

## Standardmodell der Teilchenphysik

Man könnte das Standardmodell als Schatztruhe des Wissens über die Materie bezeichnen. Rein formal gliedert es sich in die für den Aufbau der Materie verantwortlichen Elementarteilchen und, untrennbar damit verknüpft, in die zwischen diesen Teilchen wirkenden Kräfte.

Beginnen wir mit den Elementarteilchen. Wie nachfolgende Abbildung zeigt, zerfällt dieser Bereich in die Gruppe der Quarks und in die der Leptonen (griechisch *leptós* = dünn klein). Die Namen der Quarks, up, down, charm usw., bezeichnet man im Englischen als Flavour, zu deutsch etwas holprig als Geschmack. Quarks tragen eine elektrische Ladung: entweder plus  $2/3$  oder minus  $1/3$  der Elementarladung des Elektrons. Zudem besitzen Quarks noch eine sogenannte Farbladung, auf die wir in einem späteren Tutorial eingehen werden.

Drei Generationen  
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV
Ladung →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
Spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
Name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
Quarks	4,8 MeV $-1/3$ <b>d</b> down	95 MeV $-1/3$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-1/3$ <b>b</b> bottom
	<2 eV 0 $1/2$ <b><math>\nu_e</math></b> Elektron- Neutrino	<0,19 MeV 0 $1/2$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Myon- Neutrino	<18,2 MeV 0 $1/2$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau- Neutrino
	0,511 MeV -1 $1/2$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $1/2$ <b><math>\mu</math></b> Myon	1,777 GeV -1 $1/2$ <b><math>\tau</math></b> Tau
Leptonen			

(Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>)

Quarks dienen zum Aufbau einer Vielzahl massereicher Teilchen. So bilden je drei Quarks ein Baryon (griechisch *barýs* = schwer), z.B. ein Proton oder ein Neutron.

Das positiv geladene Proton besteht aus zwei up- und einem down-Quark, das elektrisch neutrale Neutron aus einem up- und zwei down-Quarks. Das negativ geladene Antiproton ist logischerweise aus Antiquarks aufgebaut: aus zwei Anti-up-Quarks mit jeweils minus  $2/3$  Ladung und einem Anti-down-Quark der Ladung plus  $1/3$ . Zusammen ergibt das die beobachtete Ladung des Antiprotons von minus 1. Das aus einem Anti-up- und zwei Anti-down-Quarks zusammengesetzte Antineutron ist wiederum ungeladen, da eine Ladung von minus  $2/3$  plus zwei Mal eine Ladung von plus  $1/3$  die Gesamtladung Null ergibt.

Neben den Baryonen gibt es noch die Gruppe der Mesonen. Diese Teilchen sind aus nur zwei Quarks aufgebaut. Zusammen bilden die Baryonen und Mesonen die Gruppe der Hadronen (griechisch *hadrós* = dick, stark).

Baryonen und Leptonen lassen sich zu drei Teilchenfamilien bzw. Generationen zusammenfassen, wobei jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen zu einer Familie gehören. Allein aus den Teilchen der ersten Generation, dem up- und dem down-Quark, sowie aus dem Elektron und dem Elektron-Neutrino sind alle bekannten Atome bzw. deren Kernbausteine, die Protonen und Neutronen, aufgebaut. Warum die Natur darüber hinaus zwei weitere Teilchenfamilien „geschaffen“ hat, ist derzeit noch nicht verstanden.

Quarks und Leptonen bezeichnet man auch als Fermionen. Fermionen haben einen halbzahligen Spin und unterliegen dem Paulischen Ausschließungsprinzip. Es besagt, dass beispielsweise zwei Elektronen in einem Atom nicht in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen können.

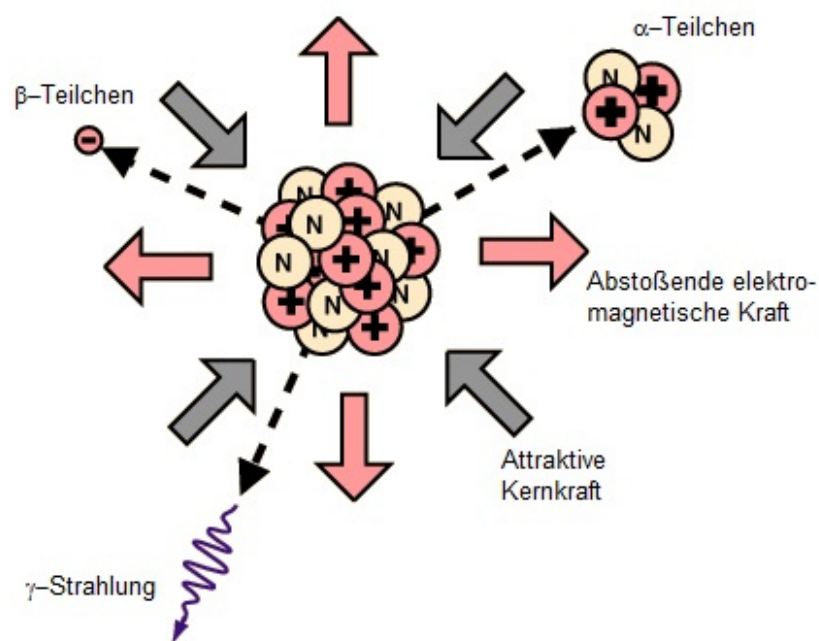
Zusammen mit den jeweiligen Antiteilchen besteht also die gesamte beobachtbare Materie lediglich aus sechs Quarks und sechs Leptonen. Die den Teilchen entsprechenden Antiteilchen sind im Standardmodell nicht gesondert aufgeführt.

Nicht enthalten im Standardmodell ist auch die sogenannte Dunkle Materie (DM) sowie die Dunkle Energie (DE). Da man bislang keinerlei Hinweise hat, aus was DM und DE bestehen, ist das nicht weiter verwunderlich. Sollte es jedoch gelingen, z.B. durch die Experimente am LHC, die Komponenten der DM zu entschlüsseln – theoretisch könnte es sich um supersymmetrische Teilchen handeln –, so müsste

das Standardmodell eine entsprechende Erweiterung erfahren. Gleiches gilt für die DE.

Nun zu den Wechselwirkungen, den fundamentalen Kräften des Standardmodells. Dazu eine Anmerkung vorab: In diesem Tutorial werden die verschiedenen Kräfte zunächst in einem allgemeinen Überblick vorgestellt. Eine eingehende Betrachtung der einzelnen Wechselwirkungen ist nachfolgenden Tutorials vorbehalten.

Wie das folgende Bild veranschaulicht, wirken in einem Atomkern drei Kräfte: die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft.



(Quelle: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>)

Die starke Kraft bzw. starke Wechselwirkung bindet die Quarks in den Kernbausteinen, den Nucleonen, und sie sorgt für den Zusammenhalt der einzelnen Nucleonen im Atomkern. Sie wirkt nur zwischen Quarks. Die schwache Kraft bzw. schwache Wechselwirkung ist verantwortlich für die Umwandlung von Quarks in andere Quarks und von Leptonen in andere Leptonen. Makroskopisch zeigt sich das z.B. beim Zerfall freier Neutronen in Protonen und beim radioaktiven  $\beta$ -Zerfall von Atomkernen (Umwandlung eines Kernneutrons in ein Proton plus Emission eines Elektrons). Die elektromagnetische Kraft wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen attraktiv auf Ladungen entgegengesetzter Polarität, abstoßend auf

Masse →	0
Ladung →	0
Spin →	1
Name →	Photon

0
0
1
Gluon

91,2 GeV
0
1
Z Boson

80,4 GeV
±1
1
W Boson

Eichbosonen

gleichnamige Ladungen (Coulomb-Gesetz). Außerdem zeigt sie sich in der Wirkung von Magnetfeldern auf geladene Teilchen (Lorentz-Kraft).

Die theoretischen Grundlagen der drei genannten Wechselwirkungen liefern sogenannte Quantenfeldtheorien, wobei die starke Kraft durch die Quantenchromodynamik beschrieben wird, die elektromagnetische und schwache Kraft durch die Quantenelektrodynamik. Grundlage dieser quantisierten Theorien sind Kraftfelder, die ihre Ursache in Ladungen haben. Die zu den Feldern gehörenden Quanten, die man auch als Feldquanten bezeichnet, vermitteln die Kräfte zwischen den Elementarteilchen. In der Quantenelektrodynamik sind elektrische Ladungen die Quelle der Felder, in der Quantenchromodynamik sind es

die bereits erwähnten Farbladungen der Quarks.

Die elektromagnetische Wechselwirkung kennt nur eine Sorte von Feldquanten, nämlich Photonen. Zur schwachen Wechselwirkung gehören drei Feldquanten: das neutrale Z-Boson und zwei W-Bosonen entgegengesetzter Ladung. Man bezeichnet sie auch als Weakonen. Die Feldquanten der starken Wechselwirkung nennt man Gluonen. Der Name entstammt der Vorstellung, dass diese Feldquanten wie Leim zwischen den Quarks wirken. Insgesamt gibt es acht unterschiedliche Gluonen. Wie in der Abbildung oben vermerkt, bezeichnet man die Kräfte vermittelnden Feldquanten auch als Eichbosonen. Der Name deutet darauf hin, dass es sich bei den Quantenfeldtheorien um sogenannte Eichtheorien handelt. Das bedeutet, man kann bestimmte Größen lokal frei wählen, ohne dass sich an der Wechselwirkung etwas ändert. Anschaulich benennt man die Feldquanten auch als „Austauschteilchen“. Der Begriff verdeutlicht, dass die Wechselwirkungen auf einem gegenseitigen Austausch von Feldquanten zwischen den Teilchen beruhen.

Alle Feldquanten sind Bosonen. Bosonen besitzen ganzzahlige Ladungen, und im Gegensatz zu den Fermionen unterliegen sie nicht dem Paulischen Ausschließungsprinzip.

Seine vorläufige Vollendung erfuh das Standardmodell mit dem experimentellen Nachweis des seit langem postulierten Higgs-Bosons im Juni 2012 am LHC. Damit war die Existenz eines allgegenwärtigen Higgs-Feldes aufgezeigt, das den Elementarteilchen – und selbst dem Higgs-Boson – Masse verleiht.

Die folgende Tabelle veranschaulicht das komplette Standardmodell der Teilchenphysik.

Drei Generationen  
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	
<b>Quarks</b>					
	$<2$ eV	$<0,19$ MeV	$<18,2$ MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron- Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon- Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau- Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
<b>Leptonen</b>	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson	<b>Eichbosonen</b>

(Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>)

Noch eine Anmerkung zu den Eichbosonen. Sie entstehen spontan ohne äußere Ursache aus den jeweiligen Feldern. Aus Sicht der klassischen Physik stellen diese Prozesse eine Verletzung des Energiesatzes dar. Die Quantenmechanik hat damit jedoch keine Schwierigkeiten. Dort „entschärft“ die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation das Problem. Sie besagt: Das Produkt aus der Unbestimmtheit von Energie und Zeit ist stets größer als  $h / 2\pi$  ( $h$  = Plancksches Wirkungsquantum).

$$\Delta E \times \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Mit anderen Worten: Je präziser die Energie eines spontan entstehenden Teilchens festgelegt wird, umso unbestimmter ist die Zeit, während der dieses Teilchen existent sein kann. Oder anders ausgedrückt: Die Quantenmechanik gestattet es, für eine extrem kurze Zeit einen relativ hohen Energiebetrag, z.B. in Gestalt der Masse eines Teilchens, aus dem Nichts zu schöpfen. Da diese Teilchen bereits wieder verschwunden sind, ehe sie direkt beobachtet werden können, bezeichnet man sie auch als virtuelle Teilchen.

Kommen wir noch auf die vierte fundamentale Wechselwirkung zu sprechen: die Gravitation. Dem aufmerksamen Leser dürfte nicht entgangen sein, dass sie nicht im Standardmodell enthalten ist. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (ART) versteht Gravitation als eine Bewegung der Materie entlang den Geodäten einer unter dem Einfluss von Materie/Energie gekrümmten vierdimensionalen Raumzeit. Der entscheidende Punkt: Im Gegensatz zu den Theorien der drei anderen Wechselwirkungen ist die ART eine klassische, nichtquantisierte Theorie. Bislang sind alle Versuche einer Quantisierung der Gravitation gescheitert. Eine Wende könnte mit Hilfe der Stringtheorie gelingen. Zwar ist diese Theorie erst in Ansätzen verstanden, dennoch ist man im Zuge der Rechnungen auf einen String gestoßen, dessen Schwingungszustand exakt einem masselosen Boson mit dem Spin 2 entspricht, dem postulierten Austauscheteilchen der gravitativen Wechselwirkung. Das würde bedeuten: Die Gravitation ist Bestandteil der Stringtheorie! Sollte die Stringtheorie entgegen aller Vorbehalte dereinst doch zu einer widerspruchsfreien Theorie zur Beschreibung der Elementarteilchen reifen, die Gravitation könnte wohl in das Standardmodell aufgenommen werden.