

GIAN FRANCESCO GIUDICE

ODYSSEE IM ZEPTORAUM

EINE REISE IN DIE PHYSIK DES LHC

AUS DEM ENGLISCHEN VON NICOLA FISCHER



Springer

VORWORT

*Werden wir nicht nachlassen in unserm Kundschaften
Und das Ende unseres Kundschaftens
Wird es sein, am Ausgangspunkt anzukommen
Und den Ort zum ersten Mal zu erkennen.*

THOMAS STEARNS ELIOT¹

Der Kontrollraum des Large Hadron Collider (LHC) ist voller Menschen. Sie alle blicken gebannt auf den Monitor an der Wand, der in diesem Augenblick nur einen grauen Hintergrund zeigt. Der letzte Absorberblock ist bereits entfernt worden, die Protonen können also ungehindert in ihre Kreisbahn durch den 27 Kilometer langen unterirdischen Tunnel eintreten. Es ist 10.28 Uhr am 10. September 2008. Wir befinden uns am CERN, dem europäischen Laboratorium für Teilchenphysik, das sich nahe Genf entlang der deutsch-französischen Grenze erstreckt.

Wie ein Magier kurz vor seinem spektakulärsten Trick spricht Lyn Evans, der Direktor des LHC-Projekts auf Französisch den Zauberspruch, ohne dabei seinen Waliser Akzent zu verbergen: »Trois, deux, un faisceau!« Im selben Moment sind auf dem Bildschirm einen

¹ T. S. Eliot: Vier Quartette: Little Gidding (Four Quartets: Little Gidding, 1943). Dt. v. N. Wydenbruck, 1988.

Moment lang zwei helle Punkte zu sehen. Ringsum bricht Beifall los. Das Geschehen im Kontrollraum wird live ins Hauptauditorium übertragen, wo CERN-Physiker und -Personal sich mehrheitlich versammelt haben. Auch hier schließen sich alle, voller Zufriedenheit und tief bewegt, dem spontanen Applaus an. Das Abenteuer, auf das man so lange hingearbeitet und gewartet hatte, hat tatsächlich begonnen.

Die ersten offiziellen Studien für den Large Hadron Collider, den leistungsstärksten Teilchenbeschleuniger der Welt, stammen aus den frühen 1980er Jahren; endgültig genehmigt wurde das Projekt jedoch erst 1994. Vierzehn Jahre später nun signalisieren die zwei hellen Punkte auf dem Bildschirm das Ende der Bauphase und den Beginn des experimentellen Programms im Bereich der Teilchenphysik. Diese Punkte waren zwei Abbilder des Protonenstrahls auf einem dünnen Leuchtfilm: Ein Punkt zeigte den Strahl im Augenblick seines Eintritts in den LHC, der zweite bei seiner Wiederkehr nach einer Runde um den Ring, nach 27 Kilometern in nur 90 Millionsteln einer Sekunde. Es stimmt, die Energie des Protonenstrahls betrug erst einen Bruchteil der letztlich vollen Kraft des LHC, und auch die Dichte der zirkulierenden Protonen war extrem niedrig. Dennoch ist der ehrlich empfundene Beifall der anwesenden Physiker vollkommen gerechtfertigt: Dieses Ereignis war der entscheidende Praxistest, dass die Technologie, auf die der LHC aufbaut, tatsächlich funktioniert.

Anwesend im Kontrollraum sind die letzten fünf Generaldirektoren des LHC. Sie haben das Laboratorium durch die einzelnen Planungs- und Bauphasen geführt: Herwig Schopper, Carlo Rubbia, Christopher Llewellyn Smith, Luciano Maiani und Robert Aymar, dem nach Ende seiner Amtszeit im Dezember 2008 Rolf Heuer folgte. »Es sind nur deshalb bloß fünf, weil die anderen bereits tot sind!«, kommentiert Lyn Evans mit einem Lachen. Einige der älteren Direktoren teilen seine Heiterkeit nicht. Dennoch sichtbar begeistert, gehen sie in ihren Anzügen und Krawatten auf Evans zu, der eher für die Modetradition des CERN steht—Jeans und Turnschuhe—, um ihrer Freude Ausdruck zu verleihen. Glückwünsche aus allen großen teilchenphysikalischen Laboratorien der Welt treffen ein. Die originellste Botschaft kommt von Nigel Lockyer, dem Direktor des kanadischen Labors TRIUMF, der



ABB. 1 Der Kontrollraum des LHC am 10. September 2008

Quelle: CERN.

die Worte Neil Armstrongs beim Betreten der Mondoberfläche abwandelt: »Eine kurze Reise für ein Proton, aber ein großer Schritt für die Menschheit!«

Der Large Hadron Collider ist tatsächlich ein außergewöhnliches Abenteuer für die Menschheit: ein großes Abenteuer der Bautechnik etwa durch die Aushebung von fast 80.000 Kubikmetern Erde in 100 Metern Tiefe—einer Menge, mit der man das Mittelschiff der Kathedrale von Canterbury füllen könnte. Ein Abenteuer an der absoluten Spitze der Technologie durch die Entwicklung neuartiger Instrumente unter konstant extremen Anforderungen wie der jahrelangen Kühlung von 37.000 Tonnen Material, verteilt über eine Strecke von 27 Kilometern, auf $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$, eine Temperatur unterhalb jener des leeren Weltraums. Ein beispielloses Abenteuer der Informationstechnologie mit einem Datenfluss von etwa einer Million Gigabyte pro Sekunde—als würden alle Menschen auf der Erde über einen einzigen Betreiber gleichzeitig jeweils rund zehn Anrufe aussenden. Vor allem aber ist es ein fantastisches geistiges Abenteuer, denn der Large Hadron Collider wird Räume erforschen, in die zuvor noch kein Experiment hat vordringen können.

Der LHC ist eine Reise zu den tiefstgelegenen Materiestrukturen mit dem Ziel, die fundamentalen Gesetze zu entdecken, die das Verhalten der Natur lenken. Es geht um ein Verstehen der elementaren Prinzipien, die über das Universum bestimmen; darum, wie—und insbesondere warum—die Natur so funktioniert, wie wir sie beobachten.

Das Faszinierendste am Large Hadron Collider ist seine Reise zum Unbekannten. Der LHC gleicht einem gigantischen Mikroskop, das in Dimensionen von weniger als etwa 100 Zeptometer vorzudringen in der Lage ist. Die selten verwendete Einheit von einem Zeptometer entspricht einem Milliardstel eines Milliardstels eines Millimeters. Die Bezeichnung wurde 1991 vom *Bureau International des Poids et Mesures* geprägt mit der Begründung: »Die Vorsilbe ‚zepto‘ leitet sich von ‚septo‘ ab und bezieht sich auf die Zahl sieben (1.000 hoch 7), und der Buchstabe ‚s‘ wird durch den Buchstaben ‚z‘ ersetzt, um die Mehrfachverwendung des Buchstabens ‚s‘ als Zeichen zu vermeiden.«² Eine recht seltsame Definition für eine seltsame Maßeinheit. Alles an diesem Wort »zepto« ist so seltsam, dass es mir zur Beschreibung des unbekanntem und fremdartigen Raums extrem geringer Entfernungen sehr gut zu passen scheint. Diesen unendlich kleinen Raum von nicht mehr als einigen Hundert Zeptometern haben bislang nur Elementarteilchen und die blühende Fantasie der theoretischen Physiker betreten. In diesem Buch wird er *Zeptoraum* genannt. Der LHC wird die erste Maschine sein, die den Zeptoraum erkundet.

Während die erste bemannte Reise zum Mond ein konkretes, in wolkenlosen Nächten für jedermann sichtbares Ziel hatte, ist die Reise, auf die sich der Large Hadron Collider begeben hat, eine Odyssee in fremdere Räume, bei der niemand voraussagen kann, was wir finden oder wo wir landen werden. Es ist eine Suche nach unbekanntem Welten mithilfe komplexer, modernster Technologien, gelenkt von theoretischen Mutmaßungen, die nur nachvollziehen kann, wer sich in höherer Physik und Mathematik auskennt. Eben diese Aspekte haben die Arbeit der Physiker in einen Nebel geheimnisvoller Exklusivität gehüllt und

² Beschluss 4 des 19. Treffens der *Conférence générale des poids et mesures* (1991). [Anm. d. Übers.: Zitate ohne Angabe deutscher Quellen wurden sämtlich für das vorliegende Buch übersetzt.]

Nichteingeweihten die Neugier genommen. Dieses Buch dagegen will zeigen, dass die Fragen, die sich aus der Arbeit des LHC ergeben, für jeden spannend und interessant sind, der fundamentale Fragen über die Natur als der Mühe wert empfindet.

Die Regierungen der zwanzig Mitgliedstaaten der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN finden offensichtlich, dass diesen Fragen nachzugehen der Mühe wert ist, haben sie doch beträchtliche Mittel in das Unternehmen gesteckt. Der Bau des LHC-Beschleunigerrings hat einschließlich der Testläufe, des Baus der Maschine und des CERN-Zuschusses zu LHC-Rechnern und Detektoren, jedoch ohne die CERN-Personalkosten, rund 3 Milliarden Euro gekostet. Diese riesige Finanzlast wäre ohne die maßgeblichen Beiträge vieler Nicht-Mitgliedstaaten des CERN, darunter Kanada, Indien, Japan, Russland und die USA, nicht zu stemmen gewesen. An Entwurf, Bau und Erprobung der Instrumente waren Physiker aus 53 Ländern und fünf Kontinenten beteiligt (Physiker oder Pinguine aus der Antarktis konnten sich leider keine zur Mitarbeit entschließen). Der Large Hadron Collider ist ein beeindruckendes Beispiel für internationale Zusammenarbeit im Namen der Wissenschaft. Da der LHC mit den Mitteln und der körperlichen und geistigen Arbeitskraft so vieler verschiedener Länder gebaut wurde, sind seine Ergebnisse Wertbesitz der gesamten Menschheit. Diese Ergebnisse sollen nicht nur einigen wenigen Physikern Nutzen bringen, und hinter ihrem technisierten und spezialisierten Charakter darf die Bedeutung ihres universellen Erkenntnisgehalts nicht verborgen bleiben.

Der Large Hadron Collider ist das komplexeste und ehrgeizigste wissenschaftliche Projekt, das die Menschheit je auf den Weg gebracht hat. Jede Herausforderung während Planung und Bau des LHC erforderte Neuentwicklungen an den Grenzen der Technologie. Die Forschungsarbeiten im Vorfeld des LHC werden fraglos in Spin-offs und praktischen Anwendungen münden, die über den rein wissenschaftlichen Nutzen hinausreichen. Auch das World Wide Web wurde 1989 am CERN erfunden, um den Daten- und Informationsaustausch zwischen Physikern und Laboratorien in verschiedenen Teilen der Welt zu ermöglichen. Vier Jahre darauf beschloss das CERN die Freigabe

dieses Instruments, das heute aus dem Alltagsleben der Menschen weltweit nicht mehr wegzudenken ist. Aus der Grundlagenforschung ergeben sich häufig unvermutete Anwendungen. Mitte des 19. Jahrhunderts fragte der britische Schatzkanzler William Gladstone den mit der Erforschung des Elektromagnetismus beschäftigten Physiker Michael Faraday, worin der Nutzen von dessen Entdeckungen liegen könnte. »Ich weiß es nicht, Sir«, war Faradays Antwort, »aber eines Tages werden Sie Steuern darauf erheben können.«

Für Physiker aber besteht das letzte Ziel des LHC ausschließlich in der reinen Erkenntnis. Weit über jede technologische Anwendung hinaus ist Wissenschaft eine Bereicherung der Gesellschaft. So wurde 1969 Robert Wilson, Direktor eines führenden US-amerikanischen Laboratoriums, vor den Kongress gerufen. Man debattierte über die möglichen Argumente für eine Ausgabe von 200 Millionen Dollar zugunsten eines teilchenphysikalischen Forschungsprojekts. Senator John Pastore vom Atomenergie-Ausschuss des Kongresses befragte Wilson, der in seiner Replik die Bedeutung der Grundlagenforschung auf den Punkt brachte.

PASTORE: Gibt es in Zusammenhang mit den Hoffnungen hinsichtlich dieses Beschleunigers irgendetwas, das in irgendeiner Weise mit der Sicherheit dieses Landes zu tun hat?

WILSON: Nein, Sir, das glaube ich nicht.

PASTORE: Gar nichts?

WILSON: Gar nichts.

PASTORE: Er hat in der Hinsicht keinen Wert?

WILSON: Er hat allein mit dem Respekt zu tun, mit dem wir einander begegnen, mit der Würde des Menschen, unserer Liebe zur Kultur. . . Er hat nichts unmittelbar mit der Verteidigung unseres Landes zu tun, außer dass es durch ihn der Verteidigung wert ist.³

³ Anhörungen vor dem *Joint Committee on Atomic Energy*, Kongress der Vereinigten Staaten. Erste Sitzung zu: Allgemeines, Physikalisches Forschungsprogramm, Raum-Kernforschungsprogramm und »Plowshare«-Projekt, 17.–18. April 1969; Teil I. US Government Printing Office, Washington, DC.

Dieses Buch befasst sich mit der Reise des Large Hadron Collider: Warum sie unternommen wurde und was wir aus ihr lernen wollen. Es liegt in der Natur dieses Themas, dass es sehr umfangreich, kompliziert und hoch technisch ist, wogegen diesem Buch ein vergleichsweise begrenzter Rahmen gesteckt ist. Ich werde nicht alle Aspekte systematisch behandeln und beanspruche nicht, hier eine vollständige Geschichte des LHC zu erzählen. Mein Ziel ist lediglich, einen Einblick in die Problemstellungen aus Sicht eines Physikers zu geben und gleichzeitig die geistige Breite und Tiefe der Fragen hervorzuheben, derer sich das LHC annimmt. Ich möchte den Lesern dieses Buchs die Bedeutung dieser Reise und den Grund dafür nahebringen, dass die gesamte teilchenphysikalische Wissenschaftlergemeinschaft den Ergebnissen dieser Reise so gespannt entgegenfiebert.

Im ersten Teil dieses Buchs geht es um die Welt der Teilchen und wie die Physiker sie zu verstehen gelernt haben. Eine Würdigung der Ergebnisse des LHC ist ohne eine gewisse Vorstellung vom Aufbau der Teilchenwelt nicht möglich. Wie der theoretische Physiker Richard Feynman einmal sagte: »Ich verstehe nicht, warum die Journalisten und andere selbst dann etwas über die neuesten Entdeckungen in der Physik wissen wollen, wenn sie nichts über die früheren Entdeckungen wissen, die den neuesten Entdeckungen Bedeutung verleihen.«⁴

Der Large Hadron Collider ist eine Maschine der Superlative von extremer technologischer Komplexität. Der zweite Teil dieses Buchs beschreibt, was der LHC ist und wie er arbeitet. Die technologischen Innovationen, die zum Bau des LHC nötig waren, bilden nur einen der vielen erstaunlichen Aspekte dieses wissenschaftlichen Abenteuers. Wir werden auch die Detektoren kennenlernen, mit denen die Teilchen untersucht werden, die bei den Protonenkollisionen im LHC entstehen. Diese Instrumente sind moderne Wunderwerke; in ihnen wird erstklassige Mikrotechnologie mit gigantischen Proportionen verbunden.

Das LHC-Projekt dient in erster Linie der Erkundung des Unbekannten. Daher mündet dieses Buch in einem Überblick über die

⁴ R. P. Feynman, zitiert in S. Weinberg: *The Discovery of Subatomic Particles*. Cambridge University Press, Cambridge 2003.

INHALTSVERZEICHNIS

Teil I Teilchen in der Materie

- 1 Die Zerlegung der Materie 3
- 2 Die Naturkräfte 31
- 3 Das Erhabene Wunder 61

Teil II Das Raumschiff des Zeptoraums

- 4 Eine Leiter zum Himmel 97
- 5 Der Herr der Ringe 121
- 6 Teleskope für den Zeptoraum 155

Teil III Missionen im Zeptoraum

- 7 Symmetriebrechungen 191
- 8 Vom Umgang mit der Natürlichkeit 237
- 9 Supersymmetrie 251
- 10 Von neuen Dimensionen zu neuen Kräften 273

11	Das Universum unter dem Mikroskop	293
12	Nachwort	327
	Glossar	335
	Danksagungen	347
	Sachverzeichnis	349