

Entwicklung und Herstellung der LSS Driftkammern für den LHC im CERN

Atieh, S.; Arnau Izquierdo, G.; Bacher, J.P. †; Benvenuti, C.; Chiggiato, P.; Costa Pinto, P.; Favre, G.; Mathot, S.; Polini, M.; Sgobba, S. (1)

CERN's Large Hadron Collider (LHC) enthält Driftkammern, Vakuumkammern unter Raumtemperatur, die den Anschluss von aktiven Komponenten der Langen Geraden Abschnitte LSS (Long Straight Sections) ermöglichen (ca. 7 km). Diskutiert wird die Materialauswahl der Kammern und die Bestimmung deren mechanischer als auch physikalischer Eigenschaften (20 °C - 300 °C). Beschrieben werden das bei Herstellung von 1000 LSS-Kammern, verwendete Hochtemperatur-Vakuumlöten und Schweißen sowie die Verwendung von NEG (Non-Evaporable Getter) Beschichtung.

CERN, das Europäische Zentrum für Teilchenphysik, hat den LHC in Betrieb genommen. Der leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt ist ein supraleitender, ringförmiger Teilchenbeschleuniger für Hadronen von 27 km Umfang.

Die LSS Driftkammern sind aus 7 m langen nahtlosen Kupferrohren gefertigt. Beide Enden sind mit zwei UHV (Ultra High Vacuum) Flansche aus austenitischem Edelstahl (EN 1.4429, AISI 316LN) zur Verbindung der einzelnen Rohre ausgestattet. Der innere Durchmesser der Rohre beträgt 80 mm, die Wandstärke beträgt 2 mm. Die Rohre haben eine NEG (Non-Evaporable Getter) Beschichtung, zur Erreichung des Endvakuums in den Kammern ($1 \cdot 10^{-12}$ mbar). Spezifische Design- und Herstellungsmethoden (Material Charakterisierung, Hochtemperatur-Vakuumlöten, Schweißen, Oberflächenbehandlungs- und Beschichtungstechnologien) gewährleisteten eine fehlerfreie Produktion und eine erfolgreiche Inbetriebnahme des Raumtemperatur-Vakuumsystems.

Materialauswahl und Charakterisierung

Kupfer stellt den besten Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und „Beschleuniger-Performance“ dar, bedurfte aber der Entwicklung eines eigenen Herstellungsprozesses.

Cu-OFE Kupfer (Oxygen-Free Electronic, C10100 CW009A, 99,99% Cu min) ist ein hochreines, mit spezifischen Grenzwerten für Sauerstoff und anderen Verunreinigungen (17 Elemente) [1], nicht desoxidiertes und sauerstofffreies Kupfer, ohne nennenswerte Mengen an Verunreinigungen, die einen hohen Dampfdruck anzeigen und hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit aufweist.

Darüber hinaus, sind die Schweißbarkeit und die Lötbarkeit wichtige Parameter. Aufgrund des Sauerstoffgehalts ($O_2 \leq 5$ ppm) und seiner Reinheit ist Cu-OFE sowohl für Hochtemperatur-Vakuumlöten als auch für Schutzgasschweißen sehr geeignet. Cu-OFE wurde als Werkstoff für die Extremitäten der Kammern gewählt, um die Verbindung zwischen den Edelstahlflanschen und der Zentralkammer zu gewährleisten. Dies wird durch Löten an der Flanschseite und Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) an der Zentralkammerseite (Cu-OFS) erreicht.

Die Kammern zeichnen sich durch eine NEG Beschichtung auf der Innenseite aus, die auf einer ternären TiZrV Legierung basiert und primär als kontinuierliche Vakuumpumpe dient. Diese Beschichtung muss regelmäßig regeneriert werden. Zu diesem Zweck ist es vorgesehen, die Kammern einmal im Jahr zwischen 200 °C und 300 °C für 24 Std aufzuheizen. Bei diesen Temperaturen diffundieren die bereits an der Oberfläche absorbierten Atome

und Moleküle in der Beschichtung, die dadurch erneut eine frisch aktivierte Oberfläche bietet.

Die Aktivierungen der NEG Beschichtung führt zu einem Rückgang der Festigkeit und Härte. Das Aussetzen erhöhten Temperaturen macht eine spezifische Auswahl von Werkstoffen geeigneter Zug- und Kriecheneigenschaften in einem breiten Temperaturbereich erforderlich. Sauerstofffreies Kupfer (mit einem maximalen Gehalt an O_2 von 10 ppm) ist auch als silberhaltiges Kupfer verfügbar.

Die Zugabe von Silber (Ag) erhöht die Glühtemperatur, insbesondere im kaltverfestigten Zustand, welches ohne eine erhebliche Senkung der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit bei Raumtemperatur auftritt [2]. Darüber hinaus verbessert die Zugabe von Ag die Zeitstandfestigkeit von reinem Kupfer.

In Anbetracht der wiederholten thermischen Aktivierungen, ist die Kupfer Legierung Cu-OFS C10700 (99,95% Cu + Ag min., 0,085% Ag min., max. O_2 : 0,0010%) für die Zentralkammer ausgewählt worden.

Die Charakterisierung der strukturellen Materialien, insbesondere von OFS Kupfer, unter diesen extremen Betriebsbedingungen, ist von großer Bedeutung. Unter diesen Bedingungen wurden sowohl mechanische als auch physikalische Eigenschaften bestimmt. Die präzise Ermittlung des Elastizitätsmoduls erlaubte die analytische und die FE-Simulationen (Finite Element Simulation) im Hinblick auf Stabilität gegen Beulen bei erhöhten Temperaturen und bei einem reduzierten Elastizitätsmodul unter Berücksichtigung des Kriechens [3].

Der reduzierte Elastizitätsmodul E_c ergibt sich aus:

$$E_c = \frac{E_0}{1 + \varphi} \quad [4]$$

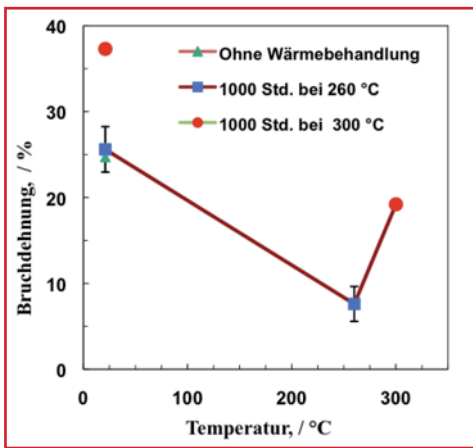


Bild 1: Bruchdehnung des Cu-OFS in Abhängigkeit von Wärmebehandlung und Temperatur

mit dem Kurzzeit-Elastizitätsmodul E_0 , und dem Kriechfaktor ϕ . Der Kriechfaktor wird in Abhängigkeit von der jeweiligen Kriechzeit (konservativ ≈ 1.000 Std.) berechnet.

Um die Lebensdauer der LSS Kammern zu simulieren (ca. 30 Aktivierungen für 24 h, $30 \times 24 \approx 1.000$ Std.), wurden Proben einer Wärmebehandlung für 1.000 Std. bei 260 °C und bei 300 °C ausgesetzt.

Die mechanischen Eigenschaften wurden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen gemessen. Ein erwarteter Rückgang der Zugfestigkeitseigenschaften ist mit zunehmenden Glüh- und Testtemperaturen beobachtet worden. Dieser Rückgang der Zugfestigkeit und Streckgrenze beeinträchtigt das Material nicht im Hinblick auf die Anwendung der LSS Kammern. Dennoch sollte die Abnahme der Bruchdehnung von 25 % bei Raumtemperatur auf ein Minimum von 7,6 % bei 260 °C (Bild 1) in Betracht gezogen werden insbesondere während der Aktivierungszyklen

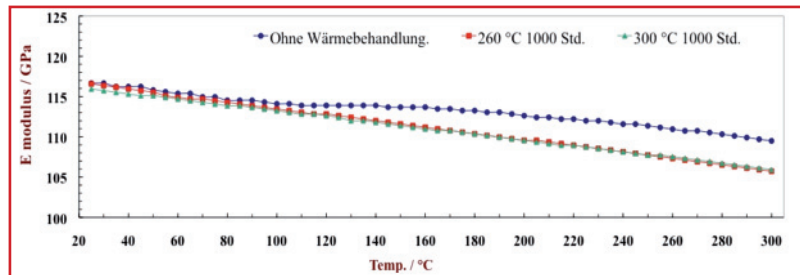


Bild 2: Cu-OFS Elastizitätsmodule in Abhängigkeit von Wärmebehandlung und Temperatur

der NEG-Beschichtung. Tabelle 1 zeigt die Zusammenfassung der gemessenen mechanischen Eigenschaften.

Der temperaturabhängige dynamische Elastizitätsmodul wurde nach ASTM E1875/00e1 gemessen. Bild 2 zeigt den Elastizitätsmodul für Cu-OFS in Abhängigkeit von Wärmebehandlung und Temperatur.

Der Trend des elastischen Verhaltens der Proben (bei 260 °C und 300 °C) wurde erwartet und zeigt, dass der Elastizitätsmodul des OFS Kupfers mit einer Erhöhung der Temperatur von 116 GPa bei Raumtemperatur auf 107 GPa bei 260 °C sinkt. Anhand dieser Ergebnisse war es möglich, den reduzierten Elastizitätsmodul auf einen Wert von $EC = 18.530$ MPa, mit einem Kriechfaktor von $\phi = 4,83$ zu bestimmen. Sowohl eine analytische Berechnung des kritischen Beuldruckes, als auch eine FE-Simulation, ergaben einen Sicherheitsfaktor von Minimum 5,9 für die gesamte Lebensdauer der LSS Kammern [5].

Aufbau der Kammern

Die Flansche (ausEdelstahl, EN 1.4429) sind mittels Hochtemperatur-Vakuumlöten mit den OFE Kupfermanschetten verbunden, die auf 55 mm in

der Länge begrenzt sind, um die Gefahr von Beulen zu vermeiden. Die so vorbereiteten Verbindungen von Flansch und Manschette wird durch einen Wolfram-Inertgas Zirkularschweißen mit gepulstem Schweißstrom, ohne Zusatz, mit der OFS Zentralkammer verbunden. Um die Wärmeeinflusszone (WEZ) des Kupfers zu reduzieren, wurde auf der OFS-Seite ein Wasserkühlungselement benutzt. Diese Technik erlaubt, unter kontrollierten Bedingungen, gleichbleibend hohe Nahtqualitäten zu erzielen. Das erforderliche Qualitätsniveau für die WIG-Schweißnähte ist B nach ISO 5817. Mit der spezifischen Anforderung an die Schweißnahtwurzel eine Überhöhung von 0,5 mm nicht zu überschreiten, wird sichergestellt, die den inneren Querschnitt für den Teilchenstrahl des Beschleunigers keinesfalls zu reduzieren.

Die Vorbereitung der Schweißnaht umfasst eine Entfettung des zentralen OFS Rohres, gefolgt durch ein mechanisches Entfernen der Oxidschicht unmittelbar vor dem Schweißen. Die OFE Manschette wird mittels eines radial streckbaren Werkzeuges auf das OFS Rohr ausgerichtet. Dieses Werkzeug dient auch als Formiereinrichtung mit der Aufgabe des Schutzes der Schweißnahtwurzel durch Zugabe von reinem Argon. Damit Oxidation und Anlaufarben vermieden werden können, ist es erforderlich den Luftsauerstoff gezielt fernzuhalten ($O_2 < 25$ ppm).

Das verwendete Schweißprogramm wurde entwickelt, um eine einheitliche Wurzelüberhöhung über 360° bei hoher Kompaktheit ohne Vorwärmen zu gewährleisten, und ist durch eine Schweißverfahrensprüfung belegt. Die wichtigsten Merkmale des Schweißprogrammes sind die Verwendung

Testtemperatur (°C)	Wärmebehandlung	0,2 % Dehngrenze (MPa)	Zugfestigkeit (MPa)	Bruchdehnung (%)
20	-	280.6	281.3	24.3
20	1000 Std. bei 260 °C	244.3	255.6	25.0
20	1000 Std. bei 300 °C	173.7	232.9	37.3
260	1000 Std. bei 260 °C	195.5	202.2	7.6
300	1000 Std. bei 300 °C	148.0	157.2	19.2

Tabelle 1: Übersicht der gemessenen mechanischen Eigenschaften für Cu-OFS abhängig von Wärmebehandlung und Testtemperatur

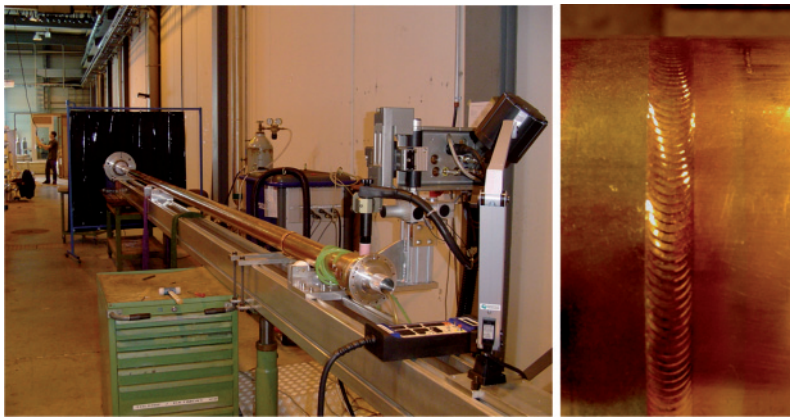


Bild 3: Links die Schweissanlage der LSS Kammern, Rechts die Schweissnaht OFS/OFE Kupfer

eines über 5 Sektoren variablen, gepulsten Stroms sowie eines Schutzgases aus einem Helium und Argon Gemisch (70 % He, 30 % Ar, Gruppe I3 nach DIN EN 439). Hierdurch wird eine hohe Schweißgeschwindigkeit bei tiefem Einbrand erzielt.

Die Schweißnähte wurden visuell und geometrisch zu 100%, zerstörungsfrei mit Röntgenstrahlung zu 25% und einer Dichtheit zu 100% (Helium-Leck-Test mit einer Leckrate $< 1 \cdot 10^{-10}$ mbar \cdot l \cdot s $^{-1}$) überprüft.

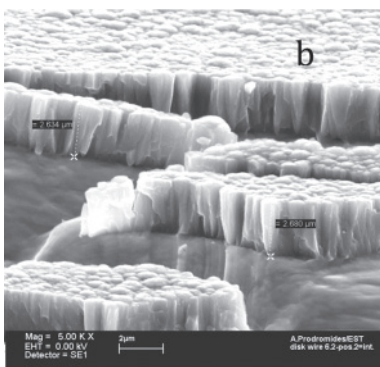
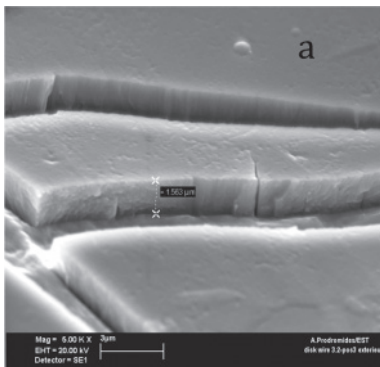


Bild 4: REM Aufnahme des NEG Films, beschichtet bei a) 100 °C und b) 260 °C

NEG-Beschichtung

Alle Kammern sind auf der Innenseite mit einem dünnen TiZrV-Film beschichtet. Die Beschichtung wird mittels eines zylindrischen DC-Magnetron-Sputterprozesses mit einer Dicke von etwa 2 μ m und einer durchschnittlichen elementaren Zusammensetzung von Ti 30 %, Zr 30 % und V 40 % (At.) erzeugt. Die hierbei gewonnene nanokristalline Struktur (3-5 nm Korngröße) steht in direktem Zusammenhang mit der Aktivierungstemperatur des NEG-Systems [6]. Dies ist vermutlich auf eine große Dichte an Korngrenzen zurückzuführen, die den Transport von Sauerstoff von der Oberfläche in das Grundmaterial des NEG während der thermischen Aktivierung erleichtern kann.

Die Film-Oberflächenmorphologie hängt hauptsächlich von der Substrat-Oberflächenrauheit und der Beschichtungstemperatur ab [7]. Bei Substrat-Beschichtungstemperaturen unter 250 °C ist der Film kompakt und homogen, während bei höheren

Temperaturen eine wesentlich höhere Rauheit erscheint. Bild 4 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (REM) der NEG Oberflächenmorphologie bei zwei verschiedenen Beschichtungstemperaturen. Rauheit spielt eine wichtige Rolle sowohl bei der Oberflächenkapazität (steigt mit zunehmender Fläche), als auch bei der Haftwahrscheinlichkeit (die sich aufgrund mehrfacher molekularer Oberflächenkollisionen steigert).

Die Beschichtung der gesamten Innenfläche einer Vakuumkammer, nach Auflösen der NEG Oxidschicht durch Erhitzen (Aktivierung), verwandelt sich von einer Gasquelle in eine Pumpe mit sehr hohem Saugvermögen je Längeneinheit [8]. Diese Besonderheit, einer kontinuierlichen Vakuumpumpe mit unerreicht hohem Saugvermögen spielt eine Schlüsselrolle für die Strahlstabilität und -Lebensdauer des LHC und bei vielen anderen Beschleunigern [9]. Die frisch aktivierte und oxidfreie NEG Oberfläche weist eine geringe Sekundärelektronenausbeute auf, bis zu 1.1, niedrig genug, um resonante Elektronen Multiplikation (Multipacting) Phänomene zu vermeiden. Aufgrund der extrem sauberen Oberfläche ist auch die Photonen- und Elektronen-induzierte Desorption stark gedämpft (ca. zwei Größenordnungen).

Typische Werte für das Saugvermögen je Flächeneinheit sind in der Größenordnung von 0.5 l \cdot s $^{-1}$ \cdot cm $^{-2}$ für H $_2$ und vom 8 l \cdot s $^{-1}$ \cdot cm $^{-2}$ für CO, mit einer Kapazität für eine CO-Fläche von etwa einer Monolage (je nach Rauigkeit von 3 x 10 14 auf etwa 10 16 Moleküle/cm 2 für CO).

Während der Aktivierung diffundiert der in der Passivierungsschicht vor-

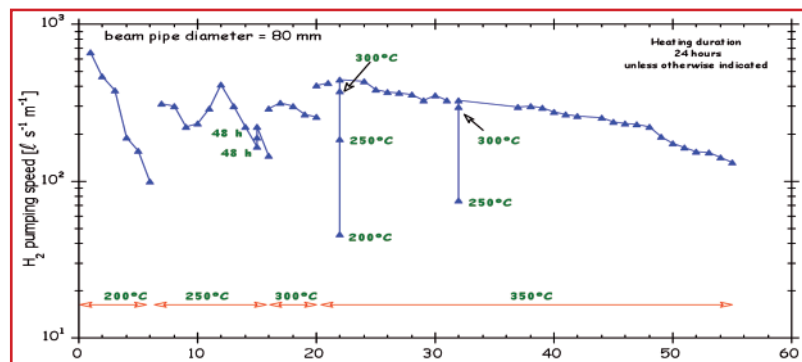


Bild 5: Wasserstoff-Saugvermögen/ Aktivierungs-Lüftungs-Zyklen



Bild 6: Lagerung der LSS Kammern

handene Sauerstoff ins Grundmaterial der NEG Beschichtung und erhöht seine Sauerstoff-Konzentration, was zu einer fortschreitenden Degradierung der Leistungsfähigkeit des Films führt. Diesem Abbau kann durch Erhöhung der Aktivierungstemperatur entgegen gewirkt werden. Bild 5 zeigt die Variation des Wasserstoff-Saugvermögens pro Längeneinheit einer Kammer als Funktion der Zahl der Aktivierungs-Lüftungszyklen.

Schlussfolgerungen

In modernen Beschleunigern werden sehr strenge Anforderungen an die Werkstoffe des Vakuumsystems gestellt. Ihre physikalischen und mechanischen Eigenschaften, wie Bearbeit-

barkeit, Schweißbeignung oder Lötbarkeit, sind wichtige Parameter. Heute ist Kupfer eines der dominierenden Materialien in der Vakuum Konstruktion, neu ist die großmaßstäbliche Anwendung von dünnwandigen Kupferrohren. Dazu war es erforderlich, unter den spezifischen Anforderungen eines Teilchenbeschleunigers das Materialverhalten und die metallurgischen Prozesse detailliert zu untersuchen.

Kosteneffiziente Herstellungsverfahren, wie dem Hochtemperatur-Vakuumlöten und dem WIG-Zirkularschweißen, konnten das geforderte hohe Qualitätsniveau während der gesamten Serienfertigung gewährleisten. Mehr als 1000 LSS Kammern wurden über einen Zeitraum von 2 Jahren, mit einer Ausschussrate von weniger als 0.5 %, hergestellt.

Die NEG Beschichtung ist die Hauptvakuumpumpe der warmen Abschnitte des LHC einschließlich der Strahlrohre für die Experimente. Nach mehreren Jahren der Beschichtungsentwicklung, konnte eine Produktion im industriellen Maßstab reibungslos durchgeführt werden. Die Produktionsrate betrug durchschnittlich 20 Standard-LSS Kammern pro Woche. Bild 6 zeigt die gelagerten, Stickstoffge-

füllten, LSS Kammern, nach der NEG Beschichtung.

Literatur

- [1] ASTM B170-99(2004), Standard Specification for Oxygen-Free Electrolytic Copper—Refinery Shapes.
- [2] S. Sgobba, Materials of high vacuum technology, an overview, Proceedings of the CAS - CERN Accelerator School and ALBA Synchrotron Light Facility: Course on Vacuum in Accelerators, Platja d'Aro, Spain, 16 - 24 May 2006, p. 117-141, <http://cdsweb.cern.ch/record/983744>
- [3] S. Sgobba, unpublished results 30 August 2005
- [4] L. Kollár, E. Dulácska, Buckling of shells for engineers, Published 1984
- [5] S. Atieh, „Characterization of materials for the drift chambers of the long straight sections“, unpublished results 23 January 2004, CERN, Geneva.
- [6] Prodromides A, Scheuerlein C, Taborelli M., Vacuum 2001;60:35.
- [7] Benvenuti C., Chiggiato P., Costa Pinto P., Prodromides A., Ruzinov V., Vacuum 2003;71:307.
- [8] Lozano M., Fraxedas J., Surf Interface Anal 2001; 30:623.
- [9] Baglin V., Bruning O., Calder R., Caspers F., Collins I., Grobner O., Hilleret N., Laurent J-M., Morvillo M., Pivi M., Ruggiero F., In: Proceedings of the European Particle Accelerator Conference, Stockholm, Sweden, 1998, IOP, 1999. p. 369-61.

(1) S. Atieh, G. Arnau Izquierdo, J.P. Bacher †, C. Benvenuti, P. Chiggiato, P. Costa Pinto, G. Favre, S. Mathot, M. Polini und S. Sgobba, CERN /EN Departement