

Mobiles CT-System für die In-Situ Prüfung des LHC am CERN

Christoph SAUERWEIN, Volker HAEMMERLE, Ion TISEANU, RayScan Technologies GmbH, Klingleweg 8, 88709 Meersburg, Deutschland, Tel. +49 (0)7532 / 4320-0, Fax: +49 (0)7532 / 4320-99, E-Mail: info@rayscan.eu, Internet: www.rayscan.eu

Lloyd R. WILLIAMS, Fritz CASPERS, CERN European Organization for Nuclear Research, CH-1211 Genf 23, Schweiz, Tel. +41 (22) 767 6939, Fax: +41 (22) 767 6300, E-Mail: Lloyd.Ralph.Williams@cern.ch, Internet: www.cern.ch, Tel. +41 (22) 767 6667, Fax: +41 (22) 767 9145, E-Mail: Fritz.Caspers@cern.ch, Internet: www.cern.ch

Kurzfassung. Im europäischen Zentrum für Kernforschung (CERN) wurde der weltweit leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger, der Large Hadron Collider (LHC) in Betrieb genommen. Dabei wurde festgestellt, dass es sinnvoll wäre, eine Anlage für die Zustandskontrolle der Komponenten in den Verbindungselementen des Teilchenbeschleunigers zu haben.

Eine solche Prüfanlage muss funktionieren, ohne die Verbindungselemente zu öffnen oder das Vakuum zu brechen und ohne den Sektor aufzuwärmen, da dies zu kosten- und zeitintensiv wäre. Außerdem sollte die Anlage mobil sein, um sie in jeder Position des 27 km langen Teilchenbeschleuniger-Rings einsetzen zu können.

Der Ansatz ist eine Röntgenprüfung mit dem Ziel, eine eindeutige Darstellung aller Strukturen in den Verbindungselementen des Teilchenbeschleunigers zu erreichen. Die minimale Anforderung ist dabei, ein Ergebnis zu erzielen, das eine Beurteilung der Unversehrtheit und der korrekten Position aller wichtigen Komponenten zulässt.

3D Röntgen-Computertomographie (3D CT) ist die ideale Lösung für eine solche Prüfaufgabe. Aber bedingt durch die Hindernisse im Beschleuniger-Tunnel, insbesondere der beengten Platzverhältnisse hinter dem Beschleunigerring, ist es nicht möglich, eine Röntgenröhre und einen Röntgendetektor komplett um die Verbindungselemente herum zu bewegen. Deshalb wurde es notwendig, eine mobile 3D CT-Anlage zu entwickeln, die eine maximale Scan-Vielfalt innerhalb der gesetzten Grenzen ermöglicht und 3D-Darstellungen, basierend auf einem stark eingeschränkten Scan-Winkelbereich, liefert.

Ein solches mobiles Röntgensystem wird in diesem Beitrag vorgestellt. Außerdem werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Teilchenbeschleuniger-Verbindungselemente erläutert.

Zusätzlich wird umrissen, wie der Ansatz, der für dieses System genutzt wird, auch für andere Applikationen verwendet werden kann.

CERN

Die europäische Organisation für Kernforschung (CERN) wird von 20 europäischen Mitgliedsstaaten finanziert und stellt einen Teilchenbeschleuniger für fundamentale Teilchenphysikforschung zur Verfügung. Geladene Teilchen werden auf hohe Energien beschleunigt, bevor sie zwischen Detektoren, die sich am Kollisionspunkt befinden, kollidieren. Kollisionen zwischen Elementarteilchen, subatomar in der Größe, aber mit einer enormen Energie ausgestattet, stellen momentan die Umgebung dar, innerhalb welcher Teilchenphysiker die Eigenschaften unseres Universums studieren, die nur in Bruchteilen einer Sekunde nach dessen Entstehen existiert haben müssen.

LHC

Der Teilchenbeschleuniger (LHC) [1] ist die größte und neueste Einrichtung von Weltrang für Hochenergiephysik, die zum schon existierenden CERN Beschleunigerkomplex hinzugefügt wurde. Er wurde ca. 100 m unter der Oberfläche des Genfer Beckens zum größten Teil in einem ringförmigen Tunnel mit einem nominalen Innendurchmesser von 3,8 m und einem Umfang von 26,65 km (Bild 1) installiert.



Bild 1: Der Teilchenbeschleuniger (LHC) in seinem Untergrundtunnel

Vier verschiedene Detektoren, jeder in einer großen Kaverne installiert, sind symmetrisch rund um den LHC an den Teilchenstrahl kreuzenden Punkten angeordnet. Der LHC wurde mit 2 verschiedenen Strahlrohren ausgestattet, die 2 Gegenstrahle von Protonen oder Ionen (einer in jedem Rohr) mit Energien von bis zu 7 TeV bei einer nominalen Spitzenluminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ speichern und innerhalb der Detektoren mit einer Schwerpunktsenergie von bis zu 14 TeV zur Kollision gebracht werden. Supraleitende Magnete werden benötigt, um, unter Berücksichtigung annehmbarer Betriebskosten, hohe magnetische Felder zu erzeugen, welche die Teilchenstrahlen dieser Energie in der Enge des Untergrundtunnels steuern und fokussieren.

Unter mehr als 7500 supraleitenden Magneten, aus denen der LHC besteht, wurden 1232 Haupttring-Dipole, jeder mit ca. 15 m Länge und 438 Haupttring-Quadrupole, jeder mit ca. 8 m Länge installiert und miteinander in den 8 Sektoren, die ca. 22,5 km des Beschleunigerumfangs in Anspruch nehmen, verbunden.

Die Verbindungszonen

Jeder Haupttring-Dipol und Haupttring-Quadrupol ist mit seinen Nachbarn über ein Verbindungsrohr verbunden. Das Verbindungsrohr wird hier Verbindungszone genannt, da es wiederum mehrere Verbindungselemente enthält. Bild 2 zeigt eine schematische

Darstellung der verschiedenen Rohre. Diese Rohre enthalten sowohl tiefkalte und elektrische Einrichtungen als auch ein Wärmedämm- und Strahlvakuum, das einen Dipol-Magneten zum nächsten über die Verbindungszone verbindet.

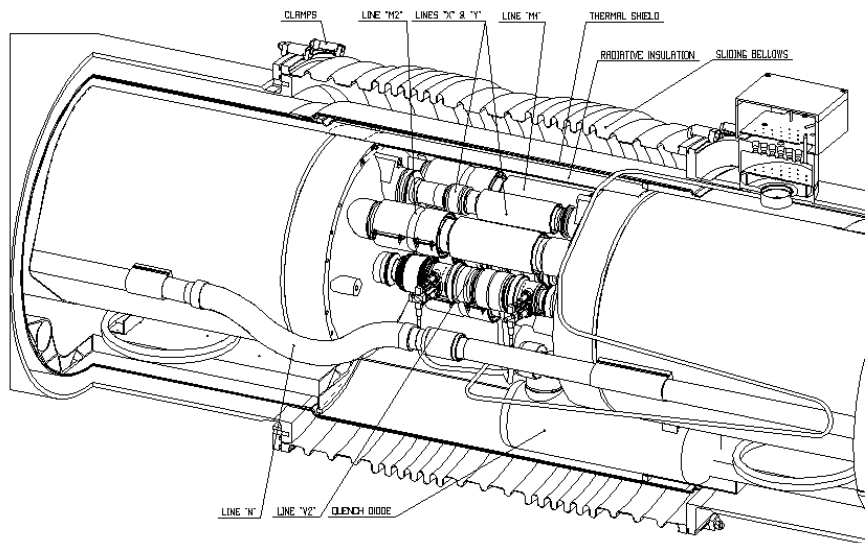


Bild 2: Schematische Darstellung einer offenen Dipol-Dipol Verbindungszone des LHC's

Jede Verbindungszone zwischen 2 angrenzenden supraleitenden Magneten (Bild 3) wurde mit modernsten industriellen Techniken fertig gestellt.



Bild 3: Eine komplette und geschlossene Verbindungszone zwischen 2 Dipol-Magneten des LHC's

In den LHC Bögen wurden mehr als 40.000 Schmelzschweißnähte und mehr als 60.000 Anschlüsse zwischen supraleitenden Kabeln produziert, um den Fortbestand der Tieftemperatur, der elektrischen und der Unterdruck-Verbindungszuführung von Magnet zu Magnet und letztendlich rund um den gesamten Speicherring zu gewährleisten. Alle Hauptringmagnete in einem Teilchenbeschleuniger sind in Serien von Stromversorgungen, die Strom von bis zu 13 kA bereitstellen, gruppiert und elektrisch verbunden.

Die Betriebssicherheit des kompletten Speicherrings hängt von der Gewissenhaftigkeit der Teams ab, die die Verbindungsaufbauarbeit gemäß spezifischer Prozeduren durchgeführt

haben und schwerpunktmäßig von einem strikten Qualitätssicherungsprogramm, das angewendet wird, um sicher zu stellen, dass die hohen Qualitätsanforderungen kompromisslos und kontinuierlich eingehalten werden.

Obwohl zwingende industrielle Qualitätskontrollprozeduren während des Designs, der Konstruktion in der Industrie, dem Aufbau und der Inbetriebnahme dieser komplexen Maschine am CERN eingehalten wurden, wurde dennoch festgestellt, dass in manchen spezifischen Bereichen die Betriebssicherheit auch von der großen Erfahrung abhängt, die seit den Anfängen erworben wurde. Jedoch ist der Teilchenbeschleuniger die einzige Installation seiner Art mit einigen bekannten Schwachstellen, wie sie einem Prototypen anhaften, die überwacht werden müssen. Innerhalb der Verbindungszone zwischen den supraleitenden Magneten des Hauptrings (Bild 4) wurden 3 Bereiche identifiziert, die periodische nichtinvasive Überprüfungen erfordern, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten.

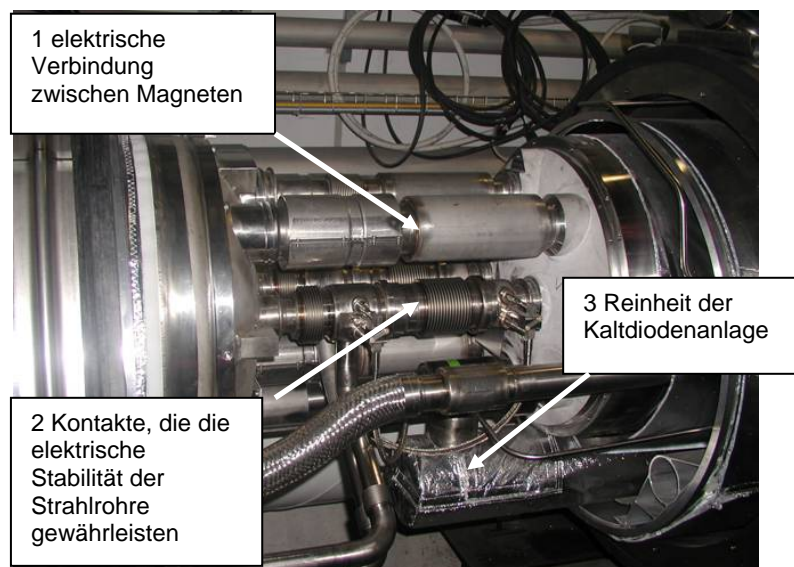


Bild 4: Eine offene Verbindungszone zwischen supraleitenden Magneten und den 3 interessierenden Bereichen, die periodische nichtinvasive Überprüfungen erfordern

Elektrische Verbindung zwischen Magneten

In jeder Verbindungszone sind 6 elektrische Verbindungselemente zwischen den Magneten enthalten. Jeder Kabelanschluss oder jede Kabelverbindung wird in einem speziell konstruierten Verbindungsgehäuse gehalten. Dieses dient dazu, während des Lötvorgangs die 2 Kabel zusammen mit 3 Streifen Zinn/Silber Lötlegierung betriebssicher und akkurat miteinander zu verbinden, wie im Bild 5 gezeigt wird.

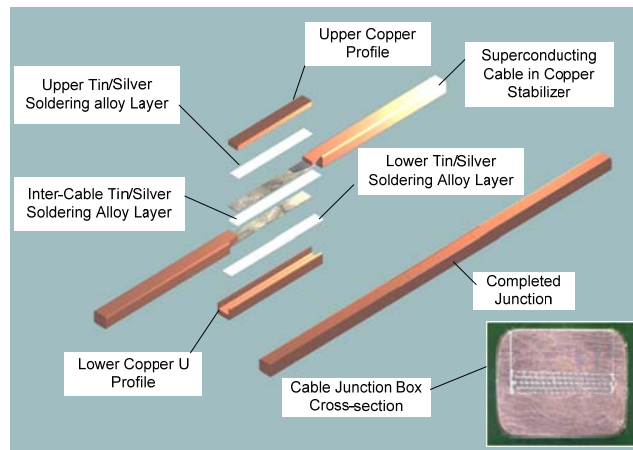
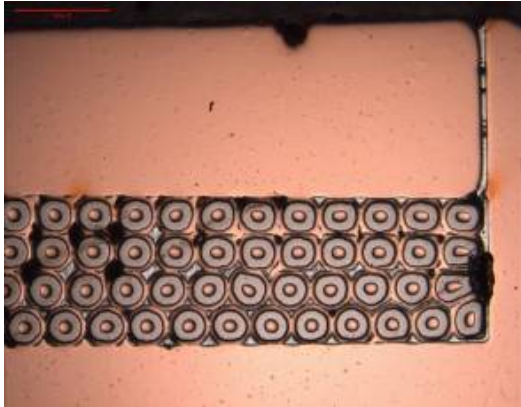


Bild 5: das Verbindungsgehäuse und seine Komponenten

Während eine überwachte Druckkraft, die einen guten Kontakt zwischen den Komponententeilen gewährleistet, senkrecht aufgebracht wird, wird der vorgefertigte Anschluss induktiv, schnell auf eine festgelegte Temperatur erhitzt, wobei sich das hinzugefügte Lötmaterial mit den überstehenden Abschnitten der Kabelstränge verbindet und diese absichert. Die engen Toleranzen der Komponententeile des Verbindungsgehäuses und die Kapillarwirkung halten das geschmolzene Lötmaterial im Inneren bis das Verbindungsgestell unter die Erstarrungstemperatur abgekühlt ist. Die Heizkraft, die Druckkraft und das Temperaturprofil der Verbindung werden im Zeitablauf kontrolliert und aufgezeichnet und nur wenn alle Daten nach dem Löten im Normalbereich liegen, wird die Verbindung von der Induktiv-Lötmaschine, als Teil der Standard-Qualitätssicherungsprozedur, akzeptiert. Schlüssel-Lötparameter werden überwacht, und jede Abweichung außerhalb des normalen Rahmens führt zu einer automatischen Unterbrechung des Lötprozesses und zur Auslösung eines Alarms. Die mechanische Stärke eines Lötanschlusses kann ernsthaft beeinträchtigt werden, wenn die Lötlegierung, die während des Lötprozesses hinzugefügt wird, fehlt oder unzureichend ist. Obwohl strenge systematische Kontrollen den Lötprozess regulieren, wird das Fehlen (verursacht durch Bedienerfehler) oder der Mangel von Zinn/Silber-Lot im Verbindungsgehäuse nirgendwo verlässlich nachgewiesen. Die Fotos in Bild 6 zeigen makrographische Querschnitte von (a) einem Verbindungsgehäuse, das eine angemessene Menge Lötmaterial enthält und (b) ein Verbindungsgehäuse, das entweder deutlich verformt ist oder eine unzureichende Legierungsmenge enthält, wobei die Lücken zwischen den Komponenten nicht komplett durch die Kapillarwirkung gefüllt wurden. Das mögliche Fehlen von Legierungszusatz, das eine unentdeckte, mechanische Schwäche oder ungenügende elektrische Verbindung der gelöteten Anschlüsse verursacht, hat dazu geführt, die Röntgentomographie als zusätzliche Qualitätskontrollmethode anzuwenden.



(a) Gut



(b) schlecht

Bild 6: Makrographischer Querschnitt einer Kabelverbindung mit Gehäuse

Kontakte, die den Stromdurchgang der Strahlrohre sicherstellen

Es ist von entscheidender Wichtigkeit, dass der elektrische Stromdurchgang der Strahlrohre, in der die Partikelstrahle zirkulieren, über alle Verbindungszone erhalten bleibt, da elektrische Störstellen eventuell zu Instabilitäten in der Zirkulation der geladenen Strahlteilchen führen. Bei der Herstellung der Verbindung werden 2 Elemente die sogenannten Plug-In Module (PIM) (Bild 7) eingefügt, jedes in ein Strahlrohr. Als Brücke zwischen den Magneten und um den Stromdurchgang der Strahlrohre zu gewährleisten, werden diese PIMs mit einem kompletten Ring aus Gold überzogenen RF Kontaktfingern, ausgestattet.

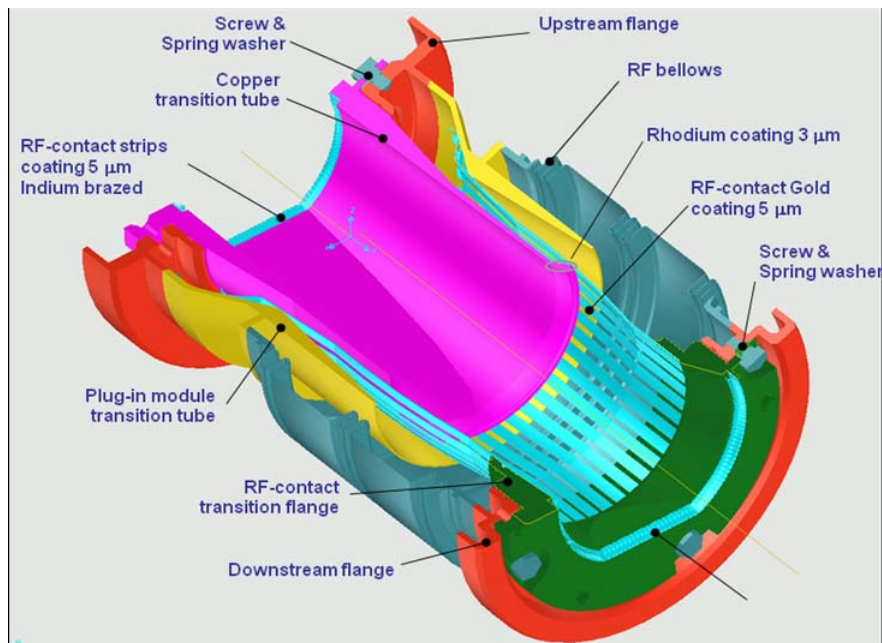


Bild 7: Das Plug-In Modul mit seinen Gold überzogenen RF Kontaktfingern

Das Plug-In Modul, genau wie alle anderen die Verbindungszone überbrückenden Komponenten, wurde entworfen, um die thermischen Kontraktionen in der Größenordnung von 50 mm auszugleichen, welche durch das Herunterkühlen von Raumtemperatur auf bis zu 1.9 K und durch die gelegentliche Wiedererwärmung bis auf Raumtemperatur des LHC Hauptringmagneten verursacht werden. Das PIM verlängert sich während der Kühlung der Magnete und die elastischen Kontaktfinger werden gestreckt, da sie unter Zug gleiten können. Während der Aufwärmphase passiert das Gegenteil, das PIM verkürzt sich und die gleitenden Kontaktfinger werden durch die Komprimierung belastet, was zu einer fehlerhaften Verformung führen kann. Es wurde herausgefunden, dass eine Kombination von nicht korrekt hergestellten Formen der Kontaktfinger mit einer Toleranz-Überschreitung der Distanz zwischen den Magneten um ein paar Millimeter im Einzelfall eine Verformung der Kontaktfinger verursachen kann, die das Partikelstrahlrohr blockieren kann, wenn die Verbindungszone von der Betriebstemperatur bis auf 60 K und höher erwärmt wird. Wenn eine abschnittsweise Erwärmung von Teilen des Beschleunigers notwendig wird, kann der Röntgentomograph in den entsprechenden Verbindungszonen eingesetzt werden, um die Intaktheit der aufgewärmten PIM's nachzuweisen.

Die Reinheit der Kaldiolenanlage

Die Hauptring LHC Magneten wurden alle in der Industrie gefertigt, wobei innerhalb der industriellen Grenzen alle möglichen Vorkehrungen getroffen wurden, um die ganze Produktion hindurch die Reinheit zu gewährleisten. Unterhalb des linken Endes jedes Supraleiter-Hauptringmagneten ist ein Gehäuse (s. Bild 2 und 4), welches Dioden und dazugehörige elektrische Leiter enthält, die es erlauben, die elektrische Versorgung rund um den Magneten umzulenken, falls er von seinem supraleitenden in den normal leitenden Zustand übergehen sollte. Um diese Magnete anfangs von Umgebungstemperatur abzukühlen, werden sie von einem zum anderen Ende von schnell fließendem kaltem Heliumgas durchströmt. Jede Ablagerung, die während des Installationsprozesses trotz der getroffenen Vorkehrungen im Inneren des Magneten verbleibt, wird sich während des anfänglichen Kühlprozesses zum Diodenende hinbewegen und sich dort am niedrigsten Punkt in der Diodenanlage ansammeln. Bei seltenen Gelegenheiten hat die angesammelte Ablagerung, die manchmal auch metallisch sein kann, den Isolationswiderstand der Dioden auf Null reduziert. Sollten Zweifel bezüglich ihrer elektrischen Funktion aufkommen, werden mit dem Röntgentomograph Bilder der Diodenanlage aufgenommen, speziell dort, wo sich die Ablagerungen typischerweise ansammeln.

Der Röntgentomograph RayScan Mobile

Im Auftrag des CERN hat die RayScan Technologies GmbH eine mobile Röntgen-Computertomographie-Anlage (CT) entwickelt, um die oben beschriebenen Prüfaufgaben innerhalb der engen Raumbedingungen, die im LHC Tunnel vorhanden sind, durchzuführen. Das RayScan Mobile wird im Bild 8 in seiner Betriebsposition an einer Verbindungszone zwischen 2 Hauptringmagneten des LHC's gezeigt.

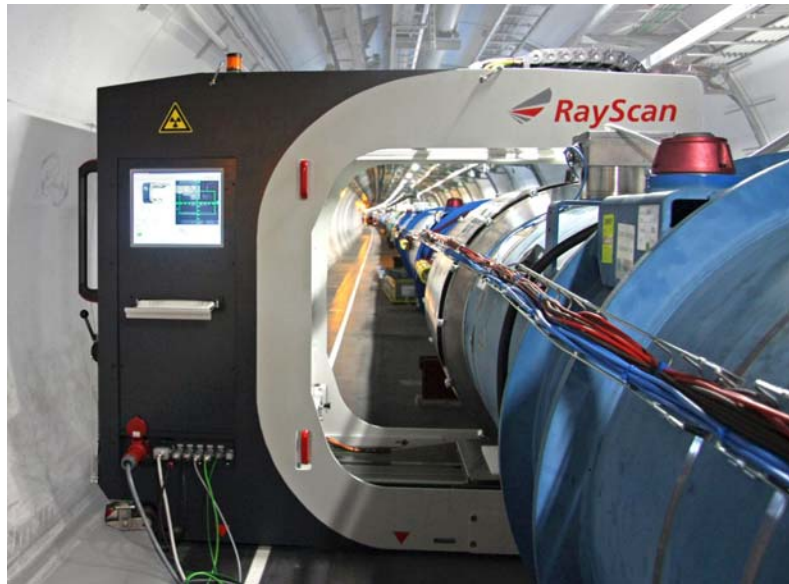


Bild 8: Der Röntgentomograph RayScan Mobile im Betrieb am LHC

Strahlenschutzkonzept

Für den Zweck des Strahlenschutzes wird zunächst ein kontrollierter Bereich rund um die zu prüfende Verbindungszone abgegrenzt. Diese Zone ist durch Lichtvorhänge gesichert, die in einem Abstand von 100 Metern vor und hinter dem RayScan Mobile positioniert werden. Diese Lichtvorhänge schalten bei Unterbrechung die Röntgenröhre aus. Die CT-Anlage wird über einen mobilen Arbeitsplatz fernbedient, der außerhalb des kontrollierten Bereiches positioniert ist.

Einzelheiten zu RayScan Mobile

Der RayScan Mobile wurde so gestaltet, dass er durch den LHC Tunnel mit einem elektrischen Zugfahrzeug, das üblicherweise im CERN benutzt wird, gezogen werden kann. Um das zu gewährleisten und für die endgültige manuelle Positionierung rund um die jeweils zu prüfende Verbindungszone, mussten die äußeren Abmessungen so gering wie möglich gehalten werden. Dies führte zu Einschränkungen der gesamten Breite (1,0 m) und der Gesamthöhe (2,3 m). Diese Einschränkungen der Abmessungen machten es notwendig, das Hochspannungskabel und das Gehäuse des Flachbilddetektors anzupassen. Zusätzlich mussten sowohl die Antriebsmotoren der Achsen als auch der Generator und die Kühleinheit der Röntgenröhre speziell modifiziert werden. Der freie Raum hinter und unterhalb der Verbindungszone des LHC-Rings ist extrem eingeschränkt. Deshalb war es nicht möglich, ein konventionelles 3D-CT Konzept [2, 3] anzuwenden. Stattdessen wurde die Anlage basierend auf früheren Entwicklungen des RayScan Teams, die schon erfolgreich im Bereich der Automobil- und Luftfahrtindustrie eingesetzt werden [4, 5], aufgebaut. Schließlich haben wir ein System und einen Algorithmus für 3D-Volume-of-Interest-CT mit sehr eingeschränktem Winkelbereich entwickelt. Die Bildrekonstruktion basiert auf einem „gefilterten Shift and Add“ Algorithmus. Weil die sehr begrenzte Zugänglichkeit zu extrem asymmetrischen Projektionen führte, wurde es notwendig, eine neue Scan-Methode mit einem neuen Rekonstruktionsalgorithmus, der alle verfügbaren Informationen berücksichtigt, zu adaptieren und zu implementieren. Die Rekonstruktion

wurde auf einem „multiple core PC“ optimiert, damit die Rekonstruktion gleichzeitig mit dem Scannen durchgeführt und beendet werden kann.

Das RayScan Mobile System ist mit einer 225kV Minifokus Röntgenröhre und mit einem Detektor mit 400 x 400 mm und 2048 x 2048 Pixeln, mit 200 µm Pixelgröße ausgestattet. Röhre und Detektor sind beide auf einem 4-Achsen-Manipulator System aufgebaut, das Translations-, Linear- und Rotations-Bewegungen ermöglicht. Der maximale Fahrweg der Quelle beträgt 1,8 m, während die Detektor-Bewegung auf 1,2 m limitiert ist. Beide Komponenten können um $\pm 45^\circ$ geschwenkt werden. Deshalb ermöglicht es die Kinematik des Systems, 3D-Volume-of-Interest-CT mit virtuellen Rotationszentren genau an den Komponenten, die innerhalb der Verbindungszonen geprüft werden sollen, anzuwenden. Zusätzlich zum 3D Scannen stellt das RayScan Mobile einen Echtzeit-Radioskopie-Modus zur Verfügung. Dieser wird verwendet, um zunächst eine schnelle Überprüfung durchzuführen und so einen vorläufigen Eindruck des gesamten Zustandes der Verbindungszone und ihrer Komponenten zu bekommen. Der Radioskopie-Modus stellt außerdem eine Online-Führung für die Definition und Auswahl des zu untersuchenden Volumens zur Verfügung, das anschließend durch die 3D-Volume-of-Interest-CT geprüft werden soll.

Ergebnisse

Wir haben die 3 speziell zu untersuchenden Bereiche in einer typischen Verbindungszone des LHC unter Vakuum und gekühlten Betriebsbedingungen geprüft. Die Fehlerfreiheit der untersuchten Komponenten konnte in dieser Zone deutlich visualisiert werden. Die korrekte Position und Form aller Gold überzogenen RF Kontaktfinger im Inneren des Plug-In Moduls wurde klar bestimmt, wie im Bild 9 gezeigt wird.

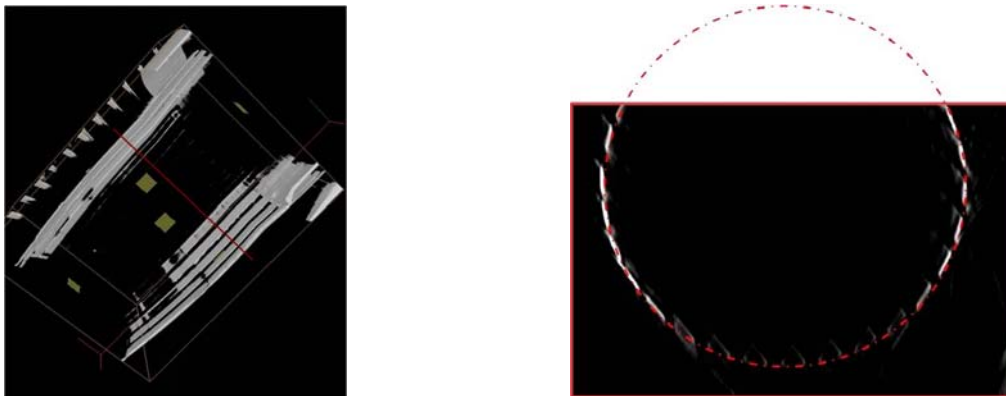


Bild 9: Plug-In Module, angeschnittene 3D-Darstellung (links) und 2D-Schnitt durch 3D Volumen (rechts)

Im linken Bild werden einige der RF Kontaktfinger dargestellt. Das rechte Bild im Bild 9 repräsentiert einen virtuellen Querschnitt des Plug-In Moduls (PIM) (entlang der roten Linie des linken Bildes). Aus diesen Daten kann eindeutig bestimmt werden, dass alle Kontaktfinger (s. Bild 7), die sich innerhalb des gescannten Teilvolumens befinden, perfekt auf einem Kreis angeordnet sind. Einige Ergebnisse der 3D Überprüfung der 6 elektrischen Verbindungen zwischen den Magneten werden in Bild 10 und 11 dargestellt.

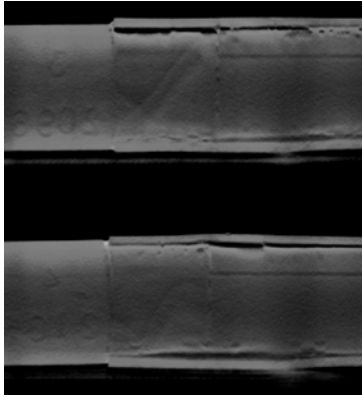


Bild 10: 2D Schicht koplanar mit Kupferoberfläche des Kabelverbindungsgehäuses

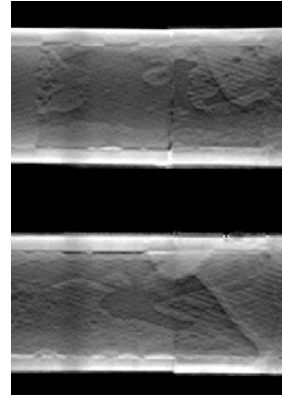


Bild 11: 2D Schicht koplanar mit Supraleiterkabeln

Bild 10 zeigt eine 2D Schicht aus dem rekonstruierten 3D Volumen. Diese Schicht ist koplanar mit der oberen Außenfläche des oberen Kupferprofils des Kabelverbindungsgehäuses (s. Bild 5). Wir sehen links das Ende der oberen Fläche des Kabelverbindungsgehäuses, in der ein geringfügiger Defekt im Lötprozess einen lokal ungefüllten längsseitigen Spalt zwischen den Kabelanschlusselementen hervorgerufen hat. Bild 11 zeigt eine 2D Schicht aus dem rekonstruierten 3D Volumen, welche sich am linksseitigen Ende des Kabelverbindungsgehäuses befindet. Diese Schicht liegt ein paar Millimeter tiefer an der Übergangsstelle zwischen den 2 supraleitenden Kabeln, die zusammen gelötet wurden (s. Bild 5). Deshalb sehen wir das Geflecht des supraleitenden Kabels und einige kleinere Fehler in der horizontalen Füllung mit Lot zwischen diesen beiden Kabeln.

Um die Eignung des RayScan Mobile zum Aufspüren defekter Komponenten zu prüfen, wurde ein original getreuer Nachbau hergestellt, der in allen Bereichen die Verbindungszone repräsentiert und mit defekten Komponenten bestückt. Alle Fehler, die auf diese Weise nachgebildet wurden, wurden auch gefunden.



Bild 12: Radioskopie der Dioden-Anlage vom original getreuen Nachbau mit Ablagerungen und Fremdkörpern (Markierungen)

Bild 12 zeigt das Radioskopie Bild einer LHC Kältdiodenanlage, die im Nachbau installiert ist und Teilchen enthält, die in seltenen Fällen Kurzschlüsse hervorrufen können. Eine kleine Anhäufung von metallischen Ablagerungen, eine Kugel und ein kleiner Zylinder (jeder mit 4 mm Durchmesser) sind klar zu erkennen (s. Markierungen in Bild 12).

Ausblick

Der Röntgentomograph RayScan Mobile hat seinen Wert als Diagnose-Werkzeug erwiesen und wird seinen Platz neben einer Vielzahl sich ergänzender Überwachungsinstrumente im LHC einnehmen. Er ist für die LHC Überwachungsteams von besonderer Bedeutung, da er das einzige Diagnosewerkzeug ist, das Bilder und Fotos einiger interner Komponenten des LHC Beschleunigers erstellen kann, während der Beschleuniger geschlossen, unter Vakuum auf Betriebstemperatur herunter gekühlt und betriebsbereit ist.

Obwohl RayScan Mobile speziell für die Anforderungen am LHC optimiert wurde, ist sein Aufbau so modular, dass er, ggf. mit geringen Anpassungen, zur Untersuchung einer Vielzahl anderer stationärer Objekte, wie z.B. Rohrleitungen, Tragflächen, Statuen oder Säulen, eingesetzt werden kann.

Literaturnachweise

- [1] LHC Design Report Volume 1 “The LHC Main Ring”, CERN June 2004 ISBN 92-9083-224-0.
- [2] Cone beam tomography for quality control and rapid product development, M. Simon, C. Sauerwein (Insight Vol. 42 No. 10, October 2000)
- [3] Multipurpose 3D computed tomography system, Sauerwein et al. (8th European Conference on Non-Destructive Testing ECNDT, Barcelona, Spain, 17-21 June 2002)
- [4] Extended 3D CT method for the inspection of large components, Sauerwein et al. (16h World Conference on Nondestructive Testing WCNDT, 30 August – 3 September, 2004)
- [5] Characterization of automotive parts by a novel multi-scan tomography system, Sauerwein et al. (4th International Conference Emerging Technologies in Non-Destructive Testing, Stuttgart, Germany, 2-4 April 2007)