



**Am Rand der Dimensionen.  
Gespräche mit  
den Physikern des CERN.**

**Rolf Landua**

**edition unseld**

**SV**

edition unseld 3

Am CERN, dem Europäischen Kernforschungszentrum in Genf, wird tief unter der Erde der neue riesige Teilchenbeschleuniger LHC in Betrieb genommen, der Wissenschaftlern Zugang zu neuen Phänomenen – und vielleicht zu neuen Dimensionen – ermöglichen soll. Erwartet werden entscheidende Erkenntnisse über den Zusammenhang von Raum, Zeit und Materie. So könnte das bisher nur hypothetisch existierende Higgs-Teilchen entdeckt werden, das allen Bausteinen der Materie ihre Masse gibt. Oder ein Beweis für die Existenz supersymmetrischer Teilchen, die auch die dunkle Materie und damit einen Hauptbestandteil des Universums erklären könnten. Und vielleicht sogar winzige schwarze Löcher und damit der Beweis für Zusatzdimensionen des Raumes. Der LHC wird entscheidend sein für die Entwicklung eines neuen Fundaments der Physik und könnte sogar Hinweise für die Entwicklung der Superstring-Theorie geben.

Rolf Landua hat einen Band verfaßt, der als Dialog mit einem Forscher des CERN konzipiert ist. Darin werden unter anderem die Erwartungen diskutiert, die mit dem Einsatz des Teilchenbeschleunigers verbunden sind. Die Gespräche bezeugen die Ungewißheit der Grundlagen moderner physikalischer Theorien, sind eine Philosophie über den Rand der Dimensionen und eine Spekulation über das Potential der Naturwissenschaften.

Rolf Landua, Physiker am Europäischen Kernforschungszentrum (CERN), Leiter der CERN-Abteilung für öffentliche Fortbildung; Mitinitiator der »Antimaterie-Fabrik« am CERN; war Leiter des ATHENA-Experiments, bei dem erstmals Millionen von Antimaterie-Atomen produziert wurden. Landua arbeitet auch an der Erneuerung des naturwissenschaftlichen Schulunterrichts mit dem Ziel, die Erkenntnisse der modernen Physik zu vermitteln. Er ist regelmäßig Gesprächspartner in Fernsehen und Radio. Für sein Engagement wurde er mit dem Kommunikationspreis der Europäischen Physikalischen Gesellschaft ausgezeichnet.

# Am Rand der Dimensionen Gespräche über die Physik am CERN

Rolf Landua

Suhrkamp

Die *edition unseld* wird unterstützt durch eine Partnerschaft mit dem Nachrichtenportal *Spiegel Online*. [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de)

edition unseld 3

Erste Auflage 2008

© Suhrkamp Verlag Frankfurt am Main 2008

Originalausgabe

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das der Übersetzung, des öffentlichen Vortrags sowie der Übertragung durch Rundfunk und Fernsehen, auch einzelner Teile.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Photographie, Mikrofilm oder andere Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Satz: Libro, Kriftel

Druck: CPI – Ebner & Spiegel, Ulm

Umschlaggestaltung: Nina Vöge und Alexander Stubić

Printed in Germany

ISBN: 978-3-518-26003-6

1 2 3 4 5 6 – 13 12 11 10 09 08

# Am Rand der Dimensionen



# Inhalt

Vorbemerkung . . . . .	9
1 Im Innern der Welt . . . . .	11
2 Die Geister der Physik . . . . .	34
3 Der Tunnel zum Urknall . . . . .	54
4 Die dunkle Seite der Materie . . . . .	70
5 Am Rand der Dimensionen . . . . .	86
Glossar . . . . .	101



## Vorbemerkung

Der neue Teilchenbeschleuniger LHC wird bald Experimente ermöglichen, die neue Formen der Materie, noch unbekannte Kräfte und vielleicht sogar zusätzliche Raumdimensionen enthüllen könnten. Welchen Einfluß werden diese Entdeckungen auf etablierte Theorien und unser Bild der Natur haben? Welche Erwartungen und Hoffnungen sind für uns Physiker damit verbunden?

Mein Buch ist ein Versuch, so viele Menschen wie möglich an den Fragen und Erkenntnissen der modernen Physik teilhaben zu lassen. Die Forscher des letzten Jahrhunderts haben eine wunderliche, aber auch faszinierende Struktur der Materie und des Universums entdeckt. Die Experimente am LHC werden uns einen Einblick in eine bisher unerreichbare Region von Raum und Zeit geben, der unser Weltbild revolutionieren könnte.

Mein Buch ist als ein – zugegebenermaßen idealisierter – Dialog zwischen einem Laien und einem Wissenschaftler konzipiert. Stellen Sie sich also vor, dem CERN einen Besuch abzustatten und dabei einen freundlichen Physiker zu treffen, der alle Ihre Fragen aus den Grenzbereichen der modernen Physik geduldig und so anschaulich wie möglich beantwortet.

*Rolf Landua*



# 1 Im Innern der Welt

Vor dem Besuch des weltweit größten Forschungszentrums für Teilchenphysik ist es nützlich, etwas über seine Geschichte und Struktur zu wissen. Das Akronym CERN steht für »Conseil Européen de la Recherche Nucléaire«, auf deutsch »Europäischer Rat für Kernforschung«, benannt nach dem Gründungsrat im Jahr 1954. Der CERN – oder das CERN? – war damals gegründet worden, um Europas Wettbewerbsfähigkeit in der Kernphysik wiederherzustellen. Kurz nach dem Zweiten Weltkrieg lebten die meisten europäischen Spitzenforscher in den Vereinigten Staaten. Europas Politiker fürchteten um die Zukunft der europäischen Grundlagenforschung – und in der damaligen Zeit des Kalten Krieges wohl auch um mögliche Wissensdefizite in der Kernforschung. Die Gründung des CERN durch zwölf europäische Staaten sollte aber vor allem ein Signal der Versöhnung zwischen ehemals verfeindeten Nationen sein – man wollte die Wunden des Kriegs vergessen machen und gemeinsam an der Erforschung der Struktur der Materie arbeiten. Ein weiterer Grund für die Zusammenarbeit war, daß einzelne Länder den Bau von Beschleunigern zur Erforschung von Atomkernen und Elementarteilchen meist nicht finanzieren konnten. Nach dem üblichen Standortgerangel einigte man sich dann auf die neutrale Schweiz, und der damals größte Teilchenbeschleuniger der Welt wurde im Jahr 1959 in Meyrin, einem Vorort von Genf nahe der französischen Grenze, eingeweiht.

Heute hat CERN 20 Mitgliedsländer und Kooperationsabkommen mit über 30 weiteren Ländern. Sein Territorium von der Größe von 600 Fußballfeldern erstreckt sich inzwischen weit

über die schweizerisch-französische Grenze hinweg nach Frankreich in das *Pays de Gex* hinein. CERN beschäftigte im Jahr 2007 etwa 2500 Angestellte. Mit Forschungsaufgaben waren davon aber nur weniger als zehn Prozent befaßt, denn die meisten Angestellten sind Ingenieure, Techniker oder Mitarbeiter in der Verwaltung. Sie stellen die Infrastruktur, also die Beschleuniger und Teile der Experimente, zur Verfügung. Die eigentliche Physikforschung wird durch die mehr als 7000 Gastwissenschaftler von Universitäten und Forschungsinstituten aus den Mitgliedsländern des CERN und aus 65 weiteren Ländern der Erde betrieben. CERN ist damit zum Weltlabor geworden.

Das Projekt hat sich ausgezeichnet: Viele fundamentale Eigenschaften der Materie wurden hier entdeckt, und seit 1984 wurde drei CERN-Forschern der Nobelpreis verliehen. Nicht nur in der Physik wurden beachtliche Ergebnisse erzielt: Die älteste Web-Adresse der Welt, aus dem Jahr 1989, heißt *www.cern.ch*, da Tim Berners-Lee hier das World-Wide-Web erfunden hat, um die Kommunikation zwischen den Physikern aus der ganzen Welt zu erleichtern.

Das Profil des Physikers hat sich in den letzten hundert Jahren sehr gewandelt. War es im 19. Jahrhundert noch möglich und sogar üblich, sowohl in experimentellen als auch in theoretischen Feldern der Physik wesentliche Beiträge zu leisten, so hat sich in den letzten Jahrzehnten besonders in der Teilchenphysik eine immer stärkere Aufgabenteilung ergeben. Die Entwicklung neuer physikalischer Modelle liegt heute fest in den Händen der theoretischen Physiker. Deren Richtschnur sind die Symmetrieprinzipien der Natur, ihr Werkzeug ist die Mathematik. CERN beschäftigt etwa 30 theoretische Physiker, dazu kommen über 100 Gastwissenschaftler von Universitäten in der

ganzen Welt, darunter Kapazitäten auf dem Gebiet der Teilchenphysik und der Kosmologie. Eines ihrer wichtigsten Ziele ist die Ausarbeitung einer vereinigten Theorie der Elementarteilchen, auch »Superstring-Theorie« genannt.

Die Aufgabe der Experimentalphysiker ist, neue Experimente zu konzipieren und durchzuführen, um die Voraussagen der Theorie zu bestätigen oder zu falsifizieren. Die Komplexität der theoretischen und der experimentellen Fragestellungen hat sich aber derart erhöht, daß sich in beiden Sektoren ein zunehmender Trend zur kollektiven geistigen Entwicklungsarbeit eingestellt hat. Die Entwicklung der theoretischen Physik geht in den letzten Jahrzehnten über ein immer enger werdendes Netzwerk von miteinander kommunizierenden Wissenschaftlern in der ganzen Welt vor sich. Auch ein modernes Experiment in der Teilchenphysik erfordert heutzutage die jahrzehntelange Kollaboration von Hunderten oder gar Tausenden von Experimentalphysikern mit einer großen Bandbreite von spezifischen Kenntnissen. Nur auf diese Weise kann dieser Zweig der Wissenschaft noch Fortschritte machen. Man könnte von einer Gruppenintelligenz der Physiker-Kollaborationen sprechen, die weit über die der einzelnen Wissenschaftler hinausgeht. Die Zeiten von einsamen Genies wie Newton oder Einstein, die im stillen Kämmerlein über Jahre hinweg eine Theorie ausarbeiteten, sind unweigerlich vorbei.

Unser Besuch in den kleinsten Dimensionen der Materie und den größten Dimensionen des Universums beginnt mit einem kurzen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Theorie. Dabei werden sich viele Fragen stellen, auf die wir dann während des Besuchs zurückkommen werden.

Eine der größten wissenschaftlichen Errungenschaften des

20. Jahrhunderts war die Entdeckung, daß die große Vielfalt der Erscheinungen auf der Erde und im gesamten Universum auf einer kleinen Zahl elementarer Bausteine beruht, die unter dem Einfluß von vier fundamentalen Kräften stehen. Die mathematische Formulierung dieser Theorie wurde 1973 gefunden und wird heute als das ›Standardmodell‹ bezeichnet. Es macht präzise Voraussagen über alle fundamentalen Reaktionen zwischen Elementarteilchen. Bisher wurden keine signifikanten Abweichungen zwischen Vorhersagen und Messungen entdeckt, weshalb es von uns Physikern als *die* Theorie der Teilchenphysik betrachtet wird. Viele wichtige Präzisionstests wurden übrigens am CERN mit dem Vorgänger des LHC-Beschleunigers, dem ›Large Electron-Positron Collider‹ – kurz LEP genannt –, durchgeführt.

Das Standardmodell kennt zwei Typen von Elementarteilchen: die Leptonen und die Quarks. Beide scheinen ›punktförmig‹ zu sein, was momentan bedeutet, daß ihre räumliche Ausdehnung nicht mehr als  $10^{-19}$  m (ein Zehntausendstel eines Atomkerndurchmessers) ist. Zur Erklärung unserer sichtbaren Welt benötigt man ein leichtes Teilchen, deshalb auch »Lepton« genannt – das Elektron –, und zwei Quarks (»Up«- und »Down«-Quark). Ein Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen, die aus Up- und Down-Quarks zusammengesetzt sind. Alle aus Quarks aufgebauten Objekte werden »Hadronen« genannt. Daher auch der Name »Large Hadron Collider«, da der LHC mit Protonen oder schweren Atomkernen immer Hadronen beschleunigt und zur Kollision bringt. Ein zweites Lepton – das Neutrino – wird gebraucht, um den radioaktiven Zerfall zu erklären. Diese »Familie« aus vier elementaren Teilchen befindet sich – aus noch unverstandenen Gründen – in Gesellschaft von zwei weiteren Teilchenfamilien mit jeweils zwei Quarks

und zwei Leptonen. Der einzige Unterschied zwischen den drei Familien scheint die Masse der Teilchen zu sein. Insgesamt gibt es im Standardmodell also zwölf elementare Teilchentypen, sechs Quarks und sechs Leptonen.

Zwischen den Teilchen gibt es vier Kräfte (auch Wechselwirkungen genannt). Die Quarks im Proton oder im Neutron werden von der *starken* Wechselwirkung zusammengehalten. Die *schwache* Wechselwirkung erlaubt die Umwandlung von Quarks in andere Quarks und von Leptonen in andere Leptonen. Die elektromagnetische Wechselwirkung wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen. Die vierte und schwächste Wechselwirkung ist die Gravitation, durch deren Einfluß Sterne, Planeten, Sonnensysteme und Galaxien geformt werden. Jede Wechselwirkung wird durch spezifische »Feldteilchen« übertragen. Die Feldteilchen der starken Wechselwirkungen nennt man »Gluonen«, für die schwache Wechselwirkung sind die »W- und Z-Bosonen« zuständig. Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch den Austausch von »Photonen« beschrieben, und in einer Quantentheorie der Gravitation würden »Gravitonen« ausgetauscht. Bis auf Gravitonen wurden alle Feldteilchen experimentell nachgewiesen. Die W- und Z-Bosonen wurden 1983 am CERN entdeckt, wofür zwei CERN-Forschern, Carlo Rubbia und Simon van der Meer, der Nobelpreis verliehen wurde.

Seit etwa 1980 wird auch ein tiefer Zusammenhang zwischen der Teilchenphysik und dem Ursprung und der Evolution des Universums zunehmend deutlich. Das »Standardmodell der Kosmologie« basiert auf dem Urknall vor etwa 13 700 Millionen Jahren, wobei sich eine ungeheure Konzentration von Energie in weniger als einer Billionstelsekunde in Materie umwandelte

und dabei eine Raum-Zeit-Blase entstehen ließ, die sich schnell ausdehnte. Nach dieser Billionstelsekunde war unser Universum in einem extrem dichten und heißen Zustand, in dem sehr energiereiche Teilchen und Strahlung koexistierten. Der LHC wird es erlauben, durch die Kollision von Protonen bei sehr hoher Energie diesen Zustand des Universums kurz nach seiner Geburt auf mikroskopischer Skala zu reproduzieren.

Das Urknallmodell steht auf zwei Säulen: der allgemeinen Relativitätstheorie zur Beschreibung der Geometrie des sich schnell ausdehnenden Raumes und dem Standardmodell der Teilchenphysik zum Verständnis der mikroskopischen Prozesse bei der Umwandlung von Energie in Materie. Es erklärt auf natürliche Weise, warum das Universum expandiert, warum die Sterne dreimal mehr Wasserstoff als Helium enthalten und warum es eine den Weltraum gleichmäßig ausfüllende Mikrowellenstrahlung gibt. Es ist ein konsistentes und experimentell nachprüfbares Modell zur Beschreibung der Evolution des Universums von einem sehr frühen Zeitpunkt an, etwa eine Milliardstelsekunde nach dem Urknall. Kurz danach hatte sich das Universum so weit abgekühlt, daß sich aus Quarks Protonen und Neutronen bilden konnten, und aus diesen die Atomkerne. Auch wir bestehen aus Protonen und Neutronen, die während des Urknalls gebildet wurden. Während der nächsten drei Minuten war die Energie dieser Teilchen noch groß genug, um die Fusionsreaktion zur Bildung leichter Atomkerne wie Helium und Lithium zu ermöglichen. Es dauerte dann aber 380 000 Jahre, bis das Universum kühl genug war, um die Verbindung von Atomkernen und Elektronen zu Wasserstoff- und Helium-Atomen zu erlauben. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Universum transparent für Lichtstrahlen. Diese konnten sich nun frei im Universum ausbreiten, und man findet sie heute in

Form der kosmischen Hintergrundstrahlung. Der Einfluß der Gravitation führte dann einige hundert Millionen Jahre später zur Bildung der ersten Sterne, die zum ersten Mal nach dem Urknall im Universum für Licht sorgten. Das Ende dieser Sterne in Supernova-Explosionen führte zur Fusion schwererer Atomkerne, wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, bis hin zum Uran. Diese Elemente wurden weitere Jahrmilliarden später in neuen Sonnensystemen zu den Bausteinen des Lebens, wie hier auf der Erde.

Auf den ersten Blick sieht es also so aus, als ob die Physiker eine zufriedenstellende Erklärung für die kleinsten und größten Strukturen der Welt gefunden hätten. Welche Fragestellungen motivieren also die Forschung des 21. Jahrhunderts? Es gibt drei Fragenbereiche:

1) Zunächst enthält das Standardmodell der Teilchenphysik noch eine große Unbekannte, nämlich die Theorie eines raumfüllenden »Higgs-Feldes«, das den Elementarteilchen ihre jeweiligen Massen gibt. Dieser Bestandteil der Theorie ist notwendig, um das Standardmodell vor einem mathematischen Kollaps zu bewahren. Das Modell sagt die Existenz eines Higgs-Teilchens voraus, das mit den LHC-Experimenten produziert und nachgewiesen werden soll.

Aus Beobachtungen der Bewegungen von Galaxien und der Krümmung von Lichtstrahlen durch Galaxienhaufen hat sich unzweifelhaft ergeben, daß unser Weltall von dunkler, unsichtbarer Materie dominiert wird. Die Teilchenphysik könnte eine Erklärung dieser dunklen Materie in Form von »supersymmetrischen Teilchen« liefern. Das leichteste dieser während des Urknalls produzierten Teilchen könnte stabil sein und deshalb die

dunkle Materie bilden. Solche supersymmetrischen Teilchen könnten im LHC produziert und nachgewiesen werden.

Auch die Antimaterie stellt uns noch vor Rätsel, mehr als 80 Jahre nach Diracs genialer Idee. Wenn sich Energie in Masse verwandelt, herrscht immer völlige Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie. Aber wo ist dann die Antimaterie des Urknalls geblieben? Die Forschung am CERN beschäftigt sich auch mit dieser Frage und studiert deshalb die Eigenschaften der Antimaterie und ihre Symmetrie mit der Materie mit höchster Präzision. Schließlich fordert Antimaterie auch unsere Intuition heraus: Wie kann sich etwas Solides wie Materie beim Kontakt mit Antimaterie einfach in Strahlungsenergie verwandeln?

2) Trotz seiner unbestreitbaren Erfolge ist unser Standardmodell nur ein »Kochrezept« zum Bau unserer Welt, unter Benutzung bestimmter Bausteine (sechs Quarks und sechs Leptonen mit ihren jeweiligen Massen) und vier Wechselwirkungen mit – scheinbar – willkürlichen relativen Stärken. Woher kommen die »freien Parameter« der Theorie – die Massen, Wechselwirkungsstärken und Zerfallswahrscheinlichkeiten –, von denen es etwa 20 gibt? Haben wir mit den Quarks und Leptonen wirklich den »Urstoff« der Welt gefunden, oder gibt es noch fundamentalere Bausteine – wie bei den russischen Matroschka-Puppen, die beim Öffnen eine noch kleinere Puppe zum Vorschein bringen? Was sind überhaupt »Elementarteilchen«? Wie ist Materie mit Raum und Zeit verbunden? Wo liegt der Zusammenhang zwischen den bekannten Feldern, der Gravitation und der »dunklen Energie« des Vakuums, die eine große Rolle für die Evolution unseres Universums zu spielen scheint?

Diese Fragen nehmen in der neueren theoretischen Physik einen großen Raum ein und haben zu einer Reihe von Modellen

geführt, die über das Standardmodell hinausgehen. In der Theorie der »Superstrings« – die schon vor etwa 25 Jahren vorgeschlagen wurde und seitdem intensiv ausgearbeitet wird – betrachtet man Elementarteilchen als kleine zehndimensionale Energiefäden, deren verschiedene Eigenschwingungen das Spektrum der Elementarteilchen und Felder erklären könnten. Zusätzliche Raumdimensionen werden auch von anderen Modellen gefordert. Es wird deshalb sehr interessant sein, ob bei Kollisionen im LHC vielleicht tatsächlich Ereignisse beobachtet werden, die solche Vorstellungen bestätigen.

3) Schließlich rücken auch Fragen ins Zentrum der Diskussion, die noch jenseits unserer experimentellen Möglichkeiten liegen, aber von großer Bedeutung für die philosophischen Aspekte der Physik sind. Wie konnte unser Universum vor 13 700 Millionen Jahren aus »Nichts« entstehen? Existiert das Nichts überhaupt? Gab es während des Urknalls nur eine – oder vielleicht unzählige – Möglichkeit(en) für die Entstehung der Naturgesetze, und welche Rolle hat der Zufall dabei gespielt? Gab es am Anfang nur ein einziges Naturgesetz, aus dem in den ersten Momenten nach dem Urknall alle anderen entstanden? Finden wir dort vielleicht einen Hinweis darauf, warum sich die Materie zu immer komplexeren Strukturen – bis hin zum Leben und zum Menschen – organisiert? Ist irgendwo im Weltbild der modernen Physik noch Platz für Gott? Manchmal wird das Higgs-Teilchen auch als »Gott-Teilchen« bezeichnet – ist Gott noch aktiv am Werk und greift über »sein« Teilchen permanent in seine Schöpfung ein?

Nach diesem kurzen Überblick beginnt nun der eigentliche Besuch, in dem viele der schon angesprochenen Themen genauer beleuchtet werden. Stellen Sie sich also vor, mit mir in der