



NETZWERK
TEILCHENWELT



DIE VIER WECHSELWIRKUNGEN

Sämtliche bekannten Vorgänge in der Natur können mit vier grundlegenden Wechselwirkungen beschrieben werden. Die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung sind für die Teilchenphysik relevant, die Gravitation ausschließlich für makroskopische Objekte. Die vorliegenden Materialien ermöglichen eine systematische Einführung ins Thema.

IMPRESSUM Herausgeber: Michael Kobel, Thomas Trefzger **Autoren:** Manuela Kuhar (verantwortlich), Fabian Kuger **Redaktion:** Michael Rockstroh, Sascha Schmeling, Gerfried Wiener **Layout und Grafiken:** büro quer, www.buero-quer.de **Projektleitung:** Michael Kobel (Gesamtprojekt) Netzwerk Teilchenwelt | TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik | www.teilchenwelt.de, mail@teilchenwelt.de | Thomas Trefzger (Projekt Kontextmaterialien) Julius-Maximilians-Universität Würzburg | Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik **Redaktionsschluss:** März 2013 **Lizenz und Nutzung:** Creative Commons 2.0-by-nc-nd | Vervielfältigung und Weiterverbreitung des Inhalts ist bei Nennung der Quelle für Lehrzwecke ohne Rückfragen gestattet, sofern keine Veränderungen vorgenommen werden. Kommerzielle Nutzung, z.B. zu werblichen Zwecken oder in Lehrbüchern, ist ohne Rücksprache nicht gestattet. Es gilt das Impressum unter www.teilchenwelt.de/service/impressum.

PROJEKLEITUNG

KONTEXTMATERIALIEN

PARTNER

SCHIRMHERRSCHAFT

GEFÖRDERT VOM



DIE VIER WECHSELWIRKUNGEN

HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

Kurzbeschreibung

Sämtliche bekannten Vorgänge in der Natur können mit vier grundlegenden Wechselwirkungen beschrieben werden. Mit dem vorliegenden Material können diese eingeführt und systematisiert werden. Sie finden in diesem Dokument ein **Arbeitsblatt, Lösungen sowie ein zusammenfassendes Informationsblatt**. Letzteres enthält auch die Lösung der zweiten Aufgabe.

Fachliche Hintergrundinformationen rund um Elementarteilchen und Wechselwirkungen finden Sie im Dokument [Standardmodell_Infos] im gleichen Materialpaket. Die Präsentation [Standardmodell_Folien] bietet einführende Erklärungen und Grafiken zum Thema sowie Anregungen für Aktivitäten.

Einordnung im Unterricht

- ▶ Die Einführung der Wechselwirkungen bietet sich im Rahmen einer Unterrichtsreihe über Kern- oder Teilchenphysik an.
- ▶ Anschließend können Sie zur modernen Forschung mit Teilchenbeschleunigern oder zum Nachweis von Teilchen mittels Detektoren (Nebelkammer, Geigerzähler, ATLAS-Detektor) überleiten.
- ▶ Die anschließende Durchführung eines Projekttages (Masterclass) zur Teilchenphysik oder Astroteilchenphysik ermöglicht es den Jugendlichen, ihr Wissen aktiv umzusetzen und einen Einblick in die moderne Forschung zu erhalten. Mehr Informationen finden Sie auf folgender Webseite: <http://www.teilchenwelt.de/angebote/masterclasses>

Vorkenntnisse und didaktische Hinweise

Um die erste Aufgabe des Arbeitsblatts bearbeiten zu können, sollten die Jugendlichen zumindest die drei Elementarteilchen kennen, aus denen die stabile Materie aufgebaut ist: Elektronen, Up- und Down-Quarks. Die vier Wechselwirkungen sollten vorher in groben Zügen vorgestellt worden sein. Die Präsentation [Standardmodell_Folien] im vorliegenden Materialpaket bietet dafür Unterstützung.

Die zweite Aufgabe (Tabelle) kann zum Vergleich und zur Systematisierung dienen, wenn die Wechselwirkungen und ihre Eigenschaften vorher besprochen wurden. Sie kann allerdings auch als Rechercheaufgabe verwendet werden. Die Jugendlichen können beispielsweise die unten angegebenen Ressourcen verwenden, um die benötigten Informationen selbstständig zusammenzutragen.

Die Zusatzfragen bieten Anregungen für vertiefende Diskussionen nach einer Unterrichtsreihe oder einer Masterclass.

Ziele

Die Jugendlichen...

- ▶ ... beschreiben die Auswirkungen der vier Wechselwirkungen.
- ▶ ... lernen die drei Ladungsarten (elektrisch, stark, schwach) kennen.
- ▶ ... lernen die Austauschteilchen der elektromagnetischen, starken und schwachen Wechselwirkung kennen.
- ▶ ... vergleichen und systematisieren die Eigenschaften der vier Wechselwirkungen.



Einführung in das Standardmodell der Teilchenphysik:

<http://kworkquark.desy.de/kennenlernen/modul.teilchen-und-kraefte/1/index.html>

<http://particleadventure.org/german>

Themenheft zur Elementarteilchenphysik:

L. Matheitsch, S. Steurer: Elementarteilchen. ÖBV 2003; ISBN 978-3-209-03908-8

Mehr Links und Literaturtipps finden Sie auf folgender Webseite: www.teilchenwelt.de/material



DIE VIER WECHSELWIRKUNGEN

WAS DIE WELT ZUSAMMENHÄLT

Alle bekannten Vorgänge in der Natur lassen sich mit nur vier grundlegenden Wechselwirkungen beschreiben.

- Welche der vier Wechselwirkungen spielt für die beschriebenen Vorgänge jeweils die Hauptrolle? Wenn du meinst, dass mehrere Wechselwirkungen im Spiel sind, erkläre.
 - a) Ein Glas fällt vom Tisch.
 - b) Du telefonierst mit deinem Handy.
 - c) Ein Atomkern wandelt sich durch einen Beta-Zerfall in einen anderen um.
 - d) Dein Gehirn schickt einen Nervenimpuls zu einem Muskel.
 - e) Viele Atomkerne sind stabil.
 - f) Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus.
 - g) Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein.
 - h) Die Erde kreist um die Sonne.
 - i) Drei Quarks bilden ein Proton oder ein Neutron.
 - j) Zusatzaufgabe: In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern (Kernfusion).

- Was bewirken die vier Wechselwirkungen jeweils, und welche Eigenschaften haben sie? Füll die Tabelle aus.

Betroffene Teilchen	Starke Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung	Gravitation
Zugehörige Ladung				
Austauschteilchen				
Reichweite				
Wirkungen				

- Welche Wechselwirkungen spüren wir direkt im Alltag, welche nicht? Warum?
- Welche Wechselwirkung ist in Atomkernen stärker: Die elektromagnetische oder die starke Wechselwirkung? Begründe deine Antwort.
- Wie groß ist das Verhältnis zwischen der elektromagnetischen Anziehungskraft (Coulombkraft) zwischen zwei Elektronen und der Gravitationskraft, die sie aufeinander ausüben?
- Was unterscheidet die Gravitation von den anderen Wechselwirkungen?
- Warum können wir nicht durch feste Gegenstände hindurchgreifen?
- Beim Beta-Minus-Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, wobei ein Elektron und ein Antineutrino entstehen. Warum ist das Antineutrino notwendig?





DIE VIER WECHSELWIRKUNGEN

LÖSUNGEN



➤ Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?

- a) Ein Glas fällt vom Tisch:
 - Gravitation
- b) Du telefonierst mit deinem Handy:
 - Elektromagnetische Wechselwirkung
- c) Ein Atomkern wandelt sich durch einen Beta-Zerfall in einen anderen um:
 - Schwache Wechselwirkung
- d) Dein Gehirn schickt einen Nervenimpuls zu einem Muskel:
 - Elektromagnetische Wechselwirkung
- e) Viele Atomkerne sind stabil:
 - Starke Wechselwirkung
- f) Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus:
 - Elektromagnetische Wechselwirkung
- g) Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein:
 - Elektromagnetische Wechselwirkung
- h) Die Erde kreist um die Sonne:
 - Gravitation
- i) Drei Quarks bilden ein Proton oder ein Neutron:
 - Starke Wechselwirkung

j) Zusatzaufgabe: In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern (Kernfusion):

- Hier spielen alle vier Wechselwirkungen eine Rolle. Indirekt beteiligt sind die Gravitation und die elektromagnetische Wechselwirkung; die starke und schwache Wechselwirkung bestimmen die Kernfusionsreaktion direkt.
- Durch die **Gravitation** werden die Teilchen im Inneren der Sonne sehr stark zusammengepresst. Der extreme Druck und die hohe Temperatur sind notwendig, um die Kernfusion zu ermöglichen: Die Energie der Protonen muss hoch genug sein, damit sie ihre **elektromagnetische Abstoßung** überwinden können. Erst wenn die Protonen sich näher als etwa 10^{-15} m kommen, überwiegt die **starke Wechselwirkung** und hält sie zusammen.
- Ein Atomkern aus vier Protonen wäre allerdings nicht stabil. Um einen stabilen Heliumkern zu bilden, müssen sich zwei Protonen jeweils in ein Neutron umwandeln (indem sich jeweils ein Up-Quark in ein Down-Quark umwandelt). Das ermöglicht die **schwache Wechselwirkung**.



➤ Welche Wechselwirkungen spüren wir direkt im Alltag, welche nicht? Warum?

- Die Reichweiten der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung sind prinzipiell unbegrenzt. Daher spielen sie für makroskopische Objekte eine Rolle, so dass wir sie direkt spüren.
- Die starke und die schwache Wechselwirkung spüren wir nicht direkt, da ihre Reichweiten zu gering sind. Jedoch spielen sie trotzdem eine lebenswichtige Rolle: Die starke Wechselwirkung sorgt dafür, dass Atomkerne stabil sein können; die schwache Wechselwirkung ermöglicht unter anderem die Kernfusion, mit der die Sonne ihre Energie erzeugt – ohne sie gäbe es kein Leben auf der Erde.

➤ Welche Wechselwirkung ist in Atomkernen stärker: Die elektromagnetische oder die starke Wechselwirkung? Begründe deine Antwort.

- Die anziehende Kraft zwischen Protonen, welche von der starken Wechselwirkung erzeugt wird, muss deutlich stärker sein als die elektromagnetische Abstoßung zwischen ihnen – sonst könnten sich keine stabilen Atomkerne bilden.
- Dieser Vergleich gilt allerdings nur bei Teilchenabständen, die in der Größenordnung eines Protonendurchmessers liegen. Bei größeren Abständen fällt die Kraftwirkung der starken Wechselwirkung deutlich ab, bis sie ab etwa 10^{-15} m keine Rolle mehr spielt. Mehr Informationen zu den Stärken der vier Wechselwirkungen finden Sie auf der nächsten Seite und im Dokument [Standardmodell-Infos]. In der Präsentation [Standardmodell_Folien] finden Sie auch eine Grafik zum Thema.



DIE VIER WECHSELWIRKUNGEN

LÖSUNGEN



➤ Wie groß ist das Verhältnis zwischen der elektromagnetischen Anziehungskraft (Coulombkraft) zwischen zwei Elektronen und der Gravitationskraft, die sie aufeinander ausüben?

- ▶ Die Gravitationskraft zwischen zwei Massen lässt sich folgendermaßen berechnen: $F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
- Die Coulombkraft zwischen zwei elektrischen Ladungen ist durch folgende Formel gegeben: $F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$
- Berechnet man das Verhältnis der zwei Kräfte, fällt der Abstand r weg: $\frac{F_C}{F_G} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 G m_1 m_2}$
- Gravitationskonstante $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$ Elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
- Masse eines Elektrons $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ Elektrische Ladung eines Elektrons $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

▶ Setzt man alles ein, ergibt sich ein Verhältnis von etwa $F_C/F_G \approx 10^{42}$

- ▶ Die elektromagnetische Wechselwirkung ist also sehr viel stärker als die Gravitation. Dies mag zunächst der Intuition widersprechen – schließlich sind die Auswirkungen der Gravitation bzw. Schwerkraft für uns meist offensichtlicher als diejenigen der elektromagnetischen Wechselwirkung. Doch letztere spielt für uns eine mindestens ebenso lebenswichtige Rolle, da sie unter anderem für den Zusammenhalt von Atomen und Molekülen verantwortlich ist.
- ▶ Der berechnete Zahlenwert gilt nur für die Kräfte zwischen Elektronen bei relativ großen Abständen (mehr als einige Mikrometer). Ob das Gravitationsgesetz bei kleineren Abständen gilt, ist bisher experimentell nicht überprüft. Mehr Informationen zu den Stärken der vier Wechselwirkungen finden Sie im Dokument [Standardmodell-Infos].

➤ Was unterscheidet die Gravitation von den anderen Wechselwirkungen?

- ▶ Die Gravitation passt nicht ins Standardmodell der Teilchenphysik, sondern wird durch die Allgemeine Relativitätstheorie beschrieben. Insbesondere wurden noch keine Austauschteilchen experimentell nachgewiesen. Weiterhin ist die Gravitation um viele Größenordnungen schwächer als die elektromagnetische Wechselwirkung.

➤ Warum können wir nicht durch feste Gegenstände hindurchgreifen?

- ▶ Die elektromagnetische Abstoßung zwischen den Elektronen der Atomhüllen verhindert, dass sich Atome zu nahe kommen. Hinzu kommt das Pauli-Prinzip, das besagt, dass sich zwei Elektronen innerhalb eines Atoms nicht im gleichen Zustand befinden können. Deswegen können sich gefüllte Orbitale nicht überlappen.

➤ Beim Beta-Minus-Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, wobei ein Elektron und ein Antineutrino entstehen. Warum ist das Antineutrino notwendig?

- ▶ Der Grund ist die Ladungserhaltung: Die elektrische, starke und schwache Ladung müssen bei Zerfällen jeweils erhalten bleiben.
- ▶ Betrachten wir also den Beta-Minus-Zerfall auf der Ebene der Elementarteilchen: Ein Down-Quark (d) wandelt sich in ein Up-Quark (u) um. Dabei entstehen ein Elektron e^- und ein Anti-Elektron-Neutrino $\bar{\nu}_e$: $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$
- Die Ladungen der beteiligten Teilchen sind wie folgt (siehe Elementarteilchen-Steckbriefe im gleichen Materialpaket):
- ▶ Elektrische Ladung: $-1/3 = +2/3 -1+0$
- ▶ Starke Ladung: rot/grün/blau = rot/grün/blau + 0 + 0
- ▶ Schwache Ladung: $-1/2 = 1/2 -1/2 -1/2$

Das Up-Quark und das Elektron würden ausreichen, damit die starke Ladung und die elektrische Ladung erhalten bleiben – doch um auch die Erhaltung der schwachen Ladung zu gewährleisten, muss zusätzlich ein Antineutrino entstehen.



DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

ELEMENTARTEILCHEN UND WECHSELWIRKUNGEN

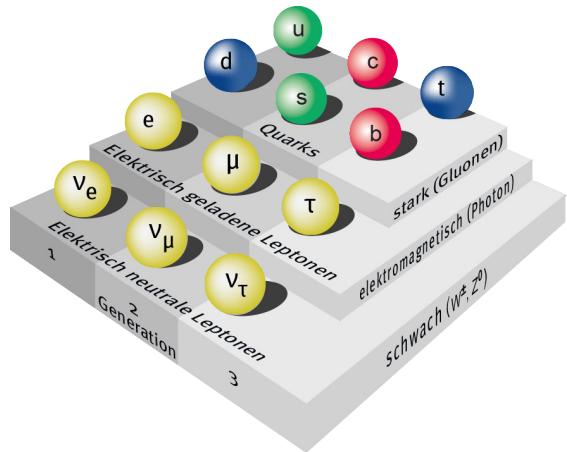
Alle Materie besteht aus **Elementarteilchen**, die sich nicht weiter zerteilen lassen:

- Sechs Arten von **Quarks** ...
- ... und sechs Arten von **Leptonen**:
 - Elektronen, Myonen und Tauonen (mit elektrischer Ladung),
 - und drei Arten von Neutrinos (ohne elektrische Ladung).

Stabile Materie in unserer Umgebung besteht nur aus Elektronen, Up- und Down-Quarks.

Von den Teilchensorten der ersten Generation gibt es jeweils zwei massereichere, instabile "Kopien" mit gleichen Ladungen (2. und 3. Generation).

Zu jeder Materiateilchensorte gibt es eine Antiteilchensorte mit gleicher Masse, aber entgegengesetzten Ladungen.



Es gibt vier **Wechselwirkungen**, mit denen man alle Vorgänge in der Natur beschreiben kann. Sie werden durch **Austauschteilchen** vermittelt.

Betroffene Materie-Teilchen	Starke Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung	Gravitation
Zugehörige Ladung	Quarks	Quarks und elektrisch geladene Leptonen	Alle	Alle
Austauschteilchen	starke Ladung (Farbladung)	elektrische Ladung	schwache Ladung	
Reichweite	Gluonen	Photon	W^+, W^-, Z^0	W^+, W^-, Z^0
Wirkungen	10^{-15} m (Protonendurchmesser)	unbegrenzt	10^{-18} m (1/1000 Protonendurchmesser)	unbegrenzt