

CERN: der LHC und die Schweizer Beteiligungen

1. Einleitung

Der *Large Hadron Collider* LHC kann, zusammen mit seinen vier Detektoren ALICE, ATLAS, CMS und LHCb als das grösste und stärkste Mikroskop aller Zeiten bezeichnet werden. Teilchen mit Energien von mehreren Tera-Elektronenvolt (TeV) prallen frontal aufeinander und ermöglichen so physikalische Untersuchungen bei kleinsten Distanzen von etwa einem Milliardstel eines Atomdurchmessers. Der Weg durch die Energiemassstäbe von Elektronenvolt zu Tera-Elektronenvolt führt von der Chemie und Festkörperphysik (Elektronenvolt, eV) über Kernreaktionen (Millionen von Elektronenvolt, MeV) zum Gebiet, welches die Teilchenphysiker in den letzten fünfzig Jahren untersucht haben (Milliarden von Elektronenvolt, GeV). Im neuen Bereich der Tera-Elektronenvolt hoffen die Forschenden ein Fenster zur Beobachtung von völlig neuen physikalischen Phänomenen zu finden. So wird z.B. das Higgs-Teilchen gesucht, das mit den bisherigen Forschungsinstrumenten nicht gefunden werden konnte (es soll den andern Elementarteilchen ihre Masse geben) oder die rätselhaften Teilchen, aus denen die dunkle Materie bestehen soll, die ihrerseits den grössten Teil der im Universum vorhandenen Materie ausmacht.

Der LHC ist in den letzten 15 Jahren von Physikern und Ingenieuren aus aller Welt gemeinsam geplant, entwickelt und gebaut worden. Um allzu hohe Kosten zu vermeiden, wurde er am CERN in den bestehenden Tunnel des früheren *Large Electron Positron Collider* LEP eingebaut: der Ringtunnel hat einen Durchmesser von 8.6 Kilometern und einen Umfang von 27 Kilometern und liegt zwischen 50 und 175 m tief im felsigen Untergrund zwischen dem Flug Genf und dem Jura-Gebirge. Der neue LHC wird in Kürze seinen Betrieb aufnehmen. Das Ziel, Protonenkollisionen bei 14 TeV durchzuführen, soll im Jahr 2009 erreicht werden.

Zum Nachweis und zur detaillierten Untersuchung der bei diesen Kollisionen entstehenden neuen Elementarteilchen haben die Teilchenphysiker in weltumspannenden Konsortien (den Kollaborationen) vier grosse Detektoren geplant, entwickelt, gebaut und in Betrieb genommen. Diese Detektoren werden möglicherweise völlig neue physikalische Erkenntnisse ermöglichen und unser Verständnis für den Aufbau der Materie und das Wesen der Kräfte vertiefen.

Die Schweiz hat bedeutende Beiträge zu drei dieser Detektoren geleistet und wird über die nächsten 10 Jahre auch ihre Verantwortung für einen entsprechend grossen und wichtigen Teil von Betrieb und Unterhalt übernehmen. Eine grosse Herausforderung stellt auch die Analyse der grossen Mengen der von den Detektoren produzierten Daten dar, aus denen die neuen Erkenntnisse gewonnen werden sollen. Die Schweizer Universitäten, die beiden Eidgenössischen Technischen Hochschulen (ETHs) sowie das Paul Scherrer Institut (PSI) sind sehr gut auf die bevorstehende Datenanalyse vorbereitet.

Diese Zusammenstellung soll eine kurze Übersicht über den LHC und seine Arbeitsweise geben (Kap. 2-5), konzentriert sich aber primär auf die Schweizer Beiträge zu den drei Detektoren – oder Experimenten – (Kap. 6) und ans CERN (Kap. 7).

2. Die LHC-Maschine

Die Grundparameter des LHC mit seinen kollidierenden Teilchenstrahlen übertreffen alle bisher weltweit gebauten Teilchen-Beschleuniger. Die beiden Protonenstrahlen werden die höchste je im Labor erzielte Energie aufweisen und werden von mehr als 9000 Magneten, von denen die Mehrheit supraleitend sind, auf ihrer Kreisbahn gehalten. Damit diese Magnete supraleitende Eigenschaften erhalten, müssen sie mit flüssigem Helium auf knapp unter 2

Grad Kelvin (minus 271.2 Grad Celsius) gekühlt werden. Bei diesen Temperaturen können sie die hohen elektrischen Ströme, die zur Erzeugung von grossen Magnetfeldern nötig sind, ohne elektrischen Widerstand verlustfrei leiten. Die Protonenstrahlen kreisen mit 99.9999991% der Lichtgeschwindigkeit gegenläufig im 27 km langen Doppelrohr, welches in derselben Magnetstruktur eingebaut ist. Jedes Proton hat eine kinetische Energie von 7 Tera-Elektronenvolt – das ist 7000 Mal mehr als seine Masse im Ruhezustand (und sieben Mal mehr als im heute energiereichsten Beschleuniger, dem Tevatron am Fermilab in den USA erzielt werden kann). Im Vollbetrieb beträgt die gesamte Energie der in jedem der beiden Strahlen kreisenden Teilchen 362 MJ (Mega-Joule), was ungefähr der kinetischen Energie eines beladenen Güterzuges in voller Fahrt entspricht.

Die Protonen kreisen in 2808 Paketen, so genannten *bunches*, die regelmässig im 27 Kilometer langen Doppelrohr verteilt sind. Jedes Paket hat die Form einer Stecknadel von einigen Zentimeter Länge und enthält etwa 100 Milliarden Protonen. Im Bereich der im Ring verteilten vier Detektoren werden die Pakete auf 16 Mikrometer im Durchmesser komprimiert (Durchmesser eines dünnen menschlichen Haares). Im Zentrum der Detektoren durchdringen sich diese Nadelpakete, dabei werden mehr als 600 Millionen Protonen-Zusammenstösse pro Sekunde produziert. Eigentlich finden die Kollisionen zwischen den Bausteinen der Protonen, den Quarks und Gluonen, statt. Diese Kollisions-Ereignisse sollen nun genau untersucht werden.

Angesichts all dieser Herausforderungen beim Bau, der Komplexität des gesamten Systems und der Vielzahl von Zulieferern und involvierten Hochschulkollaborationen ist es nicht erstaunlich, dass immer wieder technische Schwierigkeiten aufgetaucht sind, welche den Baufortschritt verzögert haben. Insgesamt sind aber die Ingenieure und Wissenschaftler äusserst zufrieden. Der LHC-Projektleiter Lyn Evans, kommentierte die Baugeschichte so: „*For a machine of this complexity, things are going remarkably smoothly.*“

3. Die Detektoren

Vier riesige Detektoren mit den Namen ATLAS, CMS, LHCb und ALICE sind um die Kollisionsstellen aufgebaut; der grösste würde die Kathedrale Notre-Dame in Paris zur Hälfte füllen, während der schwerste mehr Eisen enthält als der Eiffelturm. Die Detektoren werden die bei den Kollisionen erzeugten unterschiedlichen Elementarteilchen aufzeichnen und vermessen. Damit die Teilchenbahnen exakt verfolgt werden können, müssen die Detektorbauteile mit einer Präzision von 50 Mikrometern positioniert sein. 100 Millionen Datenkanäle erfassen die Messdaten, die pro Sekunde 100'000 CDs füllen würden. Da nicht alle diese Daten gespeichert werden können, verfügt jeder Detektor über ein mehrstufiges Auswahlssystem (so genannte *triggers*), welches wie ein grosser Spamfilter arbeitet und lediglich einige 100 der interessantesten Ereignisse pro Sekunde zur Speicherung in das zentrale CERN-Computersystem weiterleitet, von wo aus es dann zur späteren Analyse in das weltweite Computernetz GRID eingespielen wird. Umfangreiche Software erlaubt es die Teilchenspuren dieser Ereignisse zu analysieren und daraus die wichtigen Grössen der erzeugten Teilchen (Impuls, Masse und Flugbahn, etc.) sowie der neuen Elementarteilchen, aus denen sie entstanden sind, zurückzurechnen.

Die Aufgabe der Detektoren und des Datenverarbeitungssystems ist gigantisch: Bei Vollbetrieb werden rund 20 Proton-Proton Reaktionen bei jedem Kreuzen der Protonenpakete erwartet. 25 Nanosekunden später kollidieren bereits die nächsten zwei Pakete. Das heisst, dass die Teilchen aus der ersten Kollision sich noch immer in den äusseren Schichten der Detektoren bewegen, wenn schon die Teilchen aus der nächsten Kollision ihren Weg durch den Detektor angetreten haben. Um diese Aufgabe zu bewältigen, sind die Detektoren nach dem Zwiebschalenprinzip aufgebaut, wobei einige der Schichten auf eine bestimmte Teilchensorte oder Messmethode spezialisiert sind.

Die Detektoren wurden von weltweiten Interessenzusammenschlüssen von Hochschulen und Forschungslabors aufgebaut, den so genannten Kollaborationen. Diese trugen das Projekt mit intellektuellen Beiträgen sowie durch Entwicklung, Bau und Lieferung von Detektorelementen. Dabei wurde die Hardware teilweise in den institutseigenen Werkstätten gefertigt, teilweise aber auch von der Industrie gebaut. Während die Kollaborationen bei den beiden grossen Detektoren, CMS und ATLAS, rund 170 Institute umfassen, sind es in den LHCb- und ALICE-Kollaborationen etwa 50 beteiligte Institute. Auch die Schweizer waren in diesen Kollaborationen tätig und haben in grossem Masse wichtige und zentrale Beiträge beigesteuert; auf diese Mitarbeit wird im Kapitel 6 eingegangen.

4. Die Datenverarbeitung

Die filtrierte Rohdaten aus den Detektoren werden dann in einem Cluster von einigen tausend Rechnern am CERN-Rechenzentrum (*Tier-0*) in kompakte Datensätze verwandelt, die so aufgebaut sind, dass sie von den Physikern durchgesehen werden können. Die Datenanalyse findet mit Hilfe des so genannten Grid-Netzes statt, das zehntausende von PCs in Instituten auf der ganzen Welt umfasst (so genannte *Tier-2*), die alle über drei Dutzend Knoten (so genannte *Tier-1*) an wichtigen Forschungszentren auf drei Kontinenten verbunden sind. Die Knoten ihrerseits sind mit ausschliesslich für diesen Zweck genutzten Glasfaserkabeln mit dem CERN verbunden. Die Datensicherheit ist insofern gewährleistet, als die Rohdaten sowohl am CERN als auch an den *Tier-1* Zentren auf Magnetbändern archiviert werden. Diese Methode wird heute als die sicherste und kostengünstigste angesehen.

Die Detektoren sowie das Datenaufzeichnungs- und das Datenverarbeitungssystem waren bereits vor der Inbetriebnahme des LHC getestet worden: Da auch die kosmische Strahlung ihre Spuren in den Detektoren hinterlässt, wurde diese dazu verwendet, um die Detektoren, die Datenaufzeichnungssysteme und die Analysesoftware zu überprüfen.

5. Wissenschaftliche Zielsetzungen des LHC

Von der Erforschung der Welt des Mikrokosmos im Energiebereich von Tera-Elektronenvolt werden neue Einsichten auf dem Gebiet der Teilchenphysik erwartet, welche sicherlich auch benachbarte Wissenschaftsgebiete beeinflussen werden. Die Physiker erwarten, dass in dieser neuen Welt klar wird, was die grundlegenden Naturkräfte – die Gravitation, die starke und die elektroschwache Kraft – verbindet, und was sie unterscheidet. Dadurch werden neue Einsichten zu grundlegenden Fragen erwartet, insbesondere nach der Ursache und der Vielfalt dieser Kräfte.

Die Suche nach dem Higgs-Teilchen ist dabei lediglich der erste Schritt. Darüber hinaus könnten Phänomene entdeckt werden, welche erklären, weshalb die Gravitationskraft so viel schwächer ist als die anderen Naturkräfte und aus was die bisher unbekannte Dunkle Materie besteht, die unser Universum erfüllt.

Physiker arbeiten heute auf der Grundlage des so genannten Standard-Modells, welches in den 70er und 80er Jahren entwickelt wurde und in den letzten 20 Jahren zu einem guten Teil durch Experimente konsolidiert werden konnte. Jedoch ist die theoretische Erklärung unvollständig und einige wichtige beobachtete Phänomene können nicht erklärt werden. Eines der Grundprinzipien des Standardmodells ist die Tatsache, dass seine Gleichungen fast symmetrisch für Materie und Antimaterie sind. Trotzdem besteht die Welt fast ausschliesslich nur aus Materie. Woher kommt diese grosse Asymmetrie?

Unklar ist auch die Grundlage der Massen der Teilchen: Kein anderes Problem hat die Teilchenphysiker in den letzten Dekaden so sehr beschäftigt wie das nach dem theoretischen

Physiker Peter Higgs benannte Teilchen, das Antwort auf die fundamentale Frage geben soll, wie Elementarteilchen zu ihrer Masse kommen. Seinen beinahe schon ikonenhaften Status verdankt das Higgs-Teilchen der Tatsache, dass es der letzte Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik ist, der noch nicht experimentell nachgewiesen werden konnte. Die Suche nach dem Higgs ist deshalb eines der vordringlichsten Ziele des LHC.

6. Die Beiträge der Schweiz an den Aufbau der LHC-Detektoren

Forschende aus vier Universitäten (Basel, Bern, Genf, Zürich), den beiden ETHs (EPFL und ETHZ) sowie des Paul Scherrer Instituts (PSI) haben in Kollaborationen (weltweiten wissenschaftlichen Konsortien) mitgewirkt und Beiträge an die LHC-Detektoren geleistet. Mehrere der beteiligten Schweizer Forschenden sind seit den vor ungefähr 15 Jahren begonnenen Vorbereitungsarbeiten mit dabei. Diese Beteiligungen sind wichtige Elemente im Portfolio der Hochschulen als Forschungsinstitutionen und als Zentren der universitären Lehre. Doktorierende, die später führende Aufgaben in Wissenschaft, Industrie und Verwaltung übernehmen werden, erhalten so die Chance, am Bau und Betrieb eines einzigartigen Forschungsinstrumentes mitzuarbeiten.

Die wissenschaftlichen Beteiligungen der Schweiz in drei der vier Detektoren sind in Tabelle 1 zusammengestellt.¹ Sie umfassen intellektuelle und technische Beiträge der involvierten Forschungsgruppen, Soft- und Hardware-Entwicklungen in den Instituten selber als auch Komponenten, welche in der Industrie produziert wurden. Dank dieser Zusammenarbeit konnte zwischen den beteiligten Partnern und den Forschungs- und Bildungsinstitutionen ein kreativer Kreislauf des Wissens geschaffen werden, der ohne Zweifel zu einer Langzeit-Wertschöpfung führt. Industrie und Forschung zeigten Kreativität und Einfallskraft, vor allem wenn technologisches und ingenieurmässiges Neuland betreten werden musste, um die Teilchen mit einem Maximum an Genauigkeit und Effizienz aufzuspüren. Das so gewonnene einzigartige Wissen kann nun auch für andere Projekte und Produkte wieder investiert werden und kommt dadurch der gesamten Wirtschaft zugute.

Detektor	Anzahl beteiligter Institute weltweit	Beteiligte Schweizer Institute	Schweizer Beiträge zu Entwicklung und Bau der Detektoren
ATLAS	169	Universitäten Bern und Genf	Silizium-Streifen-Spurdetektor, Kalorimeter-Auslese Elektronik, <i>high-level trigger</i> , Datengewinnung, <i>event building data logging</i> , <i>coil-casings</i> , supraleitende Kabel
CMS	183	Universitäten Basel und Zürich, ETHZ, PSI	Pixel-Detektor, Silizium-Streifen-Detektor, Kristalle, Photonsensoren und Ausleseelektronik für das elektromagnetische Kalorimeter, Supraleiter für die 4 Tesla-Spule, Magnetbeschaffung
LHCb	51	EPFL, Universität Zürich	Silizium-Streifen-Detektor, Auslesekarte für Subdetektoren, Auslese-Link des Vertexdetektors, Trigger

Tabelle 1: Die drei LHC-Detektoren mit Schweizer Beteiligung. Die letzte Spalte enthält die Hardware-Beiträge der Schweizer Forschergruppen.

¹ Beim vierten Experiment (ALICE), welches der Schwerionenphysik gewidmet ist, sind keine Schweizer Gruppen beteiligt.

Zusätzlich zu erwähnen sind die aktive Rolle der Schweizer Institute bei der Vorbereitung der Datenanalyse und das für die Auswertung benötigte schweizerische Rechenzentrum (*Tier-2*). Dieses war durch die Zusammenarbeit aller beteiligter Institute unter dem Dach des Schweizerischen Instituts für Teilchenphysik (Swiss Institute for Particle Physics, CHIPP, www.chipp.ch) initiiert worden und befindet sich am Schweizerischen wissenschaftlichen Rechenzentrum CSCS (Centro Svizzero per il calcolo scientifico) in Manno/TI.

Des Weiteren spielen Schweizer Physikerinnen und Physiker eine sehr aktive Rolle bei der Koordination der Projekte und sind auch auf verschiedenen Stufen beteiligt in den Leitungsorganisationen der Kollaborationen.

Per Stichtag 1. Januar 2006 wurden von den Schweizer Instituten, welche in den Kollaborationen beteiligt sind, die folgenden Arbeitsleistungen für die Detektoren zur Verfügung gestellt (Angaben in Vollzeit-Äquivalenten): ATLAS: 21; CMS: 38; LHCb: 25. Dazu kommen noch 7 Doktorierende von Schweizer Hochschulen bei ATLAS, 13 bei CMS und 11 bei LHCb. Zwischen 1996 und 2008 wurden zudem 70 Masterarbeiten und 55 Doktorarbeiten zum Thema Entwicklung oder Bau der LHC-Detektoren fertig gestellt. Fünf weitere Doktorarbeiten hatten die LHC-Beschleunigerphysik zum Thema.

Die gesamten Investitionsmittel, die im Zeitraum 1996 bis 2008 aus Schweizer Geldquellen für die LHC-Detektoren zur Verfügung gestellt wurden, summierten sich auf 130 MCHF, was rund 9% der Gesamtkosten der drei Detektoren entspricht.

6.1 Die Schweizer Beiträge an ATLAS

Das ATLAS-Experiment ist so ausgelegt, dass Energie und Richtung von Photonen, geladenen Leptonen und andern geladen und neutralen Teilchen mit hoher Präzision identifiziert und gemessen werden können. Als sogenannter Allzweckdetektor soll ATLAS so viele physikalisch charakteristische Teilchenspuren als möglich festhalten.

Abbildung 1 zeigt eine Aufnahme des Detektors während der Bauphase. Seine schiere Grösse ist beeindruckend: er würde die Hälfte der Kathedrale Notre-Dame in Paris füllen (beachte die Grösse des Arbeiters in Abbildung 1).

Der Detektor besteht unter anderem aus einem 7 m langen inneren Spur-Detektor. Dieser ist zusammengesetzt aus diskreten Halbleiterpixeln und Mikrostreifenelementen, umgeben von einem Übergangsstrahlungsdetektor. Die jeweils sehr feinmaschigen, hermetischen und strahlungsresistenten elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter erreichen eine ausgezeichnete Energiemessung bis zu einem Grad an den Strahl heran. Die Kalorimeter sind umgeben von einem Müonenspektrometer. Dieser benötigt ein starkes Magnetfeld; dieses wird durch eine eisenlose Ringspule erzeugt, welche die Dimension des Experiments bestimmt.

Das Magnetfeldsystem basiert auf einer inneren, dünnen und supraleitenden Spule welche den Hohlraum im Innern des Detektors umgibt und einer grossen, supraleitenden hohlzylinderförmigen Ringspule, bestehend aus acht unabhängigen Spulen, die aussen um die Kalorimeter angebracht sind.

Die folgenden Institute und Industriefirmen sind in ATLAS involviert:

Universität Bern: Prof. A. Ereditato, Prof. K. Pretzl (bis 2006)

Universität Genf: Prof. A. Blondel, Prof. A. Clark, Prof. M. Pohl

Grosse Industrie- und Dienstleistungsaufträge (> 0.2 MCHF) im Werte von 13.7 MCHF gingen an die folgenden Schweizer Firmen: Alcatel Cables Suisse, Asea Brown Boveri Switzerland, Cicorel SA, Dell Switzerland, EBV Elektronik, Hamamatsu Photonics, SUN Microsystems (in alphabetischer Reihenfolge).

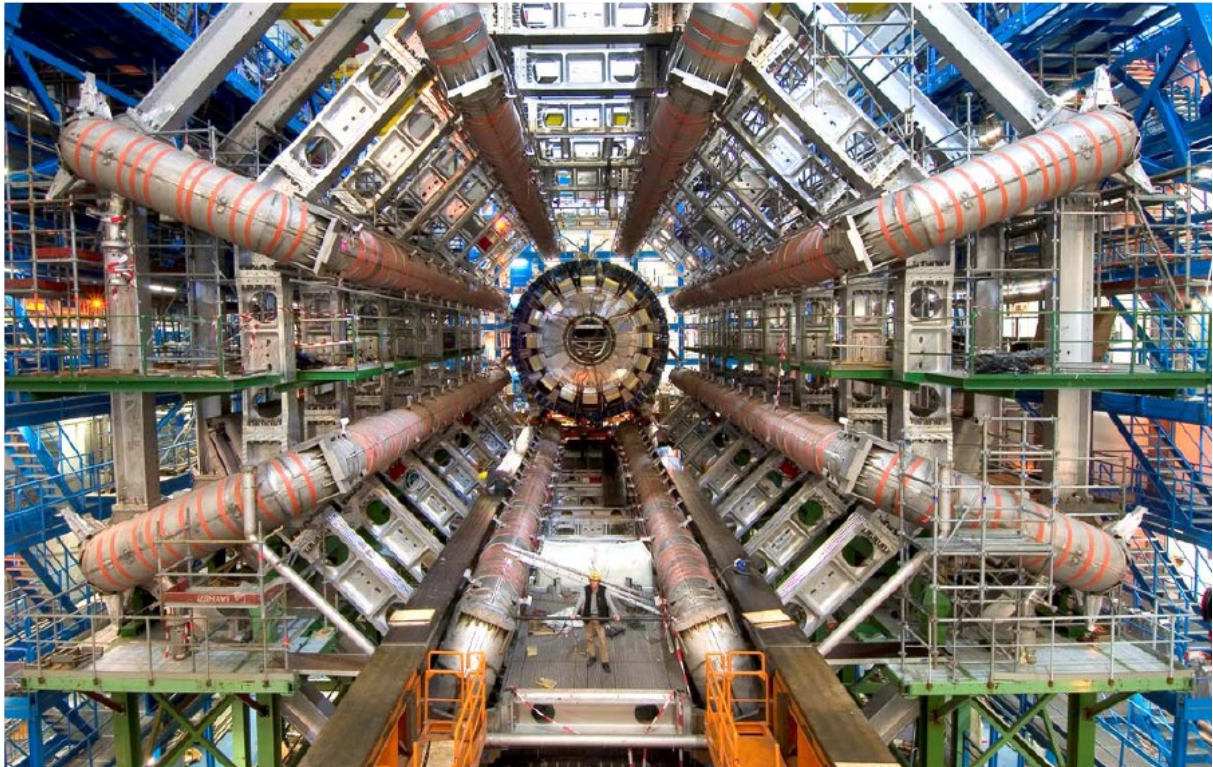


Abbildung 1: Foto des ATLAS-Detektors im LHC vor dem Einbau der Detektorelemente. Die acht symmetrisch angeordneten Röhren beinhalten die supraleitenden Spulen, die dann im Betrieb das grosse toroidale Magnetfeld erzeugen.

Folgende Beiträge wurden geleistet (siehe Abbildung 2):

- Magnetsysteme
U.BE + U.GE: verantwortlich für die Beschaffung der supraleitenden Kabel und der Aluminiumgehäuse für die Spulen;
- Silizium-Spurdetektor:
U.GE: Halterung für den Silizium-Spurdetektor: Auslegung, Erstellung von Prototypen, Beschaffung und Montage der vier Hochpräzisions-Barrel-Halterungen aus Karbonfaser und ihre Lieferung zur Modulmontage sowie auch die Barrel-Entwicklungscoordination;
U.GE: verantwortlich für den Silizium-Spurdetektor-Mechanismus des inneren Spurdetektors;
U.GE: Silizium-Spurdetektor-Auslese: Auslegung, Erstellung von Prototypen, Beschaffung und Test der Siliziumsensoren;
U.GE: Mitwirkung am Mikroelektronikdesign, dem Erstellen von Prototypen, Beschaffung und Testen des Front-End-Auslesechip;
U.GE: Silizium-Spurdetektormodule: Auslegung und Erstellung von Prototypen der Module; Zusammenbau und Test von 657 Siliziumdetektor-Modulen (in Zusammenarbeit mit Krakau, Prag und dem CERN, wo Komponenten- und „burn-in“-Studien durchgeführt wurden);;
- Flüssig-Argon-Kalorimeter:
U.GE: Auslegung, Bau, Test und Integration der insgesamt 245 Auslesesteuerungen für die Flüssig-Argon-Kalorimeter ROD Karten;
- High-Level Trigger und Datenerfassungssystem:
U.BE: Auslegung, Umsetzung, Integration und Inbetriebnahme der Event-building, Event-Data-Routing und Data-Logging-Systeme;

U.GE: Design der Algorithmen für Kalorimeter-Trigger und Kalibrierung, Trigger Monitoring, Trigger und On-line-Integration, Inbetriebnahme mit kosmischer Strahlung;
 U.BE + U.GE: Design und Implementierung der High-Level Trigger Steuerungssoftware, Algorithmus-Timing, Datenvorbereitung.

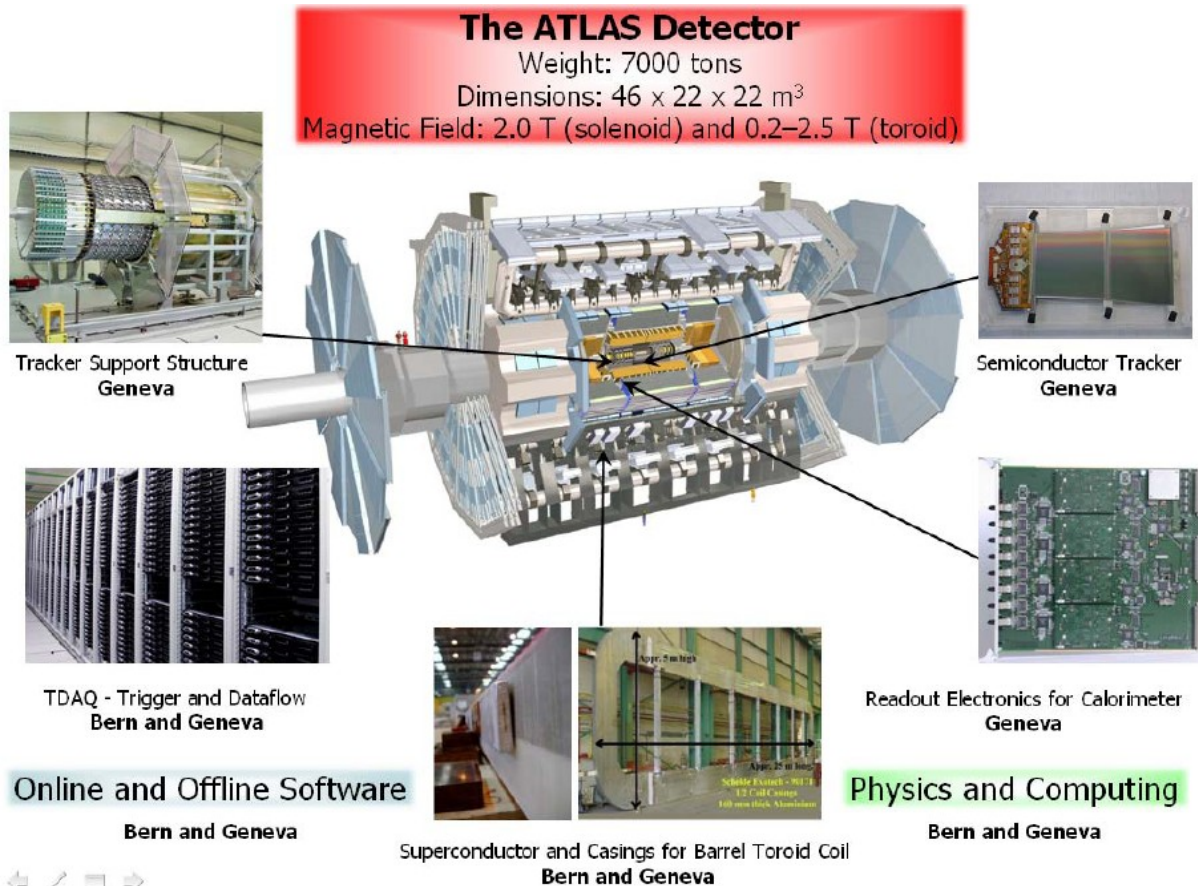


Abbildung 2: Schematische Darstellung des ATLAS-Detektors mit den verschiedenen Schweizer Beiträgen

Die Gesamtausgaben der Schweiz für ATLAS (Forschung und Entwicklung sowie Bau) in der Periode 1996-2008 beläuft sich auf 13.6 MCHF², wovon 77% vom SNF und 16% von den beteiligten Kantonen (GE, BE)/ Universitäten stammt. Während der ATLAS-Entwicklung konnten 9 Masterarbeiten und 17 Dissertation fertig gestellt werden. Das bei den Entwicklungsarbeiten in technologischen Spitzenbereichen erworbene Wissen und Können ermöglichte die Gründung von 4 Spin-off-Firmen durch Universitätsmitarbeitende.

6.2 Die Schweizer Beiträge an CMS

CMS ist so ausgelegt, dass Energie und Impuls von Photonen, Elektronen, Müonen und andern geladenen Teilchen mit hoher Genauigkeit gemessen werden können. So wird eine ausgezeichnete Auflösung der Masse jener Teilchen erzielt, welche in solche Endprodukte zerfallen. CMS besteht aus einem leistungsstarken inneren Spurdetektionssystem basierend auf Siliziumtechnologie (Mikrostreifen und Pixel) und einem Hochpräzisionskalorimeter (szintillierende Blei-Wolfram-Kristalle) gefolgt von einem hadronischen Kalorimeter bestehend aus Plastikszintillatorenziegel, welche zwischen Absorberplatten aus Messing

² plus ein CERN-Beitrag von 8.8 MCHF als Folge einer Spende des Kantons Genf an das CERN

eingeschoben werden. Weiter besteht CMS aus einem starken, von einer supraleitenden Spule erzeugten, Magnetfeld (4 Tesla), gekoppelt mit einem multi-Lagen Mionensystem.

CMS enthält mehr Eisen als für den Bau des Eiffelturms verwendet wurde, und die Absenkung der Detektorelemente in die unterirdische Halle stellte eine der kompliziertesten Kranoperationen dar, die je im Bereich der Teilchenphysik vorgenommen worden waren. Diese schwierige Aufgabe ging ohne Probleme über die Bühne, auch für das schwerste Element, das 2000 Tonnen schwere zentrale Element.

Das innerste Bestandteil des Spurdetektors des CMS Experiments, der Pixeldetektor, besteht aus 1440 Modulen die in drei zylinderförmigen Lagen angeordnet sind. Der elektromagnetische Hochpräzisionskalorimeter enthält etwa 76'000 Blei-Wolfram Kristalle (Totalgewicht: circa 80 Tonnen), wovon 72'000 in Russland und 4'000 in China hergestellt wurden.

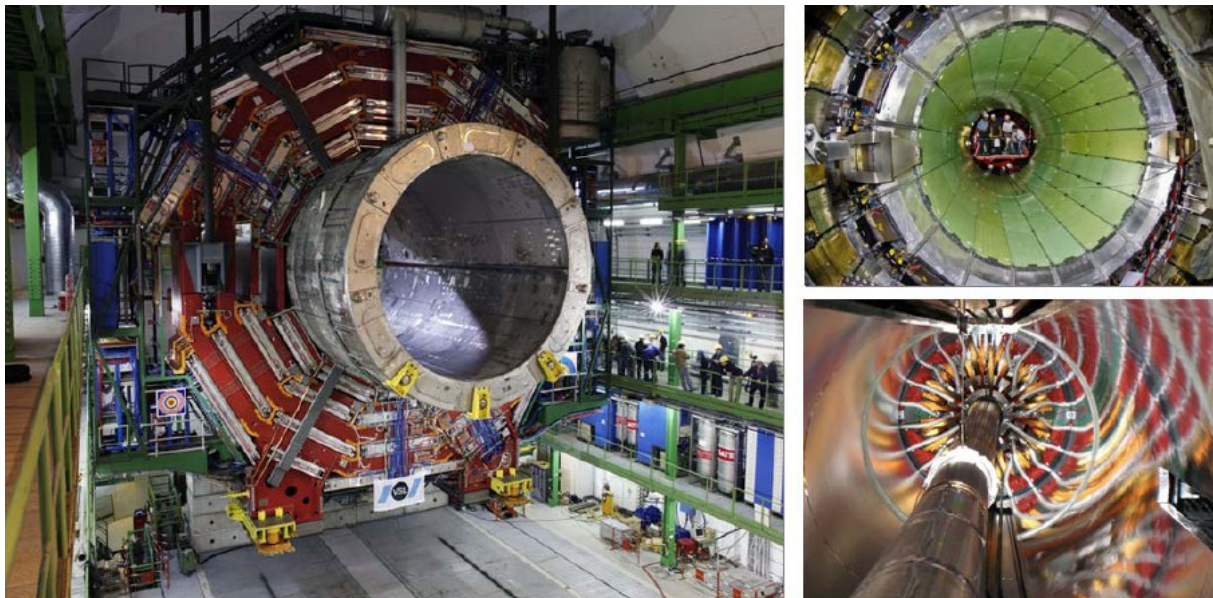


Abbildung 3: Foto des CMS-Detektors im LHC:

Links: Absenkung des zentralen und schwersten Detektorelementes in die CMS-Kaverne (rund 100m unter der Erdoberfläche).

Oben rechts: Endmontage des Barrel-Kristall-Kalorimeter im Juli 2007.

Unten rechts: Endmontage des Pixel-Detektors im Juli 2008.

Die folgenden Institute und Industriefirmen sind in ATLAS involviert:

ETH-Zürich: Prof. G. Dissertori, Prof. R. Eichler (bis 2007), Prof. Ch. Grab, Prof. H. Hofer (bis 2001), Prof. U. Langenegger, Prof. F. Pauss

Paul Scherrer Institute (PSI): Prof. R. Horisberger, Dr. Q. Ingram, Dr. D. Renker

Universität Zürich: Prof. C. AMSler

Universität Basel: Prof. L. Tauscher (bis 2004)

Grosse Industrie- und Dienstleistungsaufträge (>0.2 MCHF) im Gesamtwert von 11 MCHF gingen an die folgenden Schweizer Firmen: Alcatel Cables Suisse SA, Ascom Schweiz AG, Brugg Kabel AG, GS Präzisions AG, Hamamatsu Photonics, Hightec Lenzburg, Marti Supratec AG, VSL Schweiz AG (in alphabetischer Reihenfolge).

Die Schweizer Gruppen waren schon in den frühen Phasen von CMS in die Auslegung und die physikalische Beurteilung involviert und haben wie folgt beigetragen (siehe Abbildung 4):

- CMS Ingenieur- und Integrationszentrum EIC am CERN:
ETHZ: Leitung des CMS EIC am CERN, wo die Produktion der verschiedenen Detektorelemente in den beteiligten Ländern koordiniert und überwacht wird.
- Kristall-Kalorimeter:
ETHZ: Beschaffung und Leistungsprüfung (einschliesslich Bestrahlungstests) der 76'000 Kristalle;
ETHZ und PSI: Auslegung, Beschaffung und Test der elektronischen Komponenten und Integration der Ausleseelektronik, einschliesslich Zuständigkeiten in der Softwareentwicklung.
PSI: Produktion, Auslieferung und Kontrolle der 140'000 APDs (Avalanche Photo Diodes) für die Barrel-Kristalle; es wird erwartet, dass diese während 10 Jahren mit einer Zuverlässigkeit von 99.9% arbeiten.
- Pixel-Barrel-Detektor:
PSI und ETHZ: Auslegung, Bau und Inbetriebnahme des Pixel-Barrel-Detektors sowie Auslegung und Entwicklung des Pixelsensors, der Sensormodule und der Auslesechips.
U.ZH: Aufbau der Pixel-Barrel-Detektor-Halterung dessen Kühlungsstrukturen und Zufuhrkanäle mitsamt den optischen Links zur Steuerung der Ausleseelektronik;
Entwicklung entscheidender Softwarebestandteile zur Rekonstruktion der Teilchenspuren.
- Supraleitende Magnetspule:
ETHZ: verantwortlich für den Herstellungsprozess der supraleitenden Kabel sowie für grosse Teile der Magnetauslegung und -beschaffung.

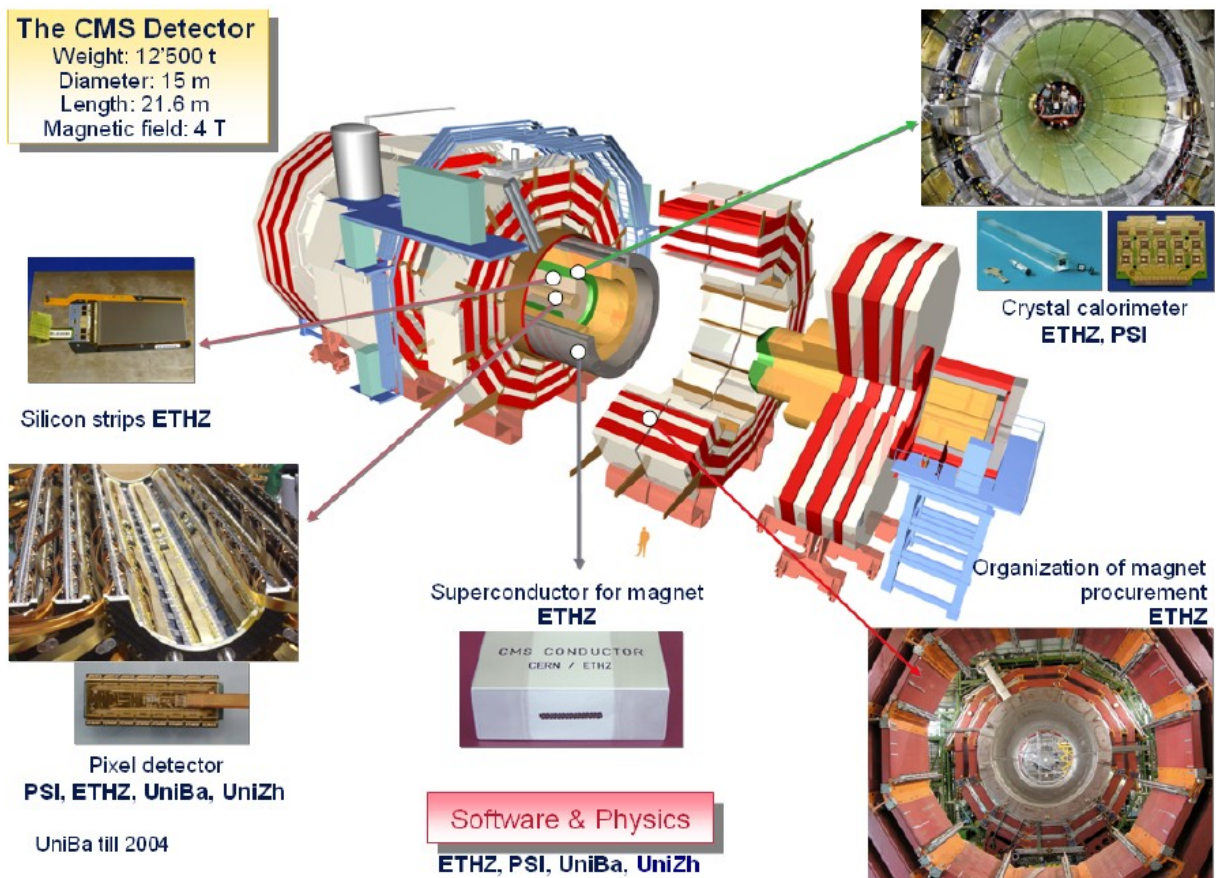


Abbildung 4: Schematische Darstellung des CMS-Detektors und der verschiedenen Schweizer Beiträge.

Die Gesamtausgaben der Schweiz für CMS (Forschung und Entwicklung sowie Bau) in der Periode 1996-2008 beläuft sich auf 107 MCHF, wovon 18% vom SNF, weniger als 1% von den beteiligten Kantonen (ZH, BS)/ Universitäten, 65% vom ETH-Bereich und 16% von der Bundesverwaltung stammt. Während der CMS-Entwicklung konnten 34 Masterarbeiten und 19 Dissertation fertig gestellt werden. Das bei den Entwicklungsarbeiten in technologischen Spitzenbereichen erworbene Wissen und Können ermöglichte die Gründung zweier Spin-off-Firmen durch Mitarbeitende der beteiligten Institute.

6.3 Die Schweizer Beiträge an LHCb

LHCb ist ein b-Quark-Physikexperiment der zweiten Generation, welches systematisch CP^3 verletzende Prozesse und seltene Zerfälle im B-Mesonen System messen wird. Diese Messungen werden mit noch nie da gewesener Präzision und in vielen verschiedenen Zerfallskanälen des b-Quark-Mesons vorgenommen.

Der Detektor ist als "Single-Arm" Forward-Spektrometer ausgelegt und benutzt einen grossen Dipolmagneten (Foto und Seitenansicht siehe Abbildungen 5 und 6).

Die folgenden Institute und Industriefirmen sind in LHCb involviert:

EPFL (seit 2003; vorher: Universität Lausanne): Prof. A. Bay, Prof. T. Nakada (Sprecher bis 2008, seither Physik-Koordinator), Prof. O. Schneider (Physik-Koordinator bis 2008)
Universität Zürich: Prof. U. Straumann

Grosse Industrie- und Dienstleistungsaufträge (> 0.2 MCHF) im Werte von 2.7 MCHF gingen an die folgenden Schweizer Firmen: EVB Elektronik, Hamamatsu Photonics, Mahr AG Schweiz (in alphabetischer Reihenfolge).

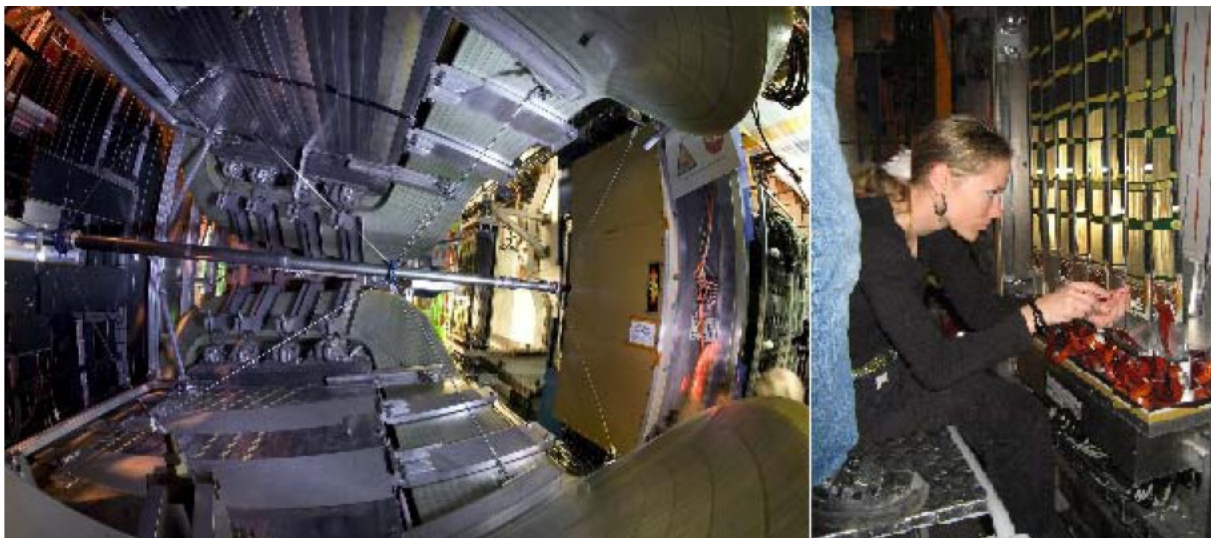


Abbildung 5: Foto des LHCb-Detektors im LHC:

Links: LHCb-Spektrometer-Magnet

Rechts: Installation des Siliziumstreifen-Detektors "made in Zurich".

Folgende Beiträge wurden geleistet (siehe Abbildung 6):

- Entwicklung, Bau und Umsetzung des LHCb-Silizium-Spurdetektor:
EPFL: Inner Tracker (inner part of T1, T2, T3),
U.ZH: Trigger Tracker (TT).

³ Teilchen- und Antiteilchen-Symmetrie

- Gemeinsames Ausleseelektroniksystem für den Silizium-Spurdetektor und den Vertexdetektor VELO:
 U.ZH: Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme der on-detector-Teile der Ausleseelektronik des Silizium-Spurdetektors. Das digitale optische Datentransfersystem wird ebenfalls von den meisten andern Sub-Detektoren von LHCb verwendet.
 EPFL: Entwicklung des Ausleseelektroniksystems für VELO und den Silizium-Spurdetektor (TELL 1). Auch dieses System wird fast von allen LHCb-Sub-Detektoren verwendet.

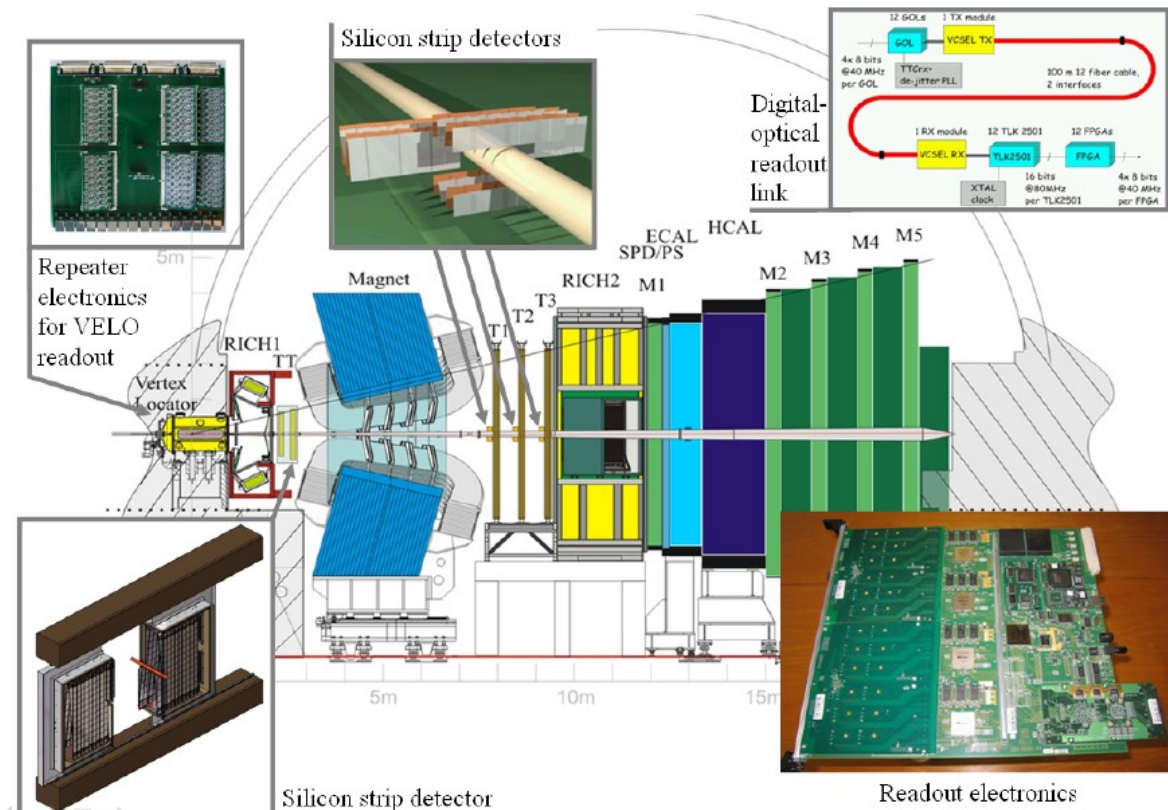


Abbildung 6: Schematische Seitenansicht des LHCb-Detektors und die verschiedenen Schweizer Beteiligungen

Die Gesamtausgaben der Schweiz für LHCb (Forschung und Entwicklung sowie Bau) in der Periode 1996-2008 beläuft sich auf 11 MCHF, wovon 56% vom SNF, 30% von den beteiligten Kantonen (ZH, VD)/ Universitäten und 14% vom ETH-Bereich stammt. Während der LHCb-Entwicklung konnten 27 Masterarbeiten und 19 Dissertation fertig gestellt werden. Spin-off-Firmen wurden keine gegründet.

7. Beiträge der Schweiz als CERN-Sitzstaat und Industrierückfluss

Neben dem normalen Mitgliederbeitrag von rd. 30 MCHF pro Jahr (dies entspricht rund 3% des CERN-Budgets) hat die Schweiz seit vielen Jahren als Sitzstaat das CERN mit Sonderbeiträgen im Gesamtbetrag von über 125 MCHF zusätzlich direkt unterstützt. Die Sonderbeiträge unterstreichen den politischen Willen, das CERN als Weltlabor für Teilchenphysik in

der Schweiz zu behalten und seine Ausstrahlung auch für die Förderung des wissenschaftlichen und technischen Nachwuchses in der Schweiz zu nutzen.

Sonderbeiträge umfassen z.B. die Vorauszahlung von Mitgliederbeiträgen zur Linderung von cash-flow-Engpässen, die Finanzierung von Infrastrukturen (wie z.B. Wasserpumpstationen), die Gewährung einer zusätzlichen Inflationsanpassung, Beiträge an wissenschaftliche Experimente oder einen Spezialbeitrag zur Umsetzung der europäischen Strategie für Teilchenphysik. Daneben gibt es Infrastrukturvorhaben, an denen sich Bund und Kanton Genf gemeinsam beteiligten, wie z.B. einer der Verbindungstunnel zwischen dem Vorbeschleuniger und dem LHC.

Nicht eingerechnet in den Sonderbeiträgen sind die zinsfreien Darlehen für Bauvorhaben (knapp 46 MCHF) und das ehemalige *Palais de l'Equilibre* der expo-02, welches die Schweiz dem CERN zum 50-jährigen Bestehen schenkte (transportiert und wieder aufgebaut durch die Armee). Die nachstehende Liste gibt eine Übersicht über die Sonderbeiträge der letzten 20 Jahre.

LEP-Sonderbeitrag	8.1	MCHF
Pumpstation Vengeron	4.0	MCHF
Zinsen für vorgezogenen Beitragszahlungen (1990-1992; 2007-2009)	27.0	MCHF
Zusätzliche Inflationsanpassung	11.2	MCHF
Neutrinoexperiment CNGS	1.5	MCHF
LHC-Teststrahl am PSI	13.2	MCHF
Europäische Strategie für Teilchenphysik: Spezialbeitrag	27.6	MCHF
LHC-Sonderbeitrag (Tunnel und ATLAS)	33.8	MCHF
<i>davon Kanton Genf: 16.3 MCHF</i>		
Gesamtbeitrag der Sonderleistungen	126.4	MCHF

Als Sitzstaat gewinnt die Schweiz aber auch durch die Anwesenheit des CERN: Im Vergleich zu ihrem Anteil am Budget ist die Schweiz mit 7.4% Personalanteil überproportional vertreten. Neben den Wissenschaftlern, die als Angestellte oder als Gastforschende das CERN nutzen, gibt es insbesondere eine grosse Anzahl von Schweizerinnen und Schweizern, die in administrativen und technischen Berufen anspruchsvolle Arbeitsplätze beim CERN gefunden haben. Zudem bietet das CERN über 20 hochinteressanten Lehrstellen für Auszubildende an, die zu mehr als drei Viertel von Schweizerinnen und Schweizern besetzt sind.

Die am CERN arbeitenden Menschen sind aber auch ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor für die Region: 2500 Angestellte leben hier, kaufen da ein und haben in vielen Fällen Wohneigentum erworben. Dadurch fliesst ein grosser Teil der ausbezahlten Löhne wieder in die Schweiz zurück. Die mehr als 8000 Gastforschenden aus aller Welt, die pro Jahr über kürzere oder längere Zeit am CERN verweilen, tragen zur Tourismusindustrie der Region bei.

Noch grösser ist der Rückfluss aus den Industrie- und Dienstleistungsverträgen des CERN, die – oft aus Standortgründen – überproportional in unser Land zurückfliessen. Die nachstehende Liste zeigt beispielhaft, dass in den letzten 5 Jahren ein Nettorückfluss von mehr als 200 MCHF erzielt werden konnte.

	2003	2004	2005	2006	2007	Total
Rückfluss durch industrielle Lieferverträge	35.4	54.1	55.3	49.3	33.5	227.6
Rückfluss durch Dienstleistungsverträge	28.9	32.2	26.9	29.1	28.7	145.8
Total	64.3	86.3	82.2	78.4	62.2	373.4
Jahresbeitrag CH	35.5	29.5	31.7	32.2	31.5	160.4

Delta (Netto-Rückfluss)	28.8	56.8	50.5	46.2	30.7	213.0
-------------------------	------	------	------	------	------	--------------