälische auf kompetenzorientierten Unterrichtsvorgaben auf. Die Inhaltsfelder werden in die in den Bildungsstandards für die Klasse 10 vorgeschlagenen Basiskonzepte *Wechselwirkung*, *Energie* und *Struktur der Materie* weiter aufgeteilt, somit wird jedes Themenfeld in eine übergreifende und wiederkehrende Struktur geordnet. Vor allem mit dem Basiskonzept *Wechselwirkung* werden auf diese Weise alle Inhaltsbereiche umfassend Verknüpfungen gebildet, welche die Zurückführung der beobachtbaren Phänomene auf die vier fundamentalen Wechselwirkungen ermöglichen.

##### 4.4.1. LEHRPLAN OHNE DIREKTEN THEMENBEZUG

Auch ohne, dass das Thema Standardmodell der Teilchenphysik im Lehrplan verankert ist, können Anknüpfungspunkte gefunden werden, um Grundkonzepte oder Begriffe zu erläutern. Exemplarisch werden im sächsischen Lehrplan inhaltlich passende Verbindungen zu dem im Rahmen dieser Masterarbeit bearbeiteten Themen dargestellt, die in der Sekundarstufe II bearbeitet werden. Thematisch sind dafür die Lernbereiche Elektrizitätslehre und Optik, Atom- und Kernphysik geeignet (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 94).

Bei der Einführung der Ladungen im Themengebiet *Elektrisches Feld* (SMK 2011, S. 63, 86) ist ein Verweis auf die schwache und starke Ladung als Unterschied zur elektrischen Ladung möglich. Die Einführung der Elementarladung (SMK 2011, S. 64, 86) ermöglicht die Nennung der Eigenschaften Additivität bei zusammengesetzten Teilchen sowie die Erhaltung bei deren Umwandlung, die für alle im Standardmodell beschriebenen Ladungen gelten. Im Lernbereich Kernphysik werden die Kern- sowie die Coulombkraft als beschreibende Modelle erläutert (SMK 2011, S. 70, 98). An diesem Punkt kann die

Bezeichnung Wechselwirkung für die gegenseitige Kraftwirkung zweier Körper, ganz nach der Beschreibung im Newton'schen Axiom, eingeführt werden. Die Strukturierung der Kraftwirkungen in Gravitationswechselwirkung, elektromagnetische und starke Wechselwirkung ist als Schlussfolgerung möglich, die schwache als vierte der fundamentalen Wechselwirkungen vorzustellen komplettiert die Ordnung. Beim Thema Radioaktivität und Strahlungen (SMK 2011, S. 71, 98) kann in der Reaktionsgleichung neben der Erhaltung der Kernladungszahl auch die Erhaltung der Ladungen thematisiert werden. Vor allem die Erläuterung der  $\beta$ -Strahlung, die nur im Leistungskurs behandelt wird, eignet sich, um das Neutrino mit der schwachen Ladung zu beschreiben, da dessen Notwendigkeit durch die alleinige Betrachtung der elektrischen Ladungserhaltung nicht ersichtlich wird.

#### 4.4.2. LEHRPLAN MIT DEM THEMA STANDARDMODELL

Das Inhaltsfeld *Strahlung und Materie* des Grundkurses des nordrhein-westfälischen Lehrplanes beinhaltet unter anderem das Themengebiet Standardmodell der Elementarteilchen. Im Leistungskurs wird das Themengebiet *Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen* zum Inhaltsfeld Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik geordnet (Abbildung 4.2). Neben dem Kontext *Forschung mit Teilchenbeschleunigern* und dem Thema *Konzept der Austauscheteilchen vs. Feldkonzept*, die nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit bearbeitet wurden, können Verknüpfungen hergestellt werden. Dazu eignen sich die erstellten Aufgaben, mit denen im Folgenden ein Szenario vorgestellt wird.

Zur Einführung der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen/des Standardmodells der Elementarteilchen sollten die Elementarteilchen in geeigneter Art und Weise präsentiert werden (eine Möglichkeit wäre die Nutzung der ÜBERSICHT ÜBER DIE ELEMENTARTEILCHEN DES STANDARDMODELLS), damit durch die AUFGABE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS und AUFGABE ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS die schematische Anordnung der Anti-/Materieteilchen dargestellt werden kann. Die AUFGABE LADUNGEN, in welcher die Ladungen zusammengesetzter Teilchen bearbeitet werden, unterstützt die Bearbeitung des Themengebietes *Kernbausteine und Elementarteilchen*. Im Lehrplan wird nur das Photon als Botenteilchen für die elektromagnetische Wechselwirkung betrachtet, die weiteren Botenteilchen können durch die Aufgabe AUFGABE ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS und unterstützend durch die Aufgabe AUFGABE BOTENTEILCHEN eingeführt werden.

**Grundkurs: Inhaltsfeld 4 Strahlung und Materie**

<b>Inhaltliche Schwerpunkte</b>	<b>Mögliche Kontexte</b>
Spektrum der elektromagnetischen Strahlung Energiequantelung in der Atomhülle Ionisierende Strahlung Kernumwandlung Standardmodell der Elementarteilchen	Erforschung des Mikro- und Makrokosmos Mensch und Strahlung Forschung mit Teilchenbeschleunigern
<b>Basiskonzept Wechselwirkung</b>	Quantenhafte Emission und Absorption von Photonen Detektoren Biologische Wirkung ionisierender Strahlung <b>(Virtuelles) Photon als Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung</b> Konzept der Austauschteilchen vs. Feldkonzept
<b>Basiskonzept Energie</b>	Linienpektren, Energieniveaus der Atomhülle, Quantelung der Energie Dosimetrie Energieaufnahme im menschlichen Gewebe
<b>Basiskonzept Struktur der Materie</b>	Kern-Hülle-Modell Strahlungsarten Elementarumwandlung Röntgenstrahlung Kernbausteine und Elementarteilchen

**Leistungskurs: Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik**

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

Abbildung 4.2.: Die Inhaltsfelder im Lehrplan, oben für Grundkurs, unten für den Leistungskurs (Schulministerium NRW 2014, S. 34, 47). Die Anknüpfungspunkte zur vorliegenden Arbeit sind schwarz hervorgehoben.



## 5. DIDAKTISCHE ANALYSE DER AUFGABEN

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurden zu sieben verschiedenen Themen der „Schulmaterialien zur Teilchenphysik“ (Netzwerk Teilchenwelt 2015) Aufgaben erstellt: Wechselwirkungen in der Umwelt, Grundpfeiler des Standardmodells, Ladungen zusammengesetzter Teilchen, Beschreibung der Wechselwirkungen durch potenzielle Energien, Ordnungsschema in Multipletts, Botenteilchen, Feynman-Diagramme. Der Großteil der erstellten Aufgaben besteht aus mehreren Aufgabenteilen, sodass ganze Arbeitsblätter entstanden sind. ALLGEMEINE ANMERKUNGEN ZUR UMSETZUNG und Entstehung der Materialien werden im Kapitel 5.1 dargestellt. Ein Überblick über die Analyseanforderung wird vorher in den Unterkapiteln 5.1.1. VORKENNTNISSE, 5.1.2. LERNZIELE, 5.1.3. METHODIK und 5.1.4. DIFFERENZIERUNG gegeben. Die Charakterisierung der Aufgaben nach den benötigten Vorkenntnissen, dem Schwierigkeitsniveau und weiteren Kriterien wird für jede Aufgabe extra beschrieben, diese Unterteilung findet sich unter jeder Aufgabe wieder. Da die oben genannten Themen der Aufgaben nicht starr abgegrenzt sind, sondern Verknüpfungen zu weiteren Gebieten existieren, werden die ab Kapitel 5.2.1 folgenden Aufgaben zunächst beschrieben und nachfolgend analysiert. Gemeinsam mit dem Untertitel als Ergänzung zum Titel wird eine Kurzbeschreibung des Aufgabeninhaltes gegeben.

### 5.1. ALLGEMEINE ANMERKUNGEN ZUR UMSETZUNG

Das Ziel dieser Masterarbeit war es, zu den entstehenden „Schulmaterialien zur Teilchenphysik, Teil Ladungen, Wechselwirkungen und Feynman-Diagramme“ Aufgaben zu entwickeln. Die in dem Spiralcurriculum vorgeschlagenen Inhalte und Lernziele bilden die Grundlage der Aufgaben. Da eine große Vielfalt der Hauptthemen (Wechselwirkungen, Ladungen, etc.) aus den Materialien als Aufgabe dargestellt werden soll, ist der fachliche Inhalt damit zu diesen Punkten vorgegeben.

Die Auswahl der Lernzieldimension ist ebenfalls eingeschränkt. Das Standardmodell der Teilchenphysik über psycho-motorische Lernziele erschließen zu wollen ist schwer möglich, da dies auf theoretischen Grundlagen basiert. Psycho-motorische Aspekte wie die Auswertung von Messergebnissen am Computer oder der Bau eines Gerätes zur Messung bestimmter Eigenschaften von Elementarteilchen sind im Rahmen der Teilchenphysik zwar möglich, aber nicht Teil dieser Masterarbeit. Bei der Entwicklung affektiver Lernziele ist

die Auswahl eingeschränkt, da keine konkrete Lerngruppe angesprochen wird. Dadurch wird eine Lerngruppenanalyse unmöglich, was eine wichtige Voraussetzung für die Planung affektiver Lernziele ist. Dennoch ist durch die Vielfalt an wissenschaftlichen Disziplinen und Nationalitäten bei der Erforschung des Standardmodells der Teilchenphysik diese Lernzieldimension wichtig. Das Hauptaugenmerk liegt also auf den kognitiven Lernzielen. Durch die Abstraktheit des Fachgebietes Teilchenphysik ist es schwierig entdeckend zu lernen. Die Lehrperson muss viele Grundlagen einfach präsentieren, erst dann können mit diesem Wissen konkrete Probleme bearbeitet und erläutert werden.

### 5.1.1. VORKENNTNISSE

Die für diese Masterarbeit erstellten Aufgaben sind für die Sekundarstufe II konzipiert, die Bildungsstandards bis zum Ende der zehnten Klasse sollten entsprechend Voraussetzungen sein. Dabei ist jedoch nicht zwingend viel Vorwissen in dem Gebiet der Teilchenphysik notwendig, die Aufgaben WECHSELWIRKUNGEN und DIE GRUNDPFEILER DES STANDARD-MODELLS könnten auch ohne jegliche Vorkenntnisse zu dem Thema bearbeitet werden. Eine für alle Aufgaben notwendige Voraussetzung ist vielmehr die Bereitschaft sich auf ein Themengebiet einzulassen, welches sehr abstrakt ist und sich nicht mit Konzepten der klassischen Physik erklären lässt. Von den Schülerinnen und Schülern muss ein gewisses Verständnis dafür aufgebracht werden, dass mithilfe qualitativer Erklärungen und Modelle die zu komplexen mathematischen Konzepte zur Beschreibung der Elementarteilchen und deren Zusammenwirken ausgedrückt werden. Das speziell für die einzelnen Aufgaben benötigte Vorwissen wird bei den folgenden Analysen der Aufgaben ausführlicher beschrieben. Im ANHANG wird das Vorwissen zur besseren Übersicht in Stichpunkten auf einem zu jeder Aufgabe gehörenden Deckblatt zusammengefasst.

### 5.1.2. LERNZIELE

Die Lernziele finden sich ebenfalls auf diesen Deckblättern wieder, gemeinsam mit einer Einordnung des Niveaus der Aufgabe von Level 1 bis 3. Bei der Begründung der Lernziele für die Aufgaben wird erläutert, wie das Lernziel erreicht werden soll und wie die Aufgabe dahin führt. Das Niveau orientiert sich an der Einordnung des Netzwerk Teilchenwelt (2015, S. 93), wobei Level 1 dem grundlegenden *Kennen* eines Sachverhaltes bzw. einer Methode entspricht, sowie daraus resultierende Zuordnungen. Das 2. Level *Analysieren und Rechnen* verlangt neben Berechnungen die Untersuchung eines Inhaltes nach gewissen Aspekten sowie die Herausarbeitung eines Ergebnisses. Die Reflexion des Ergebnisses und die verständliche Erklärung mithilfe zusätzlicher Informationen wird in Level 3 *Diskutieren, Erläutern* gefordert.

### 5.1.3. METHODODIK

Mit der Charakterisierung des Lösungsweges und des Aufgabenformates wird in diesem Abschnitt ausgeführt, weshalb die entsprechende Aufgabe für das geplante Ziel geeignet ist. Die Konstruktion der Aufgabe und sowie eventuelle spezielle Formulierungen werden erläutert. Außerdem wird der Aufgabentyp beschrieben.

### 5.1.4. DIFFERENZIERUNG

Bei nur einer Aufgabe ist vorgegeben, welche Sozialform bei der Bearbeitung gefordert ist. Die meisten Aufgaben sind mit dem Gedanken der Einzelbearbeitung entstanden, allerdings sind weitere Sozialformen in jedem Fall möglich und ein geeignetes Mittel zur Differenzierung der Aufgabe. In den jeweiligen Unterkapiteln werden Differenzierungsmöglichkeiten angesprochen, wie das Potenzial der Öffnung oder Schließung der Aufgabe. Konkrete Vorschläge zur Änderung gewisser Aspekte der Aufgabe sind in den Kapiteln Methodische Hinweise zu ausgewählten Aufgaben im ANHANG gegeben.

In mehreren Aufgaben wird die Kenntnis der Materie- und Anti-Materieteilchen der ersten Generation sowie ihre spezifischen Ladungszahlen vorausgesetzt. Durch die Nutzung einer Übersicht der Elementarteilchen können die Aufgaben in diesem Punkt differenziert werden. Ein entsprechender Überblick über die durch das Standardmodell beschriebenen Elementarteilchen ist im Anhang bei A.8. ÜBERSICHT ÜBER DIE ELEMENTARTEILCHEN DES STANDARDMODELLS zu finden. Dort werden der Name des Teilchens, das dazugehörige Symbol, die Ladungszahlen bzw. -vektoren, die Masse und die Lebensdauer sowie das Entdeckungsjahr übersichtlich dargestellt.

## 5.2. ANMERKUNGEN ZUR UMSETZUNG DER ERSTELLTEN AUFGABEN

Die im vorangegangenen Abschnitt ALLGEMEINE ANMERKUNGEN ZUR UMSETZUNG erläuterten Analysepunkte werden für jede im Rahmen der Masterarbeit erstellte Aufgabe erläutert.

### 5.2.1. KENNEN DER WECHSELWIRKUNGEN

#### Memory/Mindmap

Die fundamentalen Wechselwirkungen sind im Alltag erfahrbar, in Experimenten beobachtbar oder in mikroskopischen Prozessen beschreibbar. Daraus resultierende Aussagen

können den vier Wechselwirkungen entweder als Memoryspiel oder als Mindmap zugeordnet werden.

**VORKENNTNISSE** Den Schülerinnen und Schülern muss bekannt sein, dass sich die Phänomene, denen wir in unserem Alltag begegnen, auf die vier fundamentalen Wechselwirkungen zurückführen lassen. Da vor allem die starke sowie die schwache Wechselwirkung schwer zu greifen sind, helfen Beispiele aus dem Bereich Kernphysik. Beim  $\beta$ -Zerfall wird das Neutrino bereits eingeführt, ein Teilchen welches nur der schwachen Wechselwirkung unterliegt. Die starke *Kernkraft* wirkt zwischen den Nukleonen.

**LERNZIELE** Das Ziel dieser Aufgabe ist das Zuordnen der Phänomene zu der entsprechenden Wechselwirkung. Bei einigen Aussagen ist die Zuordnung schnell klar, da aus dem Physikunterricht bekannte Phänomene beschrieben werden. Vorgänge, die aus dem Fachbereich Chemie und Biologie stammen, sind den Wechselwirkungen schwieriger zuzuordnen. Die anderen Gruppenmitglieder können bei der Zuordnung beraten. Das Niveau der Aufgabe liegt bei Level 1, auch wenn die Schwierigkeit einiger Aussagen sehr hoch ist. Durch das geringe Vorwissen sind zwar keine Diskussionen, jedoch gemeinsames Beraten der richtigen Lösung möglich.

**METHODIK** Die zuordenbaren Aussagen sind sehr speziell formuliert, statt „Datenübertragung ist mit dem Handy und Laptop möglich.“ wird die Aussage „Das Surfen im Internet ist mit dem Handy möglich.“ vorgezogen. Dadurch werden alltägliche, nachvollziehbare Situationen beschrieben, die in den Schülerinnen und Schülern das Bedürfnis der Lösung anregen. Das Ordnen der Aussagen zu einer Mindmap wird durch die Kommunikation mit der Sitznachbarin/dem Sitznachbarn aufgelockert. Als Memoryspiel muss nach dem Aufdecken entschieden werden, ob die Karten zusammen passen oder nicht. Die Rückseiten der Aussagekarten und der Wechselwirkungskarten wurden unterschiedlich gestaltet, da das Entscheiden der Zusammengehörigkeit von Aussage und Wechselwirkung im Vordergrund steht und nicht der Spielcharakter. Somit können auch übrig gebliebene Kartenpärchen, die bisher nicht zugeordnet werden konnten, umgedreht werden um im Ausschlussverfahren zusammengeführt zu werden.

**DIFFERENZIERUNG** Die Aufgabe kann in den beiden Varianten Memory und Mindmap gleichermaßen differenziert werden. Eine Aufgabe auf Level 2 kann durch zusätzliche Rechercheoptionen geboten werden, welche die bessere Bewertung der Aussagen ermöglichen. Wenn die Schülerinnen und Schüler, z. B. bei Abschluss des Themengebietes Kern- und Teilchenphysik, Kenntnisse über das Zusammenwirken der Elementarteilchen besitzen,

müssen die Aussagen zusätzlich erläutert werden. Die Mitschülerinnen und -schüler entscheiden, ob die Erläuterung des Phänomens richtig war und diskutieren über weitere Vorschläge. Die Schwierigkeit läge dann bei Level 3.

### 5.2.2. DIE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS

#### Zusammenhänge von Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen

Bei der Beschreibung des Standardmodells der Teilchenphysik bilden die Begriffe Ladungen, Elementarteilchen und Wechselwirkungen das Grundgerüst. Die Elementarteilchen besitzen Ladungen, womit sie entsprechenden Wechselwirkungen unterliegen. Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Ladungseigenschaften ordnen die Elementarteilchen, die je nachdem von den Wechselwirkungen beeinflusst werden. Bei Wechselwirkungen werden durch den Austausch der zugehörigen Botenteilchen die Ladungen erhalten. Diese Beziehungen können in jeder Richtung hergestellt werden, darauf basiert die Aufgabe.

**VORKENNTNISSE** Um diese Aufgabe bewältigen zu können, benötigen die Schülerinnen und Schüler Kenntnisse über die Bedeutung der verwendeten Begriffe. Die verknüpfenden Verben sollten bekannt sein, wenn auch nicht in diesem Kontext. Elementarteilchen sind die elementaren, unteilbaren Teilchen, aus denen unsere Materie zusammengesetzt ist. Ladungen sind eine Eigenschaft der Elementarteilchen, die sie besitzen. Mit der Wechselwirkung wird die Kraftwirkungen zwischen zwei Elementarteilchen beschrieben.

**LERNZIELE** Durch die eigenhändige Anordnung vorgegebener Bausteine sollen den Schülern die Zusammenhänge der Grundpfeiler klar werden. Die Begriffe auf den Bausteinen sind den Schülerinnen und Schülern aus anderen Themengebieten bekannt, auch wenn sie eventuell anders bezeichnet wurden (z. B. unteilbares Elektron statt Elementarteilchen Elektron). Durch die Zuordnung wird somit gleichermaßen überprüft, ob die bisherigen Verknüpfungen einzelner Begriffe richtig sind. Die wechselseitig zusammenstehenden Verben ergänzen dann von selbst die noch nicht geschaffenen Verknüpfungen zwischen den Grundpfeilern. Die Aufgabe entspricht Level 1, da mithilfe bereits vorhandenen Wissens vorgegebene Objekte nach der Vorgabe strukturiert werden sollen.

**METHODIK** Die Begriffe, zwischen denen eine Verknüpfung hergestellt werden soll, als auch die verbindenden Doppelpfeile werden ausgeschnitten und den Schülerinnen und Schülern als Einzelteile gegeben. Die Pfeile sind als Doppelverbindungen belassen worden, somit werden nicht bekannte Verknüpfungen (zumindest visuell) automatisch geschaffen.

**DIFFERENZIERUNG** Die Aufgabe kann allein bearbeitet werden oder mit mehreren Lernenden, wodurch ein Austausch über die Lösung der Aufgabe stattfinden würde. Wenn das Wissen über die Bedeutung der Begriffe ausgeweitet wird und das Standardmodell mit den Elementarteilchen, ihren Ladungen und den fundamentalen Wechselwirkungen eingeführt worden ist, kann diese Aufgabe mit Nennen von Beispielen als Abschluss dienen. Die Doppelpfeile können zur Erhöhung der Schwierigkeit geteilt werden. Dann gibt nur noch die Richtung der daraufgeschriebenen Wörter einen Hinweis auf nicht mögliche Kombinationen. Zur Vereinfachung kann an der Tafel eine Hilfestellung gegeben werden, indem ein Pfeil korrekt zwischen zwei Begriffen gelegt wird.

### 5.2.3. LADUNGEN

#### Eigenschaften der Ladungen und Ladungen zusammengesetzter Teilchen

Ein Grundbaustein des Standardmodells bildet die Ladung. Durch diese fundamentale Eigenschaft und der Masse werden alle Elementarteilchen eindeutig charakterisiert. Zur Untersuchung eines zusammengesetzten Teilchens müssen die Eigenschaften der drei durch das Standardmodell beschriebenen Ladungen bekannt sein. Es wird überprüft, warum die Masse nicht als Ladung der Gravitation zählen und aus welchen Elementarteilchen das  $\pi^+$  zusammengesetzt werden kann.

**VORKENNTNISSE** Die Eigenschaften Quantelung (für die elektrische und die schwache Ladung), Additivität und Erhaltung müssen den Schülerinnen und Schülern bekannt sein, um die Zusammensetzung des Pions untersuchen zu können. Außerdem sollten sie die Teilchen und Anti-Teilchen der ersten Generation mit ihren charakterisierenden Eigenschaften kennen. Eine Übersicht über diese Teilchen mit den Daten zu Ladungszahlen und Masse (siehe A.8. ÜBERSICHT ÜBER DIE ELEMENTARTEILCHEN DES STANDARDMODELLS) ist dafür ausreichend.

**LERNZIELE** Die Eigenschaften der Ladungen werden im ersten Aufgabenteil durch die Anwendung auf selbst gewählte Beispiele überprüft. Durch Übertragung der Eigenschaften auf die Gravitation erläutern sie, dass die Masse nicht die Ladung der Gravitation sein kann. Dafür berechnen sie an einem Beispiel die Ladungserhaltung mit der Ladung Masse. In der dritten Aufgabe wird die Additivität der elektrischen, starken und schwachen Ladung genutzt, um im Umkehrschluss die Elementarteilchen zu identifizieren, aus denen ein  $\pi^+$ -Teilchen zusammengesetzt ist. Der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe liegt in den ersten beiden Teilaufgaben bei Level 1, da das bekannte Wissen an einem Beispiel angewendet wird. Die Steigerung zu Level 2 erfolgt in den folgenden Teilaufgaben durch den Transfer

der Ladungseigenschaften auf die Masse, sowie die Anwendung der Ladungserhaltung auf die zu identifizierenden Bausteine des Pions.

**METHODIK** In dieser Aufgabe werden in der Lösung verbale Formulierungen sowie Berechnungen verlangt. Die erste und zweite Teilaufgabe ist durch das Finden beliebiger Beispiele geöffnet. In der dritten Teilaufgabe führt die Aufgabenstellung zur Lösung hin, indem ein Beispiel vorgegeben wird. Das Ergebnis ist noch nicht sofort ersichtlich und der Erkenntnisgewinn durch das eigene Berechnen motiviert die Schülerinnen und Schüler.

**DIFFERENZIERUNG** Die Zusammensetzung weiterer bekannter und unbekannter Teilchen kann betrachtet werden, zum Beispiel die des  $\alpha$ -Teilchens.

#### 5.2.4. WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN

##### Vergleich der potenziellen Energien der vier fundamentalen Wechselwirkungen

Die Graphen der potenziellen Energien sind für die vier Wechselwirkungen dargestellt und für betreffende Teilchen mit den entsprechenden Größenordnungen eingezeichnet. Die mathematische Interpretation zeigt Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Verhalten aller Wechselwirkungen auf. Das aus den Graphen erkennbare Verhalten soll auf das Verhalten der Körper, im Falle der Gravitation, und Teilchen bezogen werden. Das Confinement der Quarks und die kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung können daraus abgeleitet werden.

**VORKENNTNISSE** Für die Auswertung ist die mathematische Interpretation von Graphen notwendig, besonders die Beschreibung hyperbolischer und linearer Verläufe. Das Wissen über das Verhalten der Teilchen durch die Wechselwirkung, wie die mit dem Faktor  $\frac{1}{r^2}$  abnehmende Kraftwirkung der Gravitation und des Elektromagnetismus, das Confinement der Quarks und die kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung sollte bekannt sein.

**LERNZIELE** Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Graphen werden durch die gleich dargestellten Proportionen deutlich. Somit kann durch den gleichen hyperbolischen Verlauf für kleine Abstände auf ein gemeinsames Verhalten geschlossen werden. Die Möglichkeit einer großen vereinheitlichenden Weltformel (vergleiche Abschnitt 2.2) wird damit auch ohne die exakte mathematische Beschreibung deutlich. Für große Abstände fällt das unterschiedliche Verhalten der starken und der schwachen Wechselwirkung auf. Das bekannte Verhalten der Teilchen durch die Wechselwirkungen kann mithilfe der Graphen nachvollzogen werden. Der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe entspricht dem Level 2 bis 3.

Die Analyse der potenziellen Energien in Abhängigkeit vom Abstand soll mit den typischen Eigenschaften der Wechselwirkung verknüpft werden.

**METHODIK** Die gleich große Darstellung der Graphen ermöglicht einen deutlichen Vergleich des Verlaufs. Da die Skalierung von den Massen und Ladungen der wechselwirkenden Teilchen abhängt, wird die Größenordnung zur besseren Einordnung mit im Diagramm eingetragen. Die Aufgabenstellung soll in verbaler Form beantwortet werden. Die Beschreibung des Graphen der Gravitation und dessen physikalische Interpretation dient zur Aktivierung bekannten Wissens. Dieser Zusammenhang kann durch den Vergleich der Graphen auf das Verhalten der weiteren Grundkräfte übertragen werden.

**DIFFERENZIERUNG** Diese Aufgabe ist für die individuelle Bearbeitung konzipiert worden, der Wechsel der Sozialform bietet eine Möglichkeit der Differenzierung. Der Aufbruch und die Bearbeitung an der (elektronischen) Tafel kann die Besonderheiten im Kurvenverlauf für die gesamte Klasse darstellen. Wenn das Wissen über das Verhalten der Teilchen noch nicht vorhanden ist, kann die Lehrkraft dieses Wissen präsentieren. Eine weitere Bearbeitungsmöglichkeit ist durch die zusätzliche Fragestellung, wie die Ordnung der Stärken der Kraft für sehr kleine und große Abstände ist, gegeben. Außerdem kann die Anpassung der Größenordnungen für andere Ladungs- beziehungsweise Massenverhältnisse erfragt werden.

### 5.2.5. ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS

#### Multipletts der schwachen und der starken Wechselwirkung

Das Standardmodell gibt die Ordnung der Teilchen vor, die sich aus den Ladungssymmetrien ableitet. Elementarteilchen werden durch Gemeinsamkeiten und Unterschiede ihrer Ladungen in Multipletts geordnet. In der Aufgabe wird nachvollzogen, wie Teilchen, die eine schwache Ladung besitzen, in Dupletts bezüglich der schwachen Wechselwirkung angeordnet werden können. Das Prinzip der Anordnung wird auf die Multipletts bezüglich der starken Ladung bezogen. Die wichtigen Begriffe zum Thema Multipletts werden in einem Begriffsnetz miteinander verknüpft dargestellt.

**VORKENNTNISSE** Zur Bearbeitung der Aufgabe müssen den Schülerinnen und Schülern die Materie- und Antimaterieteilchen des Standardmodells bekannt sein mit den Ladungen, die sie besitzen. Die Botenteilchen  $W^+$ ,  $W^-$  und die Gluonen und ihre Ladungen sollten ebenfalls bekannt sein, vor allem die möglichen Ladungswechsel der Gluonen. Damit die Ladungen bei Teilchenumwandlungen berechnet werden können, ist das Prinzip der Erhaltung aller Ladungen als Vorwissen notwendig.

**LERNZIELE** Zwei Dupletts werden in der Aufgabe vorgegeben, der Zusammenhang wird durch eine Schritt-für-Schritt-Anweisung selbst ermittelt. Diese Schrittweise Anleitung kann auf das Prinzip der Anordnung in Multipletts bezüglich der starken Ladung übertragen werden. Zur Verknüpfung der Ordnungen nach den Ladungen wird mit vorgegebenen Begriffen ein Begriffsnetz erstellt. Dadurch wird das Verständnis für diese Struktur überprüft und gefestigt. Durch die Übertragung des Prinzips der Anordnung in Multipletts und die Strukturierung der wichtigen Begriffe durch Pfeile und zusätzlichen Beschriftungen besitzt die Aufgabe das Level 3.

**METHODIK** In der ersten Teilaufgabe wurde ein Leptonen- und ein Quark-Paar zur Beschreibung des Prinzips der Dupletts vorgegeben, da die Ladungen beider Teilchenpaare unterschiedlich sind. Quarks besitzen eine drittelzahlige elektrische Ladung und einen Farbladungsvektor, trotzdem ist die Differenz der Ladungen bei beiden Paaren (da der Farbladungsvektor der gleiche ist) dieselbe. Zur Strukturierung der Aufgabe wird die vertikale Anordnung der Teilchen in Dupletts ebenso vorgegeben wie die horizontale Anordnung der Teilchen in Multipletts. Im zweiten Aufgabenteil wird das Prinzip der Dupletts verbal beschrieben, dadurch wird zusätzlich der Kompetenzbereich Kommunikation angesprochen. Damit die Lösung, die Anordnung der Dupletts bezüglich der schwachen Wechselwirkung, nicht vorweg genommen wird, sollen die Schülerinnen und Schüler diese eigene Erkenntnis in Lücken im Text eintragen. Der letzte Aufgabenteil, in dem das Begriffsnetz erstellt werden soll, gibt keine Anordnung vor. Die Verbindungen sollen selbstständig geschaffen werden, das Ergänzen eigener Begriffe und Beschriftungen ist möglich und auch erwünscht. Vor allem dieser Aufgabenteil ist für die Bearbeitung zu zweit geeignet.

**DIFFERENZIERUNG** Damit nicht alle Ladungen aller Elementarteilchen gelernt werden müssen, hilft die unterstützende **ÜBERSICHT ÜBER DIE ELEMENTARTEILCHEN DES STANDARDMODELLS** im Kapitel A.8. Ergänzend zu der Aufgabe kann die typische Anordnung der Elementarteilchen nach den Ladungen in der Übersicht nachvollzogen werden.

### 5.2.6. BOTENTEILCHEN

#### Berechnen und Erläutern möglicher Teilchenumwandlungen

In dieser Aufgabe soll die Umwandlung eines selbst gewählten Anti-/Materieteilchen (aus einer vorgegebenen Auswahl) durch die Wechselwirkung mit einem Botenteilchen berechnet werden. Mit Kenntnissen über die Ladungen des Ausgangsteilchens und des Botenteilchens werden die Ladungen des umgewandelten Teilchens berechnet. Dass alle Ladungen bei den Umwandlungen erhalten sein müssen ist die Grundlage der Berechnung.

Zu weiteren vorgegebenen Beispielteilchen sollen die Umwandlungen zusätzlich erläutert werden. Dabei kann es vorkommen, dass das Botenteilchen zwar zu einer Wechselwirkung gehört, welcher das Anti-/Materieteilchen unterliegt, aber die Umwandlung durch das nicht mögliche Ergebnis nicht stattfindet. Die in der Aufgabe vorgegebenen Umwandlungen sollen nicht nur danach bewertet werden, ob sie möglich sind oder nicht, sondern auch unter Berücksichtigung der Energieerhaltung erläutert werden.

**VORKENNTNISSE** Diese Aufgabe verlangt Vorwissen aus den verschiedenen Bereichen Eigenschaften der Elementarteilchen und Wechselwirkungen mit Botenteilchen, welches in der Aufgabe verknüpft wird. Die Schülerinnen und Schüler kennen einerseits die Anti-/Materieteilchen der ersten Generation und ihre Ladungen und Massen, wobei weiterhin die Verknüpfung der Ladung mit dem Unterliegen einer Wechselwirkung bekannt ist. Andererseits sind die zu den Wechselwirkungen zugehörigen Botenteilchen und deren Ladungen bekannt. Die unbekannt Größe ist das durch die Umwandlung entstehende Teilchen, dessen Ladungen mittels dem Prinzip der Ladungserhaltung berechnet werden, wodurch es identifiziert wird. Das Erläutern ausgewählter Beispiele setzt voraus, dass die Schülerinnen und Schüler die Energie vorher und die Summe der Energien nachher abschätzen können. Bei der Betrachtung des Ausgangsteilchens in Ruhe kann über die Masse die Ruheenergie abgeschätzt werden. Wird die Umwandlung eines Quarks betrachtet, kommt zusätzlich der Fakt hinzu, dass diese nur in gebundenen Zuständen vorkommen können.

**BEGRÜNDUNG DER LERNZIELE** Mit dieser Aufgabe werden zwei große Lernziele verfolgt: Die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass die möglichen Teilchenumwandlungen durch die Erhaltung aller Ladungen eingeschränkt werden. Und sie bewerten die nach Ladungserhaltung möglichen Umwandlungen zusätzlich nach der Energieerhaltung. Als Grundlage und zur Aktivierung des Vorwissens dienen die ersten beiden Aufgaben, in denen die Schülerinnen und Schüler ihr Wissen zu den Eigenschaften der Elementarteilchen angeben sollen. Um den Prozess der Teilchenumwandlung zu verstehen, spielt das Prinzip der Ladungserhaltung eine wichtige Rolle. Deswegen wird die kleinschrittige Vorgehensweise der beiden vorangegangenen Aufgaben bei der dritten weitergeführt. Zur Erstellung eines detaillierten Schemas der Umwandlung werden die vorher notierten Größen, die Ladungen eines Anti-/Materieteilchen und eines Botenteilchens, welches ausgetauscht werden kann, verwendet. Die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass die kombinierte Erhaltung aller Ladungen die Ladungen des umgewandelten Teilchens, und damit das Teilchen selbst, bestimmt. Die vierte Aufgabe setzt die Vorgehensweise aus drittens voraus, um vorgegebene Beispiele zu berechnen. Die Schwierigkeit ist dadurch auf Level 2 festgelegt.

**METHODIK** Als erstes werden die Ladungen des Anti-/Materieteilchens erfragt, die als grundlegendes Ordnungsprinzip des Standardmodells dient. Folgend unterliegt das Anti-/Materieteilchen entsprechenden Wechselwirkungen und kann mit den dazugehörigen Botenteilchen in Wechselwirkung treten. Durch diese Wechselwirkung werden physikalische Größen übertragen, die bei den zu betrachtenden Teilchenumwandlungen eine Rolle spielen. Durch die anfangs frei wählbaren Materie- und Anti-Materieteilchen und eines der möglichen passenden Botenteilchen kann die Aufgabe unterschiedlich gelöst werden. Das Prinzip der Ladungserhaltung steht im Vordergrund, nicht die strukturierte Betrachtung der Umwandlung eines Teilchens. Im vierten Aufgabenteil wird die Aufgabe durch die konkrete Vorgabe des Anfangsteilchens und des Botenteilchens wieder geschlossen.

**DIFFERENZIERUNG** Da die Teilaufgaben 1 bis 3 zur Vorbereitung der vierten Teilaufgabe dienen, können diese zur Erhöhung der Schwierigkeit weggelassen werden. Die Schülerinnen und Schüler müssen sich die zur Lösung notwendigen Schritte selbst erschließen, da die Aufgabe dies nicht mehr im Vorfeld strukturiert. Werden am Anfang der Aufgabe alle Elementarteilchen zur Wahl gestellt, werden die möglichen Lösungswege gar nicht mehr eingeschränkt. Eine Schließung und Vereinfachung der Aufgabe ist durch die Vorgabe eines konkreten Materieteilchens und eines Botenteilchens möglich, es gibt dann nur einen Lösungsweg. Soll nur die Berechnung der Ladungserhaltung wiederholt und geübt werden, können die Erklärungen bei den Teilchenumwandlungen in der vierten Teilaufgabe weggelassen werden. Eine Erweiterung der Aufgabe ist durch das Zeichnen der Feynman-Vertices der Umwandlungen möglich.

### 5.2.7. GRUNDBAUSTEINE DER FEYNMAN-DIAGRAMME

#### Darstellung der Vertices für Wechselwirkungen von Anti-/ Materieteilchen

Durch Feynman-Diagramme können Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen graphisch dargestellt werden. Die Darstellung einer Wechselwirkung besteht in einem Feynman-Diagramm aus verschiedenen Grundbausteinen, den Vertices. In vier Vertices können alle grundlegenden Vorgänge zwischen Anti-/Teilchen und Botenteilchen beschrieben werden: Der Einfang sowie die Aussendung eines Botenteilchens, die Paarvernichtung und die Paarerzeugung. Der Abschluss in dieser Aufgabe bildet die Darstellung kompletter Wechselwirkungen.

**VORKENNTNISSE** Zum Darstellen der Wechselwirkungen zwischen Anti-/Materieteilchen durch den Austausch von Botenteilchen müssen diese Teilchen bekannt sein. Da in der Aufgabe die Darstellung schrittweise angeleitet wird, ist kein weiteres Vorwissen

notwendig. Das Kennen der spezifischen Ladungen und die Anwendung des Prinzips der Ladungserhaltung hilft jedoch, die beschriebenen Prozesse nachzuvollziehen.

**LERNZIELE** Die vier grundlegenden Vertices werden nicht graphisch vorgegeben, sondern durch explizite Beschreibungen, nach denen die Schülerinnen und Schüler diese selbst zeichnen sollen. Die Namen der Prozesse, die allgemein für alle Zusammentreffen eines Botenteilchens und zweier Materie- oder Anti-Materieteilchen gelten, werden den exemplarischen Beschreibungen zugeordnet. Nach der Beschreibung einer konkreten Wechselwirkung zeichnen die Schülerinnen und Schüler diese zusammenhängend, indem sie Vertices zusammensetzen. Da die Erschließung von Texten zur Entwicklung einer Lösung notwendig ist, wird dieser Aufgabe der Schwierigkeitsgrad Level 3 zugeordnet.

**METHODIK** Die Aufgabe beginnt mit einem Text zur Einleitung und Beschreibung der Grundlagen der Feynman-Diagramme. In diesem vorausgehenden Informationstext werden alle notwendigen Symbole und Regeln eingeführt. Die weitere Bearbeitung besteht darin, beschriebene Prozesse zu zeichnen und einen übergreifenden Namen zuzuordnen. Da kein Beispiel für einen Vertex vorgegeben ist, müssen die anleitenden Beschreibungen genau befolgt werden. In einem weiteren Informationstext wird erläutert, dass die exemplarisch beschriebenen Vertices allgemein für jedes Zusammentreffen von Teilchen und Botenteilchen gelten. Daraus können komplette Wechselwirkungen zwischen Anti-/Materieteilchen und Umwandlungen unter Austausch eines Botenteilchens dargestellt werden. In der letzten Teilaufgabe sollen nach Beschreibungen zwei Feynman-Diagramme selbst gezeichnet werden. Durch die Reaktionsgleichung der Prozesse wird die verbale Beschreibung unterstützt. Die Aufgabe fördert die Kompetenzen Erkenntnisgewinnung und Problemlösung.

**DIFFERENZIERUNG** Die Aufgabe kann differenziert werden, indem in der ersten Teilaufgabe die vier Vertices vorgegeben werden und die Schülerinnen und Schüler eigene Erklärungen finden. Weiterhin können bei Feynman-Diagrammen aus zusammengesetzten Vertices an jedem Vertex und für den gesamten Prozess die Erhaltungen der elektromagnetischen, der starken und der schwachen Ladung berechnet werden.

## A. ANHANG

Die im Rahmen der Masterarbeit erstellten Aufgaben werden alle nach demselben Schema dargestellt: Deckblatt, Aufgabe, Aufgabe mit Lösung. Auf dem Deckblatt sind der Titel sowie der Untertitel als Kurzbeschreibung der Aufgabe dargestellt. Der in drei Levels eingeschätzte Schwierigkeitsgrad für die Aufgabe wird durch die Zahlen 1 bis 3 abgebildet. In Stichpunkten sind die von der Aufgabe verfolgten Lernziele sowie das dafür notwendige Vorwissen aufgezählt.

Die sich anschließende Aufgabe entspricht der Schülerversion des Arbeitsblattes, die Antworten können direkt eingetragen werden (außer es ist lediglich erforderlich Bausteine auszuschneiden und anzuordnen). In der Lehrerversion wird die Aufgabe mit Musterlösung abgebildet, diese ist in rot gedruckt, nur die Farbladungsvektoren der Gluonen behalten ihre Farbe. Wenn aus den Differenzierungsmöglichkeiten im Kapitel DIDAKTISCHE ANALYSE DER AUFGABEN konkrete zusätzliche Teilaufgaben abgeleitet werden konnten, werden diese in den methodischen Hinweisen am Ende der jeweiligen Aufgabe aufgeführt.

Die Arbeitsblätter sind in folgender Reihenfolge angehängt: AUFGABE KENNEN DER WECHSELWIRKUNGEN, AUFGABE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS, AUFGABE LADUNGEN, AUFGABE WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEEN, AUFGABE ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS, AUFGABE BOTENTEILCHEN und AUFGABE FEYNMAN-DIAGRAMME. Die Aufgaben sind thematische angeordnet und folgend damit der Struktur des Kapitels 2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN.

Zur Unterstützung der Aufgaben ist die ÜBERSICHT ÜBER DIE ELEMENTARTEILCHEN DES STANDARDMODELLS geeignet. Dadurch können Aufgaben bearbeitet werden, die als Voraussetzung Kenntnisse über die Ladungszahlen der Elementarteilchen benötigen, ohne dass diese vorher gelernt werden müssen.

Im GLOSSAR DER PHYSIKALISCHEN BEGRIFFE werden ausgewählte Fachtermini kurz und bündig erläutert.

# WECHSELWIRKUNGEN

## KENNEN DER WECHSELWIRKUNGEN – MEMORY / MINDMAP

### LEVEL 1

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

1. ordnen Phänomene aus der Umwelt den vier Wechselwirkungen zu.

**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die Existenz der vier Grundkräfte.
- Kenntnisse über Phänomene der Kernphysik (Ablauf des radioaktiven  $\beta$ -Zerfalls und der Kernfusion).

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 Vorzeigeaufgabe an der Tafel entwickelt werden, die folgende Aufgabenbeschreibung ist für die Partnerarbeit gedacht.*

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 Aussagekarten und lege sie verdeckt auf einen Stapel.

Nun wird abwechselnd die oberste Karte des Stapels aufgedeckt und einer Wechselwirkung zugeordnet, bis die Karten alle sind. Beratet euch untereinander, falls ihr mit der Zuordnung Probleme 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 Memory wird versucht, eine Wechselwirkungskarte mit einer dazugehörigen Aussage aufzudecken.*

Bildet Vierergruppen und mischt alle Wechselwirkungskarten und alle Aussagekarten. 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.

**Gravitation**

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

**Elektromagnetische Wechselwirkung**

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

**Starke Wechselwirkung**

1. Der Atomkern von Blei-208 ist stabil.
2. Kernfusion findet in der Sonne statt.
3. Ein Neutron wird durch drei Quarks gebildet.
4. Zwei Down- und ein Up-Quark schließen sich zusammen.

**Schwache Wechselwirkung**

1.  $\beta$ -Strahlung wird von einem radioaktiven Atomkern ausgesendet.
2. Kernfusion findet in der Sonne statt.
3. Ein Myon wandelt sich in ein Elektron und ein Elektron-Neutrino um.
4. 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

Starke Wechselwirkung

Starke Wechselwirkung

Starke Wechselwirkung

Starke Wechselwirkung

Schwache  
Wechselwirkung

Schwache  
Wechselwirkung

Schwache  
Wechselwirkung

Schwache  
Wechselwirkung



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.

Der Atomkern von Blei-208 ist stabil.

Kernfusion findet in der Sonne statt.

Ein Neutron wird durch drei Quarks gebildet.

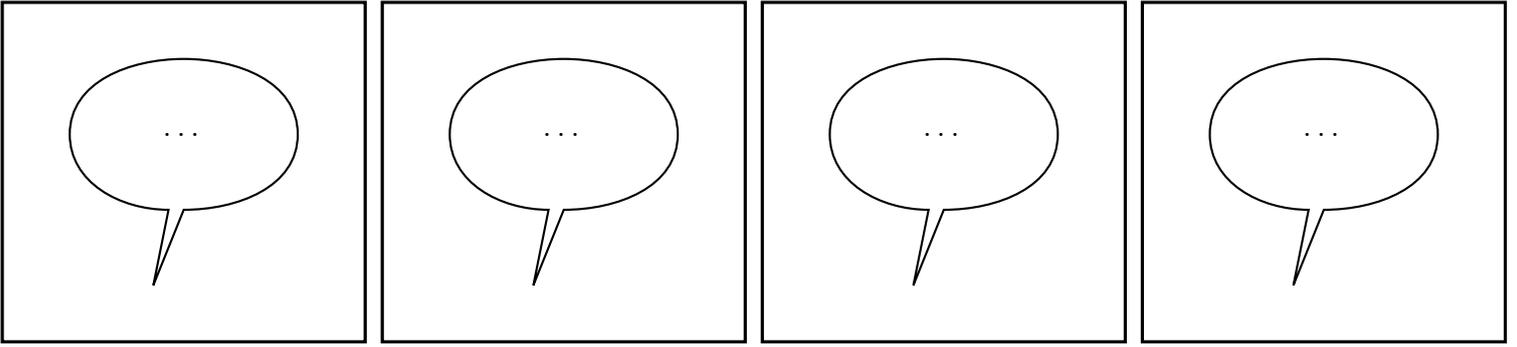
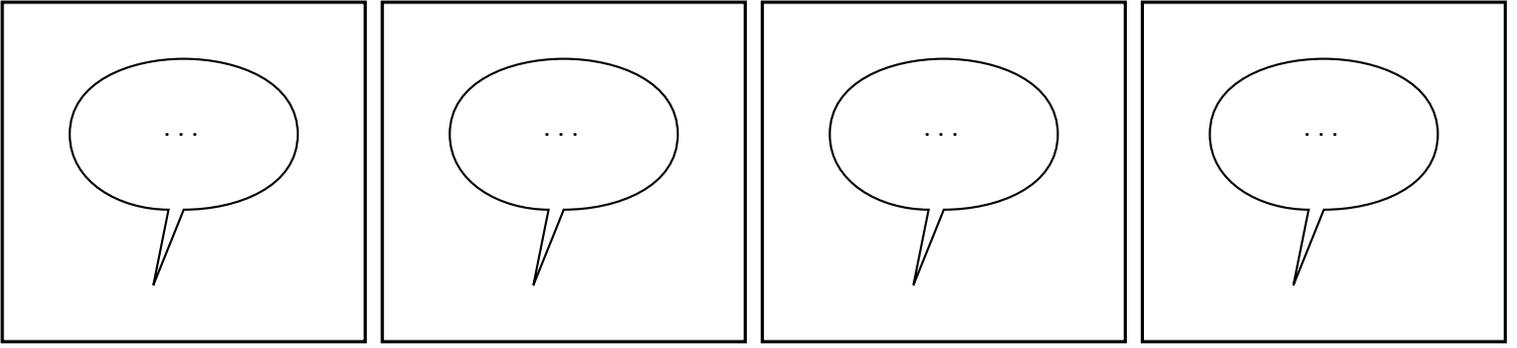
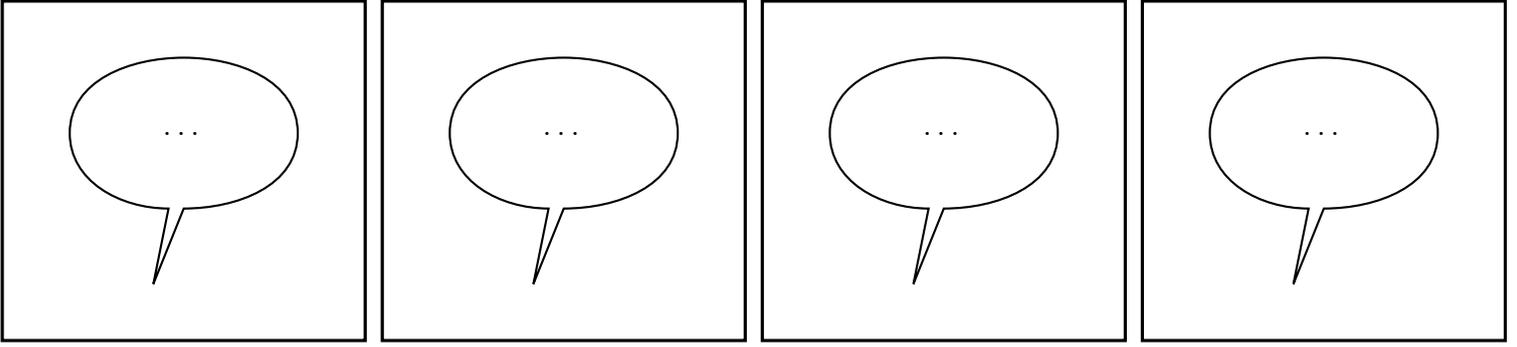
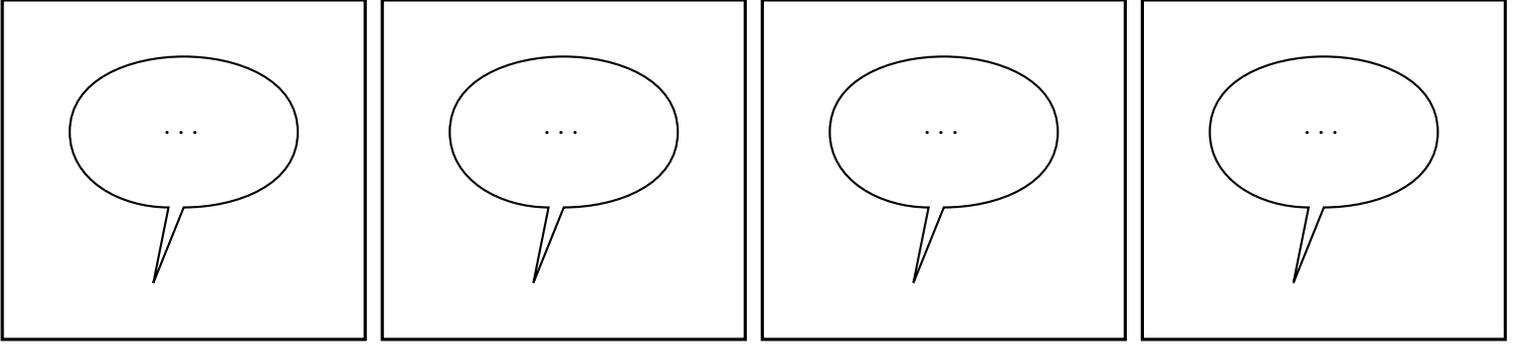
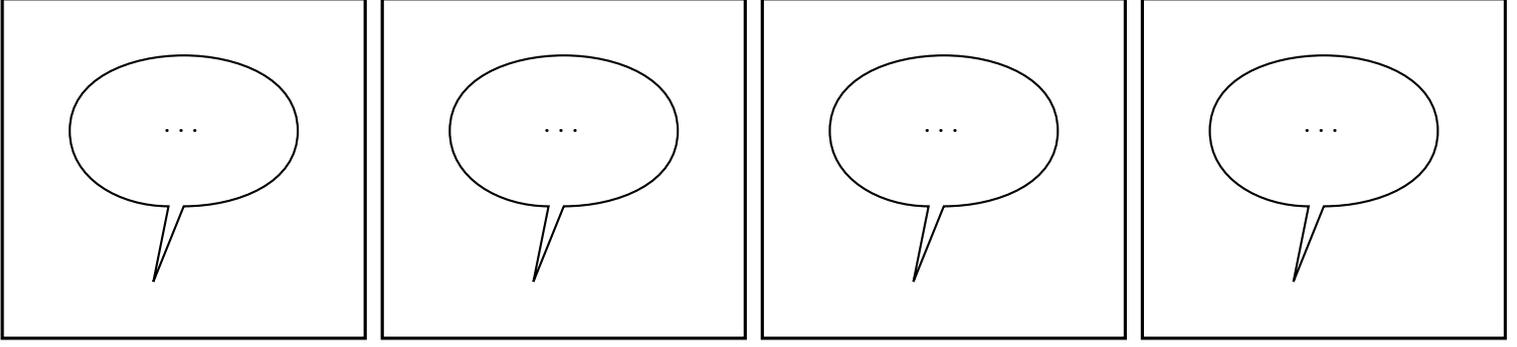
Zwei Down- und ein Up-Quark schließen sich zusammen.

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

Kernfusion findet in der Sonne statt.

Ein Myon wandelt sich in ein Elektron und ein Elektron-Neutrino 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

## ZUSAMMENHÄNGE VON LADUNGEN, WECHSELWIRKUNGEN UND ELEMENTARTEILCHEN

### LEVEL 1

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

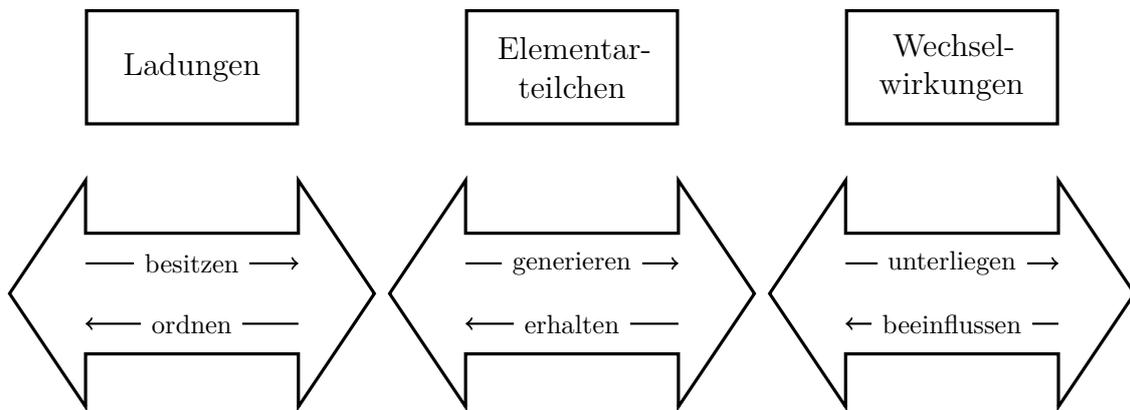
1. stellen die Zusammenhänge zwischen den ordnenden Grundpfeilern Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen des Standardmodells her.

**Vorkenntnisse:**

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

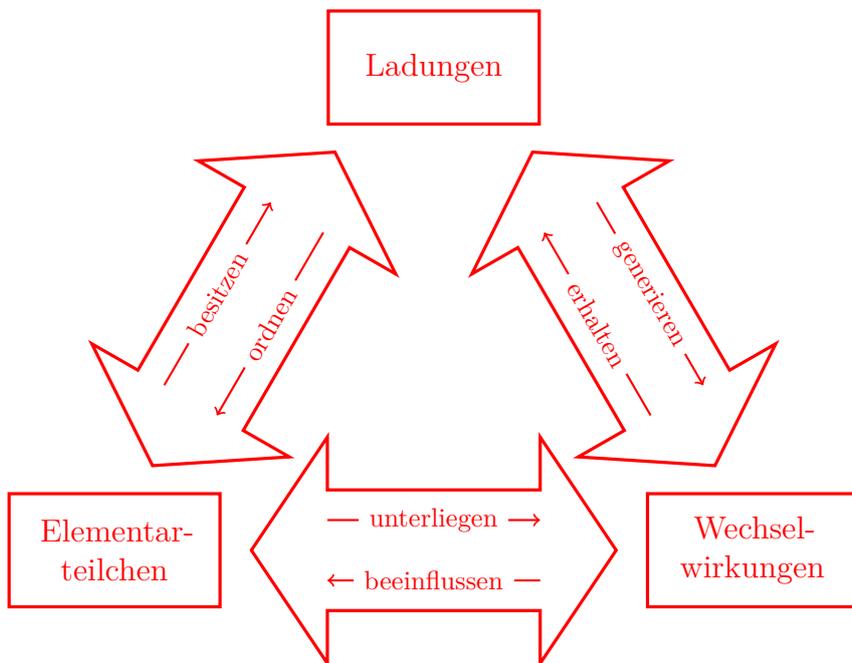
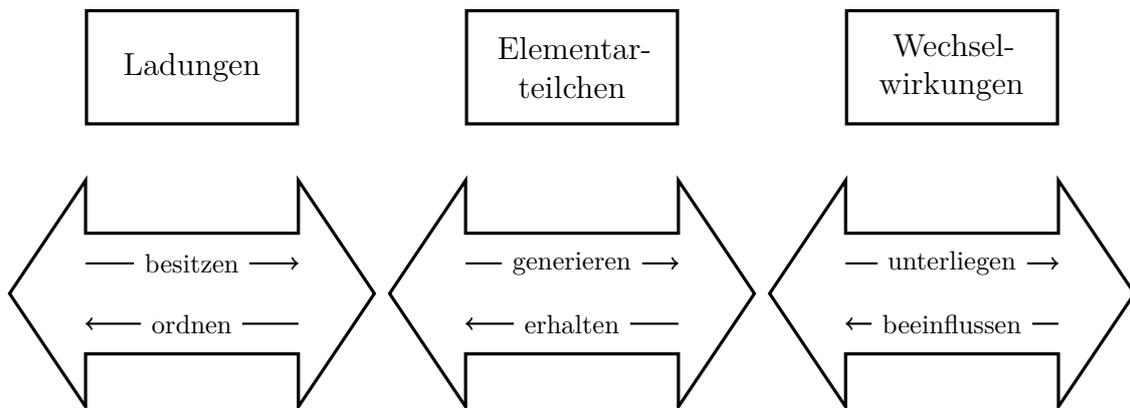
# DIE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS

Die Begriffe „Ladungen“, „Elementarteilchen“ und „Wechselwirkungen“ stehen in Beziehung zueinander. Stelle zwischen diesen drei Begriffen mithilfe der Pfeile eine sinnvolle Beziehung her.



## DIE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS

Die Begriffe „Ladungen“, „Elementarteilchen“ und „Wechselwirkungen“ stehen in Beziehung zueinander. Stelle zwischen diesen drei Begriffen mithilfe der Pfeile eine sinnvolle Beziehung her.





# LADUNGEN

## EIGENSCHAFTEN DER LADUNGEN UND LADUNGEN ZUSAMMENGESETZTER TEILCHEN

### LEVEL 2

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

1. nennen grundlegende Eigenschaften (Quantelung, Additivität und Erhaltung) der schwachen und der elektromagnetischen Ladung im Vergleich mit denen der starken Ladung (Additivität, Erhaltung).
2. erläutern, warum die Masse keine Ladung der Gravitation sein kann.
3. untersuchen zusammengesetzte Teilchen anhand der Ladungen.

**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse der grundlegenden Eigenschaften der elektromagnetischen, schwachen und starken Ladungen.
- Kenntnisse über die Anti-/Materieteilchen der ersten Generation und ihre Eigenschaften Ladung und Masse.



4. Ein aus Quarks der ersten Generation zusammengesetztes Teilchen ist das Pion  $\pi^+$ . Die elektrische Ladung des Pions ist  $q_{\pi^+} = +1$ , die starke Ladung  $\vec{C}_{\pi^+} = \vec{0}$  und die schwache Ladung  $I_{\pi^+} = +1$ .  
Aus welcher Kombination von Quarks könnte das Pion zusammengesetzt sein?

## LADUNGEN

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

1. Beschreibe, welche grundlegenden Eigenschaften die elektromagnetische und die schwache Ladung haben! Nenne pro Eigenschaft ein Beispiel!

Die elektromagnetische und die schwache Ladung sind

- gequantelt – es existieren kleinste Ladungseinheiten.  
Für die schwache Ladung ist das  $I = \pm\frac{1}{2}$ , für die elektrische Ladung für Quarks  $q_q = \pm\frac{1}{3}$  und für Leptonen  $q_l = \pm 1$ .
- additiv – die Summe der Einzelladungen ist gleich der Gesamtladung.  
Ein Neutron setzt sich aus einem Up-Quark und zwei Down-Quarks zusammen.  $I_n = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -\frac{1}{2}$  und  $q_n = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$ .
- erhalten – bei Teilchenumwandlungen ist die Summe der Ladungen vor der Reaktion gleich der Summe der Ladungen nach der Reaktion.  
Für  $e^+ \rightarrow \gamma + e^+$  gilt  $I_{vor} = \frac{1}{2} = I_{nach}$  und  $q_{vor} = 1 = q_{nach}$ .

2. Welche dieser Eigenschaften gelten auch für die starke Ladung? Beschreibe die Besonderheit der starken Ladung und finde ein Beispiel!

Die starke Ladung ist erhalten und additiv, außerdem besitzt sie Vektorcharakter. Die Summe der einzelnen starken Ladungen wird also vektoriell addiert.

Alle drei Farben (und alle drei Anti-Farben) und die Kombination einer Farbe mit einer Anti-Farbe ergeben in Summe  $\vec{0}$ , auch als weiß bezeichnet. Ein Neutron ist aus drei Quarks zusammengesetzt: einem Up- und zwei Down-Quarks. Diese tragen jeweils eine andere Farbladung, zum Beispiel  $u^\downarrow, d^\nearrow, d^\swarrow$ . Die Summe der vektoriell addierten starken Ladungen ergibt den Nullvektor:  $\nearrow + \downarrow + \swarrow = \searrow = \vec{0}$ .

3. Warum kann bei der Gravitation, der vierten fundamentalen Wechselwirkung, die Masse nicht die Ladung sein? Tipp: Überprüfe die „Ladungs“erhaltung am Beispiel der Umwandlung eines Myons. Reaktionsgleichung:  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

Die Masse ist bei Teilchenumwandlungen keine Erhaltungsgröße, sonst müsste gelten:  $m_{\mu^-} = m_{e^-} + m_{\bar{\nu}_e} + m_{\nu_\mu}$

aber  $105,6 \text{ MeV}/c^2 \neq 0,5 \text{ MeV}/c^2$

mit  $m_{e^-} = 0,5 \text{ MeV}/c^2$  und  $m_{\bar{\nu}_e} = m_{\nu_\mu} = < 0,000 002 \text{ MeV}/c^2$

Im Gegensatz zu der elektromagnetischen, starken und schwachen Wechselwirkung existieren nur „positiv geladene Massen“ bei der Gravitation. Außerdem gibt es nur Anziehung zwischen den Massen, trotz dass sie die gleiche „positive Ladung“ hätten; Abstoßung wurde bisher noch nicht beobachtet.

4. Ein aus Quarks der ersten Generation zusammengesetztes Teilchen ist das Pion  $\pi^+$ . Die elektrische Ladung des Pions ist  $q_{\pi^+} = +1$ , die starke Ladung  $\vec{C}_{\pi^+} = \vec{0}$  und die schwache Ladung  $I_{\pi^+} = +1$ .

Aus welcher Kombination von Quarks könnte das Pion zusammengesetzt sein?

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

$$q_u + q_{\bar{d}} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = 1$$

$$\vec{C}_u + \vec{C}_{\bar{d}} = \downarrow + \uparrow = \vec{0}$$

(Annahme, dass  $u$  einen blauen Ladungsvektor trägt;  $\bar{d}$  muss die entsprechende Anti-Farbe tragen)

$$I_u + I_{\bar{d}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

## METHODISCHE HINWEISE ZU LADUNGEN

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

drei Quarks:  $(uud)$ ,  $I_{uud} = +\frac{1}{2}$

sechs Quarks:  $(uuuddd)$ ,  $I_{uuuddd} = 0$

neun Quarks:  $(uuuuddddd)$ ,  $I_{uuuuddddd} = -\frac{1}{2}$

(usw.)

Ein weiteres Teilchen, dessen Bestandteile aus der Ladungssumme des zusammengesetzten Teilchens berechnet werden können ist der Heliumkern: Das  $\alpha$ -Teilchen besitzt folgende Ladungen:  $q_\alpha = +2$ ,  $\vec{C}_\alpha = \vec{0}$ ,  $I_\alpha = 0$ . Das  $\alpha$ - Teilchen ist ein Heliumkern, er besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Das Proton setzt sich aus drei Quarks zusammen,  $uud$ , und trägt die Ladungszahlen  $q_p = +1$ ,  $\vec{C}_p = \vec{0}$  und  $I_p = +\frac{1}{2}$ . Das Neutron besteht auch aus drei Quarks,  $udd$ , und trägt folgende Ladungszahlen  $q_n = 0$ ,  $\vec{C}_n = \vec{0}$  und  $I_n = -\frac{1}{2}$ . Mit  $2p + 2n$  ergeben sich die Ladungszahlen des Heliumkerns. Mit nur zwei Protonen würde die schwache Ladungszahl wieder nicht übereinstimmen.



# WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN

## VERGLEICH DER POTENZIELLEN ENERGIEN DER VIER FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN

### LEVEL 2-3

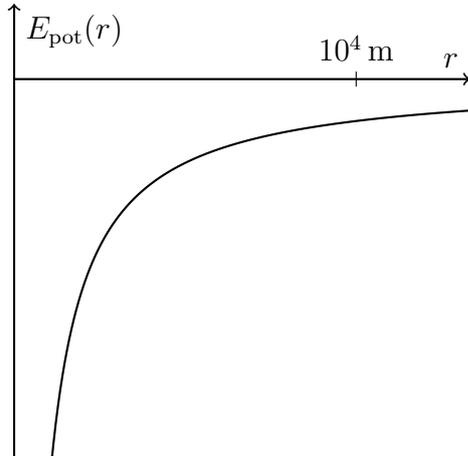
**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

1. erklären den Verlauf der Graphen und erkennen, dass aus dem gleichem Verlauf für kleine Abstände Gemeinsamkeiten bei der Kraftwirkung der Wechselwirkungen resultieren.
2. erkennen den Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Kurvenverläufen für große Abstände und dem unterschiedlichen Verhalten der Kräfte.
3. erkennen, dass anhand der Kurvenverläufe das Verhalten von Teilchen erklärt werden kann.

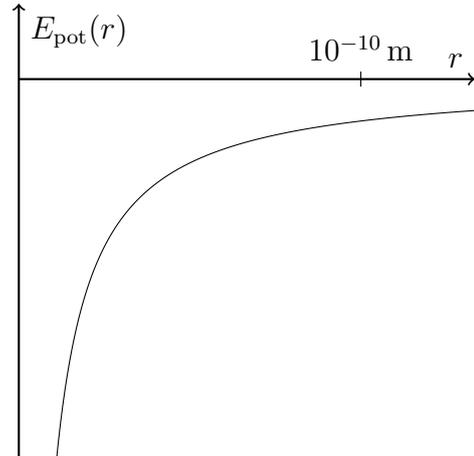
**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die mathematische Interpretation von Graphen.
- Generelle Kenntnisse darüber, welche Teilchen welcher Wechselwirkung unterliegen und wie sie sich verhalten.

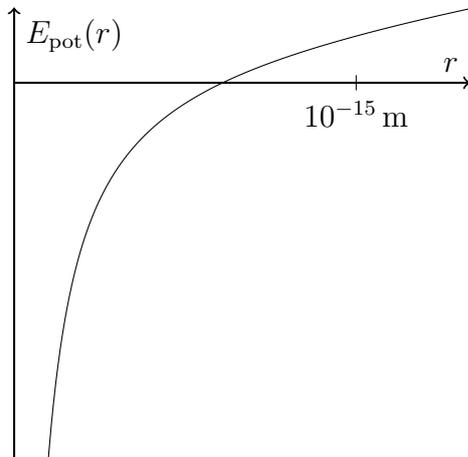
# WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN



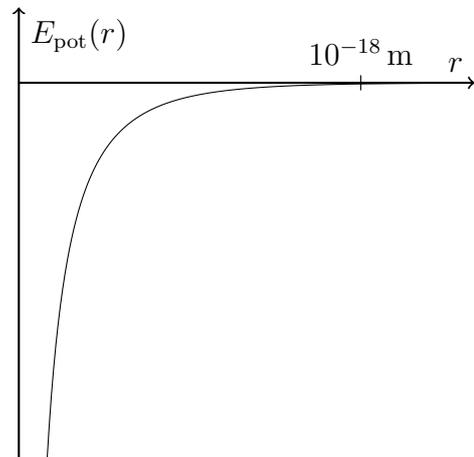
(a) Gravitationswechselwirkung zwischen der Erde und einem Satelliten.



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



(c) Starke Wechselwirkung zwischen zwei Quarks mit unterschiedlich geladenem starken Ladungsvektor.

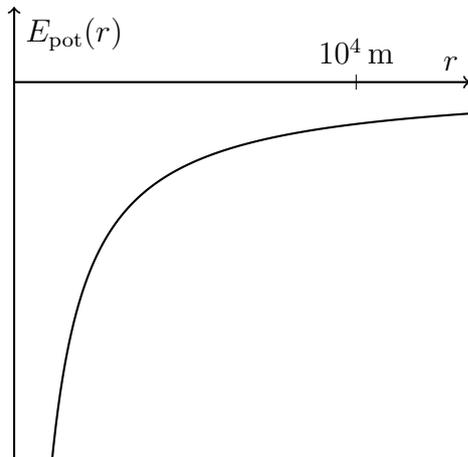


(d) Schwache Wechselwirkung zwischen einem Elektron mit der Ladungszahl  $I = -\frac{1}{2}$  und einem Neutrino mit der Ladungszahl  $I = +\frac{1}{2}$ .

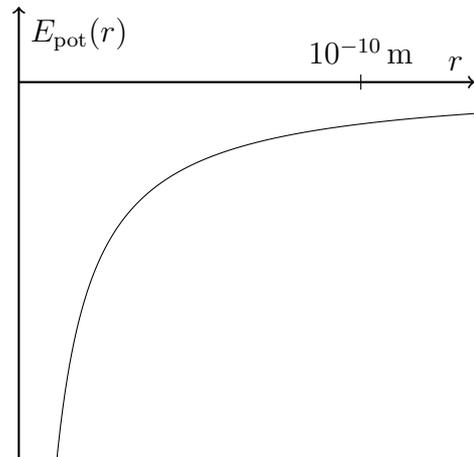
Abbildungen a) bis d): Darstellung der potenziellen Energie  $E_{\text{pot}}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  für die vier fundamentalen Wechselwirkungen.



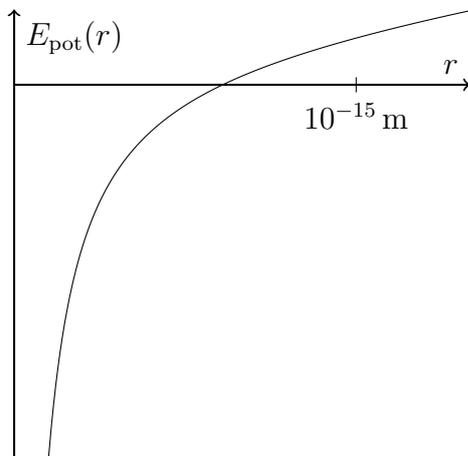
## WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN



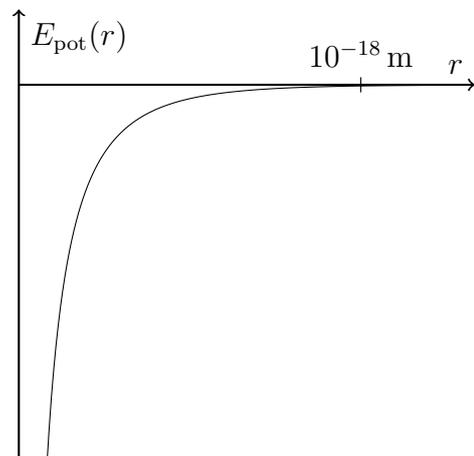
(a) Gravitationswechselwirkung zwischen der Erde und einem Satelliten.



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



(c) Starke Wechselwirkung zwischen zwei Quarks mit unterschiedlich geladenem starken Ladungsvektor.



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

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

1. Beschreibe den Verlauf der Funktion der potenziellen Energie  $E_{\text{pot}}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  für die Gravitation!

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.

2. Wie kann dieser Verlauf physikalisch interpretiert werden? Betrachte das Beispiel Erde – Satellit!

Soll der Abstand eines Satelliten von der Erde um  $\Delta r = r'' - r'$  vergrößert werden, muss Arbeit verrichtet werden. Die potenzielle Energie  $\Delta E$  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 Satellit um  $\Delta r = 600$  km von der Erdoberfläche gerade vom Erdmittelpunkt weg ins All zu befördern als ihn im Weltraum weitere  $\Delta r = 600$  km vom Erdmittelpunkt zu entfernen.

Wenn sich der Satellit immer weiter von der Erde entfernt erreicht die potenzielle Energie einen Grenzwert und nimmt nicht weiter zu.

3. Vergleiche die Abbildung der Abhängigkeit der potenzielle Energie vom Abstand der Gravitation mit den Abbildungen für die anderen Wechselwirkungen. Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden deutlich?

Wie kann der unterschiedliche Verlauf der Kurven physikalisch interpretiert werden?

Die Verläufe der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung sehen identisch aus. Für alle Funktionen ist für kleine Abstände ein hyperbolischer Verlauf zu erkennen.

Bei der starken Wechselwirkung steigt die potenzielle Energie bei sich vergrößernden Abständen linear an. Physikalisch betrachtet bedeutet dies: Je weiter sich ein Quark von einem anderen Quark entfernt, umso mehr nimmt die potenzielle Energie zu. Im Gegensatz zur Gravitation und elektromagnetischen Wechselwirkung nähert sie sich nicht asymptotisch einem Grenzwert an.

Der Verlauf der potenziellen Energie der schwachen Wechselwirkung geht mit wachsendem Abstand  $r$  exponentiell gegen 0. Ab einem gewissen Abstand ist die potenzielle Energie also nahezu 0, was auf eine kurze Reichweite hindeuten könnte.



# ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS

## MULTIPLЕТTS DER SCHWACHEN UND DER STARKEN WECHSELWIRKUNG

### LEVEL 2-3

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

1. ermitteln das Prinzip der Dupletts bezüglich der schwachen Wechselwirkung.
2. wenden das Prinzip der Dupletts auf die Tripletts der starken Ladung an.
3. stellen ihre Wissen über Multipletts und die Zusammenhänge strukturiert dar.

**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die Elementarteilchen und die Ladungen (Ladungswechsel des Gluons), die sie besitzen.
- Berechnen der Ladungen und Anwendung des Prinzips der Ladungserhaltung.

# ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS

1. Folgende Teilchen sind vorgegeben: Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , Elektron  $e^-$ , Up-Quark  $u$  und Down-Quark  $d$ .
- Welche Ladungen tragen die Materieteilchen? (Geh davon aus, dass die Quarks in dem Moment beide die gleiche Farbladung tragen.)
  - Was ist jeweils die Differenz der elektrischen und der schwachen Ladung zwischen  $e^-$  und  $\nu_e$  sowie zwischen  $d$  und  $u$ ?
  - Durch welches Botenteilchen kann eine Umwandlung von  $e^-$  zu  $\nu_e$  und von  $d$  zu  $u$  stattfinden?

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad q_{\nu_e} = \quad I_{\nu_e} = \\ q_{e^-} = \quad I_{e^-} =$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad q_u = \quad \vec{C}_u = \quad I_u = \\ q_d = \quad \vec{C}_d = \quad I_d =$$

2. Ergänze den folgenden Satz!

Die Umwandlung von dem oberen Teilchen zum unteren Teilchen in der Gruppierung geschieht durch Austausch eines \_\_\_\_, einem Austauschteilchen der \_\_\_\_\_.

Man nennt diese Gruppierungen **Dupletts** (lat. *duplex* = doppelt) **bezüglich der** \_\_\_\_\_ **Wechselwirkung**. Nur über die \_\_\_\_\_ Wechselwirkung können die Teilchen in den Dupletts ineinander umgewandelt, erzeugt oder vernichtet werden.

3. Finde weitere Beispiele für die eben beschriebenen Dupletts!

4. Für die starke Wechselwirkung existiert ebenfalls ein Ordnungsschema: die Anordnung der Quarks in **Tripletts** (lat. *triplex* = dreifach).

Welche Quarks befinden sich in einem Triplet und durch welche Austauschteilchen können die Teilchen im Triplet ineinander umgewandelt werden?

(                      )

5. Erstelle ein Begriffsnetz mit den vorgegebenen Bausteinen. Nutze Linien und eigene Beschriftungen zur Strukturierung der Begriffe um eine zusammenhängende Übersicht zu erstellen.

# BAUSTEINE

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

$$u \nearrow u \nwarrow u \downarrow$$

$$\bar{d} \nearrow \bar{d} \nwarrow \bar{d} \downarrow$$

$$\Delta q = +1$$

$$\Delta I = +1$$

$$W^+ \quad \begin{pmatrix} q_{W^+} = +1 \\ I_{W^+} = +1 \end{pmatrix} \quad g$$

Beispiele für Dupletts  
bezüglich der schwachen Wechselwirkung.

Beispiele für Tripletts  
bezüglich der starken Wechselwirkung.

Über die schwache WW können nur Teilchen innerhalb eines Dupletts erzeugt, vernichtet oder ineinander umgewandelt werden.

Über die starke WW können nur Teilchen innerhalb eines Tripletts erzeugt, vernichtet oder ineinander umgewandelt werden.

## ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS

1. Folgende Teilchen sind vorgegeben: Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , Elektron  $e^-$ , Up-Quark  $u$  und Down-Quark  $d$ .

- Welche Ladungen tragen die Materieteilchen? (Geh davon aus, dass die Quarks in dem Moment beide die gleiche Farbladung tragen.)
- Was ist jeweils die Differenz der elektrischen und der schwachen Ladung zwischen  $e^-$  und  $\nu_e$  sowie zwischen  $d$  und  $u$ ?
- Durch welches Botenteilchen kann eine Umwandlung von  $e^-$  zu  $\nu_e$  und von  $d$  zu  $u$  stattfinden?

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} q_{\nu_e} = 0 & I_{\nu_e} = +\frac{1}{2} \\ q_{e^-} = -1 & I_{e^-} = -\frac{1}{2} \end{matrix} \quad \hookrightarrow W^- \text{ mit } q_{W^-} = -1 \text{ und } I_{W^-} = -1$$

$$\Delta q = -1 \quad \Delta I = -1$$

Die Umwandlung ist durch ein  $W^-$  möglich:  $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$ .

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} q_u = +\frac{2}{3} & \vec{C}_u = \nearrow \text{ oder } \nwarrow \text{ oder } \downarrow & I_u = +\frac{1}{2} \\ q_d = -\frac{1}{3} & \vec{C}_d = \nearrow \text{ oder } \nwarrow \text{ oder } \downarrow & I_d = -\frac{1}{2} \end{matrix} \quad \hookrightarrow W^- \text{ mit } q_{W^-} = -1$$

$$\Delta q = -1 \quad \Delta I = -1$$

Die Umwandlung ist durch ein  $W^-$  möglich:  $d \rightarrow W^- + u$ .

2. Ergänze den folgenden Satz!

Die Umwandlung von dem oberen Teilchen zum unteren Teilchen in der Gruppierung geschieht durch Austausch eines  $W^+$ , einem Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung.

Man nennt diese Gruppierungen **Dupletts** (lat. *duplex* = doppelt) **bezüglich der schwachen Wechselwirkung**. Nur über die schwache Wechselwirkung können die Teilchen in den Dupletts ineinander umgewandelt, erzeugt oder vernichtet werden.

3. Finde weitere Beispiele für die eben beschriebenen Dupletts!

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

4. Für die starke Wechselwirkung existiert ebenfalls ein Ordnungsschema: die Anordnung der Quarks in **Tripletts** (lat. *triplex* = dreifach).

Welche Quarks befinden sich in einem Triplet und durch welche Austauschteilchen können die Teilchen im Triplet ineinander umgewandelt werden?

$$\begin{pmatrix} u \nearrow & u \nwarrow & u \downarrow \\ \curvearrowright & & \curvearrowright \\ g \nearrow & g \nwarrow & g \downarrow \end{pmatrix}$$

5. Erstelle ein Begriffsnetz mit den vorgegebenen Bausteinen. Nutze Linien und eigene Beschriftungen zur Strukturierung der Begriffe um eine zusammenhängende Übersicht zu erstellen.

## BAUSTEINE

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

$$u \nearrow \quad u \nwarrow \quad u \downarrow$$

$$\bar{d} \nearrow \quad \bar{d} \nwarrow \quad \bar{d} \downarrow$$

$$\Delta q = +1$$

$$\Delta I = +1$$

$$W^+$$

$$\begin{matrix} q_{W^+} = +1 \\ I_{W^+} = +1 \end{matrix}$$

$$g$$

Beispiele für Dupletts  
bezüglich der schwachen  
Wechselwirkung.

Beispiele für Tripletts  
bezüglich der starken  
Wechselwirkung.

Über die schwache WW können  
nur Teilchen innerhalb  
eines Dupletts erzeugt, vernichtet  
oder ineinander umgewandelt werden.

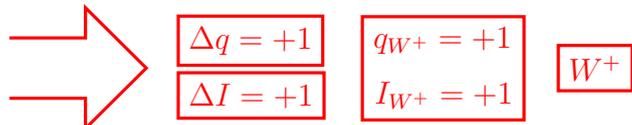
Über die starke WW können  
nur Teilchen innerhalb eines  
Tripletts erzeugt, vernichtet  
oder ineinander umgewandelt werden.

# BEGRIFFSNETZ

Bsp. für Dupletts bzgl. der schwachen WW.

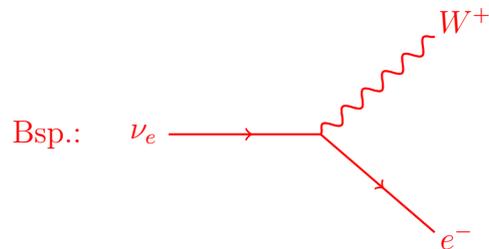
Über die schwache WW können nur Teilchen innerhalb von Dupletts erzeugt, vernichtet oder ineinander umgewandelt werden.

$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$I_{\nu_e} = +\frac{1}{2} \quad q_{\nu_e} = 0$ $I_{e^-} = -\frac{1}{2} \quad q_{e^-} = -1$
$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$I_u = +\frac{1}{2} \quad q_u = +\frac{2}{3}$ $I_d = -\frac{1}{2} \quad q_d = -\frac{1}{3}$
$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}$	$I_{e^+} = +\frac{1}{2} \quad q_{e^+} = +1$ $I_{\bar{\nu}_e} = -\frac{1}{2} \quad q_{\bar{\nu}_e} = 0$
$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$	$I_p = +\frac{1}{2} \quad q_p = 0$ $I_n = -\frac{1}{2} \quad q_n = -1$



Die Differenz der elektrischen & der schwachen Ladung vom oberen zum unteren Teilchen beträgt immer +1.

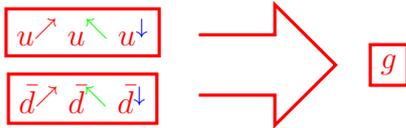
Austauschteilchen der schwachen WW.



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \rightarrow W^+ \quad \nu_e = W^+ + e^-$$

# BEGRIFFSNETZ

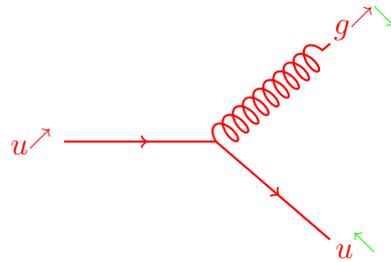
Bsp. für Triplets  
bzgl. der starken  
WW.



Über die starke Wechselwirkung können nur Teilchen innerhalb eines Triplets erzeugt, vernichtet oder ineinander umgewandelt werden.

Reaktionsgleichung

Bsp.:  $u \nearrow \rightarrow g \nearrow \downarrow + u \nwarrow$





# BOTENTEILCHEN

## BERECHNEN UND ERLÄUTERN MÖGLICHER TEILCHENUMWANDLUNGEN

### LEVEL 2

**Lernziele:** Die Schülerinnen und Schüler

1. geben folgende Eigenschaften eines ausgewählten Elementarteilchens an: Ladungen, Wechselwirkungen, denen es unterliegt, und die zur Wechselwirkung gehörenden Botenteilchen.
2. erkennen, dass die Ladungserhaltung aller Ladungen die möglichen Teilchenumwandlungen stark einschränkt und sie bestimmt.
3. überprüfen und erläutern mithilfe der Energieerhaltung, ob die Teilchenumwandlungen stattfinden können.

**Vorkenntnisse:**

- Kenntnisse über die Massen und Ladungen der Anti-/Materieteilchen der ersten Generation.
- Verständnis der Zusammenhänge von Ladung, Wechselwirkungen und Botenteilchen.
- Kenntnisse über die Botenteilchen der drei Wechselwirkungen und ihre Eigenschaften Ladung und Masse und den physikalischen Größen Energie, Impuls und Ladungen, die durch sie übertragen werden.
- Berechnen der Ladungen und Anwendung des Prinzips der Ladungserhaltung.
- Kenntnisse über das ausschließliche Vorkommen von Quarks in gebundenen Zuständen (Confinement).

# BOTENTEILCHEN

Wähle eines der folgenden Anti-/Materieteilchen aus dem Standardmodell der Teilchenphysik aus:

Elektron  $e^-$ ,

Positron  $e^+$ ,

Anti-Up-Quark  $\bar{u}$ ,

Down-Quark  $d$ .

1. Notiere das gewählte Anti-/Materieteilchen und vermerke dazu:

a) welche Ladungen es besitzt.

b) welchen Wechselwirkungen es unterliegt.

c) mit welchen Botenteilchen es in Wechselwirkung treten kann.

2. Gib an, welche physikalischen Größen durch die Wechselwirkung mit Botenteilchen übertragen werden.

3. Notiere für dein gewähltes Anti-/Materieteilchen die Reaktionsgleichung nach dem folgenden Schema:

Anti-/Materieteilchen  $\rightarrow$  Botenteilchen + ?

Berechne mithilfe der Ladungserhaltung, welche elektrische, starke und schwache Ladung das gesuchte Teilchen auf der rechten Seite der Reaktionsgleichung besitzen muss. Vervollständige danach, wenn möglich, die Reaktionsgleichung.

elektrische Ladung:  $q_d \rightarrow q_{W^-} + q_?$   $q_? =$

(Annahme, dass  $d$  einen roten Ladungsvektor trägt)

starke Ladung:  $\vec{C}_{d^{\color{red}\rightarrow}} \rightarrow \vec{C}_{W^-} + \vec{C}_?$   $\vec{C}_? =$

schwache Ladung:  $I_d \rightarrow I_{W^-} + I_?$   $I_? =$

4. Vervollständige die Tabelle und erlautere jeweils, ob die vorgegebenen Beispiele so möglich sind. Berücksichtige bei der Erläuterung auch die Energieerhaltung. Tipp: gehe davon aus, dass sich das Teilchen vor der Wechselwirkung in Ruhe befindet.

	Anti-/Materieteilchen	Botenteilchen	?
a)	$d$	$W^-$	
el. Ladungszahl $q$			
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$			
schwache Ladungszahl $I$			

b)	$e^-$	$W^+$	
el. Ladungszahl $q$			
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$			
schwache Ladungszahl $I$			
c)	$e^-$	$W^-$	
el. Ladungszahl $q$			
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$			
schwache Ladungszahl $I$			
d)	$e^+$	$\gamma$	
el. Ladungszahl $q$			
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$			
schwache Ladungszahl $I$			
e)	$\bar{u}^\uparrow$	$g^{\nearrow\uparrow}$	
el. Ladungszahl $q$			
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$			
schwache Ladungszahl $I$			

a)

b)

c)

d)

e)

# BOTENTEILCHEN

Wähle eines der folgenden Anti-/Materieteilchen aus dem Standardmodell der Teilchenphysik aus:

Elektron  $e^-$ ,

Positron  $e^+$ ,

Anti-Up-Quark  $\bar{u}$ ,

Down-Quark  $d$ .

1. Notiere das gewählte Anti-/Materieteilchen und vermerke dazu:

*Down-Quark  $d$*

- a) welche Ladungen es besitzt.

*Beispiel: Das Down-Quark besitzt die elektrische Ladung mit der Ladungszahl  $q = -\frac{1}{3}$ , die schwache Ladung mit einer Ladungszahl von  $I = -\frac{1}{2}$  und trägt als starke Ladung einen roten Farbladungsvektor  $\nearrow$ .*

- b) welchen Wechselwirkungen es unterliegt.

*Das Down-Quark unterliegt der elektromagnetischen, der starken und der schwachen Wechselwirkung.*

- c) mit welchen Botenteilchen es in Wechselwirkung treten kann.

*Aufgrund der Wechselwirkungen, denen das Down-Quark unterliegt, kann es mit dem Photon  $\gamma$ , den Gluonen  $g_i$  und dem  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  in Wechselwirkung treten.*

2. Gib an, welche physikalischen Größen durch die Wechselwirkung mit Botenteilchen übertragen werden.

*Durch die Wechselwirkung mit einem Botenteilchen werden Energie, Impuls und Ladungen übertragen.*

3. Notiere für dein gewähltes Anti-/Materieteilchen die Reaktionsgleichung nach dem folgenden Schema:

Anti-/Materieteilchen  $\rightarrow$  Botenteilchen  $+$  ?



Berechne mithilfe der Ladungserhaltung, welche elektrische, starke und schwache Ladung das gesuchte Teilchen auf der rechten Seite der Reaktionsgleichung besitzen muss. Vervollständige danach, wenn möglich, die Reaktionsgleichung.

elektrische Ladung:  $q_d \rightarrow q_{W^-} + q_?$   $q_? =$

(Annahme, dass  $d$  einen roten Ladungsvektor trägt)

starke Ladung:  $\vec{C}_d \rightarrow \vec{C}_{W^-} + \vec{C}_?$   $\vec{C}_? =$

schwache Ladung:  $I_d \rightarrow I_{W^-} + I_?$   $I_? =$

elektrische Ladung:  $-\frac{1}{3} \rightarrow -1 + q_?$   $q_? = +\frac{2}{3}$

starke Ladung:  $\nearrow \rightarrow \vec{0} + \vec{C}_?$   $\vec{C}_? = \nearrow$

schwache Ladung:  $-\frac{1}{2} \rightarrow -1 + I_?$   $I_? = +\frac{1}{2}$

Das gesuchte Teilchen ist ein Up-Quark,  $d \rightarrow W^- + u$ .

*Falls eine Beispielreaktion wie in 4.b) gewählt wurde ist die Vervollständigung der Reaktionsgleichung nicht möglich.*

4. Vervollständige die Tabelle und erlautere jeweils, ob die vorgegebenen Beispiele so möglich sind. Berücksichtige bei der Erläuterung auch die Energieerhaltung. Tipp: gehe davon aus, dass sich das Teilchen vor der Wechselwirkung in Ruhe befindet.

	Anti-/Materieteilchen	Botenteilchen	?
a)	$d$	$W^-$	$u$
el. Ladungszahl $q$	$-\frac{1}{3}$	$-1$	$+\frac{2}{3}$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\nearrow$	$\vec{0}$	$\nearrow$
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$-1$	$+\frac{1}{2}$

b)	$e^-$	$W^+$	nicht möglich
el. Ladungszahl $q$	$-1$	$+1$	$-2$
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 $q$	$-1$	$-1$	$0$
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 $q$	$+1$	$0$	$+1$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$
schwache Ladungszahl $I$	$+\frac{1}{2}$	$0$	$+\frac{1}{2}$
e)	$\bar{u}^\uparrow$	$g^{\swarrow\uparrow}$	$\bar{u}^{\searrow}$
el. Ladungszahl $q$	$-\frac{2}{3}$	$0$	$-\frac{2}{3}$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\uparrow$	$\swarrow\uparrow$	$\searrow$
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$0$	$-\frac{1}{2}$

- a) Das  $W^-$  trägt eine elektrische und eine schwache Ladung, aber keinen Farbladungsvektor. Die Darstellung in der Lösung mit einem rotem Farbladungsvektor zeigt, dass die starke Ladung gleich bleibt, nur die elektrische und die schwache Ladungszahl ändern sich. Das Down-Quark wandelt sich durch Abstrahlung eines  $W^-$  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  $+\frac{3}{2}$ , somit ist dieser Prozess nicht möglich.
- c) Das Elektron strahlt ein  $W^-$ , durch die Änderung der elektrischen und der schwachen Ladung wird es in ein Elektron-Neutrino umgewandelt. Wenn man die Energieerhaltung der Umwandlung betrachtet ist es nicht ohne weiteres möglich, dass sich ein leichtes Elektron in ein schwereres  $W^-$  und ein Neutrino umwandelt.
- d) Ein Positron strahlt ein Photon ab und bewegt sich danach in einem anderen Winkel weiter, da das Photon zwar keine Masse oder Ladungen,

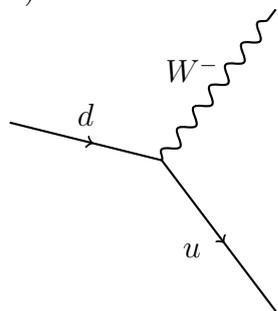
aber Energie überträgt. Dieser Prozess ist wegen der Impulserhaltung nur möglich, wenn noch ein zweites Photon an dem Prozess teilnimmt, da es sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

- e) Man nimmt an, dass ein Anti-Up-Quark einen anti-blauen Farbladungsvektor trägt. Durch das Aussenden eines grün-anti-blauen Gluons ändert sich die Farbladung des Anti-Up-Quarks zu anti-grün. Da das Gluon nur die starken Anti-/Farbladungsvektoren trägt ändern sich die elektromagnetische und die schwache Ladung nicht.

# METHODISCHE HINWEISE ZU BOTENTEILCHEN

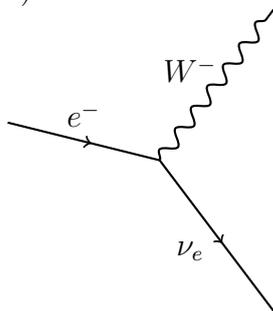
Die vierte Teilaufgabe kann erweitert werden, indem die Feynman-Diagramme für die Prozesse dargestellt werden:

a)

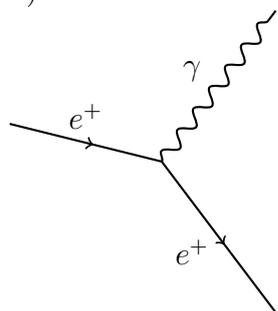


b) nicht möglich

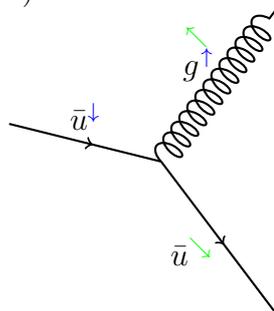
c)



d)



e)





# GRUNDBAUSTEINE DER FEYNMAN-DIAGRAMME

## DARSTELLUNG DER VERTICES FÜR WECHSELWIRKUNGEN VON ANTI-/MATERIETEILCHEN

### LEVEL 2-3

**Lernziele:** die Schülerinnen und Schüler

1. verknüpfen die Namen der Prozesse der Grundbausteine mit exemplarischen Beschreibungen.
2. zeichnen die Grundbausteine für die Darstellung der Wechselwirkung von Anti-/Materieteilchen nach den Beschreibungen.
3. stellen Wechselwirkungen durch den Austausch eines Botenteilchens (zusammengesetzte Vertices) nach einer Beschreibung dar.

**Vorkenntnisse:**

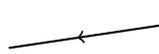
- Kenntnisse über die Elementarteilchen und ihre Eigenschaften Ladung und Masse.

# GRUNDBAUSTEINE DER FEYNMAN-DIAGRAMME

Mit Feynman-Diagrammen kann man graphisch Wechselwirkungen zwischen Teilchen veranschaulichen. Dabei werden in Orts-Zeit-Diagrammen die Wechselwirkungen zwischen Anti-/Materieteilchen über den Austausch eines Botenteilchens veranschaulicht, um die vermittelte Kraftwirkung darzustellen.

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  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  und das Photon  $\gamma$

 eine gekringelte Linie für das Gluon  $g$



*Beispiel:*

 die Darstellung eines Positrons in einem Feynman-Diagramm

Aus diesen Darstellungen der Elementarteilchen werden vier Grundbausteine definiert, bei denen jeweils zwei Anti-/Materieteilchen und ein Botenteilchen beteiligt sind. Ein Grundbaustein zeigt den Treffpunkt von Teilchenlinien und wird Vertex (plural: Vertices) genannt.

Im Folgenden werden exemplarisch vier Vertices beschrieben, die, wenn man sie verallgemeinert, jeweils einen Wechselwirkungs-Grundbaustein darstellen. Mit zwei dieser Grundbausteine kann jede Wechselwirkung zwischen zwei Anti-/Materieteilchen durch den Austausch eines Botenteilchens beschrieben werden.

1. Ordne der exemplarischen Beschreibung den passenden Namen des Prozesses zu und zeichne den Vertex (Baustein) nach der Beschreibung!

Folgende Prozessnamen stehen zur Auswahl: *Paarvernichtung, Einfang eines Botenteilchens, Paarerzeugung, Abstrahlung eines Botenteilchens*

Name des Prozesses	Beschreibung	Vertex
	Ein Elektron strahlt spontan ein $Z^0$ ab. Durch die Änderung der Energie und des Impulses ändert das Elektron seine ursprüngliche Bewegungsrichtung.	
	Ein Up-Quark fängt ein $W^+$ -Teilchen ein. Durch die Änderung der Ladung, der Energie und des Impulses wandelt es sich in ein Down-Quark um und ändert seine ursprüngliche Bewegungsrichtung.	
	Ein Up-Quark und ein Anti-Up-Quark treffen aufeinander und löschen sich unter Entstehung eines Gluons gegenseitig aus.	
	Ein Photon wandelt sich in ein Elektron und ein Positron um.	

Die vier Vertices gelten auch ganz allgemein für alle Prozesse von Materieteilchen und Anti-Materieteilchen mit Botenteilchen. Fügt man zwei Vertices an der Linie des Botenteilchens zusammen, können Wechselwirkungen zwischen den Teilchen dargestellt werden.

2. Zeichne zwei Wechselwirkungsprozesse nach den folgenden Beschreibungen. Sie bestehen jeweils aus zwei zusammengefügt Vertices. Die Reaktionsgleichungen dienen als zusätzliche Orientierung. Sie 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 aufeinander und vernichten sich gegenseitig, es entsteht ein Photon  $\gamma$ . Das Photon wandelt sich in ein Elektron und ein Positron um.

$$e^- + e^+ \longrightarrow e^- + e^+$$

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

$$\mu \longrightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$$

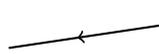


## GRUNDBAUSTEINE DER FEYNMAN-DIAGRAMME

Mit Feynman-Diagrammen kann man graphisch Wechselwirkungen zwischen Teilchen veranschaulichen. Dabei werden in Orts-Zeit-Diagrammen die Wechselwirkungen zwischen Anti-/Materieteilchen über den Austausch eines Botenteilchens veranschaulicht, um die vermittelte Kraftwirkung darzustellen.

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  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  und das Photon  $\gamma$

 eine gekringelte Linie für das Gluon  $g$



*Beispiel:*

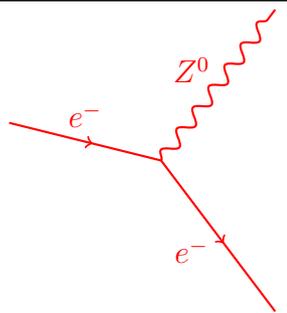
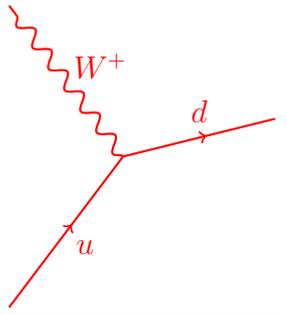
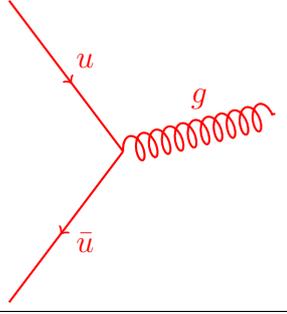
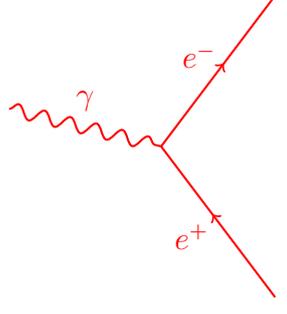
 die Darstellung eines Positrons in einem Feynman-Diagramm

Aus diesen Darstellungen der Elementarteilchen werden vier Grundbausteine definiert, bei denen jeweils zwei Anti-/Materieteilchen und ein Botenteilchen beteiligt sind. Ein Grundbaustein zeigt den Treffpunkt von Teilchenlinien und wird Vertex (plural: Vertices) genannt.

Im Folgenden werden exemplarisch vier Vertices beschrieben, die, wenn man sie verallgemeinert, jeweils einen Wechselwirkungs-Grundbaustein darstellen. Mit zwei dieser Grundbausteine kann jede Wechselwirkung zwischen zwei Anti-/Materieteilchen durch den Austausch eines Botenteilchens beschrieben werden.

1. Ordne der exemplarischen Beschreibung den passenden Namen des Prozesses zu und zeichne den Vertex (Baustein) nach der Beschreibung!

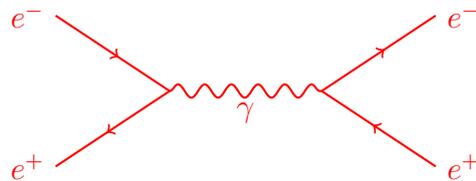
Folgende Prozessnamen stehen zur Auswahl: *Paarvernichtung*, *Einfang eines Botenteilchens*, *Paarerzeugung*, *Abstrahlung eines Botenteilchens*

Name des Prozesses	Beschreibung	Vertex
Abstrahlung eines Botenteilchens	Ein Elektron strahlt spontan ein $Z^0$ ab. Durch die Änderung der Energie und des Impulses ändert das Elektron seine ursprüngliche Bewegungsrichtung.	
Einfang eines Botenteilchens	Ein Up-Quark fängt ein $W^+$ -Teilchen ein. Durch die Änderung der Ladung, der Energie und des Impulses wandelt es sich in ein Down-Quark um und ändert seine ursprüngliche Bewegungsrichtung.	
Paarvernichtung	Ein Up-Quark und ein Anti-Up-Quark treffen aufeinander und löschen sich unter Entstehung eines Gluons gegenseitig aus.	
Paarerzeugung	Ein Photon wandelt sich in ein Elektron und ein Positron um.	

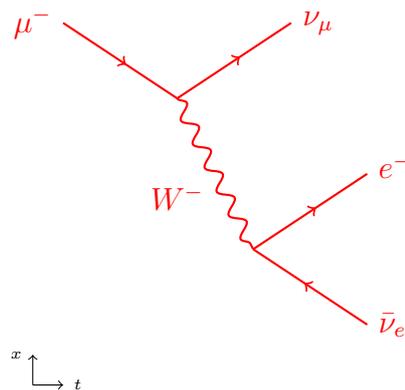
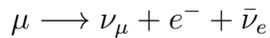
Die vier Vertices gelten auch ganz allgemein für alle Prozesse von Materieteilchen und Anti-Materieteilchen mit Botenteilchen. Fügt man zwei Vertices an der Linie des Botenteilchens zusammen, können Wechselwirkungen zwischen den Teilchen dargestellt werden.

2. Zeichne zwei Wechselwirkungsprozesse nach den folgenden Beschreibungen. Sie bestehen jeweils aus zwei zusammengefügt Vertices. Die Reaktionsgleichungen dienen als zusätzliche Orientierung. Sie 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 aufeinander und vernichten sich gegenseitig, es entsteht ein Photon  $\gamma$ . Das Photon wandelt sich in ein Elektron und ein Positron um.

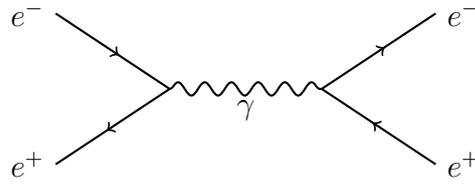


- b) Ein Myon  $\mu^-$  strahlt ein  $W^-$ -Teilchen ab und wandelt sich in ein Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  um. Das  $W^-$  zerfällt in ein Elektron  $e^-$  und ein Anti-Elektron-Neutrino  $\bar{\nu}_e$ .

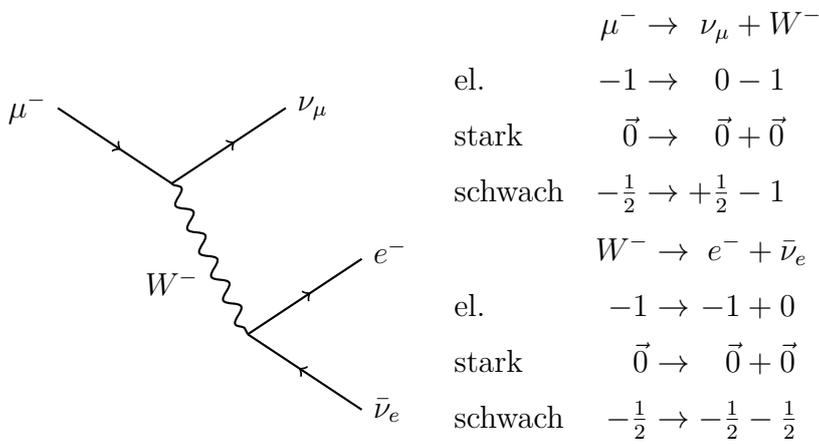


# METHODISCHE HINWEISE ZU FEYNMAN-DIAGRAMME

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



	$e^- + e^+ \rightarrow \gamma$		$\gamma \rightarrow e^- + e^+$
el.	$-1 + 1 \rightarrow 0$	el.	$0 \rightarrow -1 + 1$
stark	$\vec{0} + \vec{0} \rightarrow \vec{0}$	stark	$\vec{0} \rightarrow \vec{0} + \vec{0}$
schwach	$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \rightarrow 0$	schwach	$0 \rightarrow -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$



	$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^-$
el.	$-1 \rightarrow 0 - 1$
stark	$\vec{0} \rightarrow \vec{0} + \vec{0}$
schwach	$-\frac{1}{2} \rightarrow +\frac{1}{2} - 1$
	$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$
el.	$-1 \rightarrow -1 + 0$
stark	$\vec{0} \rightarrow \vec{0} + \vec{0}$
schwach	$-\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$
	$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-$
el.	$-1 \rightarrow 0 + 0 - 1$
stark	$\vec{0} \rightarrow \vec{0} + \vec{0} + \vec{0}$
schwach	$-\frac{1}{2} \rightarrow +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$

## A.8. ÜBERSICHT ÜBER DIE ELEMENTARTEILCHEN DES STANDARDMODELLS

In den Arbeitsblättern der vorliegenden Arbeit werden u. a. Kenntnisse über die Elementarteilchen des Standardmodells sowie deren Ladungen vorausgesetzt. Dieses Wissen kann mithilfe einer Übersicht unterstützt werden, wie sie nachfolgend nach Vorlage des Netzwerk Teilchenwelt (2013) dargestellt wird. Die Masse und die Ladungszahlen als charakterisierende Eigenschaften jedes Elementarteilchens werden unter Symbol und Namen aufgezählt. Die Lebensdauer aller Elementarteilchen ist rechts oberhalb des Symbols angegeben, bei den Botenteilchen ist an dieser Stelle die Reichweite mit aufgeführt. Als zusätzliche Information wird in der linken oberen Ecke das Entdeckungsjahr mit angegeben. In diesem Jahr wurde das entsprechende Teilchen im Experiment entdeckt oder nachgewiesen. Die Vorhersage kann schon viel früher geschehen sein, das 2012 am CERN nachgewiesene Higgs-Teilchen wurde schon Mitte der 1960er Jahre theoretisch beschrieben.

Entdeckungs-jahr	Lebens-dauer Reich- weite
Symbol	
Name	
Masse $m$	
elektr. Ladungszahl $q$	
starker Ladungsvektor $\vec{C}$	
schwache Ladungszahl $I$	

Die Elementarteilchen sind im folgenden nach Materieteilchen, Anti-Materieteilchen, Botenteilchen und Higgs-Teilchen angeordnet. Die Materieteilchen werden in Quarks und Leptonen eingeteilt (ebenso die Anti-Materieteilchen).

# MATERIETEILCHEN

## QUARKS

1969  $\infty$

***u***

Up-Quarks

$m = 2 \text{ MeV}/c^2$

$q = +\frac{2}{3}$

$\vec{C} = \nearrow, \nwarrow, \downarrow$

$I = +\frac{1}{2}$

1974  $10^{-12} \text{ s}$

***c***

Charm-Quarks

$m = 1300 \text{ MeV}/c^2$

$q = +\frac{2}{3}$

$\vec{C} = \nearrow, \nwarrow, \downarrow$

$I = +\frac{1}{2}$

1995  $6 \cdot 10^{-25} \text{ s}$

***t***

Top-Quarks

$m = 173\,000 \text{ MeV}/c^2$

$q = +\frac{2}{3}$

$\vec{C} = \nearrow, \nwarrow, \downarrow$

$I = +\frac{1}{2}$

1969 900 s

***d***

Down-Quarks

$m = 5 \text{ MeV}/c^2$

$q = -\frac{1}{3}$

$\vec{C} = \nearrow, \nwarrow, \downarrow$

$I = -\frac{1}{2}$

1969  $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

***s***

Strange-Quarks

$m = 100 \text{ MeV}/c^2$

$q = -\frac{1}{3}$

$\vec{C} = \nearrow, \nwarrow, \downarrow$

$I = -\frac{1}{2}$

1977  $2 \cdot 10^{-12} \text{ s}$

***b***

Bottom-Quarks

$m = 4200 \text{ MeV}/c^2$

$q = -\frac{1}{3}$

$\vec{C} = \nearrow, \nwarrow, \downarrow$

$I = -\frac{1}{2}$

LEPTONEN

1956 undefiniert

$$\nu_e$$

Elektron-Neutrino

$$m < 0,000\,002 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = 0$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = +\frac{1}{2}$$

1962 undefiniert

$$\nu_\mu$$

Myon-Neutrino

$$m < 0,000\,002 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = 0$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = +\frac{1}{2}$$

2000 undefiniert

$$\nu_\tau$$

Tau-Neutrino

$$m < 0,000\,002 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = 0$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = +\frac{1}{2}$$

1897  $\infty$

$$e^-$$

Elektron

$$m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = -1$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = -\frac{1}{2}$$

1937  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

$$\mu^-$$

Myon

$$m = 106 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = -1$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = -\frac{1}{2}$$

1975  $2,9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$

$$\tau^-$$

Tauon

$$m = 1777 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = -1$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = -\frac{1}{2}$$

# ANTI-MATERIETEILCHEN

## ANTI-QUARKS

1969  $\infty$

$\bar{u}$

Anti-Up-Quarks

$m = 2 \text{ MeV}/c^2$

$q = -\frac{2}{3}$

$\vec{C} = \swarrow, \searrow, \uparrow$

$I = -\frac{1}{2}$

1974  $10^{-12} \text{ s}$

$\bar{c}$

Anti-Charm-Quarks

$m = 1300 \text{ MeV}/c^2$

$q = -\frac{2}{3}$

$\vec{C} = \swarrow, \searrow, \uparrow$

$I = -\frac{1}{2}$

1995  $6 \cdot 10^{-25} \text{ s}$

$\bar{t}$

Anti-Top-Quarks

$m = 173\,000 \text{ MeV}/c^2$

$q = -\frac{2}{3}$

$\vec{C} = \swarrow, \searrow, \uparrow$

$I = -\frac{1}{2}$

1969 900 s

$\bar{d}$

Anti-Down-Quarks

$m = 5 \text{ MeV}/c^2$

$q = +\frac{1}{3}$

$\vec{C} = \swarrow, \searrow, \uparrow$

$I = +\frac{1}{2}$

1969  $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

$\bar{s}$

Anti-Strange-Quarks

$m = 100 \text{ MeV}/c^2$

$q = +\frac{1}{3}$

$\vec{C} = \swarrow, \searrow, \uparrow$

$I = +\frac{1}{2}$

1977  $2 \cdot 10^{-12} \text{ s}$

$\bar{b}$

Anti-Bottom-Quarks

$m = 4200 \text{ MeV}/c^2$

$q = +\frac{1}{3}$

$\vec{C} = \swarrow, \searrow, \uparrow$

$I = +\frac{1}{2}$

ANTI-LEPTONEN

1956 undefiniert

$$\bar{\nu}_e$$

Anti-Elektron-Neutrino

$$m < 0,000\,002 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = 0$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = -\frac{1}{2}$$

1962 undefiniert

$$\bar{\nu}_\mu$$

Anti-Myon-Neutrino

$$m < 0,000\,002 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = 0$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = -\frac{1}{2}$$

2000 undefiniert

$$\bar{\nu}_\tau$$

Anti-Tau-Neutrino

$$m < 0,000\,002 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = 0$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = -\frac{1}{2}$$

1932  $\infty$

$$e^+$$

Positron

$$m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = +1$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = +\frac{1}{2}$$

1937  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

$$\mu^+$$

Anti-Myon

$$m = 106 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = +1$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = +\frac{1}{2}$$

1975  $2,9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$

$$\tau^+$$

Anti-Tauon

$$m = 1777 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = +1$$

$$\vec{C} = \vec{0}$$

$$I = +\frac{1}{2}$$

# BOTENTEILCHEN UND HIGGS-TEILCHEN

1983  $3 \cdot 10^{-25}$  s  
 $10^{-18}$  m

$W^+$

$W^+$ -Botenteilchen

$m = 80\,400 \text{ MeV}/c^2$

$q = +1$

$\vec{C} = \vec{0}$

$I = +1$

1983  $3 \cdot 10^{-25}$  s  
 $10^{-18}$  m

$W^-$

$W^-$ -Teilchen

$m = 80\,400 \text{ MeV}/c^2$

$q = -1$

$\vec{C} = \vec{0}$

$I = -1$

1983  $3 \cdot 10^{-25}$  s  
 $10^{-18}$  m

$Z^0$

$Z^0$ -Botenteilchen

$m = 91\,200 \text{ MeV}/c^2$

$q = 0$

$\vec{C} = \vec{0}$

$I = 0$

1905  $\infty$   
 $\infty$

$\gamma$

Photon

$m = 0 \text{ MeV}/c^2$

$q = 0$

$\vec{C} = \vec{0}$

$I = 0$

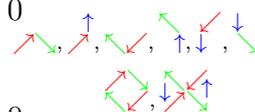
1979  $\infty$   
 $10^{-15}$  m

$g$

Gluonen

$m = 0 \text{ MeV}/c^2$

$q = 0$

$\vec{C} =$  

$I = 0$

2012  $2 \cdot 10^{-22}$  s

$H$

Higgs-Teilchen

$m = 125\,000 \text{ MeV}/c^2$

$q = 0$

$\vec{C} = \vec{0}$

$I = -\frac{1}{2}$

## A.9. GLOSSAR DER PHYSIKALISCHEN BEGRIFFE

**Annihilation/Paarvernichtung** Aufeinandertreffen von einem Teilchen mit seinem Antiteilchen. Dabei vernichten sie sich zu einem Botenteilchen, klassischerweise ein Photon.

**Anti-/Materieteilchen** In der vorliegenden Arbeit werden damit die elementaren Materieteilchen und ihre Anti-Teilchen bezeichnet, also Leptonen und Anti-Leptonen sowie Quarks- und Anti-Quarks.

**Boson** Teilchen mit ganzzahligem Spin, zu denen die Botenteilchen gehören. Das bedeutet, dass sich in einem bestimmten Raumgebiet unendlich viele Bosonen aufhalten können.

**Botenteilchen** Vermittler der Wechselwirkungen zwischen allen Elementarteilchen.

**Confinement** Eigenschaft der starken Wechselwirkung, dass nur farbneutrale Teilchen beobachtet werden können. Quarks können also nicht isoliert vorkommen.

**Elementarteilchen** Die kleinsten Bausteine der Materie, von denen bisher nicht bekannt ist, dass sie sich aus weiteren Teilchen zusammensetzen. Sie werden in Anti-/Materieteilchen und Botenteilchen unterteilt.

**Fermion** Teilchen mit halbzahligem Spin, zu denen die Anti-/Materieteilchen des Standardmodells zählen. Fermionen genügen dem Pauli-Prinzip: Zwei Teilchen in dem exakt selben Zustand können nicht am selben Ort sein.

**Feynman-Diagramm** Möglichkeit der graphischen Darstellung von Teilchen und Wechselwirkungen. Hilfsmittel zur Berechnung der Wirkungsquerschnitte von Streuprozessen.

**Generation** Gruppe von Teilchen mit den gleichen Ladungen, die sich nur durch ihre Masse unterscheiden.

**Kopplungskonstante/-parameter  $\alpha$**  Dimensionslose Vergleichsgröße für die Stärken der fundamentalen Wechselwirkungen.

**Lepton** Die sogenannten *leichten* Anti-/Materieteilchen des Standardmodells, die sich in elektrisch geladene (Elektron, Myon und Tau sowie ihre Anti-Teilchen) und elektrisch neutrale (Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino sowie die Anti-Neutrinos) Teilchen unterteilen.

**MeV** Megaelektronenvolt, Einheit der Energie. Ein MeV entspricht der Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannung von 1 Millionen Volt erhält.

**MeV/ $c^2$**  Einheit für die Masse, die aus der Umstellung der Formel  $E = mc^2$  resultiert.

**Multipletts (Triplet/Duplett/Singulett)** Gruppierung von Teilchen, die sich unter einer bestimmten Wechselwirkung gleich verhalten.

**Nukleon** Ein Baustein des Atomkerns (Proton oder Neutron).

**Paarerzeugung** Zwei Botenteilchen (klassischerweise Photonen) treffen aufeinander und erzeugen ein Teilchen und das entsprechende Anti-Teilchen.

**Standardmodell** Grundlegendes Modell zur Beschreibung der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen.

**virtuelles Teilchen** Interne Linie eines Feynman-Diagramms.

**Wirkungsquerschnitt** Die Wahrscheinlichkeit, dass Teilchen in überlappenden Teilchenstrahlen miteinander streuen.



# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1.	Der Aufbau der Materie vom Kristall bis hin zu den Quarks (nach Hacker 1999). . . . .	11
2.2.	„Quarks lassen sich nicht räumlich voneinander trennen. Stattdessen entstehen neue Paare aus einem Quark und Anti-Quark, die mit den ursprünglichen Quarks wieder gebundene Zustände bilden“ (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 21). (Grafik nach Stohl 2010) . . . . .	14
2.3.	Die Graphen der potenziellen Energien in Abhängigkeit vom Abstand der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Dabei ist jeweils nur die Anziehung betrachtet (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S.13-23). Die Größenordnungen für das starke (c) und schwache (d) Potential sind die Reichweiten. Für die Gravitation (a) liegt das System Erde-Satellit zugrunde, bei der elektromagnetischen Wechselwirkung (b) das Wasserstoffatom. . . . .	15
2.4.	Die drei Farben rot $\nearrow$ , grün $\nwarrow$ und blau $\downarrow$ im zweidimensionalen Farbgitter. Der Winkel zwischen den eingezeichneten Farbladungsvektoren beträgt $120^\circ$ . Die Antifarben wären dem jeweiligen Farbvektor entgegengesetzt gezeichnet (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 33 f.) . . . . .	18
2.5.	Beispiele für aus Quarks zusammengesetzte Teilchen. Das Proton besteht aus drei Quarks ( $uud$ ), das Pion aus einem Quark und einem Anti-Quark ( $u\bar{d}$ ). . . . .	18
2.6.	Die Triplets bezüglich der starken Wechselwirkung der Quarks und Anti-Quarks der ersten Generation (nach Netzwerk Teilchenwelt (2015, S. 37)). .	19
2.7.	Die Dupletts bezüglich der schwachen Wechselwirkung der ersten Generation der Anti-/Materieteilchen. Die elektrische und die schwache Ladung erhöht sich von unten nach oben um $+1$ . Durch ein $W^+$ und ein $W^-$ können die Teilchen in den Dupletts ineinander umgewandelt, erzeugt oder vernichtet werden (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 30 f.). . . . .	20
2.8.	Die Ordnung der Teilchen der ersten Generation nach ihren Ladungen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 40 f.). . . . .	21
2.9.	Die drei Generationen der Materie- und Anti-Materieteilchen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 68 f.). . . . .	22

2.10. Sechs der Gluonen tragen jeweils eine Farbe und eine Anti-Farbe zur Änderung der Farbladung der Quarks, zwei tragen eine Kombination aus Farben und Anti-Farben, bei deren Aussendung sich die Farbe der Quarks nicht ändert. Sie lassen sich ebenfalls in das Farbgitter einordnen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 49 f.). . . . .	25
2.11. Der Wert für die Häufigkeit des Auftretens eines W-Teilchens bei einer bestimmten Ruheenergie. Es entsteht eine Gauß-Glocke (Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 56). . . . .	26
2.12. Beispiele für die Abstrahlung von Botenteilchen der elektromagnetischen, starken und schwachen Wechselwirkung (durch WW abgekürzt). . . . .	26
2.13. Fundamentale Vertices zur Darstellung der Kraftwirkung auf Anti-/Materieteilchen, sowie der Vernichtung und Erzeugung von Anti-/Materieteilchen (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 53 f.). . . . .	27
2.14. Umwandlung eines Myon. Die Ladungserhaltung wird einzeln für jeden Vertex und für die gesamte Umwandlung betrachtet. . . . .	28
2.15. Der $\beta$ -Zerfall, bei dem sich ein Neutron in ein Proton durch Aussendung eines $W^-$ umwandelt. Dieses zerfällt nach kurzer Zeit in ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino. . . . .	29
4.1. In diesem Event vom 18. Juni 2012 ist der Zerfall eines Higgs-Teilchen dargestellt. Die Protonen laufen orthogonal zur dargestellten Fläche aufeinander zu und kollidieren miteinander. Das entstehende Myon-Anti-Myon-Paar ist in rot dargestellt, das Elektron-Positron-Paar in grün (ATLAS 2015). . . .	43
4.2. Die Inhaltsfelder im Lehrplan, oben für Grundkurs, unten für den Leistungskurs (Schulministerium NRW 2014, S. 34, 47). Die Anknüpfungspunkte zur vorliegenden Arbeit sind schwarz hervorgehoben. . . . .	49

# TABELLENVERZEICHNIS

2.1. Für die vier fundamentalen Wechselwirkungen sind die Gleichungen für die potenziellen Energien, die Kopplungsparameter und die Reichweiten im Vergleich dargestellt (nach Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 24). . . . .	13
2.2. Die Ladungszahlen der Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung. . . .	24
4.1. Die Kompetenzbereiche aus den einheitlichen Prüfungsanforderung für die Abiturprüfung im Fach Physik in tabellarischer Darstellung (KMK 2004, S. 3 f.). . . . .	45
4.2. Die im Rahmen der Masterarbeit erstellten Aufgaben wurden nummeriert und in die tabellarische Darstellung der Prüfungsanforderungen 4.1 eingeordnet. Die Nummerierung ist in der gesamten Arbeit konsistent folgendermaßen: 1 AUFGABE KENNEN DER WECHSELWIRKUNGEN 2 AUFGABE GRUNDPFEILER DES STANDARDMODELLS 3 AUFGABE LADUNGEN 4 AUFGABE WECHSELWIRKUNGEN UND POTENZIELLE ENERGIEN 5 AUFGABE ORDNUNGSSCHEMA DES STANDARDMODELLS 6 AUFGABE BOTENTEILCHEN 7 AUFGABE FEYNMAN-DIAGRAMME . . . . .	46



# LITERATUR

- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Hrsg. (2014). Kernlehrplan Physik für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. URL: [www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_GOSt\\_Physik.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf) (besucht am 04.09.2015).
- Netzwerk Teilchenwelt (2015). Schulmaterialien zur Teilchenphysik. Hrsg. von Joachim Herz Stiftung. in Vorbereitung. Joachim Herz Stiftung Verlag.
- Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport, Hrsg. (2011). Lehrplan Gymnasium Physik. URL: [www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/lp\\_gy\\_physik\\_2011.pdf?v2](http://www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/lp_gy_physik_2011.pdf?v2) (besucht am 21.09.2015).
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, Hrsg. (2004). Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 01.12.1989 i.d.F. vom 05.02.2004. URL: [www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1989/1989\\_12\\_01-EPA-Physik.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1989/1989_12_01-EPA-Physik.pdf) (besucht am 31.08.2015).
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, Hrsg. (2005). Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10). URL: [www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf) (besucht am 31.08.2015).

# PHYSIK

- Bleck-Neuhaus, Jörn (2010). Elementare Teilchen. Moderne Physik von den Atomen bis zum Standard-Modell. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Coughlan, Guy und James Dodd (1996). Elementarteilchen. Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Braunschweig und Wiesbaden: Vieweg.
- Ellanger, Ullrich (2008). Vom Universum zu den Elementarteilchen. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Experiment, ATLAS, Hrsg. (2015). URL: [cds.cern.ch/record/1459500](http://cds.cern.ch/record/1459500) (besucht am 20.09.2015).

- Hacker, German (1999). URL: [erlangen.physicsmasterclasses.org/sm\\_groeo/sm\\_groeo\\_02.html](http://erlangen.physicsmasterclasses.org/sm_groeo/sm_groeo_02.html) (besucht am 21.09.2015).
- Ne'eman, Yuval und Yoram Kirsh (1995). Die Teilchenjäger. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Netzwerk Teilchenwelt, Hrsg. (2013). Materialsammlung. Kontextmaterialien für Lehrkräfte. Dresden.
- Particle Data Group, Hrsg. (2013). Particle Data Booklet.
- Stohl, Stefan (2010). URL: [www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/fair/panda/](http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/fair/panda/) (besucht am 21.09.2015).

## DIDAKTIK

- Blömeke, Sigrid u. a. (2006). „Analyse der Qualität von Aufgaben aus didaktischer und fachlicher Sicht. Ein allgemeines Modell und seine exemplarische Umsetzung im Unterrichtsfach Mathematik“. In: Unterrichtswissenschaft. Zeitschrift für Lernforschung 34/4, S. 330–357.
- Häußler, Peter und Gunther Lind (1998). „Erläuterungen zu Modul 1 mit Beispielen für den Physikunterricht. Weiterentwicklung der Aufgabekultur im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht“. In: Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung.
- Kauertz, Alexander und Hans E. Fischer (2009). „Standards und Physikaufgaben“. In: Kirchner, Ernst, Raimund Girwidz und Peter Häußler. Physikdidaktik. Theorie und Praxis. Heidelberg: Springer, S. 663–688.
- Leisen, Josef (2001). „Qualitätssteigerung des Physikunterrichtes durch Weiterentwicklung der Aufgabekultur“. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 54/7, S. 401–405.
- Leisen, Josef (2006). „Aufgabekultur im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht“. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 59/5, S. 260–266.
- Müller, Rainer, Rita Wodzinski und Martin Hopf, Hrsg. (2004). Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag.
- Wiesner, Hartmut, Horst Schecker und Martin Hopf (2011). Physikdidaktik kompakt. Freising: Aulis Verlag.

# Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich reiche sie erstmals als Prüfungsleistung ein. Mir ist bekannt, dass ein Betrugsversuch mit der Note „nicht ausreichend“ (5,0) geahndet wird und im Wiederholungsfall zum Ausschluss von der Erbringung weiterer Prüfungsleistungen führen kann.

Name: Andreas

Vorname: Rahel

Matrikelnummer: 3428769

Dresden, den 29. September 2015

Rahel Andreas