

## Standardmodell der Elementarphysik -Teil 2: Elementarteilchen

Mit dem Ausarbeiten des Standardmodells zog auch eine Klassifizierung in den Teilchenzoo ein. Es wird jetzt ein klarer Trennungsstrich zwischen Elementarteilchen und Teilchen, die aus Elementarteilchen bestehen, gezogen. Die Einteilung ist ähnlich der Einteilung in der Chemie zwischen Atom und Molekül. Die Elementarteilchen gelten aktuell als unteilbar.

Diese Eigenschaften sind aber kaum mit den uns bekannten Eigenschaften in der makroskopischen Welt vergleichbar, wenngleich sie mit Namen versehen wurden, die uns aus der bekannten Welt der sichtbaren Größenordnungen geläufig sind.

Hier eine kurze Einführung in die Eigenschaften von Elementarteilchen:

- **Ruheenergie:** Sie wird als Äquivalent der gut bekannten Masse über die Einstein'sche Formel  $E=mc^2$  (E: Energie, m: Ruhemasse, c: Lichtgeschwindigkeit) verwendet. Sie wird in eV (Elektronenvolt) angegeben. Ein  $eV/c^2$  entspricht einer Masse von  $1,783 \cdot 10^{-36} \text{kg}$ . Die Verwendung der Energie statt der Masse ist vor allem bei vielen Experimente in der Atomphysik bei annähernder Lichtgeschwindigkeit vorteilhaft, da die Energie der Teilchen für den Erfolg des Experiments entscheidend ist.
- **Elektrische Ladung:** Dieses Phänomen ist allgemein bekannt. Der elektrische Strom ist nichts anderes als die Übertragung von elektrischer Ladung. Hat ein Teilchen keine elektrische Ladung, so nimmt es nicht an der elektromagnetischen Wechselwirkung teil.
- **Spin:** Er veranschaulicht den Eigendrehimpuls des Teilchens. Der Spin bleibt für jedes Teilchen gleich, egal in welchem Zustand es sich befindet.
- **Innere Parität:** Sie definiert die Zugehörigkeit des Teilchens zur Materie (=1) oder zur Antimaterie (=-1)
- **Leptonenzahl:** Diese ladungsartige Quantenzahl beträgt +1 bei jedem Lepton, -1 bei jedem Antilepton und Null bei allen anderen Elementarteilchen. Die Leptonenzahl ist vor und nach einem physikalischen Experiment immer gleich (Erhaltungssatz). Ein fiktives anschauliches Beispiel für den Erhaltungssatz: An dem Vorgang sind zwei Leptonen beteiligt, durch das Experiment entstehen vier Leptonen, dann müssen noch zwei Antileptonen entstanden sein, damit die Gesamtleptonenzahl ( $4-2=2$ ) wieder zwei ist.
- **Farbladung:** Sie ist mit keiner Eigenschaft auf makroskopischer Ebene vergleichbar, also auch nicht mit der uns bekannten durch das Licht hervorgerufenen Farbe. Sie beschreibt wie sich Teilchen (Quarks und Gluonen) unter der starken Wechselwirkung verhalten. Es gibt die Farbladungen grün, blau und rot und die entsprechenden Antifarben. Hat ein Elementarteilchen keine Farbladung, so nimmt es nicht an der Starken Wechselwirkung teil.
- **Schwacher Isospin:** Damit werden Teilchen belegt, die an der Schwachen Wechselwirkung teilnehmen. Wenn er den Wert Null hat und das Teilchen auch keine elektrische Ladung trägt, ist das Teilchen nicht an der Schwachen Wechselwirkung beteiligt.
- **Baryonenzahl:** Mit dieser Quantenzahl werden alle Elementarteilchen belegt. Aus historischen Gründen haben Quarks eine Baryonenzahl von  $1/3$  und Antiquarks von  $-1/3$ . Alle anderen Elementarteilchen haben die Zahl Null. Auch hier gilt der Erhaltungssatz, d.h., die Baryonenzahl muss vor und nach jedem physikalischen Vorgang gleich sein (ähnlich der Leptonenzahl).

# Standard-Modell der Elementarteilchen

			Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
			I	II	III		
Masse			$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Ladung			$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
			<b>U</b> Up	<b>C</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
	<b>QUARKS</b>		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
			$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
			<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b><math>\gamma</math></b> Photon	
	<b>LEPTONEN</b>		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
			-1	-1	-1	0	
			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
			<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Muon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
			$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
			0	0	0	$\pm 1$	
			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
			<b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Muon-Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	
							<b>EICHBOSONEN</b> <b>VEKTORBOSONEN</b>
							<b>SKALARBOSONEN</b>

Bild: Übersicht der aktuell nachgewiesenen Elementarteilchen

Quelle:

[https://de.wikipedia.org/wiki/Lepton#/media/Datei:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles-de.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Lepton#/media/Datei:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg)

Aus dem Bild geht hervor, dass die Wissenschaftler aktuell vier Klassen von Elementarteilchen unterscheiden. Die Leptonen und Quarks gehören zu den Fermionen, die die Grundbausteine der Materie sind. Die Eich- oder Vektorbosonen ermöglichen Wechselwirkungen zwischen den Leptonen und Quarks und somit den Aufbau von Teilchen zu den uns bekannten Atomen. Das Higgs-Teilchen (auch Higgs- oder Skalarboson genannt) vermittelt die Beziehung zum allgegenwärtigen Higgs-Feld. Durch die Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen und Higgs-Feld wird den Elementarteilchen ein zusätzlicher Masseanteil zugewiesen. Neben der aus dem Alltag bekannten Materie gibt es noch die Antimaterie, d.h., zu jedem Elementarteilchen gibt es auch ein Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung. Treffen Teilchen und Antiteilchen aufeinander, so werden beide vollständig in Photonen (umgangssprachlich in Energie) umgewandelt. Die Eigenschaften, nach denen die Elementarteilchen unterschieden werden, charakterisieren auch ihr Zusammenwirken mit den Elementarkräften.

### a) Leptonen

Die Leptonen selbst bilden keine anderen Teilchen. Sie gehören zu den Fermionen und haben einen Spin von  $+1/2$  (halbzahliger Spin). Zu den Leptonen gehört das Elektron als bekanntester Vertreter. Das Elektron ist Bestandteil des Atoms und hat eine negative elektrische Ladung in der Größenordnung einer Elementarladung. Seine direkten größeren Verwandten sind das Myon und das Tauon. Diese beiden Leptonen besitzen ebenfalls eine negative elektrische Ladung wie das Elektron und zerfallen aber nach Bruchteilen von Sekunden. Am Zerfall des Myons wurde übrigens die Zeitdehnung nach der speziellen Relativitätstheorie nachgewiesen. Zu den Leptonen gehören auch die Neutrinos, die nur selten mit anderen Teilchen wechselwirken. Zu Elektron, Myon und Tauon existieren jeweils Äquivalent-Neutrinos. Jedes der sechs Leptonen besitzt einen Gegenpart in der Antimaterie, das Anti-Lepton (z.B. Antielektron, auch Positron genannt). Antileptonen besitzen statt der negativen elektrischen Ladung eine positive elektrische Ladung. Die Leptonen unterliegen der Gravitation, der Schwachen Kernkraft sowie - mit Ausnahme der elektrisch neutralen Neutrinos - der elektromagnetischen Wechselwirkung.

### b) Quarks

Die Quarks gehören zu den Fermionen und sind die Bausteine der Teilchen, die nicht zu den Elementarteilchen zählen. Aus ihnen werden die Baryonen (jeweils drei Quarks) und die Mesonen (jeweils ein Quark und ein Antiquark) gebildet. Baryonen und Mesonen werden zu Hadronen zusammengefasst. Zu den Baryonen gehören u.a. Protonen und Neutronen, die die Bausteine der Atomkerne sind. Mesonen sind instabile extrem kurzlebige Teilchen, die in der kosmischen Strahlung nachgewiesen oder experimentell erzeugt werden. Die Quarks besitzen gebrochene elektrische Ladungen ( $2/3$  oder  $-1/3$  der Elementarladung), einen halbzahligen Spin (wie die Leptonen), eine Farbladung (rot, grün oder blau) und einen schwachen Isospin. Sie unterliegen allen vier Grundkräften. Neben den genannten Teilchen können Quarks auch Tetraquarks (zwei Quarks und zwei Antiquarks) sowie Pentaquarks (vier Quarks plus ein Antiquark) bilden. Quarks treten nur in Verbindungen auf, sie können im Gegensatz zu den Leptonen nicht als Einzelteilchen existieren, da es nur farblose Gesamtzustände geben kann.

### c) Eichbosonen

Die Eichbosonen sind die Träger der Wechselwirkungen bzw. der Kraftübertragung zwischen den Leptonen und Quarks. Alle Eichbosonen sind Vektorteilchen, das heißt, sie sind charakterisiert durch einen Wert und die Vorgabe der Richtung (z.B. ist die Geschwindigkeit auch ein Vektor: Größe der Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung)

Gluonen: Die größte Gruppe bilden die masselosen Gluonen. Der übersetzte Name bedeutet Kleber. Sie halten die Quarks in ihren gebundenen Zuständen, den Teilchen, zusammen und verhindern das Auseinanderdriften der Protonen und Neutronen im Atomkern. Sie sind die Träger der starken Wechselwirkung und besitzen keine elektrische Ladung aber einen Spin der Größe 1. Außerdem besitzen sie eine Farbladung wie die Quarks. Ihre Farbladung besteht jeweils aus einer Farbe und einer Antifarbe. Nach der Theorie können Gluonen auch selbst größere Teilchen ohne die Mitwirkung von Quarks bilden, die bisher hypothetischen Glueballs. Theoretisch könnte es neun Arten von Gluonen geben. Allerdings sind nur acht Arten nachgewiesen. Jedes Gluon beschreibt den Übergang von einer Farbe zu einer anderen bzw. zum farblosen Zustand. Das neunte würde eine unendliche Reichweite der Starken Kernkraft bedingen, was allerdings den bekannten Verhältnissen widerspricht.

W- und Z-Boson: Die zweite Gruppe beinhaltet die zwei Arten von W-Bosonen (das Teilchen  $W^+$ -Boson und das Antiteilchen  $W^-$ -Boson) und das Z-Boson. Diese Elementarteilchen sind Träger der Schwachen Kernkraft und wirken auf Quarks und Leptonen. Die W-Bosonen sind elektrisch geladen, während das

Z-Boson elektrisch neutral ist. Alle besitzen einen Spin von 1. Sie sind verantwortlich für die Kernfusion und die Kernspaltung und können Neutronen in Protonen umwandeln. Im Gegensatz zu den Gluonen und Photonen wird den W- und Z-Bosonen durch die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld eine Ruhemasse verliehen.

Photon: Das dritte Eichboson ist das bekannte Photon als Überträger der Elektromagnetischen Kraft, das ja auch das Licht überträgt. Es besitzt keine Ruhemasse aber einen Spin gleich 1. Allerdings hat es eine Äquivalenzmasse, ausgedrückt durch seine Energie  $E_{\text{photon}}$ , sofern es sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Die Höhe der Masse hängt von der Frequenz der Strahlung ab.

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu \quad \text{mit } h \text{ als Plancksches Wirkungsquantum, } \nu \text{ Frequenz der Strahlung}$$
$$m = E_{\text{photon}} / c^2 \quad \text{mit } m \text{ als Masse und } c \text{ als Lichtgeschwindigkeit}$$

#### d) Higgs-Boson

Dieses Boson wurde erst vor kurzem in Genf am CERN, dem aktuell größten Teilchenbeschleuniger nachgewiesen. Vorausgesagt wurde es schon länger vom britischen Forscher James Higgs. Es besitzt als einziges Elementarteilchen keinen Spin und ist ein skalares Teilchen (wird also nur durch einen Wert bestimmt, wie z.B. die Masse eines Körpers). Das Higgs-Teilchen ist verantwortlich für die Wechselwirkung der anderen Elementarteilchen mit dem Higgs-Feld, das überall gegenwärtig ist. Nur Elementarteilchen mit einer Ruhemasse können mit dem Higgs-Feld über das Higgs-Boson in Wechselwirkung treten. Das Photon mit einer Ruhemasse von Null führt somit keine Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld aus. Mit dem Higgs-Feld und seinen Wechselwirkungen lässt sich aber u.a. die nachgewiesene Masse der Z- und W-Bosonen erklären, die ohne Higgs-Feld masselos sein müssten. Man muss sich das Higgs-Feld ähnlich wie ein elektromagnetisches Feld vorstellen, dass dafür verantwortlich ist, dass man mobil telefonieren kann.

Wer nähere Informationen zum Thema benötigt, findet diese z.B. unter

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>
- <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/elementarteilchen-1817>
- [https://www.weltmaschine.de/physik/standardmodell\\_der\\_teilchenphysik/](https://www.weltmaschine.de/physik/standardmodell_der_teilchenphysik/)
- <http://www.teilchenphysik.at/wissen/das-standardmodell/>
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/standardmodell/451>