

Die Helium-Kälteanlage am FZ Rossendorf

Dr. Christoph Haberstroh

Lehrstuhl für Kälte- und Kryotechnik
TU Dresden, 01062 Dresden

Kurzfassung

Am Forschungszentrum Rossendorf in der Nähe von Dresden wurde kürzlich ein Linearbeschleuniger für Elektronen in Betrieb genommen (ELBE – ELEktronenbeschleuniger hoher Brillanz und geringer Emittanz [1]). Für verschiedene Anwendungen im Bereich der Grundlagenforschung wird hier ein quasi-kontinuierlicher Elektronenstrahl bei einer Endenergie von 12 bis 40 MeV erzeugt. Die eigentliche Beschleunigung erfolgt mit Hilfe supraleitender Hohlraumresonatoren.

Die Helium-Kälteanlage zum Aufrechterhalten der benötigten Betriebstemperatur hat eine Leistung von 220 W bei 1,8 K und stellt damit die viertgrößte Heliumanlage in ganz Deutschland dar. Konzeption und Aufbau wurden exakt auf die spezifischen Anforderungen am FZ Rossendorf zugeschnitten. Insbesondere im Unterdruckteil der Anlage – 1,8 K entsprechen einem He-Dampfdruck von 16 mbar – kamen eine Reihe innovativer technischer Lösungen zum Einsatz.

Der Beitrag berichtet über Aufbau und Arbeitsweise dieser Kälteanlage, sowie über die Betriebserfahrungen im Verlauf der ersten Versuchsperioden.

Stichworte

Helium-Kälteanlage, Teilchenbeschleuniger, supraleitende Resonatoren, Kalte Kompressoren

1 Einleitung

Das Akronym ELBE steht für Elektronenbeschleuniger hoher Brillanz und geringer Emittanz. Es handelt sich hierbei um einen Linearbeschleuniger für hohe Strahlqualität (Emittanz und Brillanz als Maß für Strahlfokussierung und Monochromatizität, sprich einheitliche Elektronenenergie) sowie hoher Strahlintensität. Letztere liegt, insbesondere aufgrund des Dauerstrichregimes (cw, continuous wave) bei typisch 1 mA Strahlstrom entsprechend einer Strahlleistung von 50 kW. Die Endenergie der einzelnen Elektronen liegt dagegen bei moderaten 20 MeV, im Endausbaustadium ca. 40 MeV.

Die Forschungsausrichtung ist dementsprechend eine grundlegend andere, verglichen etwa mit DESY oder CERN. Der ELBE-Beschleuniger dient nicht zur Erzeugung neuartiger Elementarteilchen, sondern für die Grundlagenforschung im Bereich der Kernspektroskopie, der Neutronenphysik, insbesondere auch zum Antrieb eines FEL (Free Electron Laser).

Die Beschleunigung der Elektronen erfolgt mit Hilfe supraleitender Hohlraumresonatoren, sog. Kavitäten (Typ TESLA, 9-zellig, Resonanzfrequenz 1,3 GHz, Arbeitstemperatur ca. 1,8 K). Zwei gleichartige Resonatoren sind dabei in einem gemeinsamen Helium-Badkryostaten untergebracht. Als Anforderungen für den Betrieb sind wichtig das Vermeiden jeglicher Vibrationen, weiterhin eine hohe Druckkonstanz.

Innerhalb der Planungsgruppe von ELBE war der Lehrstuhl für Kälte- und Kryotechnik an der TU Dresden für die Auslegung der kryogenen Versorgung zuständig.

2 Prozessbeschreibung

Das stark vereinfachte Fließbild der Anlage ist in Bild 1 gezeigt. Die Anlage kann verstanden werden als eine Standard – 4 K – Kälteanlage mit zusätzlicher 1,8 K - Erweiterung. Der 4 K – Teil umfasst drei Expansionsturbinen sowie einen Phasenseparator. Der Kreislaufkompressor ist in zwei parallel arbeitende, separate Einheiten aufgeteilt. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung der Anlage an verschiedene Betriebsmodi oder Lastfälle. Bei Bedarf kann die Anlagenleistung durch Vorkühlung mit Flüssigstickstoff (LN₂) nochmals deutlich erhöht werden.

Der 1,8 K – Teil umfasst einen Unterkühlungs-Wärmeübertrager und ein Expansionsventil, über welches der Helium-Vorlauf in den Badkryostaten entspannt wird. Das abdampfende Gas wird mit Hilfe von zwei sogenannten Kalten Kompressoren (CC1 und CC2, jeweils einstufige Turbomaschinen) teilweise bereits bei tiefer Temperatur rückverdichtet. Kalte Kompressoren wurden hier erstmals für eine Anlage dieser Größenordnung verwendet und speziell für die hier vorliegenden, vergleichsweise kleinen Massenströme konzipiert.

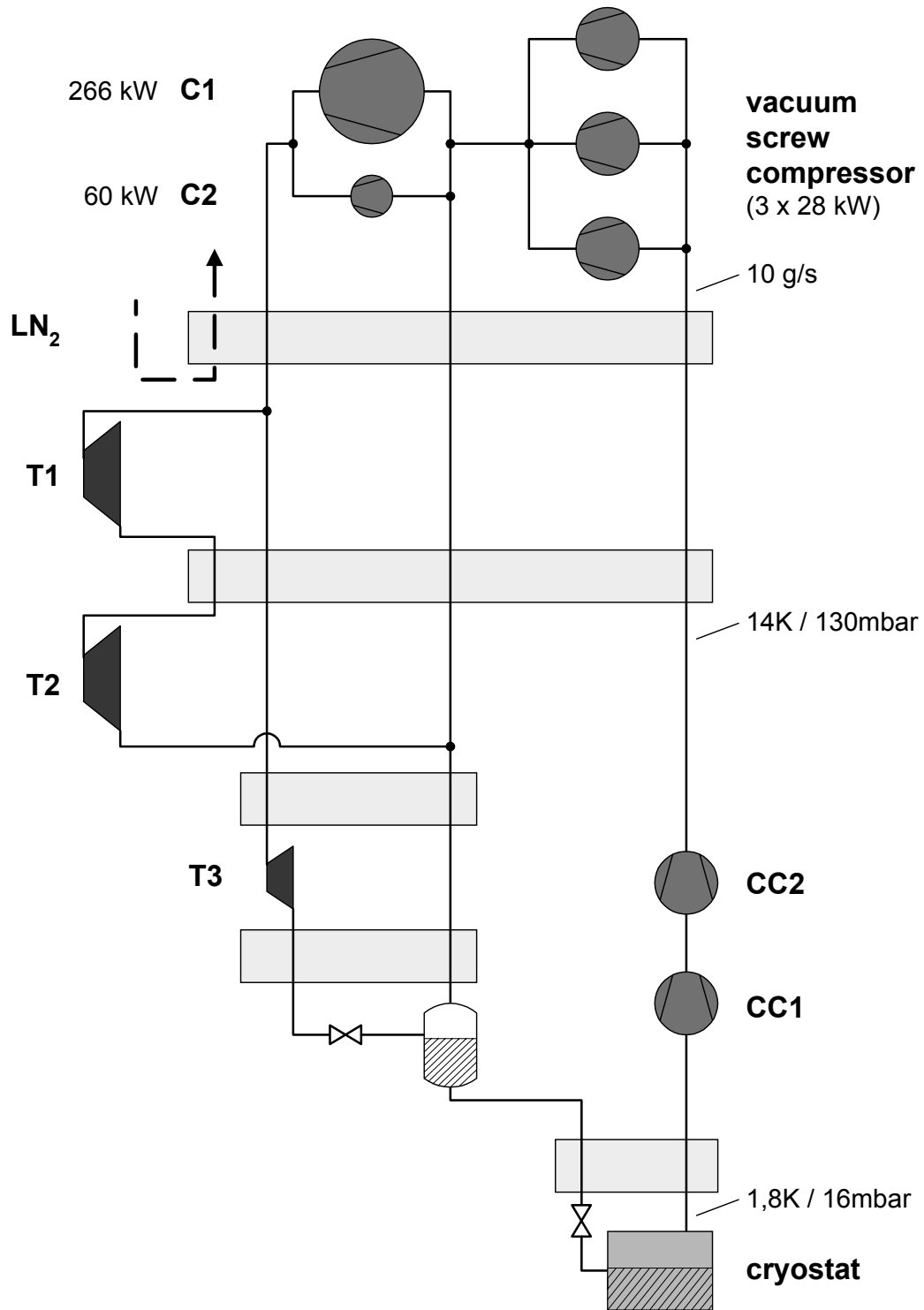


Bild 1: Vereinfachtes Fließbild der Helium-Kälteanlage ELBE-Beschleuniger FZ Rossendorf

Die endgültige Rückverdichtung auf Niederdruckniveau Kreislaufkompressoren erfolgt mit Hilfe dreier Vakuum-Schraubenkompressoren. Auch deren Einsatz stellt eine Neuerung in diesem Zusammenhang dar. Bisher waren Heliumanlagen hier auf aufwändige Sperrschieber-Vakuumpumpstände angewiesen.

3 Anlagenteile

In Bild 2 ist die Aufstellung der Kälteanlagenkomponenten maßstabsgetreu wiedergegeben. Zu erkennen sind großer und kleiner Kreislaufkompressor mit Ölabscheidung (Vordergrund links), Gasmanagement (Seitenwand links), die drei Vakuum-Schraubenkompressoren und die zentrale Coldbox (im Hintergrund). Auf der rechten Seite in der Abbildung sind der an der Hallendecke aufgehängte Gasspeicherballon (30 m³), der Rückgewinnungskompressor (200 bar, ~ 27 m³/h) sowie mehrere Hochdruck-Flaschenbündel zu sehen. Zusammen mit dem Hochdruck-Speichertank außerhalb der Halle (HD-Tank) steht eine Speicherkapazität von ca. 2100 m³ He (STD) zur Verfügung. Ebenfalls außerhalb der Halle installiert ist der Mitteldruck-Reinstgaspuffer (Buffer, 20 m³).

Zur Vermeidung von Vibrationsübertragung ist die Kälteanlage in einer Nebenhalle mit separatem Fundament untergebracht. Die Verbindung zum Beschleunigerraum innerhalb der Betonabschirmung ist durch eine Transferleitung von ca. 20 m Länge realisiert. Innerhalb der Beschleuniger-cave befindet sich noch die Verteilbox (nicht sichtbar) mit Unterkühlungs-Wärmeübertrager und Kaltventilen.

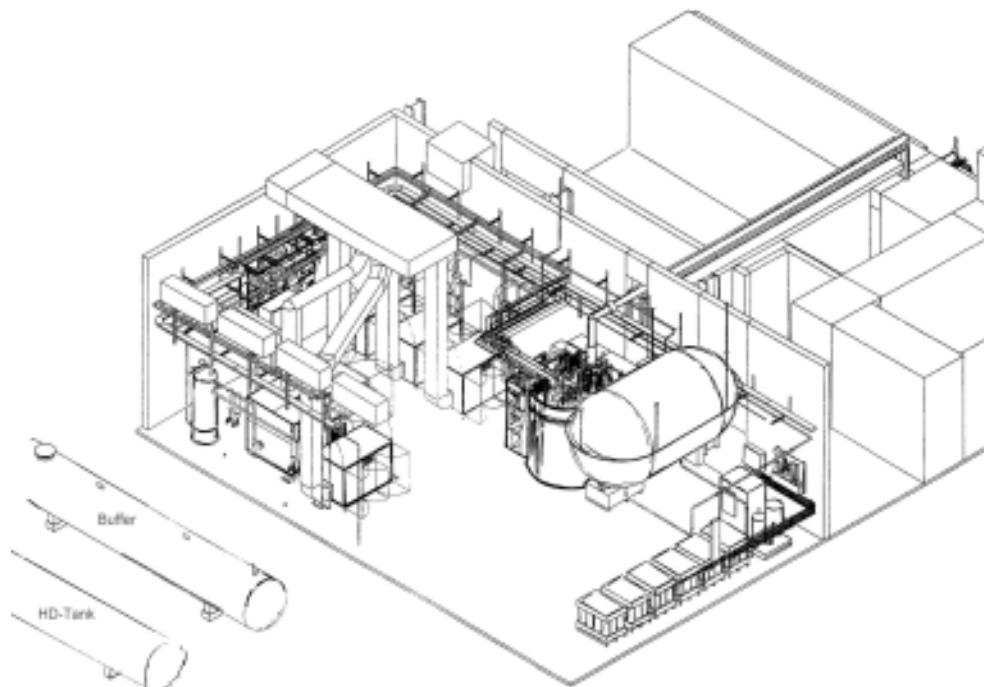


Bild 2: Helium-Kälteanlage ELBE-Beschleuniger

4 Anlagenleistung

Der beschriebene Aufbau der Kälteanlage erlaubt eine sehr flexible Anpassung an verschiedene Anforderungen. In Tab. 1 sind einige Möglichkeiten exemplarisch aufgeführt. Angegeben sind Kälteleistung, benötigte Aggregate sowie die aufgenommene elektrische Leistung (inkl. einiger Nebenaggregate, nicht aufgeführt). Weiterhin stehen in allen Betriebsfällen - außer F - ca. 200 W Kälteleistung bei rund 80 K zur Versorgung der Schildkühlung zur Verfügung.

Tabelle 1: Anlagenleistung

<u>A) Volllastbetrieb</u>			
220 W @ 1.8 K	C1 + C2 +	VC	417 kW
315 W @ 2.1 K	C1 + C2 +	VC	417 kW
400 W @ 2.1 K	C1 + C2* +	VC + LN ₂	528 kW
<u>B) Standby-Betrieb + Verflüssigung</u>			
20 W @ 1.8 K + 30 l/h	C1 +	VC	355 kW
<u>C) reiner Verflüssiger-Betrieb (inkl. Reinigung)</u>			
76 l/h	C1		271 kW
164 l/h	C1 + C2 +	LN ₂	331 kW
<u>F) Standby-Betrieb bei 70 K</u>			
44 W @ 70 K	C2		41 kW
C1:	Kreislaufkompressor 266 kW		
C2:	Kreislaufkompressor 60 kW		
C2*:	Kreislaufkompressor 171 kW (Austausch)		
VC:	Vakuumschrauben, 3 x 28 kW		
LN ₂ :	zusätzliche LN ₂ - Einspeisung		

Im Normalbetrieb sind beide Kreislaufkompressoren sowie Vakuumschrauben und Kalte Kompressoren in Betrieb. Wird ein etwas höherer Betriebsdruck an den Kavitäten gefahren, erhöht sich die verfügbare Kälteleistung erheblich, bei zusätzlicher Verstärkung der Kreislaufkompressoren und LN₂-Vorkühlung ist fast eine Verdopplung möglich. Umgekehrt kann bei geringerer Kälteanforderung Antriebsleistung gespart werden. Für längere Betriebsunterbrechungen am Beschleuniger,

bei denen ein komplettes Wiederaufwärmen und der damit verbundene mechanische Stress vermieden werden sollen, steht ein extrem sparsamer stand-by – Mode bei rund 70 K zur Verfügung. Die Anlage ist weiterhin so konzipiert, dass die jeweils nicht vom Beschleunigerkryostaten benötigte Kapazität zum Verflüssigen zur Verfügung steht (interner Ausfrierreiniger ebenfalls vorhanden).

5 Zeitlicher Ablauf von Aufbau und Betrieb

Im Folgenden sind der zeitliche Ablauf von Aufbau und Betrieb der Kälteanlage grob umrissen:

94 – 96	Vorlaufzeit Planungsgruppe
9/96	Baubeschluss; Ausschreibung der Kälteanlage
12/96	Auftragserteilung Kälteanlage (Fa. Linde, Pfungen)
97 – 98	Bau der Beschleunigerversuchshalle
ab 7/98	Lieferung der Kälteanlagenkomponenten / Verrohrung
4/99	Beginn Inbetriebnahme
11/99	Abnahme und Übergabe der Kälteanlage
11/99 – 4/00	Ausbau für LHe-Entnahme (Speicher Dewar 2000 l, Abfüllstation)
1/01	Beschleunigerkryostat angeschlossen
5/01 – 12/01	erste Messperiode Linearbeschleuniger
8/01	erstmalig 20 MeV erreicht (Designwert)
11.9.01	Festakt Einweihung (abgebrochen)
1/02 – 8/02	Umbau Halle, Beschleuniger-cave
2 ... 4/02	Kälteanlage im Verflüssigerbetrieb für separates Experiment
4/02	Installation LN ₂ /N ₂ –Versorgung (Standtank, Inertgasverteilung)
5 ... 8/02	Komplettwartung der Kälteanlage
seit 10/02	zweite Beschleuniger-Messperiode

6 Betriebserfahrungen

Abweichend von der ursprünglichen Planung wurden für den Beschleunigerbetrieb z. T. erheblich abweichende Arbeitsbedingungen vorgefunden. So lag der Arbeitspunkt ausschließlich im extremen Teillastbereich (9 ... 25 %), die Anforderungen an die Druckstabilität waren mit $\pm 0,5$ mbar erheblich höher als zum Zeitpunkt der Anlagenkonzeption veranschlagt. Trotzdem konnte von Anfang an ein durchgängiger He II – Betrieb realisiert werden.

In Tabelle 2 sind alle wesentlichen Ausfälle und Störungen aufgeführt, die im gesamten Zeitraum von Inbetriebnahme bis Stichdatum Ende 2002 zu verzeichnen waren. Dies entspricht etwa 6000 – 9000 Betriebsstunden, je nach individueller Laufzeit der einzelnen Aggregate. Für eine Anlage dieser Komplexität sind dies vergleichsweise wenig Zwischenfälle, die zudem meist innerhalb kurzer Zeit zu beheben waren.

Tabelle 2: Anlagenausfälle

Ausfall	Konsequenzen
Medienversorgung (Kühlwasser, Druckluft, Elt)	→ keine Beschädigung Neustart i.a. problemlos
HD-Kompressor	→ Ventile, Kolbenringe Stufe 5 getauscht *
Kaltventile cave (Strahlenschäden ?)	→ Elektronik extern platziert
Zufrieren WÜ, LHe-Transferleitung	→ Wasser entfernt
Ausfall Kryostatvakuum (gefährlicher Kaltgasanfall)	→ keine Beschädigung; jetzt zus. Interlocksignal zum Schutz He-Anlage
Expansionsturbinen: - Rotor fest - Ausfall Drehzahlsensor - Bremsventil festgefressen (Lineardurchführung)	→ Partikel entfernt * → Ersatzsensor → gangbar gemacht
Vakuumschrauben: Ablösung Zn-Beschichtung (alle 3 Aggregate) Lagerschaden anschl. Kontamination Buffer	→ Überholung Schraubenblöcke * → Austausch * → ext. Ausfrierreiniger

* Gewährleistung Hersteller

7 "1 Hz" – Phänomen

In der ersten Messperiode war eine unerwartete Komplikation zu verzeichnen: Im stand-by – Modus (nur statische Last, ca. 20 W) konnte problemlos ein stabiler Druck innerhalb des Kryostaten eingestellt werden. Sobald jedoch durch Hochfahren der Hochfrequenz- (HF)-Einspeisung eine zunächst geringe zusätzliche dynamische Last anlag, war eine Oszillation des Druckes zu beobachten, welche rasch an Intensität zunahm und ab einem Niveau von $\pm 0.3 \dots \pm 1$ mbar die HF-Abstimmung der Kavitäten unmöglich machte. Zusätzlich wurde z. T. Flüssighelium aus dem Badkryostaten bis zur Verteilbox hin verlagert, d.h. die Phasentrennung innerhalb des Kryostaten überwunden. Der maximale mögliche Beschleunigungsgradient war hierdurch empfindlich nach oben begrenzt. Die Frequenz der Druckoszillationen lag im Bereich zwischen 1,1 Hz und 0,2 Hz.

Untersucht wurden eine Vielzahl denkbarer Ursachen:

- Taconis-Oszillationen
- Resonanzen innerhalb der Kälteanlage
- Rückkopplung von Druck- oder HF-Reglern
- He II – Effekte
- OF - Welle Zweiphasenrohr

Es wurde gefunden, dass die während des Beschleunigerbetriebs einseitig geschlossene Kaltfahrleitung eine „Gasfeder“ mit passender Resonanzfrequenz bildet. Eine zusätzlich eingefügte Bypass-Kapillarleitung brachte hier eine gewisse Verbesserung.

Als eigentliche Ursache konnte schlussendlich ein Pumpregime der ersten Stufe der Kalten Kompressoren identifiziert werden. Diese an sich naheliegende Erklärung war eingangs aufgrund plausibler Gründe ausgeschlossen worden, zudem waren keine der sonst typischen Anzeichen für ein Vorliegen des Pumpregimes festzustellen. Die beobachteten relativ niedrigen Frequenzen sind durch die großen Volumina auf Hoch- und Niederdruckseite zu erklären.

Abhilfe:

Die zuvor auf gleicher Drehzahl gehaltenen Kalten Kompressoren wurden entkoppelt, die Drehzahl von Stufe 2 erhöht. Das Drehzahlverhältnis ist durch eine mathematische Funktion festgelegt, damit verbleibt unverändert nur ein zu regelnder Parameter.

Stufe 1 wird auf diese Weise entlastet, bei Stufe 2 der reichlich vorhandene Spielraum bis zur Pumpgrenze besser genutzt.

Durch zusätzliche Einspeisung von Helium-Kaltgas auf der Saugseite von Stufe 1 wird während des späteren Kryostatbetriebs der Massenstrom so weit erhöht, dass der Arbeitspunkt beider Stufen in der Nähe des Auslegungspunkts liegt.

Ein erneutes Auftreten des Pumpregimes konnte damit vollständig verhindert werden. Durch Feinabstimmung der Regelparameter wurde darüber hinaus eine Druckstabilität im Bereich der geforderten ± 0.5 mbar erzielt.

8 Ausblick

Nach umfangreichem Umbau innerhalb der Beschleunigerhalle und Rekonstruktion der gesamten Strahlführung wurde im Oktober 2002 die zweite LINAC-Versuchsperiode gestartet. Die Helium-Anlage konnte ohne Schwierigkeiten sämtliche Betriebsanforderungen einhalten.

Im Verlauf der ersten Messperiode wurde bereits eine überarbeitete Version des Beschleunigerkryostaten konzipiert und gefertigt. Diese weist einen wesentlich verbesserten Phasenseparator auf. Zudem wurde eine elektrische Ausgleichsheizung integriert, welche die Kaltgaseinspeisung zur Einstellung des Saugmassenstromes weitgehend ersetzt. Der verbesserte Kryostat wird voraussichtlich in der ersten Hälfte des Jahres 2003 in Betrieb gehen und die Vorgängerversion ersetzen.

9 Literaturverzeichnis

[1] www.fz-rossendorf.de → ELBE

[2] Haberstroh, Ch., ELBE Accelerator: First Year of Cryogenic Operation, wird veröffentlicht in: Proc. of the ICEC 19, July 2002, Grenoble