Heliumkryosystem für den Röntgenlaser LCLS-II

Dirk Pflückhahn^{*}, Eric Fauve, Vincent Heloin, Viswanath Ravindranath, Marc Ross SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Rd, Menlo Park, CA 94025, USA <u>dirkp@slac.stanford.edu</u>

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Das Linac Coherent Light Source-II Projekt stellt die Erweiterung des seit 2009 erfolgreich betriebenen Freie-Elektronen-Lasers LCLS am SLAC National Accelerator Laboratory dar. In Kollaboration mit mehreren nationalen Instituten werden in einem 700 m langen Teilstück des bereits bestehenden Tunnels 37 Kryomodule mit supraleitenden Beschleunigerkavitäten installiert. Der Einsatz von supraleitender Beschleunigertechnologie wird eine Teilchenenergie von bis zu 4 GeV im CW (continous wave) Betrieb ermöglichen. [1]

Zwei identische Kryoanlagen mit einer äquivalenten Leistung von je 18 kW bei 4,5 K werden im Folgenden beschrieben. Die Anlagen versorgen den Linearbeschleuniger mit Helium auf mehreren Temperaturniveaus. Superfluides Helium II gewährleistet die notwenige Kühlung zur Aufrechterhaltung der Supraleitung in den Kavitäten. Die Arbeitstemperatur der 1,3 GHz Kavitäten wurde auf 2 K festgelegt. Zwei weitere Heliumkreisläufe werden für die Schildkühlung bei ca. 35 K und die Kühlung von Wärmelasten auf 5 K Niveau genutzt.

Als eine technische Besonderheit der hier beschriebenen Anlagen, ist die rein dynamische Kompression des kalten Heliumdampfes hervorzuheben. Es wird hierzu in einer fünfstufigen Kette von kalten Kompressoren von 32 mbar an den Kavitäten bis auf den Ansaugdruck der Kreislaufkompressoren bei ca. 1 bar absolut verdichtet.

Stichwörter:

Heliumkryosystem, SLAC, LCLS-II, Kalte Kompressoren, Kälteanlage

1 Einleitung

Mit dem Röntgenlaser LCLS-II (Linac Coherent Light Source) wird am SLAC National Accelerator Laboratory der Technologiesprung vom bestehenden normalleitenden Freie-Elektronen-Laser hin zur supraleitenden Beschleunigertechnologie unternommen.

In einem Gemeinschaftsprojekt mit den führenden US amerikanischen Forschungseinrichtungen, wie dem Lawrence Berkeley National Laboratory, Argonne National Laboratory, Cornell University, Fermi National Accelerator Laboratory und dem Jefferson Lab wird im ersten Kilometer des bestehenden Beschleunigertunnels am SLAC ein supraleitender Elektronenbeschleuniger für Teilchenenergien von bis zu 4 GeV errichtet. Die hierbei genutzten Beschleunigermodule basieren auf der bewährten 1,3 GHz TESLA/ILC Technologie. Durch technische Modifikationen wurden die Kryomodule an die spezifischen Anforderungen, wie z.B. den continous wave (CW) Betrieb oder die Neigung des Tunnels angepasst. Insgesamt werden 35 Kryomodule mit einer Arbeitsfrequenz von 1,3 GHz und zwei weitere 3,9 GHz Module zu einem 700 m langen Beschleuniger zusammengestellt. Die spezifizierte Güte (Q0) der Kavitäten beträgt mindestens 2.7·10¹⁰.

Die für die Supraleitung notwendige Kühlung auf eine Arbeitstemperatur von 2 K wird im Endausbau von zwei identischen Heliumkälteanlagen übernommen (Bild 3). Die Kryoanlagen wurden nach der Vorlage des Central Helium Liquefiers (CHL-2) am Jefferson Lab konstruiert. Die Installation der Kälteanlage wird in einem neu errichteten Kryogebäude nahe Sektor 4 des 3,2 km langen Beschleunigertunnels erfolgen (Bild 1).

Das Heliumverteilsystem, bestehend aus Transferleitungen innerhalb des Tunnels, der Surface Transfer Line (STL) sowie der sogenannten Distribution Box (DB) mit dem 2 K Wärmetauscher, wurden vom Fermilab entworfen und beschafft.



Bild 1: SLAC Campus Ansicht mit Beschleunigertunnel und neuem Kryogebäude



Bild 2: 3D Model des Kryogebäudes neben dem des SLAC Beschleunigertunnel

2 Schema und Layout der Helium Kryoanlage

Zwei identische Kryoanlagen mit der Äquivalentleistung von je 18 kW bei 4,5 K sind zur Versorgung des LCLS-II Beschleunigers geplant und derzeit in der Fabrikation. Die Kopplung der Anlagen erfolgt mit der Verbindung über den gemeinsamen Heliumgasspeicher und wahlweise über die zwei Interfaceboxen (IB). Von hier kann der gesamte Beschleuniger in der sogenannten "first light"-Konfiguration von nur einer Kälteanlage versorgt werden. In diesem Fall werden die Interfaceboxen mit U-Tubes zwischen allen Prozessleitungen verbunden. In der finalen Ausbaustufe ist es möglich, die sogenannten Upstream- und Downstream Strings separat von jeweils einer Kryoanlage zu versorgen (Bild 3). Mit Hilfe von Bypässen im Upstream String werden warme Strecken innerhalb des Beschleunigers umgangen und die Sektionen LO, L1 und L2 verbunden.



Bild 3: Schema des LCLS-II Kryosystems mit Heliumkälteanlagen mit Verteilung und Beschleunigermodulen

In Bild 4 wird das Layout innerhalb des Kryogebäudes dargestellt. Die Kompressorsysteme der Kryoanlagen C1 und C2 befinden sich jeweils in den außen liegenden Kompressorräumen. Auf der Nordseite außerhalb des Gebäudes sind die vertikale Coldbox, das Oil Removal System, der Reiniger und die Heliumanwärmer installiert. Die restlichen Coldboxen befinden sich zusammen mit den Interfaceboxen im zentralen Coldboxraum.

Zwei gemeinsam genutzte LN2 Speichertanks mit einem Volumen von jeweils 76 m³ versorgen die Anlagen mit dem zur Vorkühlung notwendigen Flüssigstickstoff. Zu jeder Anlage ist je ein 10.000l LHe Dewar zugeordnet, welcher zusammen mit den sechs GHe-Tanks zur Speicherung des Heliuminventars bereitsteht.



Bild 4: Subsysteme der LCLS-II Helium Kälteanlage

3 Prozessflussdiagramm

In Bild 5 ist der prozesstechnische Aufbau der LCLS-II Heliumkälteanlage in der Form eines Prozessflussdiagrammes abgebildet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde hier nur die Kryoanlage C1 abgebildet. Die identische Anlage C2 ist über das Niederdruck- und Gasspeichersystem und die Interfacebox mit Anlage C1 verbunden. In den folgenden Unterabschnitten werden die Subsysteme beginnend mit dem Main Compressor System über die Coldboxen bis hin zu den Kryomodulen im Einzelnen beschrieben.



Bild 5: Prozessflussdiagramm der Kälteanlage C1 [2]

3.1 Main Compressor System

In den separierten Kompressorräumen an der Ost- und Westseite des neu errichteten Kryogebäudes befinden sich die Kompressorstationen. Die Anschlussleitungen für Helium, Kühlwasser und Ölverteilung werden in einem Versorgungskanal verlegt, hierdurch wird eine gute Zugänglichkeit zu den Aggregaten ermöglicht (Bild 6). Der Kanal ist mit Gitterrosten abgedeckt, regelmäßig benutzte Ventile sind von oben bedienbar oder werden automatisiert.

Das Main Compressor System (MCS) besteht aus einem dreistufigen Schraubenkompressor System. Drei Kompressoren mit je 597 kW bilden die Niederdruckstufe (LP). Ein 756 kW Mitteldruckkompressor (MP) verdichtet das von der 4,5 K Coldbox zurückströmende Helium. Der leistungsstärkste Kompressor mit einer Leistung von 1864 kW bildet die Hochdruckstufe (HP) und verdichtet auf einen Enddruck zwischen 17 und 20,2 bar. Dieser Hochdruckkompressor ist redundant ausgeführt (im PFD Bild 5 nicht aufgeführt) und kann bei einem Ausfall eines Kompressors variabel als LP-, MP- oder HP-Kompressor (Swing) eingesetzt werden. Die Kompressoren sind modular aufgebaut, d.h. jede Einheit verfügt über eine dedizierte Steuerung mit SPS, ein eigenständiges Grobölabscheidesystem und einem separaten Ölkreislauf mit Ölpumpe [4].

Ein nachgeschaltetes, dreistufiges Ölabscheidesystem (ORS) aus Koaleszern übernimmt die Feinfiltration des Heliumstroms. In einem Aktivkohleadsober mit 4250 kg getrockneter Aktivkohle werden letzte Verunreinigungen aufgenommen. Ein nachgeschalteter Feinfilter hält den im Adsorber anfallenden Kohlenstaub zurück.

Als Heliumspeicher dienen sechs separate 113 m³ Drucktanks mit einem zulässigen Maximaldruck von 17,2 bar. Eine angeschlossene Trailerstation ermöglicht die Aufnahme von Heliumgas aus einem LKW-Druckbehälter. Die Reinigung des Prozessgases erfolgt über einen stickstoffgekühlten Reiniger mit redundantem Reinigerbett für unterbrechungsfreien Betrieb.

Unabhängige Recovery Kompressoren erlauben das Auffangen und Rückverdichten von Helium in die Puffertanks bei einem Stillstand des MCS. Weiterhin sind im C1 Kompressorraum die Druckluftanlage und das Motor Control Center (MCC) untergebracht.



Bild 6: Kompressorraum mit Leitungskanal

3.2 4,5 K Coldbox

Die Helium Kälteanlage mit einer äquivalenten Leistung von 18 kW bei 4,5 K wurde nach dem Vorbild der CHL-2 Anlage am Jefferson Lab entworfen und von Air Liquide Advanced Technologies, US (ALATUS) in Zusammenarbeit mit PHPK Technologies konstruiert und gefertigt.

Die 4,5 K Heliumanlage ist in eine sogenannte Upper Coldbox (UCB) und eine Lower Coldbox (LCB) unterteilt. Während die UCB in vertikaler Außenaufstellung installiert wird, ist die LCB als horizontale Coldbox im Coldbox-raum des Kryogebäudes untergebracht. Beide Boxen sind über eine Vielfachkryoleitung miteinander verbunden (Bild 7).

Die UCB übernimmt die LN2 Vorkühlung von 300 K auf 80 K und beherbergt die zwei redundanten 80 K Adsorber. Für die Stickstoffkühlung des Heliumhochdruckstromes wird ein LN2 Verbrauch von maximal 1060 l/h erwartet [4]. Der erste Wärmetauscher ist aus Effizienzgründen und zur Vermeidung von unzulässigen Thermospannungen zweigeteilt ausgeführt. Der Hochdruckheliumstrang kann je nach aktuellem Betriebsmodus über HX-1A durch das LN2-Kaltgas und das Mitteldruckrückgas oder über HX-1B vom Niederdruckrückgas vorgekühlt werden.

Die LCB beherbergt die Aluminium Plattenwärmetauscher HX3 bis HX12 (Bild 5) und übernimmt die Kälteerzeugung und Verflüssigung des Heliums mittels vier statisch gasgelagerter Expanderturbinen bis auf 4,5 K. Turbine 1 versorgt hierbei einen 35 K Schildkreislauf. Turbine 4 arbeitet als JT-Expander und verflüssigt wahlweise direkt in den 10.000 I Dewar oder über den Unterkühler in den Phasenseparator V22195. Gleichzeitig erfolgt hier die 5,5 K Versorgung der thermischen Abfangungen über die Line C. Vom Phasenseparator aus wird der Beschleuniger mit überkritischem 4,5 K Helium versorgt, welches später zur 2 K Versorgung der Kavitäten dient.

Die Rücknahme von Kaltgas kann je nach aktuellen Betriebsbedingungen an mehreren Stellen der Wärmeübertragerkette erfolgen. Über einen außen aufgestellten Anwärmer ist die Rücknahme bei Raumtemperatur direkt in das Kompressorsystem möglich.



Bild 7: 4,5 K Coldbox

3.3 2 K Coldbox

Die Arbeitstemperatur der Kavitäten ist auf 2,0 K festgelegt. Zur Erzeugung des suprafluiden Helium II ist ein Evakuieren des Heliumbades erforderlich. Fünf in Serie geschaltete Kaltkompressoren übernehmen die Verdichtung von 31,3 mbar auf 1,05 bar (Bild 8). Das verdichtete Gas hat eine Temperatur von weniger als 30 K und wird über die 4,5 K Coldbox auf Kompressorsaugdruckniveau zurückgeführt und somit effizient genutzt.

Für die Stabilität der Arbeitsfrequenz der Kavitäten im continous wave Betrieb ist eine Druckstabilität von <± 0,2 mbar gefordert. Zur Einhaltung dieser Stabilität ist eine sorgfältige Abstimmung des gesamten Systems notwendig und stellt eine besondere Herausforderung dar.

Eine weitere konzeptionelle Besonderheit der 2 K Coldbox ist die Auslegung auf zwei Leistungsstufen. In der maximalen Leistungsstufe (High Flow Mode) können 4 kW bei 2 K erzeugt werden, was einem Massenfluss von 200 g/s entspricht. Diese Leistung wird benötigt, wenn der gesamte Linac von nur einer Kryoanlage versorgt wird. Im Falle der Versorgung der Upstream- und Downstreamsektion des Linacs durch jeweils eine Kälteanlage muss mit einer deutlichen Verringerung des 2 K Massenstromes für jede 2 K CBX gerechnet werden. Um diesen Teillastbetrieb (Low Flow Mode) zu gewährleisten, kann eine Neukonfiguration der kalten Kompressoren vorgenommen werden. Es wird hierbei die erste Kompressorstufe entfernt und die zuvor unbesetzte sechste Kompressorstufe zum Einsatz gebracht (Bild 9).



Bild 8: 2 K CBX Schema und 3D Ansicht [3]



Bild 9: Konfiguration der Kalten Kompressoren im Volllast- und Teillastbetrieb [3]

3.4 Heliumtransfersystem

Die Main Transfer Line (MTL) verbindet die 4,5 K CBX und die 2 K CBX mit der sogenannten Interface Box. Im Querschnitt betrachtet, enthält diese Mehrfachleitung folgende Prozessleitungen:



Line A: 4,5 K Supply DN 50 (2") Line B: 2 K Return DN 250 (10") Line C: 5 K Intercept Supply DN 50 (2") Line D: 8 K Intercept Return DN 50 (2") Line E: 35 K High Temperature Shield Supply DN 50 (2") Line F: 55 K High Temperature Shield Return DN 50 (2")

Bild 10: Querschnitt der [7]

Die Vakuumisolierung, ein auf ca. 35 K gekühltes Aluminium Temperaturschild sowie möglichst kleine Kontaktstellen an den Rollensystemen sollen den Wärmeeintrag auf die Prozessleitungen auf ein Minimum reduzieren.

Die Interfacebox stellt die Schnittstelle zum Transfersystem für die Tunnelversorgung dar. Gleichzeitig eröffnet sie über Bayonetverbindungen die Möglichkeit der wahlweisen Kopplung von Upstream- und Downstreamsektion des Linacs an eine einzige Kryoanlage ("first light"-Konfiguration) oder die separate Versorgung von einer Sektion mit je einer Kryoanlage (Bild 11).

Die Surface Transfer Line (STL) verbindet das Kryogebäude mit der Distribution Box, welche sich in der Klystron Galerie direkt über dem Linactunnel befindet. Sie enthält den 2 K Wärmetauscher, der im Gegenstrom das 4,5 K Helium mit dem 2 K Rückgas aus den Kavitäten weiter unterkühlt. Für den Abkühl- und Aufwärmprozess des Linacs werden Bypässe um diesen Wärmetauscher genutzt.

Durch die vertikalen Transferleitungen wird das Helium zu den Feedboxen geleitet. Die Feedboxen stellen die Verbindung zu den Kryomodulen dar. Am gegenüberliegenden Ende der Kryomodulsektion wird über ein Endcap das Helium zurück bzw. durch Bypassleitungen vorbei an den warmen Sektionen des Beschleunigers geleitet.



Bild 11: Main Transfer Line zur Interface Box mit U-Tube Verbindungen (links), Surface Transfer Line (STL), Distribution Box (rechts)

3.5 Kryomodul

Die insgesamt 37 Kryomodule sind nach dem bewährten Tesla/ILC Design aufgebaut. Eine 300 mm Helium Gas Return Pipe (HGRP, Line B) bildet dabei die Rückgratstruktur (Bild12). Die acht Kavitäten mit jeweils neun Niob Zellen sind an dem 300 mm Rohr aufgehängt. Jede Kavität besitzt einen separaten Heliumtank und ist über den sogenannten Chimney und dem Zweiphasenrohr mit der HGRP verbunden. Im Zweiphasenrohr (Line G) wird die Heliumniveauregulierung vorgenommen. Durch Filmsieden des suprafluiden Heliums leitet sich die an der Cavityoberfläche entstehende Wärme ab. Das entstehende Kaltgas gelangt durch die HGRP über den 2 K Wärmetauscher zu den kalten Kompressoren.

Bedingt durch die Neigung des Beschleunigertunnels und den hierdurch zwangsläufig entstehenden unterschiedlichen Füllstand im Zweiphasenrohr wurde für jedes Kryomodul ein separates Joule-Thompson Ventil vorgesehen, welches das überkritische Helium von ca. 3 bar auf 31,3 mbar in das Zweiphasenrohr entspannt. Ein Cooldown-ventil mit Kapillarleitung (Line H) zur Unterseite der Kavitäten wird für die Abkühlung und initiale Flüssigheliumbefüllung genutzt. Der 5 K Kreislauf (C, D) ermöglicht die thermische Abfangung, z. B. an den Hochfrequenzkopplern. Ein Temperaturschild bei ca. 35 K wird über die Leitungen E und F versorgt und absorbiert die anfallenden Wärmestrahlungslasten.



Bild 12: LCLS-II Kryomodul in 3D Ansicht und Querschnitt

4 Zusammenfassung

Das Heliumkryosystem zur Kühlung der supraleitenden Beschleunigerstruktur stellt eine der großen technischen Herausforderungen für das LCLS-II Projekt dar. Insbesondere die Erzeugung des 2 K Heliums mit Hilfe einer fünfstufigen Kaltkompressorenkette stellt hohe Anforderungen an die Druckstabilität des gesamten Heliumprozesses.

Die technische Zuverlässigkeit der Anlage ist von größter Bedeutung für den Erfolg des Röntgenlasers als Forschungsinstrument. Jeder Ausfall oder größere Störung der Heliumanlage wirkt sich direkt auf die nutzbare Strahlzeit aus und ist mit langen Wartezeiten bis zur Wiederaufnahme des Strahlbetriebes verbunden.

Das Design baut daher auf der Grundlage bereits bewährter Komponenten auf, die in den Partnerinstituten seit Jahren im Einsatz sind. Das technische Risiko soll durch diese Strategie reduziert werden. Dennoch stellen die notwendigen Modifikationen, bedingt durch spezielle Rahmenbedingungen am Aufstellungsort (seismische Aktivität, Tunnelneigung), die charakteristischen Anforderungen an den CW Röntgenlaserbetrieb sowie der ambitionierte Zeitplan bis zur Inbetriebnahme, sehr hohe Ansprüche an das Design der Anlage, die Qualität der Einzelkomponenten, die Planung der Installation und Inbetriebsetzung. Die termingerechte Fertigstellung mit dem geplanten ersten Strahlbetrieb ("first light") im August 2019 stellt hierbei ein wichtiges und anspruchsvolles Projektziel dar.

Work supported by Department of Energy contract DE-AC02-76SF00515

Abkürzungsverzeichnis

C1, C2 CBX CHL-2 CW GHe	Cryoplant 1, Cryoplant 2 Coldbox Central Helium Liquefier 2 Continous wave Heliumgas
HGRP	Helium Gas Return Pipe
НР	High Pressure
НХ	Heat Exhanger
IB	Interface Box
ILC	International Linear Collider
JT	Joule-Thomson
LCB	Lower Cold Box
LCLS-II	Linac Coherent Light Source II
LHe	Flüssighelium
LN2	Flüssigstickstoff
LP	Low Pressure
MCC	Motor Control Center
MP	Medium Pressure
MTL	Main Transfer Line
PFD	Prozessflussdiagramm
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STL	Surface Transfer Line
T1T4	Turbine 1Turbine 4
TESLA	Tera electron volt Energy Superconducting Linear Accelerator
UCB	Upper Cold Box

Literaturverzeichnis

- [1] Linac Coherent Light Source II (LCLS-II) Conceptual Design Report, SLAC-I-060-003-000-00, 2014
- [2] Viswanath Ravindranath, Internal Document Process Flow Diagram LCLS II Cryoplant, 2017
- [3] Viswanath Ravindranath, Presentation: 2K Cold Box Design and Production Plans, FAC Review 2017
- [4] Dana M. Arenius, LCLS-II Helium Cryoplant Refrigeration System Baseline Design, LCLSII-4.8-EN-0609-R0, 2016
- [5] Dana M. Arenius, Presentation LCLS-II Cryoplant Design (Cryosystem Final Design Review), 2015
- [6] T. J. Peterson, J. G. Weisend II, TESLA & ILC Cryomodules, FERMILAB-TM-2620-TD
- [7] A. Martinez, A. Dalesandro, II, Presentation LCLS-II Cryogenic System CDS Tunnel Components, 2014