

Der heutige Hauptstandort in Meyrin am Rande von Genf lag ursprünglich auf einem nur landwirtschaftlich genutzten Gelände unmittelbar an der Grenze zu Frankreich. In frühen Fotos aus den Gründerjahren bilden Kühe, Weiden und Felder die reizvollen Motive neben den Kommissionsmitgliedern zur Begutachtung des Standorts und des Baufortschritts. Wo heute die Straßenbahn aus Richtung Genf endet, gab es noch keine asphaltierten Straßen. Der Schwertransport der großen Magnetteile des ersten Beschleunigers am CERN, des Synchrozyklotrons (SC), musste über Schotterwege und durch die enge Ortsdurchfahrt von Meyrin erfolgen, mit nur wenigen Zentimetern Abstand zu den Häuserwänden (siehe Abb. 2.1).

CERN lebt von seinen Teilchenbeschleunigern. Das Synchrozyklotron mit einer Energie¹ von 600 MeV wurde im Jahr 1957 als erster Beschleuniger in Betrieb genommen und erst Anfang der 1990er Jahre stillgelegt. Nach einer jahrelangen Abkühlphase zum Abklingen der durch den Betrieb entstandenen Radioaktivität wurde das Synchrozyklotron rechtzeitig zur 60-Jahr-Feier des CERN 2014 der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Eine aufwändige und beeindruckende Audio-Video-Show führt den Besucher in die Zeit der Anfänge des CERN zurück und erweckt den Beschleuniger wieder zu neuem virtuellen Leben.

Der Methusalem unter den Beschleunigern ist das Proton Synchrotron (PS), der zweite Beschleuniger des CERN, gleichzeitig mit dem Synchrozyklotron konzipiert und zwei Jahre später, am 24. November 1959 in Betrieb genommen. Mit einer

¹ Auch wenn meist von Teilchenbeschleunigern und beschleunigten Teilchen gesprochen wird, ist weniger die Geschwindigkeit, sondern viel mehr die (kinetische) Energie der Teilchen entscheidend. Aus praktischen Gründen wird die Energie dabei in der Einheit Elektronenvolt eV angegeben. 1 eV entspricht der Energie eines Elektrons oder Protons, das durch eine elektrische Spannung von 1 V beschleunigt wurde. Größere Einheiten sind MeV (1 Mio. = 10^6 eV), GeV (1 Mrd. = 10^9 eV), TeV (1 Billion = 10^{12} eV). Mehr zur Beschleunigung von Teilchen findet sich im Kap. 5 über Teilchenbeschleuniger.



Abb. 2.1 Transport einer Magnetspule des Synchrozyklotrons durch die Straßen von Meyrin. (© 1956 CERN)

maximalen Energie von 28 GeV holte das Proton Synchrotron für kurze Zeit auch gleich den Weltrekord für die höchste erreichte Energie von den USA nach Europa. Auch nach mehr als 56 Jahren gehört das Proton Synchrotron noch lange nicht zum wahrhaftigen alten Eisen, sondern ist schlicht **das** Arbeitspferd des CERN, ohne das auch der Betrieb des LHC nicht möglich wäre. Beschleuniger am CERN sind sehr langlebig und werden vielseitig verwendet.

Die vorletzte Stufe des heutigen CERN-Beschleunigerkomplexes (siehe Abb. 2.2) bildet das 1976 in Betrieb genommene Super Proton Synchrotron (SPS) mit einer Energie von bis zu 450 GeV, der erste CERN-Beschleuniger, der aufgrund seiner Größe von fast 7 km Umfang außerhalb des CERN-Geländes gebaut werden musste.

Die Beschleunigerkette des CERN endet derzeit beim LHC: Über insgesamt vier Vorbeschleuniger, mit dem PS und dem SPS als den beiden letzten Stufen erlangen die Protonen mehr und mehr Energie, bis sie schließlich in die letzte Stufe, den LHC eingeschossen werden. Dabei kann man den LHC mit einem auf Höchstgeschwindigkeit getrimmten Sportwagen vergleichen, der aber leider nur mit einem fünften Gang und ohne Anlasser daherkommt. Bevor der Motor anspringt, muss durch vierstufiges Anschieben zunächst eine gewisse Mindestgeschwindigkeit erreicht werden, erst dann können Sportwagen und auch der LHC losjagen.

LHC zu befüllen, sind davon nur 6×10^{14} Protonen oder gleich viele Wasserstoffatome nötig, sodass die Flasche für 4 Billionen Füllungen oder länger als das Alter der Erde reichen würde. Deutlich mehr Protonen werden für die anderen Anlagen und Experimente am CERN benötigt. Bei einem Gesamtverbrauch von 2×10^{20} Protonen pro Jahr mit einem Gewicht von nur 0,27 mg ist allerdings kein Engpass in der Protonenversorgung zu befürchten.

Die erste große Erweiterung der CERN-Beschleuniger stand am Ende der 1960er Jahre bevor, als das ein Jahrzehnt zuvor in Betrieb genommene Proton Synchrotron nicht mehr ausreichend war für neue Fragestellungen, die höhere Energien erforderten. Ein stärkerer Beschleuniger musste her, mit dem man Neuland betrat, denn die Intersecting Storage Rings (ISR) waren der erste Protonen-Speicherring, in dem wie später beim LHC die Teilchen mit hoher Energie stundenlang kreisten und dabei an verschiedenen Stellen entlang des Rings kollidierten.

Bis dahin wurden sämtliche Beschleuniger im sogenannten „*fixed target*“ Mode betrieben. Der auf hohe Energie gebrachte Teilchenstrahl wird aus dem Beschleuniger ausgelenkt und auf ein Target, meist Metalle wie Beryllium, Blei oder Wolfram, geschossen. Bei Auftreffen des Teilchenstrahls auf das Targetmaterial finden darin zahlreiche Kernwechselwirkungen statt und es entstehen viele sekundäre Teilchen aller Art, die aus dem Target austreten. Magnetsysteme und Lochblenden, sogenannte Kollimatoren, sorgen dafür, dass je nach Anforderung die entsprechende Teilchensorte mit der gewünschten Energie und Intensität nach dem Target aussortiert wird und die sekundären Teilchen auf die Experimente mit ihren Detektoren gelenkt werden. Das Hochbeschleunigen und Auslenken der Protonen auf ein Target dauert dabei nur wenige Sekunden und wird ständig wiederholt.

Ein entscheidender Nachteil der Targetmethode ist jedoch, dass die volle Energie der Protonen bei der Kollision mit dem ruhenden Targetmaterial gar nicht zur Verfügung steht. Beim Auffahrunfall eines schnellen Autos auf ein stehendes Fahrzeug wird zwar einiges an Blechschaden entstehen, aber die meiste Energie des auffahrenden Wagens wird dazu verwendet, um den stehenden Wagen beim Unfall nach vorne zu bewegen. Sehr viel zerstörerischer ist der direkte Zusammenstoß eines Fahrzeuges mit dem Gegenverkehr. Hier wird die gesamte Bewegungsenergie der beiden Fahrzeuge unmittelbar frei, zum erheblichen Nachteil für die Insassen. Physikalisch gesehen bewegt sich bei einem Auffahrunfall der Schwerpunkt der beiden Fahrzeuge vor dem Zusammenstoß und muss sich auch nach dem Zusammenstoß weiter bewegen. Beim Frontalzusammenstoß dagegen ruht der Schwerpunkt vor und nach der Kollision und die gesamte Bewegungsenergie der beiden Fahrzeuge steht zur Verfügung.

Deswegen beträgt bei einer Strahlenergie von 28 GeV die verwertbare Energie² bei der Targetmethode lediglich 7,25 GeV, und damit gerade einmal 25 %. In den Intersecting Storage Rings sollten deswegen in zwei Ringen von je 300 m Durchmesser Protonen mit jeweils 31 GeV frontal kollidieren, um die gesamte Bewegungsenergie von $2 \times 31 \text{ GeV} = 62 \text{ GeV}$ auszunutzen. Für die gleiche Energie mit der konventionellen Targetmethode wäre ein Teilchenstrahl mit 2000 GeV nötig, erzeugt von einem Beschleuniger mit über 20 km Durchmesser. Es war klar, dass die Zukunft bei den sogenannten Collidern und ihren frontal miteinander kollidierenden Strahlen liegen würde.

Trotz der noch moderaten Größe des ISR gab es nun ein Platzproblem. Das ursprüngliche CERN-Gelände, unmittelbar an der französischen Grenze gelegen, war zu klein für einen weiteren Beschleuniger und musste vergrößert werden. Die einzige Erweiterungsmöglichkeit war jedoch in Richtung Frankreich, im Zeitalter der noch nicht ganz so durchlässigen Grenzen in Europa ein durchaus politisches und nicht einfaches Unterfangen. Nach vielen Debatten und Diskussionen auf Regierungsebene gab es jedoch letztendlich grünes Licht, die neuen Intersecting Storage Rings auf französischem Boden zu bauen, sodass die Vorbeschleuniger mit dem Proton Synchrotron auf Schweizer Territorium die Protonen über die Grenze zum ISR schicken mussten. Zum ersten Mal gab es einen grenzüberschreitenden Teilchenstrom.

Auch die Menschen innerhalb des CERN wurden nun zu ständigen Grenzgängern. Mitten durch das nun vergrößerte CERN-Hauptgelände zieht sich seitdem die französisch-schweizerische Grenze, ohne dass sie allerdings bewusst wahrgenommen wird. Nur kleine Besonderheiten weisen darauf hin. So stehen auf dem CERN-Gelände nach wie vor die Grenzsteine, die seit der Aufnahme des Kantons Genf in die Schweizer Eidgenossenschaft im Jahr 1815 die Grenze zu Frankreich markieren. Auch darf kein oberirdisches Gebäude direkt auf der Grenze errichtet werden und innerhalb des CERN gilt je nach Territorium unterschiedliches Arbeitsrecht für die Angestellten der vielen externen Firmen, die zahlreiche Arbeiten ausführen.

Die Erweiterung des CERN-Geländes machte auch ein weiteres Restaurant notwendig, das nach seinem ersten Pächter über viele Jahre nur *Tortella* genannt wurde. Da das Gebäude des neuen *Restaurant 2* auch eine Bank und eine Schweizer Poststelle erhalten sollte, musste es aus diesem Grund auf dem allerletzten Zipfel Schweizer Boden unmittelbar an Grenze zu Frankreich errichtet werden. Dabei

²Die verwertbare Energie E_{CM} beim Auftreffen eines Protons des PS auf ein ruhendes Proton im Target berechnet sich näherungsweise als $E_{CM} = \sqrt{2 \times m_p \times E} = 7,25 \text{ GeV}$, mit der Protonmasse $m_p = 0,938 \text{ GeV}$ und $E = 28 \text{ GeV}$.

steht es recht idyllisch direkt neben den angrenzenden Weinbergen, sodass man den Winzern manchmal auch unmittelbar bei der Ernte zuschauen kann.

2.2 Der erste Collider – die Intersecting Storage Rings ISR

Als im März 1971 weltweit zum ersten Mal zwei Protonen im ISR miteinander kollidierten, brach ein neues Zeitalter im Bestreben nach immer höheren Kollisionsenergien an. Aber Energie ist nicht alles, es muss auch genügend viele Kollisionen geben, damit auch seltene Prozesse gefunden und vermessen werden können. Gerade die interessanten, neuen und noch zu entdeckenden Phänomene treten meist nur selten auf und müssen aus einer Masse von uninteressanten, weil bekannten Kollisionen herausgefiltert werden, dies ist beim LHC nicht anders.

Bei der herkömmlichen Targetmethode war es nicht schwer, ausreichend viele Kollisionen zu produzieren, oft sogar mehr als die nachfolgenden Teilchendetektoren verarbeiten und aufzeichnen konnten. Bei entsprechend dickem Targetmaterial reichte auch ein mäßig intensiver Teilchenstrahl, um genügend hohe Teilchenströme zu erzeugen. Die Anforderungen an einen Collider sind dagegen viel höher. Technisch bedingt sind dort die Teilchen in Bündeln gruppiert, die nur einige Zentimeter lang sind. Diese Strahlbündel kreuzen sich nur an den Stellen, an denen sich Teilchendetektoren befinden, um die möglichen Kollisionsprodukte aufzuzeichnen. Die allermeisten Protonen kollidieren dabei allerdings gar nicht und fliegen unbeeinflusst aneinander vorbei, stehen dafür aber nach einem weiteren Umlauf wieder für eine mögliche Kollision zur Verfügung. Da die Strahlen über Stunden kreisen und gespeichert bleiben, ist ein Collider damit gleichzeitig auch ein Speicherring (engl. *storage ring*).

Um die Kollisionswahrscheinlichkeit insgesamt zu steigern, müssen möglichst viele Protonen in möglichst vielen Teilchenbündeln kreisen, die sich mit möglichst kleinem Durchmesser, also hoher Teilchendichte am Kollisionspunkt kreuzen. Nur dann steigt die Chance auf einige wenige Kollisionen. Im LHC sind es pro Stahl über 2800 Teilchenbündel mit jeweils 10^{11} Protonen, von denen etwa 20 bei jeder Strahlkreuzung kollidieren³. Collider konnten nur dann erfolgreich werden, wenn alle diese Bedingungen erfüllt wurden und ausreichend viele Kollisionen zur Verfügung gestellt werden konnten.

In der Tat lag eine Hauptschwierigkeit des ISR in den ersten Jahren darin, genügend viele Kollisionen zu produzieren. Es war von vorne herein klar, dass in Speicherringen ein sehr gutes Vakuum herrschen musste, wenn die Strah-

³Siehe auch Designparameter des LHC im Anhang.

len darin über viele Stunden zirkulieren und sich immer wieder kreuzen sollten, ohne zuvor mit einem der verbleibenden wenigen Gasmoleküle zusammenzustoßen. Schätzungen ergaben, dass das Vakuum etwa tausend Mal besser sein musste als bei konventionellen Beschleunigern. Im LHC herrscht ein Druck von nur 10^{-10} mbar, entsprechend 3 Mio. Molekülen pro cm^3 oder zehnmal besser als das Vakuum auf der Mondoberfläche während eines Mondtages.

Trotz eines aufwändigen Vakuumsystems blieb im ISR die Qualität des Vakuums anfangs jedoch unter den Erwartungen, da sich ein zuvor unbekanntes Phänomen einstellte: War das Vakuum zunächst ohne zirkulierende Protonen ausreichend (statisches Vakuum), wurde es im Betrieb mit zunehmender Anzahl von Protonen immer schlechter (dynamisches Vakuum). Dies beschränkte die maximale Anzahl von Protonen und Kollisionen erheblich, sodass die Experimente sehr viel weniger Daten erhielten als erwartet.

Es dauerte mehrere Jahre, bis das Problem erkannt und behoben wurde. Wie sich herausstellte, wurden die Wände des Strahlrohrs während des Betriebs mit Ionen bombardiert, die aus Kollisionen der Protonen mit Restgasmolekülen stammen. Die hochenergetischen Ionen schlagen dann weitere Gasmoleküle aus den Wänden heraus, wodurch noch mehr Ionen entstehen. Ein Lawineneffekt setzt ein, der zu einer dramatischen Verschlechterung des Vakuums führt und damit die maximale Anzahl der Protonen beschränkt. Erst nach dem Einbau von 500 speziellen Pumpen konnte das Vakuum nach einigen Jahren deutlich verbessert werden, sodass zusammen mit einer verstärkten Fokussierung an den Kollisionspunkten schließlich die erhoffte Kollisionsrate erzielt werden konnte.

Der ISR als erster Protonen-Speicherring und-Collider überhaupt war deswegen besonders in seinen Anfangsjahren mehr ein Trainingsfeld für Beschleunigerphysiker, Ingenieure und Techniker. Viele Erkenntnisse und Erfahrungen aus jener Zeit flossen jedoch in das Design von späteren Speicherringen und auch des LHC ein.

2.3 Unter die Erde – das SPS

Bei allen Vorteilen von Speicherringen zur Erzielung von hohen Kollisionsenergien waren nicht alle Teilchenphysiker in den 1960er und 1970er Jahren davon überzeugt, dass Speicherringe ein Schritt in die richtige Richtung seien. Die erwarteten Probleme schienen zu groß. Parallel zur Planung des ISR liefen deswegen auch Diskussionen zum Bau eines neuen, großen konventionellen Synchrotrons⁴, das die etablierte Physikforschung am Proton Synchrotron in einen neuen Energiebereich

⁴Mehr zum Synchrotron im Abschn. 5.4 über Kreisbeschleuniger.

katapultieren sollte. Die Planungen sahen einen 300 GeV-Beschleuniger vor, mehr als die zehnfache Energie des Proton Synchrotrons und auch vom Durchmesser und Umfang zehnmal größer.

Solch eine große „Maschine“, wie die Beschleuniger- und die Teilchenphysiker gerne ihre Beschleuniger nennen, passte ganz sicher nicht mehr auf das existierende CERN-Gelände, auch nicht mit den jüngsten Erweiterungen nach Frankreich. Viele Physiker glaubten daher, dass ein ganz neuer Standort mit einem neuen Labor erforderlich wäre, das nicht notwendigerweise nahe beim alten Labor in Genf liegen müsste. Plötzlich sahen die großen und auch einige kleinere Mitgliedsländer die Möglichkeit eines zweiten CERN in ihrem Heimatland. Innerhalb eines Jahres offerierten neun Länder 22 verschiedene Standorte für das prestigeträchtige und auch ökonomisch höchst interessante Projekt. Der alte Standort in Genf war scheinbar aus dem Rennen.

Die Entscheidungsfindung für einen neuen Standort zog sich hin und verzögerte das Projekt um Jahre, ohne dass sich eine Einigung, auch über die Finanzierung, abzeichnete. Jenseits des Atlantiks, in der Nähe von Chicago am Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) war jedoch bereits ein Konkurrenzbeschleuniger mit sogar 400 GeV Energie im Bau und wie nach dem Zweiten Weltkrieg bestand erneut die Gefahr, dass Europa ins Hintertreffen geraten würde.

Anfang 1970 schien das 300 GeV-Projekt in einer ausweglosen Sackgasse, die erwarteten Kosten waren höher als die Mitgliedsländer tragen wollten und die Standortfrage war nach wie vor ungeklärt. Da erarbeitete John Adams (1920–1984), der frisch ernannte Projektleiter und spätere Generaldirektor des neuen zukünftigen 300 GeV-Labors, der bereits das Proton Synchrotron geplant und gebaut hatte, innerhalb von nur drei Monaten einen radikalen Plan: Wenn man die neue Maschine nicht an der Oberfläche bauen würde wie alle bisherigen Beschleuniger, sondern in einem Tunnel in 40 m Tiefe, könnte man das Synchrotron durchaus nahe CERN bauen. Die bereits existierenden Beschleuniger würde man als Vorbeschleuniger nutzen und könnte auf diese Weise Kosten sparen. Ein komplett neues Labor auf der grünen Wiese müsste stattdessen alle Vorbeschleuniger und die gesamte Infrastruktur vollkommen neu errichten.

Diese Kosteneinsparungen und die damit verbundene Standortwahl überzeugten den CERN-Rat und die Regierungen der Mitgliedsländer im Laufe des Jahres 1970 schließlich. Um der aufkommenden Konkurrenz in den USA besser zu begegnen, wurde sogar beschlossen, dass die Energie der zukünftigen Maschine ebenfalls 400 GeV betragen sollte.

Damit wurde zum ersten Mal ein Konzept am CERN verwirklicht, das sich auch bei allen späteren Beschleunigern wie dem LHC wiederfindet: Das Ausnutzen bereits existierender Beschleuniger und der Infrastruktur des Labors zur Vorbe-

schleunigung für die nächst größere Maschine. Heute dient die 400 GeV-Maschine, das Super Proton Synchrotron (SPS) als vierter und letzter Vorbeschleuniger, bevor die Protonen schließlich in den LHC eingeschossen werden. Die Energie des SPS konnte später sogar auf 450 GeV gesteigert werden, mehr als bei der Planung Anfang der 1970er Jahre erwartet.

Neben der Versorgung des LHC mit Protonen dienen die Vorbeschleuniger aber auch anderen, kleineren Experimenten außerhalb des LHC-Physikprogramms als Teilchenlieferanten. Im Laufe der Jahre zirkulierten dabei nicht nur Protonen im Beschleunigerkomplex, sondern sowohl leichte als auch schwere Atomkerne wie Sauerstoff, Schwefel und Blei, aber auch ganz leichte Teilchen wie Elektronen und ihre Partner aus Antimaterie, die Positronen.

Neustart des LHC: CERN und die Beschleuniger

Die Weltmaschine anschaulich erklärt

Hauschild, M.

2016, XII, 65 S. 15 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-13478-5