

SEMINARARBEIT**Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:**

Moderne Physik und ihre Grenzen – Kleinste Teilchen, dunkle Materie und die Vereinheitlichung der Physik.

Leitfach: Physik

Thema der Arbeit:

Die Geschichte des CERN – Wie der LEP zum LHC wurde

Kurztitel¹:

Die Geschichte des CERN

Verfasser der Seminararbeit: Göttler Diego

Kursleiter: Schmid Simon

Abgabetermin: Dienstag, 11.11.2025

Abschlusspräsentation am: Mittwoch, 03.12.2025

Bewertung	Note	Notenstufe in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	

Summe:

Gesamtleistung nach § 29 Abs. 6 GSO = Summe : 2 (gerundet):

Datum

Unterschrift der Kursleiterin bzw. des Kursleiters

¹ Kurztitel für das Abiturzeugnis (nur bei einem Thema mit mehr als 3 x 44 Zeichen)

Gliederung

I. Einführung.....	3
II. Geschichte des CERN.....	4
1. Nachkriegszeit.....	4
2. Gründung und frühe Meilensteine.....	5
III. Der Large Electron-Positron Collider (LEP).....	6
1. Grundlegende Informationen.....	6
2. Technische Spezifikationen und Aufbau.....	6
3. Funktionsweise.....	7
IV. Der Übergang vom LEP zum LHC.....	9
V. Der Large Hadron Collider (LHC).....	11
1. Technologie und Inbetriebnahme.....	11
2. Wissenschaftliche Erfolge: Die Higgs-Entdeckung.....	11
3. Globale Bedeutung und Zukunftsaussichten.....	12
VI. Vergleich von LEP und LHC.....	13
VII. Fazit.....	14

I. Einführung

Die vorliegende Seminararbeit verfolgt das Ziel, die historische Entwicklung der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) detailliert darzustellen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem entscheidenden Übergang vom Large Electron-Positron Collider (LEP) zum Large Hadron Collider (LHC). Die Relevanz des Themas liegt in der fundamentalen Bedeutung dieser Teilchenbeschleuniger für die moderne Physik, da sie die Grundlage für bahnbrechende Entdeckungen wie das Higgs-Boson legten. Durch die Nutzung immer höherer Kollisionsenergien gelang es CERN, das Standardmodell der Teilchenphysik zu präzisieren und zugleich seine Grenzen aufzuzeigen. Diese Faszination für das Unbekannte, die Albert Einstein einst als das 'Geheimnisvolle' und die Quelle wahrer Wissenschaft bezeichnete, treibt die Forschung am CERN bis heute an.

Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit lautet: Wie entwickelte sich das CERN von seinen bescheidenen Anfängen bis zum LHC, und welche technologische, infrastrukturelle sowie wissenschaftliche Rolle spielte der LEP in diesem Prozess als Wegbereiter?

Zur Beantwortung dieser Frage werden historische Dokumente, wissenschaftliche Publikationen und relevante Fachliteratur analysiert. Dabei wird insbesondere auf die technologischen Herausforderungen und die wissenschaftlichen Errungenschaften beider Beschleuniger eingegangen, um den konzeptionellen Sprung von der Präzisionsphysik (LEP) zur Energiephysik (LHC) nachzuzeichnen.

II. Geschichte des CERN

1. Nachkriegszeit

Nach dem Zweiten Weltkrieg stand Europa 1945 vor enormen Herausforderungen. Der Kontinent war durch die Zerstörung des Krieges nicht nur wirtschaftlich und infrastrukturell am Ende, sondern auch die Gesellschaft war gespalten. Die wissenschaftliche Forschung, einst ein europäisches Aushängeschild, hatte durch die Unterdrückung im NS-Regime und die Abwanderung vieler Spitzenforscher in die Vereinigten Staaten (z. B. im Rahmen des Manhattan-Projects) einen erheblichen Rückschlag erlitten. Dies führte zu einer tiefgreifenden technologischen Lücke.

In dieser Zeit wuchs das Bedürfnis nach internationaler Zusammenarbeit, um Frieden, Wiederaufbau und wissenschaftlichen Fortschritt auf einer kontinentalen Ebene zu fördern. Die Idee, gemeinsam ein Zentrum für physikalische Forschung zu errichten, wurde in der wissenschaftlichen Gemeinschaft schnell populär. Man wollte die wissenschaftliche Zusammenarbeit unabhängig von nationalen Grenzen stärken und der Physik in Europa wieder zu einer führenden Rolle verhelfen. Bereits 1949 schlugen führende Physiker wie der Franzose Louis de Broglie und der Italiener Edoardo Amaldi die Schaffung eines gemeinsamen Labors vor. Das Gründungs-Motto lautete: „Science for Peace“ – Wissenschaft als Brücke zwischen ehemals verfeindeten Nationen.

2. Gründung und frühe Meilensteine

Erste konkrete Schritte zur Gründung wurden 1950 unternommen, als die UNESCO eine Konferenz in Florenz organisierte. Im Jahr 1952 unterzeichneten elf europäische Staaten eine vorläufige Vereinbarung, und am 29. September 1954 wurde das CERN (damals noch Akronym für „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“) in Genf offiziell gegründet.

Die CERN-Konvention von 1955 legte die Organisation und ihre friedlichen Ziele fest. In Artikel 2, Punkt 1 der Konvention heißt es dazu explizit:

"Die Organisation soll die Zusammenarbeit der europäischen Staaten bei der Kernforschung von rein wissenschaftlichem und grundlegendem Charakter sowie bei der damit im Wesentlichen verbundenen Forschung fördern."

Die Wahl von Genf als Standort war strategisch: Die Schweiz war politisch stabil, neutral und bot eine gute Infrastruktur.

Frühe Beschleuniger des CERN legten den Grundstein für die spätere Hochenergiephysik:

- Synchro-Cyclotron (SC): 1957 in Betrieb genommen, mit einer Energie von 600 MeV.
- Proton Synchrotron (PS): 1959 eingeweiht, einer der weltweit ersten großen Hadronenbeschleuniger mit 28 GeV. Es diente später als wichtiger Injektor für den LEP und den LHC.
- Super Proton Synchrotron (SPS): 1976 in Betrieb genommen. Es diente als Protonen-Antiprotonen-Kollisionsanlage (SppS) und ermöglichte 1983 die Entdeckung der W- und Z-Bosonen, die Träger der schwachen Kernkraft. Diese Entdeckung, für die Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984 den Nobelpreis erhielten, festigte CERNs Position als Weltführer in der Teilchenphysik.

III. Der Large Electron-Positron Collider (LEP)

1. Grundlegende Informationen

Der Large Electron-Positron Collider (LEP) war ein bahnbrechender Teilchenbeschleuniger, der von 1989 bis 2000 im CERN betrieben wurde. Als einer der größten und leistungsstärksten Beschleuniger seiner Zeit ermöglichte der LEP präzise Tests des Standardmodells der Teilchenphysik. Seine Konstruktion und der Betrieb markierten einen Wendepunkt in der Hochenergiephysik, insbesondere durch die Untersuchung des Z-Bosons und die Vorbereitung des Weges für den Large Hadron Collider (LHC).

2. Technische Spezifikationen und Aufbau

Der LEP war ein ringförmiger Beschleuniger mit einem Umfang von 26,7 Kilometern, der in einem Tunnel etwa 100 Meter unter der Erde zwischen Genf und dem Jura-Gebirge lag. Der Tunnel, der später für den LHC wiederverwendet wurde, beherbergte eine komplexe Infrastruktur. Der Beschleuniger bestand aus acht geraden Abschnitten und acht gekrümmten Abschnitten, die durch supraleitende Magnetfelder verbunden waren. Diese Magnetfelder lenkten Elektronen und Positronen auf präzisen Kreisbahnen.

Die Hauptbestandteile des LEP umfassten:

- Beschleunigungsrohren: Vakuumröhren, in denen Elektronen und Positronen in die jeweils entgegengesetzte Richtung zirkulierten. Diese Röhren waren mit Hochfrequenzkavitäten ausgestattet, die elektromagnetische Wellen nutzten, um die Teilchen zu beschleunigen.
- Supraleitende Magneten: Über 3.300 Dipolmagnete und Quadrupolmagnete hielten die Teilchen auf ihren Bahnen und

fokussierten die Strahlen. Die Magnetfelder erreichten bis zu 0,1 Tesla, was für Elektronen-Positron-Beschleuniger ausreichend war.

- Detektoren: Vier große Detektoren – ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL – waren an den Kollisionspunkten platziert, um die Ergebnisse der Teilchenkollisionen zu analysieren.

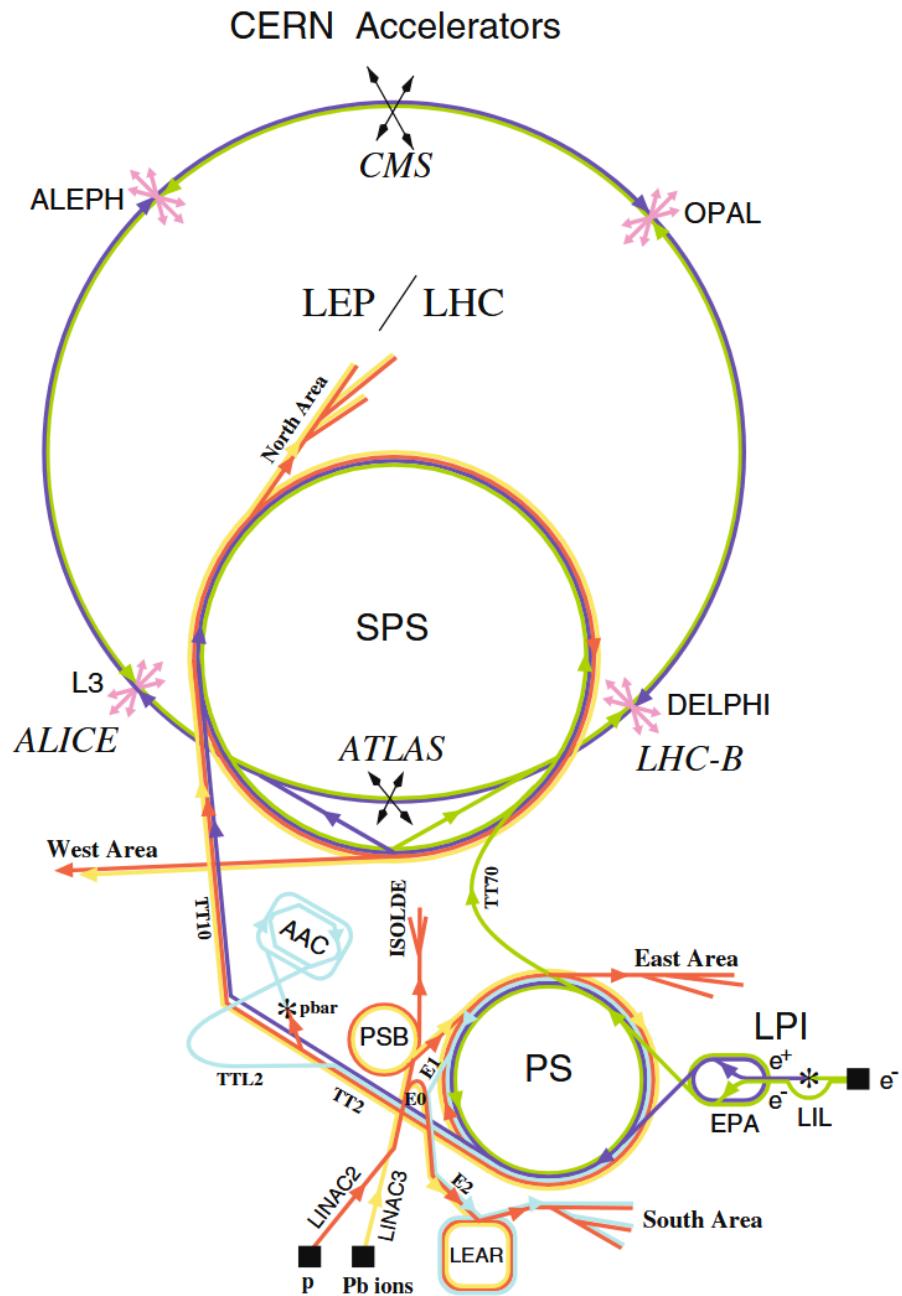
Der LEP operierte in zwei Phasen: LEP1 (1989–1995) mit Kollisionsenergien von etwa 91 GeV (zur Untersuchung des Z-Bosons) und LEP2 (1996–2000) mit Energien bis zu 209 GeV, um nach dem Higgs-Boson und anderen Phänomenen zu suchen.

3. Funktionsweise

Der LEP beschleunigte Elektronen und Positronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit, bevor sie in den vier Detektorpunkten kollidierten. Elektronen wurden aus einer Kathode erzeugt, während Positronen durch die Kollision von Elektronen mit einem Target produziert wurden. Beide Teilchenarten wurden zunächst in kleineren Beschleunigern (wie dem Proton Synchrotron) vorbeschleunigt, bevor sie in den LEP-Ring eingespeist wurden.

Ein zentrales Problem war die Synchrotronstrahlung: Da Elektronen und Positronen leichte Teilchen sind, verlieren sie bei Ablenkung in den Magnetfeldern Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung. Um dies zu kompensieren, wurden 128 supraleitende Hochfrequenzkavitäten installiert, die kontinuierlich Energie zührten.

In der LEP2-Phase wurden zusätzliche Kavitäten eingebaut, um höhere Energien zu erreichen. Die Kollisionen erzeugten kurzlebige Teilchen, die in den Detektoren nachgewiesen wurden. Die Detektoren bestanden aus mehreren Schichten, darunter Spurdetektoren (zur Verfolgung von Teilchenbahnen), Kalorimeter (zur Messung der Energie) und Myonenkammern (zur Identifikation von Myonen). Diese Konfiguration ermöglichte präzise Messungen von Teilchen Wechselwirkungen.



LEP: Large Electron Positron collider

SPS: Super Proton Synchrotron

AAC: Antiproton Accumulator Complex

ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice

PSB: Proton Synchrotron Booster

PS: Proton Synchrotron

LPI: Lep Pre-Injector

EPA: Electron Positron Accumulator

LIL: Lep Injector Linac

LINAC: LINear ACcelerator

LEAR: Low Energy Antiproton Ring

(A. Straessner (2010), Electroweak Physics at LEP and LHC)

IV. Der Übergang vom LEP zum LHC

Der Wechsel vom LEP zum Large Hadron Collider (LHC) war ein mutiger strategischer Schritt, der von den wissenschaftlichen und politischen Gremien des CERN getragen wurde. Die Genehmigung des Projekts erfolgte 1994, noch während der Betriebszeit des LEP, was die Dringlichkeit und den wissenschaftlichen Konsens für den nächsten Energieschritt unterstrich.

Die Wiederverwendung des 26,7 km langen Tunnels war der entscheidende ökonomische Faktor. Ohne die bereits vorhandene Infrastruktur wäre die Finanzierung eines völlig neuen Tunnels in dieser Dimension politisch kaum durchsetzbar gewesen. Dennoch war die technische Herausforderung gewaltig. Die LEP-Ausrüstung musste komplett demontiert und durch die massiv komplexere LHC-Ausrüstung ersetzt werden.

Die technologische Hürde: Der LHC sollte Protonen mit einer Energie von bis zu 7 TeV pro Strahl (14 TeV Kollisionsenergie) beschleunigen, ein Energiebereich, der um ein Vielfaches höher war als der des LEP. Da Protonen deutlich schwerer sind als Elektronen, unterliegen sie weniger der Synchrotronstrahlung, was höhere Energien im selben Ring ermöglicht. Um die Protonen jedoch auf dieser Kreisbahn zu halten, waren extrem starke Magnetfelder erforderlich.

Hier kamen die supraleitenden Dipolmagnete des LHC ins Spiel. Sie mussten Feldstärken von bis zu 8,3 Tesla erzeugen, was eine Steigerung um den Faktor 80 im Vergleich zu den LEP-Magneten bedeutete. Hauschild (2016) beschreibt die Entwicklung dieser Magnete als "eine der größten technologischen Herausforderungen in der Geschichte der Teilchenphysik".

Für den Betrieb dieser Magnete war ein umfangreiches Kryogeniksystem erforderlich. Über 1.200 Hauptmagnete mussten auf eine

Betriebstemperatur von nur 1,9 Kelvin (-271,3 °C) gekühlt werden – kälter als der Weltraum. Hierfür wurde das größte Kryogeniksystem der Welt gebaut, das flüssiges Helium zur Kühlung verwendet. Dieser technische Aufwand spiegelte den Sprung in der Komplexität wider und war die Voraussetzung für die Durchführung von Hadronen-Kollisionen im Teravolt-Bereich.

V. Der Large Hadron Collider (LHC)

1. Technologie und Inbetriebnahme

Der Large Hadron Collider (LHC) nahm seinen Betrieb 2008 auf. Im Gegensatz zum LEP, der Leptonen (Elektronen und Positronen) zur Kollision brachte, kollidiert der LHC Hadronen (Protonen oder schwere Ionen wie Bleikerne). Diese Proton-Proton-Kollisionen bei hohen Energien erzeugen eine immense Fülle neuer Teilchen, die Einblicke in fundamentale Prozesse kurz nach dem Urknall ermöglichen sollen.

Die Inbetriebnahme war von Anfangsschwierigkeiten überschattet. Im September 2008, kurz nach dem Start, führte ein fehlerhaft gelöteter elektrischer Verbindungspunkt zwischen zwei Magneten zu einem Magnetquench (Verlust der Supraleitung). Dies hatte eine Explosion und eine massive Beschädigung des Kühlsystems und mehrerer Magnete zur Folge. Nach einer intensiven Reparatur- und Aufrüstungsphase konnte der LHC im November 2009 den Betrieb wieder aufnehmen. Erste Kollisionen bei einer Energie von 7 TeV fanden 2010 statt.

2. Wissenschaftliche Erfolge: Die Higgs-Entdeckung

Der Höhepunkt der LHC-Forschung war die Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012. Dieses Teilchen ist der fehlende Baustein des Standardmodells und ist eng mit dem Higgs-Feld verbunden, das allen fundamentalen Teilchen ihre Masse verleiht.

Die Suche wurde durch die beiden größten Detektoren, ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) und CMS (Compact Muon Solenoid), durchgeführt, die unabhängig voneinander arbeiteten. Am 4. Juli 2012 gaben die Experimente die Entdeckung eines neuen Teilchens mit einer Masse von etwa 125 GeV bekannt. Dieses Teilchen stimmte in seinen Eigenschaften mit dem theoretisch vorhergesagten Higgs-Boson überein. Für diese Entdeckung erhielten der britische Physiker Peter Higgs und der belgische Physiker François Englert im Jahr 2013 den Nobelpreis.

Der Physiker und Wissenschaftsautor Leon M. Lederman formulierte die tiefere, existentielle Frage, die die Forschung am LHC antreibt: „Wenn das Universum die Antwort ist, was ist die Frage?“ (L. Lederman, *The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question?*, Houghton Mifflin Harcourt, o.O., 1993). Die Suche nach dem Higgs-Boson war eine zentrale Frage, deren Beantwortung eine Tür zu neuen, unbekannten Phänomenen geöffnet hat. Der LHC ermöglichte zudem die Untersuchung neuer Phänomene, wie die Entdeckung von exotischen Materiezuständen wie den Pentaquarks und Tetraquarks in den Experimenten von LHCb. Zudem werden Fragen zur Dunklen Materie und Supersymmetrie erforscht.

3. Globale Bedeutung und Zukunftsaussichten

Das LHC-Projekt ist ein einzigartiges Beispiel für globale wissenschaftliche Kooperation. Über 10.000 Wissenschaftler aus mehr als 100 Ländern arbeiten an den Experimenten. Diese immense Zusammenarbeit erforderte die Entwicklung neuer Strukturen zur Datenverarbeitung. Das LHC Computing Grid wurde eingerichtet, um die riesige Datenmenge von täglich etwa 140 Terabyte zu verarbeiten, indem es Rechenzentren weltweit vernetzt.

Der Blick in die Zukunft zeigt Pläne für den High-Luminosity LHC (HL-LHC). Dieses Upgrade, das bis etwa 2029 abgeschlossen sein soll, wird die Luminosität (die Kollisionsrate) des Beschleunigers um den Faktor fünf bis zehn erhöhen. Das Ziel ist es, eine zehnmal größere Datenmenge zu sammeln, um die Eigenschaften des Higgs-Bosons noch präziser zu messen und seltene Prozesse besser untersuchen zu können.

Die langfristige Vision des CERN ist der Future Circular Collider (FCC), ein geplanter, 100 km langer Tunnel, der den LHC in der fernen Zukunft ablösen soll.

VI. Vergleich von LEP und LHC

Der Übergang vom LEP zum LHC war kein bloßer Austausch von Geräten, sondern ein fundamentaler Paradigmenwechsel in der Hochenergiephysik, der durch technologische Kontinuität ermöglicht wurde.

	LEP (Large Electron-Positron Collider)	LHC (Large Hadron Collider)
Kollidierende Teilchen	Leptonen (Elektronen/Positronen)	Hadronen (Protonen/Bleikerne)
Maximale Kollisionsenergie	Bis zu 209 GeV	Bis zu 14 TeV (Tera-Elektronenvolt)
Synchrotronstrahlung	Hoch (begrenzt die Energie)	Niedrig (ermöglicht hohe Energie)
Magnetfeldstärke	Gering (bis zu 0,1 Tesla)	Sehr hoch (bis zu 8,3 Tesla)
Betriebstemperatur	Raumtemperatur (für Magnete)	1,9 Kelvin (-271,3 °C)
Wissenschaftliche Ziele	Präzisionsphysik (Tests des Standardmodells)	Energiephysik (Suche unabhängig von Standardmodell)

Die Wahl der Teilchen ist der wesentlichste Unterschied:

1. Leptonen (LEP) sind punktförmige Elementarteilchen. Ihre Kollisionen sind sauber und erlauben extrem präzise Messungen der Teilchenparameter, wie es bei der Bestimmung der Z-Resonanz der Fall war. Die Energiebegrenzung durch die Synchrotronstrahlung machte jedoch eine weitere Steigerung der Kollisionsenergie unmöglich.
2. Hadronen (LHC) bestehen aus Quarks und Gluonen. Ihre Kollisionen sind komplex und erzeugen eine immense "Teilchensuppe". Der große Vorteil der Hadronen liegt jedoch in ihrer Masse: Sie verlieren kaum Energie durch Synchrotronstrahlung, wodurch sie im selben Tunnel auf die 70-fache Energie des LEP beschleunigt werden können. Diese hohe Energie war notwendig, um das schwere Higgs-Boson zu erzeugen und die energetische Grenze des Standardmodells zu durchbrechen.

Der LEP lieferte die Präzisionsmessungen, die bestätigten, dass das Standardmodell korrekt ist. Der LHC musste diese Präzision als gegeben hinnehmen, um mit der Suche nach dem Higgs-Boson und neuer Physik in den höchsten Energiebereichen fortzufahren, welche die Grenzen des Standardmodells aufzeigen. Die Wiederverwendung des Tunnels und des Know-hows zur Organisation globaler Kollaborationen gewährleistete die infrastrukturelle und menschliche Kontinuität dieses epochalen Wandels.

VII. Fazit

Die Geschichte des CERN ist eine bemerkenswerte Entwicklung, die den Fortschritt der europäischen und globalen Wissenschaft im 20. und 21. Jahrhundert widerspiegelt. Aus dem Bedürfnis nach friedlicher internationaler Zusammenarbeit in der Nachkriegszeit entstand ein Forschungszentrum, das heute der globale Führer in der Teilchenphysik ist.

Der Large Electron-Positron Collider (LEP) spielte dabei die entscheidende Rolle des Wegbereiters. Er lieferte die Präzisionsbestätigung des Standardmodells und schuf die notwendige Infrastruktur – allen voran den 27 km langen Tunnel – für den Nachfolger. Der Übergang vom LEP zum Large Hadron Collider (LHC) symbolisierte den technologischen Sprung von der Leptonen- zur Hadronenphysik, der es ermöglichte, einen neuen, energieintensiveren Bereich der Physik zu erschließen. Die technologische Meisterschaft in der Entwicklung von supraleitenden Magneten und Kryogenik war hierfür unerlässlich.

Der LHC hat mit der Entdeckung des Higgs-Bosons das Standardmodell vervollständigt und die physikalische Forschungslandschaft nachhaltig verändert. Dieses monumentale Projekt ist das Ergebnis einer beispiellosen globalen wissenschaftlichen Kooperation und hat gezeigt, dass die größten Herausforderungen nur durch gemeinsame Anstrengungen bewältigt werden können. Die CERN-Generaldirektorin Fabiola Gianotti fasste die Euphorie der Forschung einmal zusammen, indem sie die Entdeckung eines neuen Teilchens als etwas zutiefst "Sexyes" bezeichnete – ein Ausdruck, der die Leidenschaft der Teilchenphysik widerspiegelt.

Dieser Übergang verdeutlicht, dass wissenschaftlicher Fortschritt ein Prozess der kontinuierlichen Entwicklung ist, bei dem jede Generation von Beschleunigern auf den Fundamenten der vorherigen aufbaut. Der Erfolg des CERN ist eine Inspiration für zukünftige Generationen von Forschern.

Mit den Plänen für den High-Luminosity LHC und den Future Circular Collider wird CERN auch in Zukunft an der Spitze der physikalischen Forschung stehen und die Geheimnisse des Universums weiter entschlüsseln.

Literaturverzeichnis:

Internetquellen:

- CERN (1953): Convention for the Establishment of a European Organization for Nuclear Research,
<https://council.web.cern.ch/en/content/convention-establishment-european-organization-nuclear-research#2>
 (abgerufen am 03/05/2025)
- Wikipedia: CERN
<https://en.wikipedia.org/wiki/CERN>
 (zuletzt abgerufen am 9.11.2025)
- CERN (o.J.) The High-Luminosity LHC
<https://home.cern/science/accelerators/high-luminosity-lhc>
 (zuletzt abgerufen am 9.11.2025)
- Schweizer Illustrierte (2022). Interview mit der Cern-Chefin Fabiola Gianotti: «Ein Teilchen zu entdecken ist sexy»
<https://www.schweizer-illustrierte.ch/people/swiss-stars/fabiola-gianotti-interview-mit-der-cern-chefin-fabiola-gianotti-ein-teilchen-zu-entdecken-ist-sexy-391369>
 (abgerufen am 9.11.2025)

Literaturquellen:

- A. Einstein, Mein Weltbild.
 (Carl Seelig, München, 1952)
- M. Hauschild, Neustart des LHC: CERN und die Beschleuniger II
 (Springer, o.O., 2016)
- L. Lederman, The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question
 (Houghton Mifflin Harcourt, Vereinigte Staaten von Amerika, 1993)
- A. Straessner, Electroweak Physics at LEP and LHC, STMP 235
 (Springer, Berlin Heidelberg, 2010)

Manche Formulierungen wurden von der LLM Google Gemini 2.5 Flash verbessert.

Erklärung zur Seminararbeit

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.
Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen
Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.
Denkendorf, _____