2 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

„Die ganze Physik kann so auf einer Seite DIN A4 zusammengefaßt werden. Diese enthält:
Die Tabelle 11.1 mit der Liste der Fermionen
Die Tabelle 1.2 mit der Liste der Wechselwirkungen
Die Einsteinsche Gleichung der Gravitation
Die Gleichung für die starke Wechselwirkung (QCD)
Die Gleichung für die elektroschwache Wechselwirkung
Außerdem benötigt man noch die folgenden Zahlen: [...]
Ist damit die Physik „fertig“ ? Nein. Warum 28 Zahlen? Lassen sich einige davon berechnen? Warum drei Generationen? Existiert das Higgs-Boson? Wie geht der Weg ins Innere der Materie weiter?“
[Lohrmann 1990], S. 147

2.1 Überblick

Wie das obige Zitat aus einem Klassiker der Elementarteilchenphysik verdeutlicht, erhebt das Standardmodell der Teilchenphysik den Anspruch, große Teile der modernen Physik in einer sehr kompakten Weise zusammen zu fassen. In diesem Kapitel sollen ausgehend von den Ergebnissen der klassischen Physik die zentralen Aussagen der aktuellen Elementarteilchenphysik dargestellt werden.

T. C. Brückner, *Zur Ontologie der Elementarteilchen,*
DOI 10.1007/978-3-658-09683-0_2, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

2.2 Von den Atomen zum Standardmodell

Ausgangspunkt für die Entwicklung der modernen Elementarteilchenphysik sind die Ergebnisse der klassischen Physik, die sich als eine Kombination der folgenden Theorien darstellen lassen:

1. Newtonsche Mechanik der Massenpunkte,
2. Elektromagnetische Kraft vom E- und B-Feld auf eine Ladung,
3. Maxwellsche Gleichungen für die Felder E und B,
4. spezielle Relativitätstheorie,
5. Gravitationskraft zwischen zwei Massen nach Newtons Gravitationsgesetz,

Weiterhin gehören hierzu die klassischen Anteile der folgenden Theorien:

1. Mechanik der starren und elastischen Körper,
2. Thermodynamik.

Diese Zusammenstellung von Theorien charakterisiert in etwa den Stand der Physik um 1900. Sie konnte einen Großteil der beobachteten Phänomene erklären, viele bekannte Phänomene wie z.B. der Photoeffekt standen jedoch in offenem Widerspruch zur klassischen Physik. Es sollte der Entwicklung der Quantenmechanik und darauf aufbauend der Formulierung der modernen Elementarteilchenphysik vorbehalten bleiben, im Einklang mit dem experimentellen Befund ein kohärentes Bild der modernen Physik zu formulieren, welches im Standardmodell der Elementarteilchenphysik gipfelt.

Seit den Schriften der vorsokratischen Naturphilosophen wird die Konzeption diskutiert, wonach die Materie aus kleinsten, unteilbaren

Tabelle 2.1: Überblick über einige der in den 80-er Jahren bekannten Teilchen [Bethge et al. 1991] mit den damals bekannten Werten. Aus heutiger Sicht sind einige der in diesem Werk angegebenen Werte veraltet. Die Tabelle enthält sowohl die elementaren Leptonen als auch die aus Quarks zusammengesetzten Mesonen und Baryonen (Massenangaben in (MeV/c^2) .

	Masse	q	S	P	I	I_3	B	L	s	c	b
	Leptonen										
e^-	0.511	-1	1/2				0	1	0	0	0
μ^-	105.66	-1	1/2				0	1	0	0	0
τ^-	1748.2	-1	1/2				0	1	0	0	0
ν_e	$\leq 46 \times 10^{-6}$	0	1/2				0	1	0	0	0
ν_μ	≤ 0.52	0	1/2				0	1	0	0	0
ν_τ	≤ 164	0	1/2				0	1	0	0	0
	Mesonen										
$\pi^\pm$	139.56	± 1	0	$-$	1	± 1	0	0	0	0	0
π^0	134.96	0	0	$-$	1	0	0	0	0	0	0
$K^\pm$	493.7	± 1	0	$-$	1/2	$\pm 1/2$	0	0	± 1	0	0
K_S^0	497.6	0	0	$-$	1/2	$-1/2$	0	0	1	0	0
K_L^0	497.6	0	0	$-$	1/2	$-1/2$	0	0	1	0	0
η	548.8	0	0	$-$	0	0	0	0	0	0	0
$D^\pm$	1869.4	± 1	0	$-$	1	1/2	0	0	0	0	0
D^0	1864.7	0	0	$-$	1/2	$-1/2$	0	0	0	± 1	0
$F^\pm$	1971.0	± 1	0	$-$	0	1/2	0	0	0	± 1	0
$B^\pm$	5270.8	± 1	0	$-$	1/2	$\pm 1/2$	0	0	0	0	± 1
B^0	5274.2	0	0	$-$	1/2		0	0	0	0	1
	Baryonen										
p	938.28	$+1$	1/2	$+$	1/2	$+1/2$	1	0	0	0	0
n	939.57	0	1/2	$+$	1/2	$-1/2$	1	0	0	0	0
Λ	1115.6	0	1/2	$+$	0	0	1	0	-1	0	0
Σ^+	1189.4	$+1$	1/2	$+$	1	$+1$	1	0	-1	0	0
Σ^0	1192.5	0	1/2	$+$	1	0	1	0	-1	0	0
Σ^-	1197.3	-1	1/2	$+$	1	-1	1	0	-1	0	0
Ξ^0	1314.9	0	1/2	$+$	1/2	$-1/2$	1	0	-2	0	0
Ξ^-	1321.3	-1	1/2	$+$	1/2	$+1/2$	1	0	-2	0	0
Ω^-	1672.45	-1	1/2	$+$	0	0	1	0	-3	0	0
Λ_c^+	2282.0	$+1$	1/2	$+$	0	0	1	0	0	$+1$	0

Partikeln besteht. Einer dieser Naturphilosophen, Demokrit, vertrat die Ansicht, dass es kleinste Teile der Materie, die sogenannten *A*tome, gäbe, die nicht mehr in kleinere Teile zerlegt werden können. Obwohl diese Konzeption seit ihrer ersten Formulierung mitunter heftig kritisiert wurde, stellt die Suche nach diesen Atomen seit langer Zeit ein wichtiges Unternehmen dar, da diese Atome die Beschreibung der gesamten Materie innerhalb des Rahmens einer einzigen Theorie ermöglichen. Die Formulierung des *S*tandardmodells stellt einen herausgehobenen Abschnitt innerhalb dieser Suche dar, möglicherweise den abschließenden.[1]

Zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts wurde die Materie im Rahmen der Theorie von N. Bohr beschrieben als Kombination der negativ geladenen *E*lektronen, die den positiv geladenen Kern umkreisen, vergleichbar den Planeten auf ihrem Weg um die Sonne. Die Existenz der Elektronen wurde erstmals von J. J. Thomson experimentell nachgewiesen. Während das Elektron bis heute als Elementarteilchen ohne innere Struktur verstanden wird, konnte gezeigt werden, dass sich der Atomkern aus einer Vielzahl kleinerer Bestandteile zusammensetzt, den Protonen und Neutronen, die wiederum aus kleineren Bestandteilen bestehen. Nach der Theorie der *Q*uarks konstituieren sich sowohl Protonen als auch Mesonen aus derartigen Quarks, die neben den Elektronen eine weitere Gruppe von Elementarteilchen darstellen.

Mittlerweile konnte experimentell gezeigt werden, dass es eine beeindruckende Anzahl verschiedener Arten von Teilchen gibt.[2]. Angesichts dieses verwirrenden *T*eilchenzoos, der sich aus so verschiedenen Teilchen wie Elektronen, Myonen, Kaonen, Pionen auf der einen Seite, Gluonen und Photonen auf der anderen Seite zusammensetzt, erhob

[1] [Appenzeller 1990].

[2] Bis Ende der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts konnten einige Dutzend von Teilchenarten nachgewiesen werden, zusätzlich eine große Anzahl von instabilen Teilchen. Einen Überblick über einige der in den 80-er Jahren bekannten Arten von Teilchen findet sich in Tabelle 2.1.

sich zunehmend die Frage nach der Existenz eines möglichen Klassifikationssystems innerhalb der Vielzahl der Teilchenarten, vergleichbar dem Periodensystem der Elemente[3]

Hierin besteht die zentrale Bedeutung des Standardmodells:[4] Es erlaubt es, alle derzeit bekannten Teilchen im Rahmen eines einzigen Modells zu beschreiben. Im Rahmen der von *S*MEP vorausgesetzten Theorien wird die gesamte beobachtbare Materie auf wenige Arten von elementaren Bausteinen zurückgeführt. Kern von *S*MEP sind die wenigen Arten von Wechselwirkungen, die zwischen diesen Elementarteilchen bestehen.

Das *S*MEP wurde in den 60er und 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelt mit dem Ziel, exakt die Existenz und Aktivität der Elementarteilchen in der Teilchenphysik zu beschreiben.[5] Zwei Physiker, nämlich der Amerikaner S. Weinberg und der Pakistani A. Salam entwickelten die allgemeine Version des *S*MEP, basierend auf dem vorherigen Werk des Amerikaners S. Glashow über die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung (1967). Obwohl das Modell zu diesem Zeitpunkt weder umfassend noch vollständig war, erhielten die drei Physiker 1979 den Nobelpreis. Zu diesem Zeitpunkt war nur ein Teil der beschriebenen Partikel experimentell nachgewiesen worden. Schon bald nach der Ehrung 1979 wurden verschiedene Ergänzungen für das *S*MEP formuliert, um so eine noch umfassendere Theorie zu haben. Eine wichtige experimentelle Bestätigung der Aussagen von *S*MEP stellte 1983 die Entdeckung des W- und des Z-Bosons

[3] [Nachtmann 1994], [Close et al. 1989], [Perkins 2000].

[4] An dieser Stelle sei angemerkt, dass entsprechend der üblichen Praxis unter Naturwissenschaftlern, der Terminus 'Standardmodell', der vielfach in physikalischen Lehrbüchern verwendet wird, kein *M*odell im exakten Sinn der Logik und der Wissenschaftstheorie bezeichnet, sondern eine Theorie mit einem ähnlichen Status wie andere physikalische Theorien. Im weiteren Verlauf wird hier diese Theorie als *S*tandardmodell der Elementarteilchenphysik bezeichnet, abgekürzt als *S*MEP.

[5] [Cottingham et al. 1998], [Brown et al. 1997], [Perkins 2000].

Tabelle 2.2: Die elementaren Fermionen des Standardmodells. Es werden jeweils Name, Äquivalenzklasse bezüglich der Äquivalenzrelation $\sim$ sowie die zuletzt gemessenen Werte von Masse, Ladung und Spin aufgeführt [Lohrmann 2001]. Die Äquivalenzrelation $\sim$ wird in Abschnitt 5.2.1 eingehend erläutert. Für jedes dieser 24 Teilchen existiert jeweils ein entsprechendes Anti-Teilchen. Jedes der 6 Quarks existiert mit den 3 *F*arbladungen *R*ot, *G*rün und *B*lau.

Teilchen	Klasse hinsichtlich $\sim$	Masse (mc^2)	Ladung	Spin
$u-Quark$	$P_1 - P_3$	$6\ MeV$	2/3	1/2
$c-Quark$	$P_4 - P_6$	$1,5\ GeV$	2/3	1/2
$t-Quark$	$P_7 - P_9$	$174\ GeV$	2/3	1/2
$d-Quark$	$P_{10} - P_{12}$	$10\ MeV$	-1/3	1/2
$s-Quark$	$P_{13} - P_{15}$	$150\ MeV$	-1/3	1/2
$b-Quark$	$P_{16} - P_{18}$	$4,2\ GeV$	-1/3	1/2
e^-	P_{19}	$0,511\ MeV$	-1	1/2
μ	P_{20}	$105,7\ MeV$	-1	1/2
τ^-	P_{21}	$1.777\ MeV$	-1	1/2
ν_e	P_{22}	$< 2,2\ eV$	0	1/2
ν_μ	P_{23}	$< 0,17\ MeV$	0	1/2
ν_τ	P_{24}	$< 18\ MeV$	0	1/2

durch den Italiener C. Rubbia dar. Auch heute noch suchen Forscher nach weiteren Teilchen, die bislang nicht experimentell nachgewiesen wurden. Sie hoffen, auf diese Weise das *S*MEP zu vervollständigen.

2.3 Elementarteilchen

Kommen wir zur Klassifikation der Elementarteilchen. Diese werden unter der Bezeichnung *F*ermionen (F) zusammen gefasst.[6] Gemäß dem *S*MEP stellt jeder Materieteil eine Zusammensetzung verschiedener Arten von Fermionen dar.

Die Materie ist nach heutigem Verständnis aus Atomen zusammen gesetzt, die - entgegen ihrem Namen - in kleinere Bestandteile aufgeteilt werden können. Die Atome setzen sich konkret aus Elektronen und dem Atomkern zusammen. Das Elektron ist nach aktueller Auffassung ein Elementarteilchen, weil bei Untersuchungen bis zu einer Auflösung von 10^{-16} keine innere Struktur festgestellt werden konnte. Wie weitere Untersuchungen zeigten, setzt sich der Atomkern aus Protonen und Neutronen zusammen. Protonen und Neutronen besitzen eine Ausdehnung von etwa 10^{-13} cm. Auch diese Teilchen sind wiederum keine Elementarteilchen, da sie eine komplexe Struktur haben, wie bereits ihr anomales magnetisches Moment zeigt. Neutron und Proton weisen jeweils einen Spin 1/2 auf. Folgt man dem naiven Quarkmodell von Gell-Mann, so müssen auch ihre Bausteine Spin 1/2 haben. Bei einem anderen Wert des Spins lässt sich nämlich ein Teilchen mit dem Wert 1/2 (Neutron bzw. Proton) aus den Bausteinen nicht erzeugen. Die Zahl dieser Bausteine darf also nicht gerade sein. Ein einfacher Weg besteht darin, Proton und Neutron je aus drei elementaren Bausteinen zu konstituieren, die man *Q*uarks nennt. Die Quarks weisen eine innere Eigenschaft auf, die als *F*arbladung bezeichnet wird. Die Farbladung kann drei Werte annehmen, die als

[6] Der Name *F*ermionen verweist auf die für diese Teilchen relevante Statistik. Das *P*auli-Prinzip postuliert, dass zwei Fermionen sich in jedem Fall mindestens hinsichtlich eines Freiheitsgrades unterscheiden müssen, zum Beispiel der Ladung. Alle Teilchen, für die das Pauli-Prinzip Gültigkeit hat, werden als Fermionen bezeichnet, da die für diese Teilchen maßgebliche Statistik die Fermi-Statistik ist.

rot, grün und blau bezeichnet werden. Alle beobachtbaren Teilchen, somit auch Proton und Neutron, müssen farbneutral sein. Dies wird dadurch gewährleistet, dass sich die Farbladungen der drei Quarks, die ein Proton bzw. Neutron bilden, gegenseitig neutralisieren.

Wie in Tabelle 2.2 dargestellt wird, gibt es insgesamt 6 verschiedene Arten von Quarks (u, c, t, d, s und b). Das Neutron setzt sich z.B. aus einem u- Quark und zwei d-Quarks zusammen ($u$dd), das Proton aus zwei u-Quarks und einem d-Quark ($u$ud). Die u-Quarks können in d-Quarks und d-Quarks in u-Quarks übergehen. Dies ist notwendige Voraussetzung dafür, dass Protonen und Neutronen ineinander umgewandelt werden können.

Die Existenz der Quarks wurde unabhängig voneinander von Murray Gell-Mann und von George Zweig postuliert. Diese Konzeption erregte zu Beginn vielfach Widerspruch. Aufgrund einer Vielzahl von experimentellen Bestätigungen - spätestens seit der Entdeckung der letzten Sorte, des t-Quarks - wird dieses Modell jedoch inzwischen uneingeschränkt akzeptiert.

Eine weitere Gruppe von Elementarteilchen stellen die Neutrinos dar. Ein Neutrino entsteht unter anderem beim β-Zerfall von Kernen. Ein einfaches Beispiel hierfür ist der Zerfall des Neutrons:

$$Neutron \rightarrow Proton + Elektron + Neutrino. \tag{2.1}$$

Da das Neutrino in diesem Beispiel zusammen mit einem Elektron auftritt, wird es als Antielektron-Neutrino bezeichnet. Neutrinos haben den Spin 1/2. Ursprünglich ging man davon aus, dass sie masselos sind. Inzwischen ordnet man ihnen eine geringe Masse zu. Neutrinos erzeugen bei Stößen mit Protonen unter hohen Energien neben anderen Teilchen auch Pionen, die nachgewiesen werden können. Dies stellt eine Möglichkeit dar, die Existenz der Neutrinos zu beweisen.

Fasst man die bisherigen Erläuterungen zusammen, so werden die elementaren Fermionen unterteilt (siehe Tabelle 2.2) in die 6 Lep-

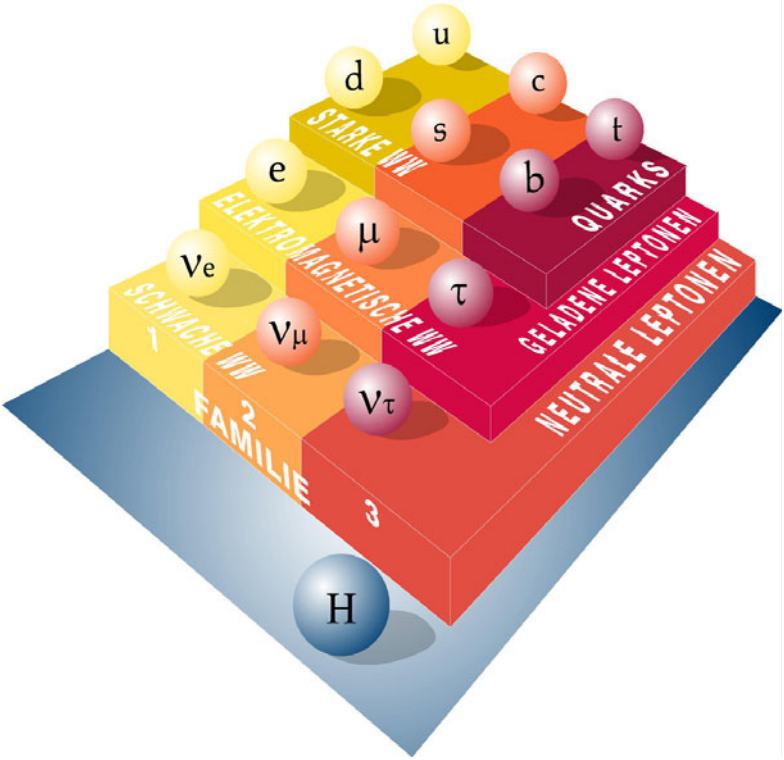


Abbildung 2.1: Die 3 Familien der Leptonen. Quelle: DESY

tonen L[7] sowie die 6 Quarks Q. Konkret setzt sich die Menge der Leptonen zusammen aus den nahezu masselosen Neutrinos ν_e, ν_μ und ν_τ, dem Elektron e^-, dem Myon μ, dem Tauon τ^- sowie den 6 Quarks u, c, t, d, s und b. Üblicherweise werden die genannten Elementarteilchen in 3 *F*amilien unterteilt.[8] Für jede dieser Arten existiert sowohl ein Teilchen als ein Antiteilchen, zum Beispiel Elektronen und Positronen. Jedes Antiteilchen weist exakt die gleichen Eigenschaften wie das zugehörige Teilchen auf mit Ausnahme der

[7] Der Name *L*epton bedeutet leichtes Teilchen.
[8] Siehe hierzu Abbildung 2.1.

elektrischen Ladung (das Elektron weist z. B. die Ladung - auf, das Positron die Ladung +). Sobald Teilchen und Antiteilchen kollidieren, zerfallen die beiden Teilchen unter Aussendung von Strahlung.

Neben den Elementarteilchen werden im Rahmen von *S*MEP ebenso die zusammengesetzten Teilchen untersucht. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sind die *B*aryonen von besonderem Interesse. Bei den Baryonen handelt es sich um Teilchen, die aus jeweils drei Quarks zusammengesetzt sind. Ein Beispiel hierfür ist das Proton. Die Baryonen werden durch eine *B*aryonenzahl gekennzeichnet. Jedes Baryon wird mit der Baryonenzahl 1 gekennzeichnet, jedes Anti-Baryon mit der Zahl -1, alle anderen Teilchen tragen die Baryonenzahl 0. Analog zur Baryonenzahl wird eine *L*eptonenzahl definiert. Jedem Lepton wird die Leptonenzahl 1 zugeordnet, jedem Anti-Lepton die Leptonenzahl -1, allen anderen Teilchen die Leptonenzahl 0.

2.3.1 Die Rolle der Elementarteilchen in der Kosmologie

Zum Abschluss der Beschreibung der Elementarteilchen soll in einem Überblick gezeigt werden, in welcher zeitlichen Abfolge nach dem Urknall die uns heute bekannten Arten von Teilchen entstanden.[9] Aus diesem Überblick ergibt sich, dass die verschiedenen Arten von Elementarteilchen keineswegs zugleich entstanden:

1. Das Alter des Universums beträgt nach heutiger Erkenntnis $13,2 \pm 0,2$ Mrd. Jahre.

2. Ab einer Zeit von $t > 10^{-33}$ *sec.* nach dem Urknall beginnt bei Temperaturen von ca. $T = 10^{25}$ K die Bildung von Materie (**P**lasma-Ära) . Zu diesem Zeitpunkt liegen Quarks und die anderen Arten von Leptonen mit ihren jeweiligen Antiteilchen sowie alle heute bekannten Arten von Bosonen in einem Plasma vor. Es kommt zu

[9] Für die folgenden Erläuterungen vgl. [Allday 1999].

http://www.springer.com/978-3-658-09682-3

Zur Ontologie der Elementarteilchen
Eine philosophische Analyse der aktuellen Elementarteilchenphysik
Brückner, Th.C.
2015, XI, 195 S. 13 Abb., Softcover
ISBN: 978-3-658-09682-3