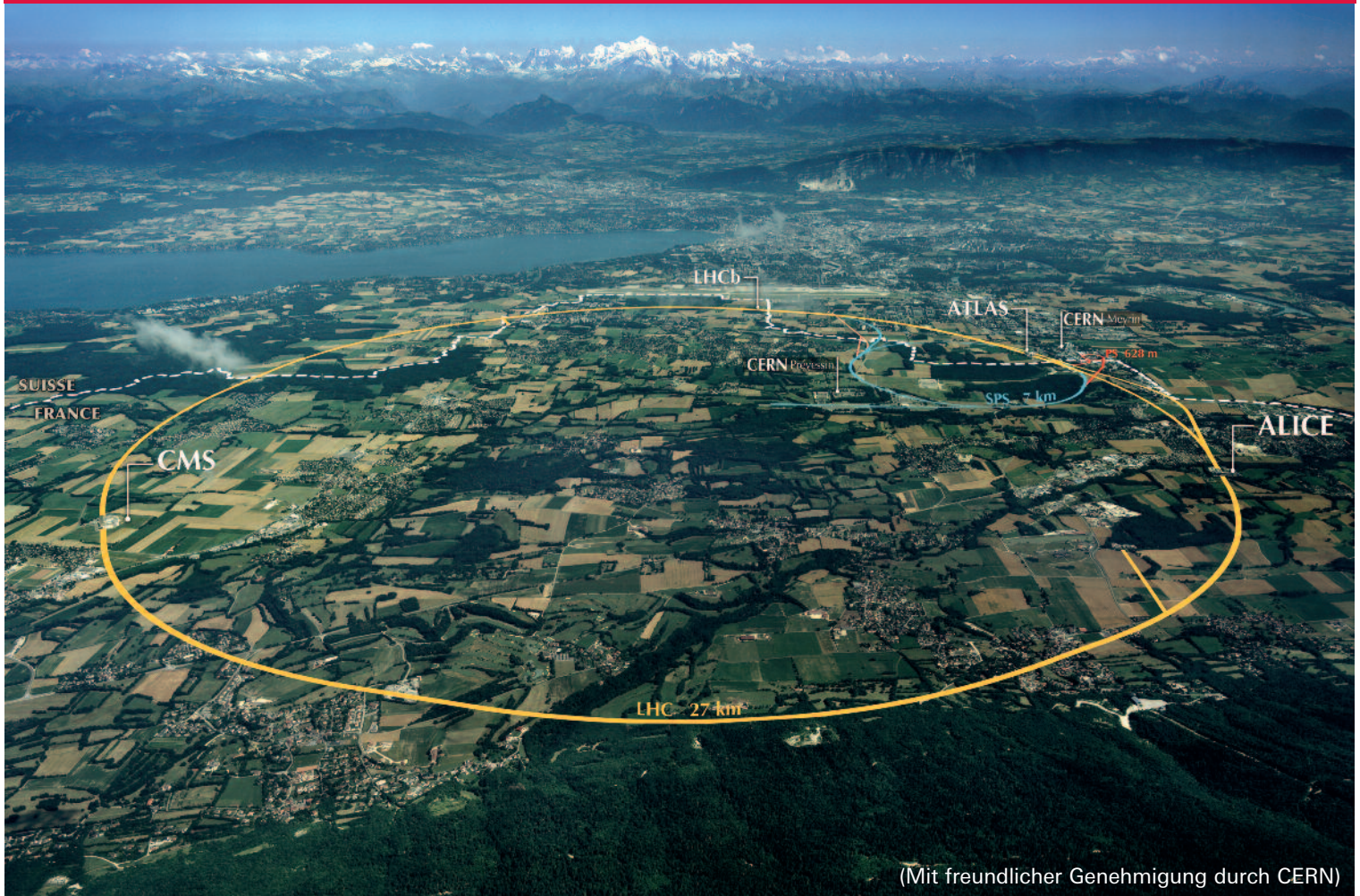


Auf der Spur des Higgs Bosons

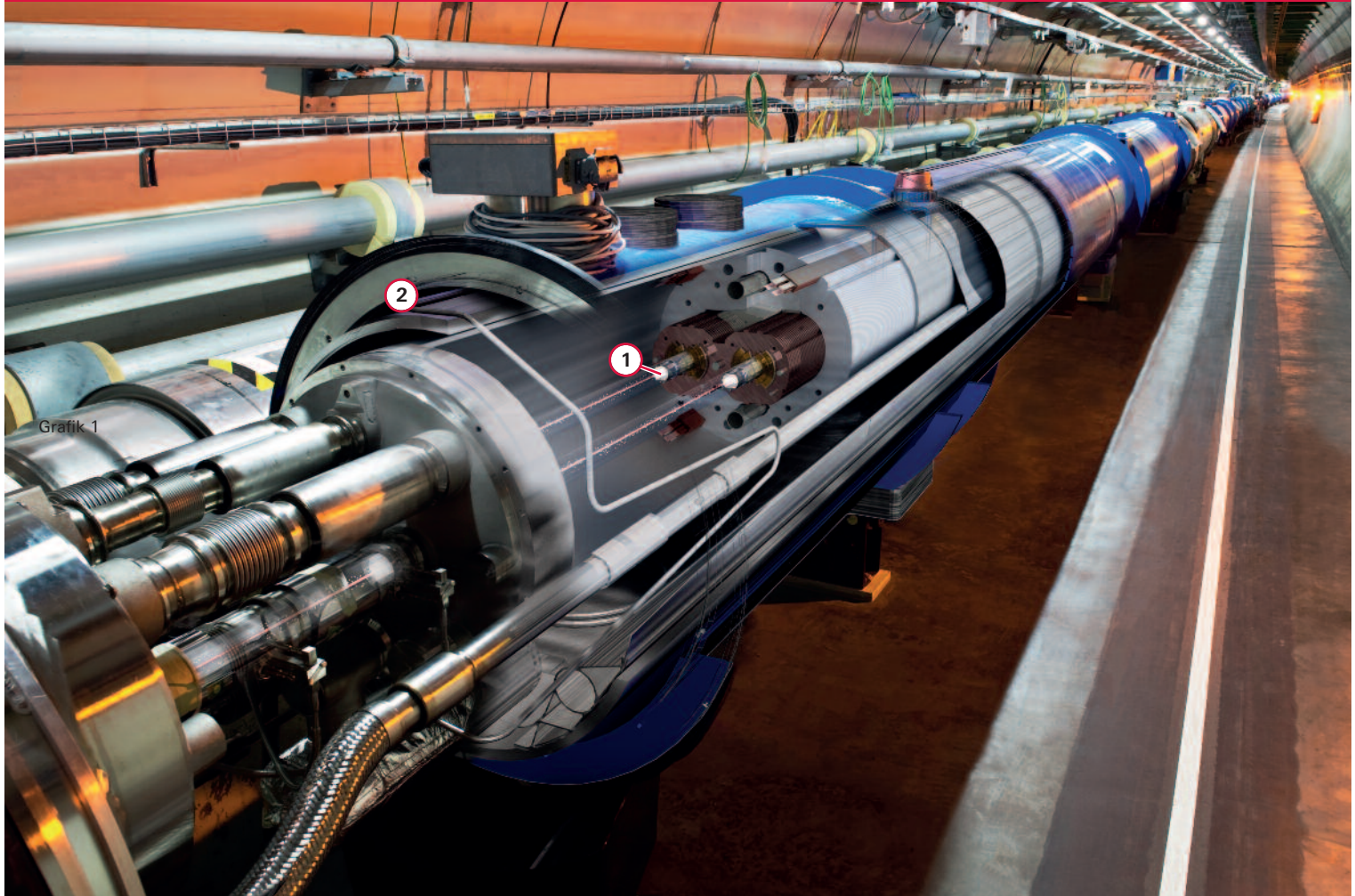
Das größte Vakuumsystem der Welt vertraut auf Vakuumlösungen von Pfeiffer Vacuum



Pfeiffer Vacuum lieferte die wesentlichen Komponenten für CERNs Large Hadron Collider (LHC)

CERN, das Europäische Labor für Teilchenphysik, mit Sitz in der Schweiz ist das weltgrößte Forschungszentrum für Teilchenphysik. Gegründet 1954, arbeiten dort heute etwa 2.500 Mitarbeiter und über 10.000 Gastwissenschaftler aus aller Welt. Die Hauptaufgabe des CERN besteht darin, herauszufinden woraus das Universum besteht und wie es funktioniert. Dabei gilt es, das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, das die Grundbausteine der Materie und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte beschreibt, zu vervollständigen. In diesem Model fehlt ein wichtiger Baustein, der bisher noch nicht experimentell nachgewiesen werden konnte: Das Higgs Boson. Um seine Forschungen ausüben zu können, betreibt das CERN eine Reihe von Teilchenbeschleunigern. Der außergewöhn-

lichste unter ihnen ist der unterirdisch in einem Tunnel installierte LHC (Large Hadron Colider). Er hat einen Umfang von 26,7 km und ist damit der größte Teilchenbeschleuniger der Welt. Im LHC werden zwei gegenläufige Teilchenstrahlen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und an definierten Orten, in großen Detektoren, zur Kollision gebracht. Dabei entstehen neue Teilchen. Die Aufzeichnungen der Detektoren geben Rückschlüsse auf die Eigenschaften der kollidierten sowie der neu entstandenen Teilchen. Auf diese Weise hofft man, das Higgs Boson nachweisen zu können. Am 4. Juli 2012 berichteten die Forschergruppen an den Detektoren ATLAS und CMS, dass sie ein neues Teilchen gefunden haben. Ob dieses das vom Standardmodell beschriebene Higgs Boson ist, muss durch die Bestimmung seiner Eigenschaften noch nachgewiesen werden.



Grafik 1

Der Aufbau des LHC Beschleunigers (Mit freundlicher Genehmigung durch CERN)

1 Strahlvakuum

In den Strahlrohren muss ein Ultrahochvakuum von 10^{-11} hPa herrschen, um zu verhindern, dass die schnellen Teilchen auf ihrem Weg durch den Beschleuniger mit Gasmolekülen zusammenstoßen. Dieses sogenannte Strahlvakuum wird in einem mehrstufigen Pumpprozess erzeugt. Zuerst werden die Strahlrohre mit Hilfe von Pfeiffer Vacuum HiPace 300 Turbopumpen auf 10^{-8} hPa vorevakuert. Der Vorteil dieser Pumpen ist, dass sie ein sehr großes Kompressionsverhältnis für leichte Gase haben. Dies ist besonders wichtig, da Wasserstoff, als leichtestes Gas in der Luft, die Enddruck bestimmende Größe im Ultrahochvakuum ist. Nach der Vorevakuierung wird im Inneren der Strahlrohre eine vom CERN entwickelte NEG (Non Evaporable Getter) Schicht thermisch aktiviert. Diese Schicht wirkt wie eine zusätzliche gasbindende Vakuumpumpe. Sie absorbiert die noch verbleibenden Gasmoleküle und erzeugt so den erforderlichen Enddruck von 10^{-11} hPa.

2 Isolationsvakuum

Extrem starke, supraleitende Magnete, die mit flüssigem Helium auf 1,9 K (ca. -271 °C) heruntergekühlt werden, sorgen dafür, dass die Teilchen im LHC auf ihrer Kreisbahn gehalten werden. Damit die Magnete auf ihrer niedrigen Temperatur gehalten werden können, ist eine gute thermische Isolation des kompletten Kühlsystems unerlässlich. Dazu wird, ähnlich wie bei einer Thermoskanne, ein Isolationsvakuum um die Magnete erzeugt, das den Wärmeintrag in das Kryosystem auf ein Minimum reduziert. Das Isolationsvakuum muss permanent auf $<10^{-6}$ hPa gehalten werden. Da durch nicht zu vermeidende Leckagen im Kühlsystem immer wieder superflüides Helium in das Isolationsvakuum gelangt, sind HiPace 300 Turbopumpen von Pfeiffer Vacuum permanent im Einsatz, um das Isolationsvakuum aufrecht zu erhalten. Durch ihr einmalig hohes Saugvermögen und das große Kompressionsverhältnis für leichte Gase sind die HiPace Turbopumpen für das Abpumpen des Heliums besonders gut geeignet.

Die Bedeutung des Vakuums

Ein wichtiger Faktor für den Betrieb eines Teilchenbeschleunigers ist ein verlässliches, leistungsfähiges Vakuumsystem. Allerdings stellt eine so außergewöhnliche Maschine wie der LHC auch sehr spezielle Anforderungen an die installierte Vakuumtechnik. Kleinste Störungen können den kompletten Beschleuniger über mehrere Stunden außer Betrieb setzen. Daher muss das komplette Vakuumsystem extrem zuverlässig arbeiten. Weiterhin müssen alle Geräte, die am Beschleuniger im Einsatz sind, einer Strahlung von bis zu 1.000 Gy/a standhalten. Geräte, die den Strahlenbereich des Beschleunigers aus Gründen wie Wartung verlassen, müssen sehr aufwändig freigelesen werden. Aus diesem Grund ist es immens wichtig, dass die Geräte vor Ort gewartet werden können.

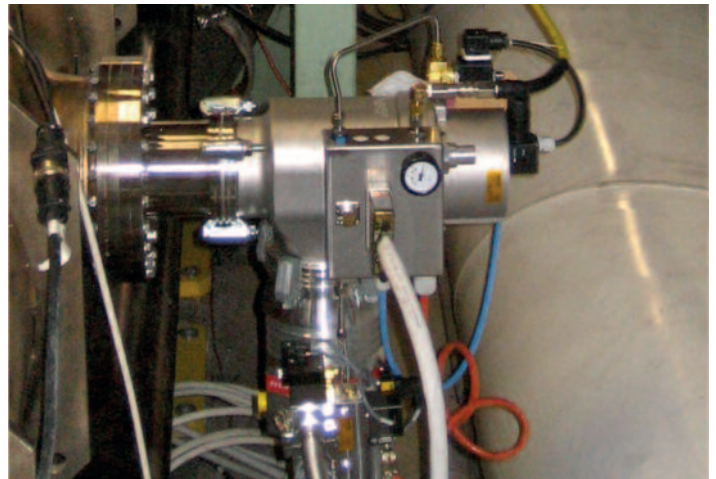
Um diesen besonders hohen Anforderungen zu begegnen, hat Pfeiffer Vacuum zusammen mit dem CERN spezielle Vakuumlösungen zur Vakuumerzeugung, Vakuummessung und Vakuumanalyse entwickelt und umgesetzt.

Vakuumerzeugung

Am LHC wird zwischen zwei Vakuumsystemen unterschieden: dem Strahlvakuum und dem Isolationsvakuum. Für beide Anwendungen kommen Turbopumpen von Pfeiffer Vacuum zum Einsatz. Diese wurden so modifiziert, dass sie die speziellen Anforderungen des LHC erfüllen. Um die Turbopumpen in der radioaktiven Strahlung betreiben zu können, dürfen in den Pumpen keine Elektronikbauteile verwendet werden. Pfeiffer Vacuum hat dafür ein sensorloses Antriebskonzept entwickelt, das es erlaubt, den mechanischen Teil der Pumpe und die Elektronik komplett von einander zu trennen. Auf diese Weise kann die Elektronik bis zu 1.000 m entfernt von der Turbopumpe in einem abgeschirmten Bereich lokalisiert werden.

Vakuummessung

Gemessen wird das erzeugte Vakuum mit speziell entwickelten Messgeräten von Pfeiffer Vacuum. Zum Einsatz kommen dabei modifizierte Pirani- und Kaltkathodenmessröhren. Sie überwachen permanent den Druck im Beschleuniger und sorgen dafür, dass im Falle eines Druckanstieges die entsprechenden Maßnahmen ergriffen werden können. Da auch die Messröhren hoher radioaktiver Strahlung ausgesetzt sind, wurden sie als passive Sensoren, ohne integrierte Elektronik, ausgeführt. Die komplette Elektronik ist in einem strahlungssicheren Bereich untergebracht und wird mit den passiven Sensoren über lange Kabel verbunden. Die benötigten Kabel wurden in enger Zusammenarbeit mit CERN evaluiert. So können die Kaltkathodenmessröhren Drücke bis zu 10^{-11} hPa messen. Eine spezielle Zündprozedur bietet den Vorteil, die Kaltkathodenmessröhren auch bei sehr niedrigen Drücken problemlos eingeschaltet werden können. Da die Lebensdauer eines Beschleunigers bei ca. 30 bis 40 Jahren liegt, wurden für die Elektroniken nur Bauteile verwendet, die auf lange Zeit verfügbar sein werden.



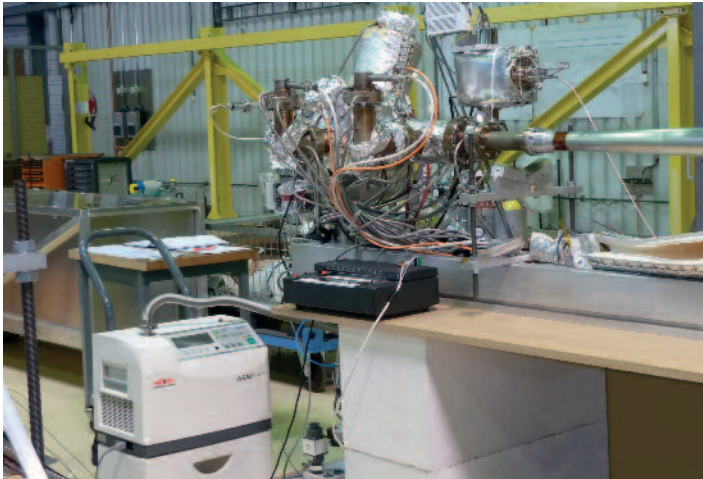
Erzeugung des Strahlvakuums mit HiPace 300 Turbopumpen



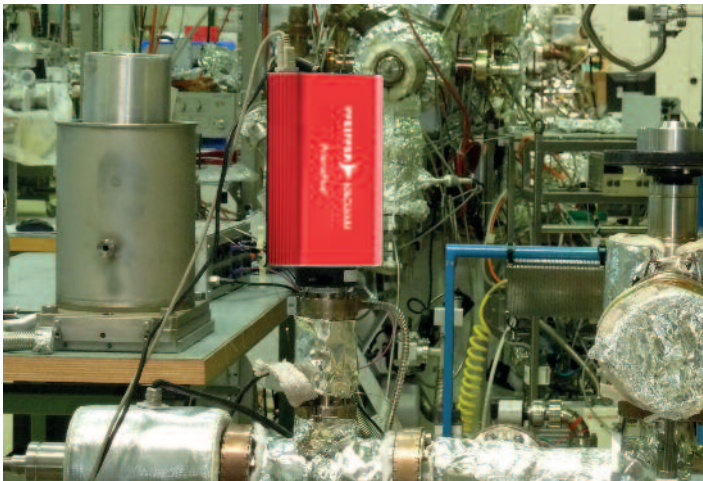
Erzeugung des Isolationsvakuums mit HiPace 300 Turbopumpen



Vakuummessung mit PKR 261 Messröhren



Lecksuchsystem für LHC Bauteile mit dem ASM Graph



Testsystem mit PrismaPlus für das Ausgasverhalten der LHC Bauteile

Helium Lecksuche

Bei den am LHC benötigten Ultrahochvakuumdrücken ist es wichtig, dass die für den Beschleuniger verwendeten Bauteile äußerst kleine Leckraten aufweisen. Vor dem Einbau der Teile ist daher ein ausgiebiger Lecktest unentbehrlich. Für die Lecktests verwendet das CERN adixen Helium Lecksucher der ASM Baureihe. Mit ihnen können selbst kleinste Leckagen bis 10^{-13} Pa·m³/s verlässlich aufgespürt werden.

Vakuumanalyse

Nicht nur der Druck, sondern auch die Zusammensetzung des Restgases ist ein wichtiger Faktor für den einwandfreien Betrieb des Beschleunigers. Anhand eines Restgasspektrums können Rückschlüsse auf das Ausgasverhalten der im Beschleuniger verwendeten Materialien gezogen werden. Das CERN verwendet zur Aufzeichnung von Restgasspektren Massenspektrometer von Pfeiffer Vacuum. Bei dieser Restgasmessung im Ultrahochvakuum ist besonders wichtig dass die Analysatoren der Massenspektrometer selbst eine niedrige Ausgasrate aufweisen. Pfeiffer Vacuum Analysatoren, die am CERN zum Einsatz kommen, besitzen neben einer vakuumgeglühten Ionenquelle auch ein vakuumgeglühtes Stabsystem. Damit erzeugen die Analysatoren ein extrem niedriges Untergrundsignal und sind dadurch besonders gut in der Lage, die wirklichen Restgasverhältnisse im Beschleuniger zu erfassen.

Beispielprodukte von Pfeiffer Vacuum am CERN



Vakuumerzeugung
HiPace 300



Vakuummessung
ModulLine



Helium-Lecksuche
ASM 310



Vakuumanalyse
PrismaPlus



André Kägi (links) and Florian Henss (rechts) von Pfeiffer Vacuum unterhalten sich mit Dr. José Miguel Jimenez

Interview am CERN

Ein Gespräch mit Dr. José Miguel Jimenez, Leiter der Gruppe „Vacuum, Surfaces & Coatings (TE/VSC)“ am CERN.

Dr. Jimenez, wie fühlt man sich, wenn man an einem der weltweit größten und angesehensten Zentren für wissenschaftliche Forschung arbeitet?

Ich bin sehr stolz und glücklich darüber, am CERN arbeiten zu können. Von außen betrachtet sehen viele nur unsere Arbeit im Bereich der physikalischen Grundlagenforschung. Damit CERN diese Forschung betreiben kann, sind technologisch anspruchsvolle Entwicklungen notwendig. All dies geschieht in internationaler Zusammenarbeit. Für mich als Ingenieur ist es sehr aufregend zu sehen, welche unterschiedlichen Technologien für die Beschleuniger zum Einsatz kommen.

Es scheint, dass jetzt das lang gesuchte Higgs Boson am CERN gefunden wurde. Welche Rolle spielt die Vakuumtechnologie für die Forschungsarbeit allgemein?

Um genau zu sein: Er wurde ein neues Teilchen gefunden. Wir müssen aber noch weitere Kollisionsdaten sammeln und analysieren, um zu bestätigen, dass es sich um das Higgs Boson handelt.

Was die Rolle der Vakuumtechnologie für unsere Forschungsarbeit angeht, so kann man sagen, dass der Beschleuniger und die Detektoren ohne ein sehr gutes Ultrahochvakuum nicht funktionieren würden.

Was ist der Zweck der Vakuumtechnologie im LHC-Beschleunigerring?

Vakuumtechnologie wird eingesetzt, um das Strahl- und Isolationsvakuum im Beschleuniger zu erzeugen.

Das Strahlvakuum ist speziell für unsere Hochenergie-Beschleuniger besonders wichtig. Hier müssen Drücke von 10^{-10} hPa im Strahlbetrieb und 10^{-12} hPa im Stand-by Betrieb erzeugt werden. Von besonderer Bedeutung ist das Strahlvakuum im Bereich vor und hinter den Experimenten. Dort müssen Kollisionen zwischen Strahlteilchen und den im Beschleuniger verbliebenen Gasteilchen auf ein Minimum reduziert werden. Je höher der Vakuumdruck ist, um so mehr dieser Kollisionen finden statt. Bei jeder Kollision wird Strahlung erzeugt, die den Untergrund der Detektoren beeinflusst und zu Schäden an den Detektoren führt.

Um das Isolationsvakuum aufrecht zu erhalten, verwenden wir Turbopumpen. Sie pumpen das aus dem Kühlsystem austretende Helium aus den Kryostaten ab.

Obwohl die Ablenkmagnete bei 1,9 K (-273°) betrieben werden, ist die Menge an Helium, die wir an den kalten Oberflächen kondensieren können, sehr gering. Dies liegt daran, daß Helium eine sehr niedrige Kondensationstemperatur hat. Da es in dem extrem langen, komplexen Flüssigheliumkreislauf zu kleinsten Heliumleckagen kommen kann, müssen wir eine Pumpkapazität vorhalten, um in der Lage zu sein, das Isolationsvakuum und damit den Betrieb des Beschleunigers fortsetzen zu können.

Der größte Teil der Vakuumtechnologie, die wir am CERN benötigen, ist am Markt erhältlich. Das Problem ist die Anpassung dieser Technologie an die sehr speziellen Anforderungen im Umfeld des Beschleunigers. Diese Anforderungen machen die Entwicklung von speziell zugeschnittenen Vakuumtechnologien für den LHC und für alle anderen CERN-Beschleuniger erforderlich.

Welche speziellen Voraussetzungen muss das Vakuumsystem erfüllen?

Ein leistungsfähiges Vakuumsystem ist wichtig für den erfolgreichen Betrieb eines Teilchenbeschleunigers. Es muss eine hohe Zuverlässigkeit gewährleisten, strahlungsfest und resistent gegen elektromagnetische Felder sein sowie eine einfache Wartung gewährleisten.

Welche Produkte / Systeme / Komponenten von Pfeiffer Vacuum werden hier eingesetzt?

Am LHC werden die Vakuumtechnik und die Geräte für die Restgasanalyse von Pfeiffer Vacuum eingesetzt. Alle Messgeräte, Messkontrollenheiten und Restgasanalysatoren stammen von Pfeiffer Vacuum. Wir verfügen darüber hinaus über eine große Anzahl von HiPace Turbopumpen, die permanent im Tunnel installiert sind oder als mobile Pumpstationen verwendet werden, um Interventionen im Tunnel oder in den Labors zu ermöglichen.



Dr. José Miguel Jimenez erklärt das spezifische Umfeld des Beschleunigers und die notwendigen Anpassungen an das Vakuumsystem

Was schätzen Sie an den Produkten von Pfeiffer Vacuum? Welche Aspekte könnten zu der Entscheidung beigetragen haben, in erheblichem Maße Vakuumlösungen von Pfeiffer Vacuum am CERN einzusetzen?

Die Zusammenarbeit mit Pfeiffer Vacuum begann nicht erst mit dem LHC. Sie begann vor mehr als 30 Jahren mit dem Intersecting Storage Ring (ISR), dem ersten großen Ultrahochvakuum-Beschleuniger der Welt und mit den Projekten des Large Electron-Positron Collider (LEP).

Die Qualität, Verlässlichkeit und Leistungsfähigkeit der Produkte von Pfeiffer Vacuum passen zu den Anforderungen unserer Teilchenbeschleuniger. Wir haben gelernt, wie diese Produkte in unsere komplexe Technik implementiert werden.

Das CERN und Pfeiffer Vacuum verbindet eine langjährige Partnerschaft. Dies ist wichtig, da unsere Beschleuniger über mehrere Jahrzehnte funktionieren müssen.

Welche speziellen Vorteile der Turbopumpen sind für diese Anwendung erforderlich?

Im LHC müssen die Turbopumpen ein enormes Kompressionsverhältnis für Helium und Wasserstoff haben, um ein sehr tiefes Endvakuum zu ermöglichen. Die Pumpen müssen strahlungsfest und resistent gegen elektromagnetische Felder sein. Sie müssen höchst zuverlässig arbeiten, um die Stillstandzeiten des LHC zu reduzieren. Einige von ihnen müssen in der Lage sein, langen Ausheizzyklen von mehr als 24 Stunden bei 250°C standzuhalten, um das Endvakuum noch weiter zu verringern.

Bitte beschreiben Sie kurz die speziellen Umgebungsbedingungen im Beschleunigerring. Wie mussten die Turbopumpen modifiziert werden?

Nehmen wir zum Beispiel die permanent auf den Kryostaten installierten Pumpen für das Isolationsvakuum. Bei 1,9 K (ca. -271°C) kann nur ein geringer Bruchteil des Heliumgases kondensiert werden. Im Falle eines kleinen Lecks in diesen komplexen kryogenen Kreisläufen erlauben die installierten Turbopumpen die Fortsetzung des LHC-Betriebs. Die Pumpen müssen robust gegen elektromagnetische Störungen sein, die von den Magneten herrühren. Vor allen Dingen müssen sie robust gegen Strahlung sein, die beim Betrieb des LHC auftritt.

Damit sie sich für den Einsatz am LHC eignen, müssen die Turbopumpen einer Strahlungsdosis von bis zu 1.000 Gy/a standhalten. Dieses Strahlungsniveau verhindert den Einsatz von Halbleiterkomponenten im Inneren der Pumpe. Um dieses Problem zu lösen, verwenden wir ein neues sensorloses Antriebskonzept, das gemeinsam mit Pfeiffer Vacuum entwickelt wurde. Dieses Konzept ermöglicht die vollständige Auslagerung der gesamten elektronischen Bauteile aus dem Pumpenkörper in einen abgeschirmten Bereich außerhalb des Tunnels. Obwohl die Elektronik weit von der Pumpe entfernt positioniert ist, kann sie den Anwendern alle wichtigen Statusparameter der Turbopumpe mitteilen.

Wie viele Produkte von Pfeiffer Vacuum werden am CERN Ihrer Einschätzung nach eingesetzt?

Die Anzahl der Produkte von Pfeiffer Vacuum ist erheblich. In den Beschleunigern haben wir insgesamt 89 km Strahlvakuumsystem. Wenn wir die Transferleitungen für Flüssighelium und das Isolationsvakuum des LHC hinzuaddieren, kommen wir auf bis zu 128 km Vakuumsystem.

Für die Erzeugung des Vakuums, die Vakuummessung und die Analyse des Partialdrucks wird sehr viel Vakuumausrüstung benötigt, von dem ein großer Teil von Pfeiffer Vacuum geliefert wird.

Beim LHC zum Beispiel sind etwa 95 Prozent der verwendeten Messgeräte und Messkontrollenheiten, 70 Prozent der Turbopumpen, 65 Prozent der Lecksucher und 50 Prozent der Primärpumpen sowie eine große Anzahl Restgasanalysatoren, Ventile und Bauteile von Pfeiffer Vacuum.

Wie bewerten Sie die Zusammenarbeit mit Pfeiffer Vacuum?

Wir setzen viele Produkte von Pfeiffer Vacuum ein und die meisten Vakuumlösungen sind speziell auf unsere Bedürfnisse zugeschnitten. Wir sehen Pfeiffer Vacuum als einen starken Partner an, der sich unserer Zukunft verpflichtet fühlt.

Wie wichtig ist der technische Kundendienst für Sie in Bezug auf die Vakuumkomponenten?

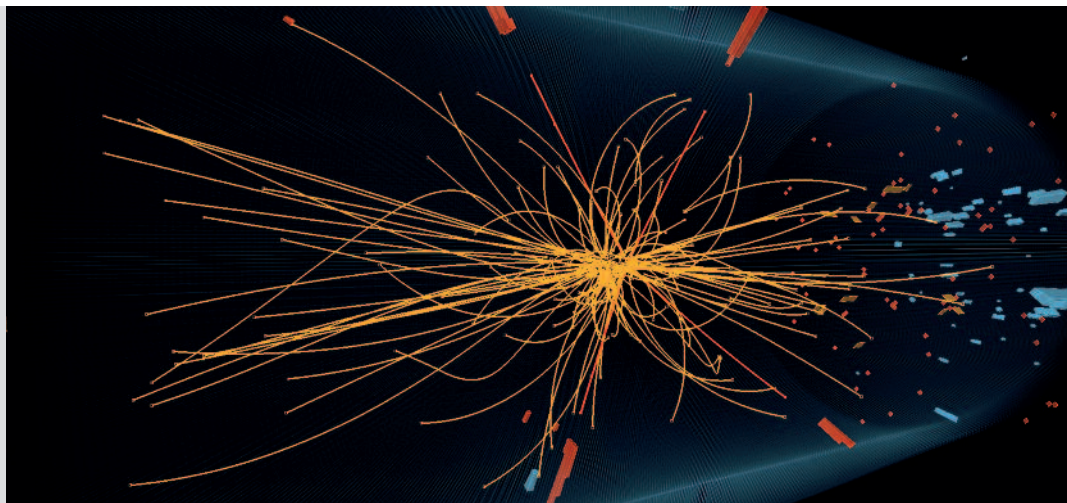
Alle Gegenstände die den Kontrollbereich am CERN verlassen, müssen sehr aufwendig freigemessen werden. Obwohl im Grunde ausgeschlossen ist, daß Komponenten des Vakuumsystems durch die im Betrieb herrschende Strahlung kontaminiert oder aktiviert werden, muß diese aufwendige Prozedur auch dann durchgeführt werden, wenn Komponenten den Kontrollbereich für Servicezwecke verlassen. Daher ist uns sehr daran gelegen, daß die installierte Technik vor Ort durch Service-Techniker gewartet werden kann.

Es scheint so, als sei das Higgs Boson gefunden. Was bedeutet das für die Forschungsarbeit am LHC? Ist die Forschung damit beendet? Und was kommt als Nächstes?

Es ist ein Teilchen gefunden worden, das möglicherweise das Higgs Boson ist. Das ist eine fantastische Belohnung für die Anstrengungen einer riesigen Gemeinschaft von Wissenschaftlern und Technikern auf der ganzen Welt.

Das LHC-Projekt begann in den 1980er Jahren und wurde 1994 genehmigt. Der Bau begann im Jahre 1998 und wurde 2008 abgeschlossen. Im Jahr 2012, haben wir dieses neue Teilchen entdeckt. Es war ein weiter Weg bis zu diesem großartigen Erfolg.

Jetzt müssen wir mit dem Betrieb des LHC fortfahren, um zu bestätigen, dass wir das Higgs Boson gefunden haben und anschließend all die Eigenschaften dieses Teilchens erforschen. Das bedeutet, den Betrieb des LHC bei noch höheren Energien und Intensitäten und dass wir diesen fantastischen Beschleuniger an seine Grenzen führen. Wir sind alle überzeugt, dass wir innerhalb oder außerhalb des Standardmodells noch viele weitere Entdeckungen machen werden. Ein besseres Verständnis von „dunkler Materie“ ist eine davon.



Eine Echtzeit Proton-Proton Kollision im CMS Detektor, in dem vier hochenergetische Elektronen (rote Türme) beobachtet wurden (Mit freundlicher Genehmigung durch CERN)

**Vakuumlösungen
aus einer Hand**

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuumlösungen, für technologische Perfektion, kompetente Beratung und zuverlässigen Service.

**Komplettes
Produktsortiment**

Vom einzelnen Bauteil bis hin zum komplexen System:
Wir verfügen als einziger Anbieter von Vakuumtechnik über ein komplettes Produktsortiment.

**Kompetenz in Theorie
und Praxis**

Nutzen Sie unser Know-how und unsere Schulungsangebote!
Wir unterstützen Sie bei der Anlagenplanung und bieten erstklassigen Vor-Ort-Service weltweit.

**Sie suchen eine perfekte
Vakuumlösung?
Sprechen Sie uns an:**

Pfeiffer Vacuum GmbH
Headquarters · Germany
T +49 6441 802-0
info@pfeiffer-vacuum.de
www.pfeiffer-vacuum.de