

Jörg Resag

# Die Entdeckung des Unteilbaren

Quanten, Quarks und die Entdeckung  
des Higgs-Teilchens *2. Auflage*



SACHBUCH



Springer Spektrum

Jörg Resag

# Die Entdeckung des Unteilbaren

Quanten, Quarks und die Entdeckung  
des Higgs-Teilchens *2. Auflage*



**SACHBUCH**



Springer Spektrum

## Die Entdeckung des Unteilbaren

*Für Karen, Kevin, Tim und Jan*

Jörg Resag

# Die Entdeckung des Unteilbaren

Quanten, Quarks und die Entdeckung des  
Higgs-Teilchens

2. Auflage

 Springer Spektrum

Jörg Resag  
Leverkusen  
Deutschland

ISBN 978-3-642-37669-6      ISBN 978-3-642-37670-2 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-642-37670-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

**Springer Spektrum**

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Planung und Lektorat:* Vera Spillner, Bettina Saglio

*Redaktion:* Annette Heß

*Einbandabbildung:* © The ATLAS-Experiment at CERN

*Einbandentwurf:* deblik Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

# Vorwort zur zweiten Auflage

Nachdem die erste Auflage von *Die Entdeckung des Unteilbaren* im Herbst 2010 erschienen war, bekam ich viele positive Rückmeldungen, die mir gezeigt haben, dass das Buch bei den Lesern gut angekommen war und einiges zum tieferen Verständnis der modernen Physik beitragen konnte. Besonders bedanken möchte ich mich bei allen, die mich auf kleinere Fehler aufmerksam gemacht haben, die in der nun vorliegenden zweiten Auflage korrigiert wurden.

Die erste Auflage dieses Buches war erschienen, kurz nachdem der Large Hadron Collider LHC am CERN in Betrieb gegangen war und damit begonnen hatte, erste Kollisionsdaten aufzuzeichnen. Jeder wartete damals darauf, dass endlich neue Entdeckungen zutage treten würden, doch noch war es deutlich zu früh dafür gewesen. Das hat sich mittlerweile geändert! Am 4. Juli 2012 verkündete man am LHC die Entdeckung eines neuen Teilchens mit einer Masse von rund 125 GeV, das sehr gute Chancen hat, das lange gesuchte Higgs-Teilchen zu sein.

Die zweite Auflage bietet mir nun die Gelegenheit, das Buch insgesamt auf den aktuellen Stand zu bringen und in Abschn. 8.2 ausführlich auf die Fortschritte am LHC einzugehen, die schließlich zur Entdeckung des Higgs-Teilchens führten. Nach wie vor ist es für mich fast ein Wunder, dass es in der Physik offenbar wieder einmal gelungen ist, ein theoretisches Gebäude experimentell zu bestätigen, das von uns Menschen Jahrzehnte zuvor mithilfe der Mathematik errichtet worden war und das weit jenseits unserer eigenen menschlichen Vorstellungskraft liegt.

Bei Andreas Rüdinger, Vera Spillner, Bettina Saglio und Annette Heß vom Springer-Spektrum-Verlag möchte ich mich herzlich für die wie immer sehr gute Zusammenarbeit bedanken. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meiner Frau Karen und meinen Söhnen Kevin, Tim und Jan für ihre Unterstützung und ihr Verständnis dafür, dass mich die Arbeit am Buchmanuskript so manchen Abend in Beschlag nahm.

# Vorwort zur ersten Auflage

Kaum eine andere Naturwissenschaft hat in den letzten gut 100 Jahren eine so stürmische Entwicklung erfahren wie die Physik. Sie hat Entdeckungen hervorgebracht, die weit über den Rahmen dieser Wissenschaft hinausreichen und die unser Weltbild entscheidend verändert haben. Als wichtige Meilensteine seien hier genannt: die Formulierung der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein in den Jahren 1905 und 1916, die Entwicklung der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie seit 1925 durch Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Paul Dirac, Richard Feynman und andere sowie schließlich die Formulierung des modernen Standardmodells der Elementarteilchen in den Jahren seit etwa 1962, insbesondere durch Glashow, Salam, Ward, Weinberg, Gell-Mann, Fritzsche und Zweig. Dieses Standardmodell bildet die Grundlage für unser heutiges Verständnis der Physik der Elementarteilchen und wurde an den großen Teilchenbeschleunigern immer wieder getestet und glänzend bestätigt, insbesondere am großen Elektron-Positron-Collider (LEP, *Large Electron-Positron Collider*) des europäischen Forschungszentrums CERN bei Genf.

Das Standardmodell basiert auf den beiden Grundpfeilern *spezielle Relativitätstheorie* und *Quantentheorie* und beschreibt die Naturgesetze mithilfe von zwölf Teilchen (sechs Quarks und sechs Leptonen) sowie drei Wechselwirkungen zwischen diesen Teilchen (die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung). Die Gravitation bleibt dabei außen vor, d. h. sie wird nicht im Rahmen des Standardmodells beschrieben.

Im März 1995 wurde das letzte noch fehlende der sechs Quarks am Tevatron-Beschleuniger des Fermilabs bei Chicago entdeckt: das *top*-Quark – ein Ereignis, das sogar auf den Titelseiten vieler Zeitungen Eingang fand. Nur das Higgs-Teilchen fehlt noch (Stand Juni 2010). Nach ihm wird in den nächsten Jahren am Large Hadron Collider LHC intensiv gesucht werden.

Im Rahmen des Standardmodells sind wir heute in der Lage, die Struktur der Materie bis zu Abständen von etwa einem Tausendstel Fermi (also ungefähr einem Tausendstel des Protonendurchmessers) detailliert zu beschreiben.



Wir kennen heute die physikalischen Gesetze zwischen Elementarteilchen bis zu Teilchenenergien von mindestens 100 GeV sehr genau und können damit im Rahmen des Urknallmodells die Entwicklung unseres Universums bis zu einem Zeitpunkt zurückverfolgen, als seine Temperatur etwa eine Millionen-Milliarde Grad betrug. Das Universum existierte zu diesem Zeitpunkt gerade einmal seit einer zehnmilliardstel Sekunde.

Haben wir mit dem Standardmodell der Elementarteilchen womöglich bereits die sagenumwobene Weltformel, die allumfassende fundamentale physikalische Theorie der Naturgesetze unseres Universums, gefunden? Sind wir mit unserer Suche nach den wirklich unteilbaren Bausteinen der Materie am Ziel angekommen? Die Antwort, die wir aller Wahrscheinlichkeit nach auf diese Frage geben müssen, lautet: Nein! Von einer solchen Weltformel sind wir heute sicher noch ein gutes Stück entfernt. Im Gegenteil: Es gibt viele gute Gründe, die darauf hindeuten, dass es eine Physik jenseits des Standardmodells geben muss und dass der gerade in Betrieb gegangene Large Hadron Collider LHC ein Fenster in diese neue Welt öffnen wird.

In jedem Fall wird das Standardmodell ähnlich wie die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik ein wesentlicher Meilenstein auf dem Weg zu einer fundamentalen Theorie der Naturgesetze sein. Genauso, wie man das Standardmodell ohne die spezielle Relativitätstheorie und die Quantenmechanik nicht verstehen kann, so wird man eines Tages auch eine hypothetische allumfassende Theorie nicht verstehen können, ohne sich mit dem Standardmodell befasst zu haben.

In diesem Buch möchte ich den Versuch wagen, die Reichweite und Schönheit der modernen physikalischen Theorien einem breiten Publikum näherzubringen und damit auch Nicht-Experten an der Faszination teilhaben zu lassen, die von ihnen ausgeht. Neben der Darstellung der neuesten Entwicklungen und Entdeckungen habe ich den nötigen Grundlagen für das Verständnis der modernen Teilchenphysik breiten Raum eingeräumt. Dabei habe ich mich bemüht, den Leser nicht durch halb wahre Überveranschaulichungen zu verwirren. Ich werde versuchen, möglichst klar zu beschreiben, was man tut und tun muss, um die Gesetze der Natur zu formulieren, nicht aber, wie man es tut.

Aufgrund der Komplexität des Themas war es mir nicht möglich, ein einfaches Buch zu schreiben. Dennoch werden vom Leser im überwiegenden Teil des Buches keine besonderen mathematischen oder physikalischen Vorkenntnisse erwartet. Auf mathematische Formeln wollte ich aber nicht ganz verzichten, da sie an einigen Stellen zum Verständnis des Buches nützlich sein können. Ich hoffe aber, dass die verwendeten Formeln für den Leser keine größeren Schwierigkeiten darstellen. Im Übrigen ist es problemlos möglich,

die Formeln einfach zu überspringen, ohne dass das Verständnis in stärkerem Maße darunter leiden sollte. Wer sich für weitere Details sowie den neuesten Stand der Entdeckungen am LHC interessiert, der findet diese auf den Webseiten zu diesem Buch unter

<http://www.joerg-resag.de/>

Juni 2010  
Leverkusen

Jörg Resag

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zur zweiten Auflage</b> .....	V
<b>Vorwort zur ersten Auflage</b> .....	VII
<b>1 Atome, Bausteine der Materie</b> .....	1
1.1 Die ersten Anfänge .....	1
1.2 Atome und Moleküle .....	3
1.3 Die Struktur der Atome .....	9
1.4 Kräfte und Wechselwirkungen .....	15
<b>2 Seltsame Quantenwelt</b> .....	29
2.1 Das Problem der Stabilität der Atome .....	29
2.2 Licht besteht aus Teilchen .....	32
2.3 Elektronen als Welle .....	34
2.4 Das Planck'sche Wirkungsquantum .....	47
2.5 Die Heisenberg'sche Unschärferelation .....	49
2.6 Die Bewegung der Elektronen in der Atomhülle .....	55
2.7 Spin und Pauli-Prinzip .....	59
2.8 John Stewart Bell und die Suche nach verborgenen Informationen .....	65
<b>3 Atomkerne und spezielle Relativitätstheorie</b> .....	89
3.1 Der Atomkern .....	89
3.2 Die spezielle Relativitätstheorie .....	94
3.3 Maßstäbe der Natur .....	112
3.4 Neue Rätsel .....	115
<b>4 Teilchenzoo, Quarks und Wechselwirkungen</b> .....	117
4.1 Neue Teilchen und eine neue Wechselwirkung .....	117
4.2 Ordnung im Teilchenzoo: Quarks und Leptonen .....	125
4.3 Die starke Wechselwirkung .....	143
<b>5 Quanten und Relativität</b> .....	155
5.1 Relativistische Quantenfeldtheorien .....	156
5.2 Richard Feynmans Graphen .....	178
5.3 Wechselwirkungen und das Eichprinzip .....	198

<b>XII</b>	Die Entdeckung des Unteilbaren	
	5.4 Die gleitende Ladung	205
	5.5 Quark-Physik mit dem Supercomputer.	215
	5.6 QCD mit Nebenwirkungen: die starke Kernkraft	219
<b>6</b>	<b>Das Standardmodell der Teilchenphysik</b>	<b>223</b>
	6.1 Schwache und elektromagnetische Wechselwirkung vereinigen sich	224
	6.2 Das Standardmodell auf dem Prüfstand	252
	6.3 Der Umgang mit divergierenden Graphen: Renormierung	265
	6.4 Was ist ein Teilchen?	275
<b>7</b>	<b>Gravitation</b>	<b>283</b>
	7.1 Einsteins Gravitationstheorie	284
	7.2 Quantengravitation.	302
<b>8</b>	<b>Aufbruch in neue Welten</b>	<b>317</b>
	8.1 Supersymmetrie, Stringtheorie und andere Ausblicke	317
	8.2 Higgs-Teilchen und neue Physik am LHC	335
	8.3 Abschließende Bemerkungen.	361
	<b>Anhang: Zeittafel</b>	<b>365</b>
	<b>Index</b>	<b>371</b>

# 1

## Atome, Bausteine der Materie

Woraus besteht Materie? Ist sie kontinuierlich und in immer kleinere Stücke teilbar, oder besteht sie aus vielen kleinen Bausteinen? Die letztere Idee existierte bereits im antiken Griechenland, doch erst die zunehmende Entwicklung der Chemie und Physik in den letzten gut 300 Jahren brachte zunehmend die Gewissheit, dass es diese Bausteine tatsächlich gibt.

### 1.1 Die ersten Anfänge

Vor etwa 2 500 Jahren besaß man im antiken Griechenland bereits ein umfangreiches Wissen über die physikalischen Eigenschaften der verschiedensten Materialien. Man versuchte daher, Ordnung in die Vielfalt dieser Materialien und ihrer Bearbeitungsmöglichkeiten zu bringen und übergreifende Prinzipien zu finden, um des wachsenden Wirrwarrs von Einzelinformationen Herr zu werden. Dabei wurde schon recht bald die Frage nach der inneren Struktur der Materie gestellt und verschiedene Philosophen versuchten, zu schlüssigen Antworten zu gelangen.

So vertrat Thales, der aus einer griechischen Stadt in Kleinasien namens Milet stammte, etwa um 600 vor Christus die Auffassung, Wasser sei die Grundsubstanz aller Materie. Anaximander von Milet dagegen vertrat die Ansicht, Luft sei der Urstoff und könne die anderen Grundstoffe Wasser und Erde hervorbringen. Auch andere Möglichkeiten für das Auftreten einer einzigen Grundsubstanz wurden diskutiert.

Das Problem mit diesen Ideen bestand aber darin, eine Erklärung dafür zu finden, wie sich ein einziger Urstoff in so unterschiedliche Materieformen wie Luft, Wasser oder Eisen verwandeln konnte.

Um dieses Problem zu lösen, ging etwa 100 Jahre später Empedokles bereits von vier Grundsubstanzen (Erde, Wasser, Feuer und Luft) und zwei Grundkräften (Liebe und Hass) aus. Empedokles verwendete also mehrere Grundstoffe und unterschied zwischen Stoff und Kraft. Alle Veränderungen in der Natur erklärte er dadurch, dass sich die vier Grundstoffe in verschie-

denen Verhältnissen miteinander mischen und wieder voneinander trennen. Gerade diese Vorstellung hat sich lange bis ins Mittelalter hinein behaupten können. Sie spiegelt bereits einen Grundgedanken unserer heutigen Sicht wider, nämlich dass verschiedene Grundstoffe über gewisse Kräfte aufeinander einwirken.

Es bleibt bei diesen Ansätzen jedoch unklar, ob Materie als kontinuierlich oder als aus einzelnen fundamentalen Teilchen bestehend aufgefasst wird. Überlegen wir uns die Konsequenzen dieser beiden Alternativen.

Nimmt man an, Materie sei kontinuierlich, so lässt sich ein beliebig kleines Stück Materie immer in noch kleinere Stücke desselben Stoffes zerlegen. Auch diese winzigen Bruchstücke müssen noch alle Eigenschaften aufweisen, die für die spezielle Substanz charakteristisch sind, wie beispielsweise Farbe, Dichte, Geruch oder Festigkeit.

Mit der Vorstellung kontinuierlicher Materie stößt man nun schon recht bald auf Schwierigkeiten. So liefert sie keine Erklärung dafür, warum ein und derselbe Stoff in Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen (Druck, Temperatur) mal fest, mal flüssig und mal gasförmig sein kann. Auch die chemische Reaktion von zwei Substanzen zu einer neuen Substanz kann in diesem Bild nicht recht dargestellt werden, d. h. der Mechanismus, der einer chemischen Reaktion zugrunde liegt, bleibt im Dunkeln.

Wenden wir uns daher dem atomistischen Standpunkt zu. Zwischen 450 und 420 vor Christus entwickelten der griechische Philosoph Leukipp und sein Schüler Demokrit das erste atomistische Modell, bei dem Materie aus einer großen Anzahl winziger, unzerstörbarer Bausteine aufgebaut ist. Leukipp und Demokrit nannten diese Bausteine *Atome*, was so viel wie *das Unteilbare* bedeutet. Um die vielen verschiedenen Materieformen zu erklären, gingen sie davon aus, dass es unendlich viele verschiedene Atomsorten in der Natur geben müsse.

Erst diese neue Sichtweise ermöglichte Ansätze zur Erklärung von Vorgängen wie Schmelzen und Verdampfen oder von chemischen Prozessen, bei denen sich die Atome umgruppieren und neu formieren. Wie die Atome aber genau aussehen, darüber gab es im Laufe der Zeit die unterschiedlichsten Vorstellungen. Eine denkbare Möglichkeit wäre beispielsweise, dass sich verschiedene Atomsorten durch ihre äußere Gestalt unterscheiden. Aufgrund außen angebrachter Haken und Ausbuchtungen könnten sie sich miteinander verhaken und so chemische Reaktionen ermöglichen.

Der atomistische Ansatz besitzt jedoch auch seine Probleme. So ist nicht zu erwarten, dass die Atome den Raum lückenlos ausfüllen können. Insbesondere bei gasförmigen Substanzen sollte man aufgrund der geringen Dichte sogar erwarten, dass sie den Raum viel weniger dicht ausfüllen als bei einem flüssi-

gen oder festen Stoff. Was aber befindet sich dann zwischen den Atomen? Die uns heute gewohnte Konsequenz, dass sich dazwischen eben einfach Nichts, also leerer Raum befindet, erschien bis in die Neuzeit hinein vielen Menschen als nicht akzeptabel. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Vorstellung eines den ganzen Raum erfüllenden Stoffes geboren, den man Äther nannte und dem viele recht ungewöhnliche Eigenschaften zugeschrieben wurden, um die im Laufe der Zeit anwachsende Fülle von Beobachtungen und experimentellen Resultaten erklären zu können.

Ein weiteres Problem des atomistischen Ansatzes besteht darin, die Eigenschaften der Atome wie Gestalt, Größe und Masse zu erklären. Löst man dieses Problem durch die Annahme, Atome seien eben nicht elementar und bestünden ihrerseits aus anderen elementaren Objekten, so verschiebt sich dadurch das Problem lediglich um eine Stufe und stellt sich für die neuen Elementarobjekte erneut.

Wir sehen also, dass keine der beiden beschriebenen Alternativen uns wirklich zufriedenstellen kann, auch wenn der atomistische Ansatz weniger Probleme aufzuweisen scheint und mehr Potenzial für die Erklärung der physikalischen Materie-Eigenschaften bietet.

Jeder im Laufe der Zeit erdachte Lösungsversuch wies ähnliche Probleme auf. Erst mithilfe der direkten Befragung der Natur durch die Experimente der Neuzeit und mithilfe der abstrakten Sprache der Mathematik sind wir in den letzten gut 300 Jahren der Lösung dieses Rätsels ein gutes Stück nähergekommen. Statt weiter zu spekulieren, wollen wir uns daher nun der Methode des physikalischen Experiments bedienen, um die Frage zu entscheiden, welche der beiden Alternativen in der Natur realisiert ist. Dabei dürfen wir gespannt sein, wie die Natur die angesprochenen Probleme gelöst hat.

## 1.2 Atome und Moleküle

Betrachten wir ein beliebiges Stück Materie und versuchen, etwas über sein Innenleben herauszufinden. Wir wollen dies am Beispiel eines gewöhnlichen Kochsalzkristalls tun. Dabei gehen wir (wie sich herausstellt, zu Recht) von der Annahme aus, dass es letztlich nicht darauf ankommen wird, mit welchem Stoff wir unsere Untersuchung beginnen. Ein Kochsalzkristall hat jedoch einige Vorteile, wie wir noch sehen werden.

Zunächst einmal fällt uns seine würfelförmige Gestalt auf. Betrachten wir andere Kochsalzkristalle, so sehen wir, dass die Würfelgestalt tatsächlich die bevorzugte Gestalt von Kochsalzkristallen ist. Kristalle anderer Salze wie z. B. Alaun bevorzugen dagegen andere regelmäßige Formen. Das Auftreten dieser