

80 K - Helium-Kreis mit innovativem, gasgelagertem, ölfreiem Turbo- kompressor

Konzeption, Realisierung, Inbetriebnahme und Test der 80 K - Kälteversorgung für die supraleitenden Elektronenquelle am HZB

Felix Glöckner

Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, FG-ISRF, Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin, Deutschland

felix.gloeckner@helmholtz-berlin.de

Kurzfassung

Die in diesem Paper vorgestellte Anlage versorgt das Testmodul für die supraleitende Elektronenquelle (GunLab) am Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) mit 500 W Kühlleistung bei 80 K.

Da eine Direktverdampfung von Flüssigstickstoff im Modul aus Sicherheitsgründen nicht erwünscht ist, arbeitet die Anlage mit einem Heliumzwischenkreis. Um nicht nur die latente Kälte des flüssigen Stickstoffs, sondern auch den sensiblen Anteil zu nutzen, wird ein neues Konzept, bestehend aus einem Dualwärmeübertrager und einem Badkryostaten verwendet. Die Coldbox enthält für Testzwecke darüber hinaus einen regelbaren Bypass mit integriertem elektrischem Heizer.

Für die Umwälzung des Heliums kommt eine neue Art eines warmen Kompressors zum Einsatz. Der Turbokompressor ist ölfrei, gasgelagert und in heliumdichter halb-hermetischer Bauweise ausgeführt. Um dessen, in dieser Leistungsklasse einzigartigen Eigenschaften zu nutzen, wurde der Turbokompressor von der Fischer Engineering AG für die Anwendung mit Helium angepasst.

Das Paper schließt mit dem Test der Anlage und einem Einblick auf die aktuellen Betriebserfahrungen, sowie einem Ausblick auf das nächste, größere Version für bERLinPro.

Stichwörter:

80 K, Helium, ölfrei, gasgelagert, Turbokompressor, Dualwärmeübertrager, LN2

1 Einleitung

1.1 Die Projekte bERLinPro und GunLab am HZB

Im Rahmen des Projekts bERLinPro (**berlin Energy Recovery Linac Project**) des Helmholtz-Zentrums Berlin (HZB) erfolgt eine Machbarkeitsstudie eines Hochstrom- und Niedrigemittanz – Energy Recovery Linac (ERL). Die Schlüsselkomponenten der Anlage sind dabei supraleitende Kavitäten, welche zusammen mit anderen Komponenten in drei kryogenen Modulen verbaut werden. Diese Module sind: das Gun-Modul mit einer supraleitenden Elektronenquelle, das Booster-Modul, welches als Vorbeschleuniger dient und das Linac-Modul, welches die eigentliche Energierückgewinnungs- und Beschleunigungsaufgabe übernimmt. Die Module haben Wärmelasten auf drei Temperaturniveaus (1,8 K, 4 K und 80 K), die abgeführt werden müssen.

Zur Erprobung des Gun-Moduls und zur Untersuchung von geeignetem Kathodenmaterial wurde GunLab konzipiert. Dessen Versorgung mit flüssigem Helium erfolgt dabei aus einem der beiden am HZB vorhandenen Heliumverflüssigern (Linde TCF50 und L700). Das GunLab ist mit einem eigenen Prozessvakuum-Pumpstand und mit der in diesem Paper behandelten 80 K-Versorgung ausgestattet.

1.2 Rahmenbedingungen für die 80 K-Versorgung

Die 80 K-Versorgung dient zum einen GunLab als Kälteversorgung, zum anderen stellt es auch den Prototyp für die 80 K-Versorgung von BERLinPro dar. Dadurch ergeben sich folgende zusätzliche Anforderungen:

Skalierbarkeit

Die 80 K-Versorgung soll sich auf die etwa fünffach höheren Kältebelastungen $\dot{Q}_{NLast} = 2500 \text{ W}$ von bERLinPro skalieren lassen. Dies soll bei allen Schlüsselkomponenten sowie der Konzeption berücksichtigt werden.

Sicherheitsaspekte

Der spätere Standort des Beschleunigers von bERLinPro befindet sich in einem Strahlenschutz bunker im Untergeschoss. Durch den unterirdischen Standort und die eingeschränkte Luftzirkulation ergeben sich Beschränkungen bezüglich der verwendeten Gase. Es dürfen nur ungiftige, nicht brennbare und nicht explosive Gase verwendet werden. Auch sollen alle Gase mit einer im Vergleich zu Sauerstoff höheren Dichte wegen möglicher Erstickungsgefahr vermieden werden. Daher ist keine direkte Verwendung von flüssigen Stickstoff (LN2) möglich.

Vorhandene Infrastruktur

Das Heliumsystem für die Temperaturniveaus 1,8 K und 4 K baut auf einem vorhandenen Heliumverflüssiger auf. Für die Auskopplung auf einem weiteren Temperaturniveau ist dieser allerdings nicht ausgelegt. Das System für die 80 K-Versorgung muss daher autark betrieben werden.

Darüber hinaus gibt es an den Standorten für GunLab und bERLinPro eine Versorgung mit flüssigem Stickstoff.

Vorhandene Komponenten

Für den kalten Teil der 80 K-Versorgung sind bereits einige Komponenten, die teilweise für andere Projekte beschafft worden waren, vorhanden und sollen wieder verwendet werden. Darunter fallen der Vakuumtank, der Verdampfer, sowie die Kryoventile und die Johnston-Durchführungen. Das gilt auch für den Dualwärmeübertrager sowie ein Sortiment an SCHWER-u2-instrumentation™ Klemmringverschraubungen, die im Rahmen einer vorherigen Arbeit gekauft und teilweise getestet wurden. Daraus ergeben sich einige Einschränkungen der Freiheitsgrade bezüglich Konstruktion und Konzeption.

2 Konzeption und Auslegung der Anlage (P&ID)

Die Anlage lässt sich räumlich und konzeptionell in zwei Teile unterteilen:

Der warme Teil umfasst den Verdichter mit den dazugehörigen Wärmeübertragern, Regelventilen und Sensoren sowie die Druckhaltung. Des Weiteren sind dem warmen Teil auch die elektrische Versorgung und der Schalt-schrank zugeordnet.

Der zweite Teil ist der kalte Teil im erweiterten Sinne. In einer Coldbox befinden sich alle kalten Komponenten, d.h. Dualwärmeübertrager, Regelventile, Sensoren und ein Heizer als Testlast. Diesem Teil ist auch das Vakuum-System zugeordnet (s. Abb. 1)

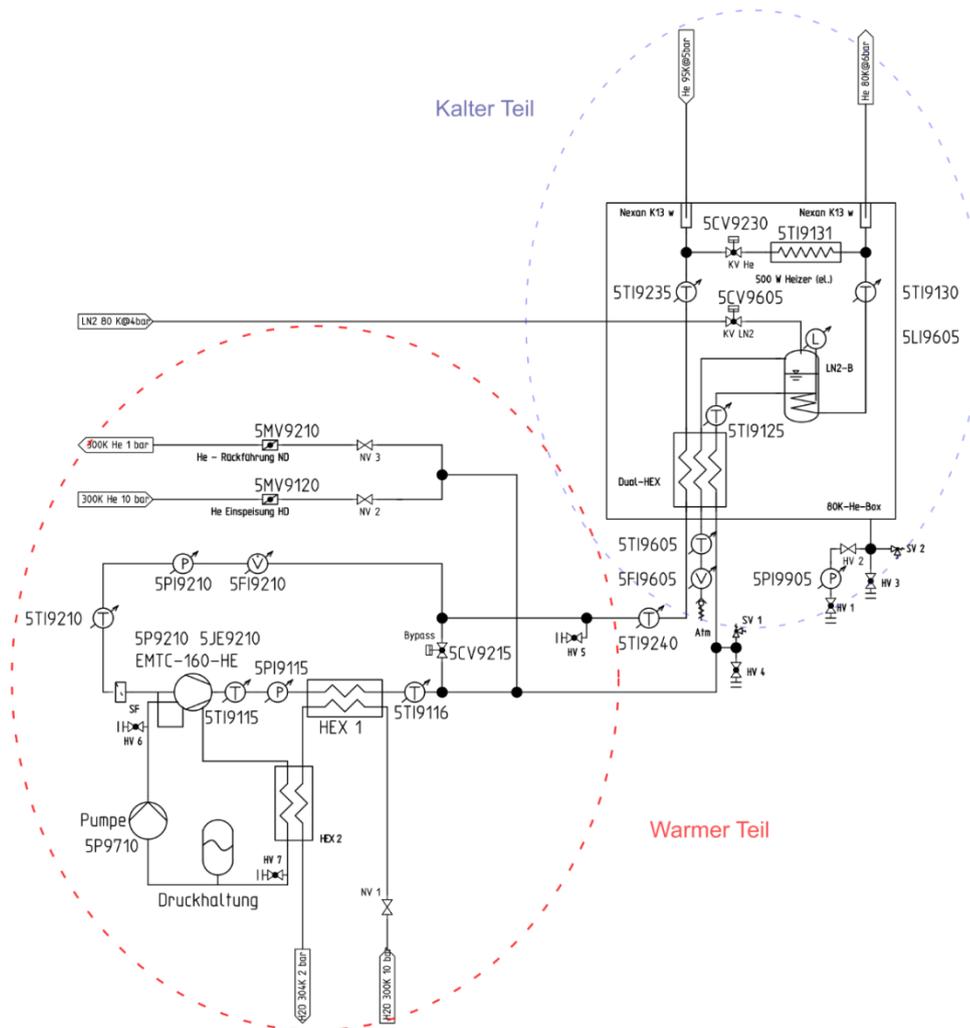


Abb. 1: P&ID der 80K-Versorgung

Im Folgenden werden die Funktionen der Hauptkomponenten aus dem Piping and Instrumentation Diagramm (P&ID) (s. Abb. 1) erläutert.

3 Hauptkomponenten der Anlage

3.1 Warmer Teil

Der warme Teil erfüllt eine Doppelfunktion. Primär dient er zur Umwälzung des Heliums, sekundär übernimmt er die Aufgabe eines Teststands für den Turbokompressor. Im zweiten Fall wird die Verbindung zum kalten Teil getrennt und der gesamte Heliummassenstrom über das warme Bypassventil (5CV9215) geleitet. Da sowohl Sicherheitsventil (s. Abb. 1, SV), Evakuier- und Spülventile (s. Abb. 1, HV 4 und 5), die aktive Druckhaltung, als auch der Schaltschrank mit der Energieversorgung und der steuernden SPS, verbaut sind kann der Teststand ohne weitere Umbaumaßnahmen betrieben werden.

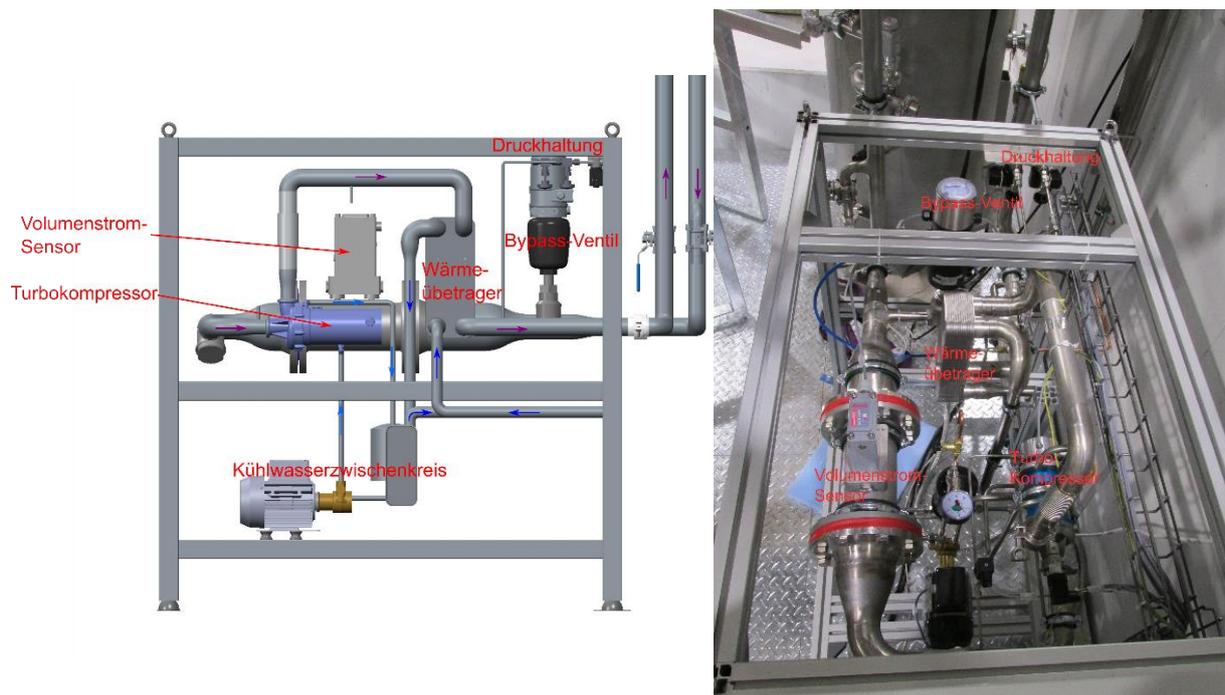


Abb. 2: Warmer Teil – Konstruktion und apparative Umsetzung

3.1.1 Ölfreier Turbokompressor

Vor dem Hintergrund der aufwendigen, nötigen Ölabscheidung für klassisch ölgeschmierte Kompressoren wurde die Recherche für ein ölfreies Konzept vorangetrieben. In diesem Rahmen wurden Verhandlungen mit der Firma Fischer Engineering über einen ölfreien Turbokompressors aufgenommen. Eines ihrer Produkte, der EMTC 150k Air [1] passt von den Auslegeparametern gut in den Anwendungsfall. Es handelt sich um einen schnell drehenden, einstufigen Radialverdichter für Druckluft. Darüber hinaus überzeugt er durch einige konstruktive Eigenschaften.

Der Turbokompressor ist hermetisch aufgebaut und gasgelagert (s. Abb. 3)

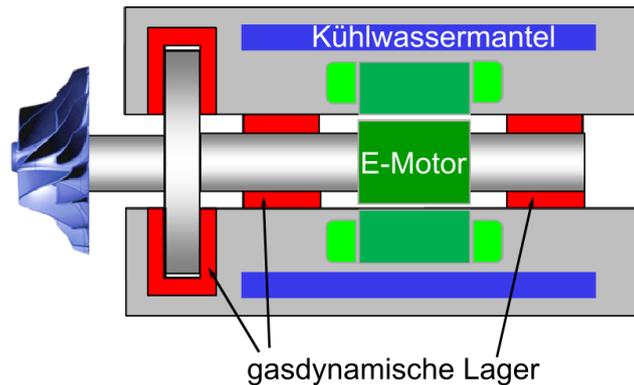


Abb. 3: Prinzipskizze EMTC 160k He [2]

Das bedeutet, dass Motor und Lager mit dem Arbeitsraum verbunden sind. Damit entfällt die Notwendigkeit einer dynamischen Wellendichtung und es sind nur statische Dichtungen notwendig. Dadurch können sehr niedrige Leckageraten erreicht werden, was bereits in einem Anwendungsfall mit Wasserstoff vom Hersteller getestet wurde.

Bei dem Elektromotor handelt es sich um eine Synchronmaschine, die über einen Frequenzumrichter (FU) drehzahl geregelt werden kann.

Sowohl die beiden horizontalen Lager als auch das Vertikallager sind gasdynamisch ausgeführt. Die Profile auf der Welle bauen ab einer Mindestdrehzahl ein Gaspolster auf, auf dem die Welle berührungsfrei gelagert ist (s. Abb. 4). Das gilt auch für das scheibenförmige Lager, welches die Axialkräfte aufnimmt.



Abb. 4: Gasdynamische Profillagerung – horizontal und vertikal [2]

Bei der Strömungsmaschine entfallen zudem trocken dichtende, dynamische Dichtungen im Arbeitsraum, welche häufig Verschleiß und Abrieb unterliegen. Durch den berührungsfreien Betrieb kann der Turbokompressor daher als partikel- und verschleißfrei betrachtet werden.

Da Strömungsmaschinen allerdings nicht mediumunabhängig sind und die EMTC 150k Air [1] für Luft ausgelegt ist, müssen Anpassungen durchgeführt werden. So müssen Modifikationen an der Geometrie der Volute und des Laufrads vorgenommen werden. Auch die gasdynamischen Lager müssen auf Helium angepasst werden. Darüber hinaus muss für ein ausreichend hohes Verdichtungsverhältnis die Drehzahl angehoben werden.

3.1.2 Kennfeld des EMTC 160 k He

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden Tests, mit dem warmen Teil als Teststand (s. Abb. 5, „80%-Bypass“) sowie mit der Gesamtanlage (s. Abb. 5, „...ges“). durchgeführt und das folgende Kennfeld aufgenommen (s. Abb. 5), welches gut zum Anwendungsfall passt (vgl. KapitelZweiter Test - Regelung 4.2). Bei einem Niederdruck von $p_{ND} = 5$ bar wird bei einem Druckverhältnis von $\pi = 1.2$, die geforderter Drucksprung von 1 bar erfüllt werden. Der Massenstrom ermöglicht mit $\dot{m} = 32$ g/s bereits die Kälteleistungsanforderungen für bERLinPro.

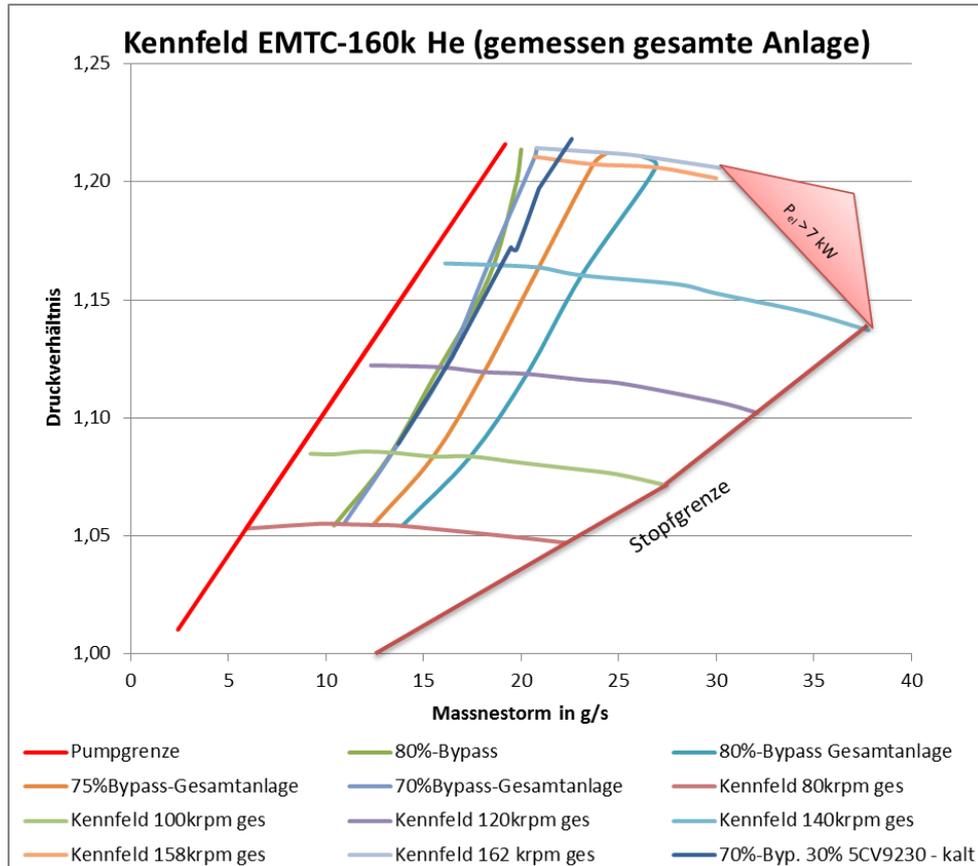


Abb. 5: Kennfeld EMTC-160 He – gemessen gesamte Anlage

3.2 Kalter Teil

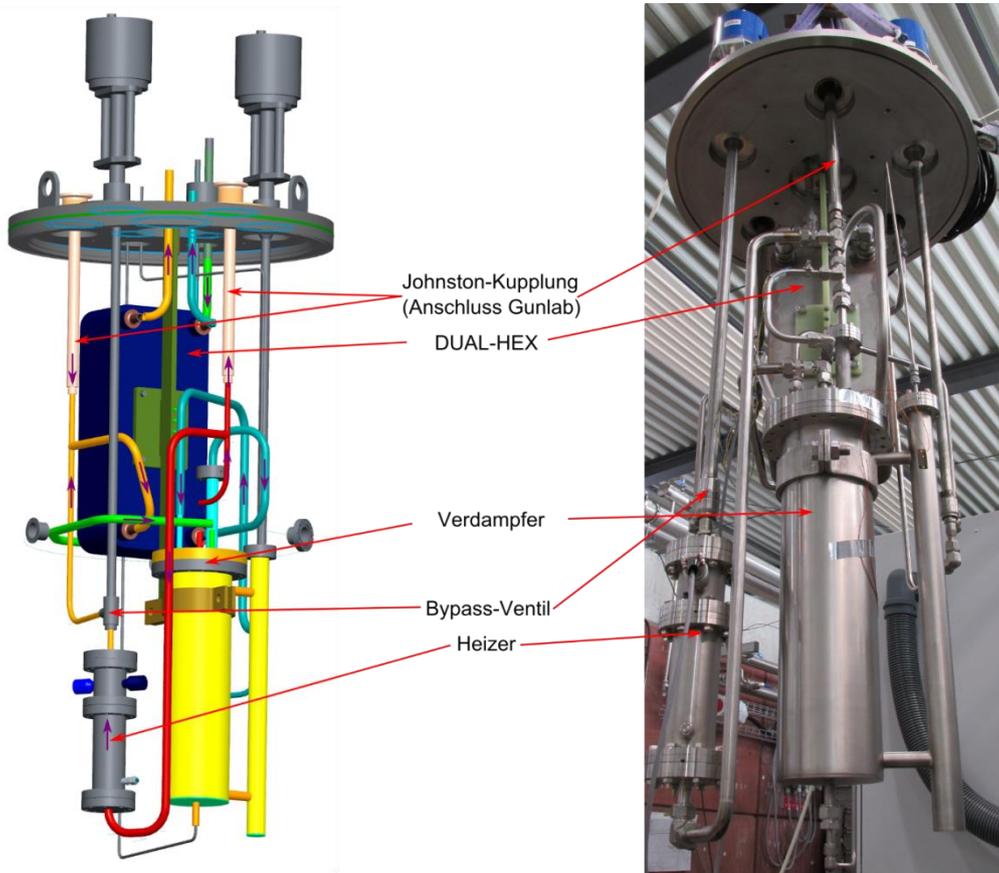


Abb. 6: Kalter Teil – Coldbox Insert -- Konstruktion und apparative Umsetzung

Die primäre Aufgabe des kalten Teils ist die Bereitstellung von Kälte durch Stickstoffverdampfung. Darüber hinaus ist die Coldbox mit einem Bypass-Ventil (s. 5CV9230, Abb. 1 und Abb. 6) und einem elektrischen Heizer ausgestattet, welche für Testzwecke zur Simulation von GunLab vorgesehen sind. Das Aufprägen des Kältestroms auf den Heliumkreis erfolgt zweistufig (s. Abb. 7).

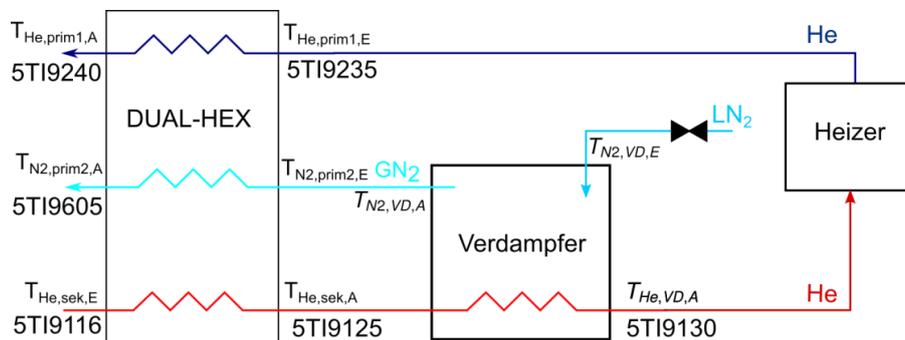


Abb. 7: Übersicht des kalten Teils – Syntax Indices: Medium: Helium (He), Stickstoff (N2) – Kreis, Komponente – Eintritt (E) oder Austritt (A)

Das Helium wird in einem Verdampfer (s. Abb. 7 und Kapitel 3.2.2) auf das 80 K Temperaturniveau mit Hilfe von Stickstoffverdampfung konditioniert. Dabei kommt der Vorteil der inhärenten Temperaturregelung durch die Verdampfungstemperatur und der sich selbst regelnden Kälteleistungsabgabe voll zum Tragen, allerdings auch der Nachteil, dass nur die latente Kälte \dot{Q}_v genutzt wird.

Der in dieser Anlage vorgesehene Wärmeübertrager, welcher zur Überbrückung des Temperaturgradienten zwischen kaltem und warmem Teil genutzt wird, stellt eine Besonderheit dar. Er ist als Dualwärmeübertrager ausgeführt (s. Abb. 1, Dual-HEX), welcher die zusätzliche Nutzung des sensiblen Anteils der Kälte des Stickstoffs ermöglicht.

3.2.1 Dualwärmeübertrager

Bei dem Dualwärmeübertrager DBD200 von SWEP handelt es sich um einen echten Dualwärmeübertrager. Das bedeutet, die Kanalbelegung erfolgt wie in Abb. 8 und Abb. 7 skizziert.

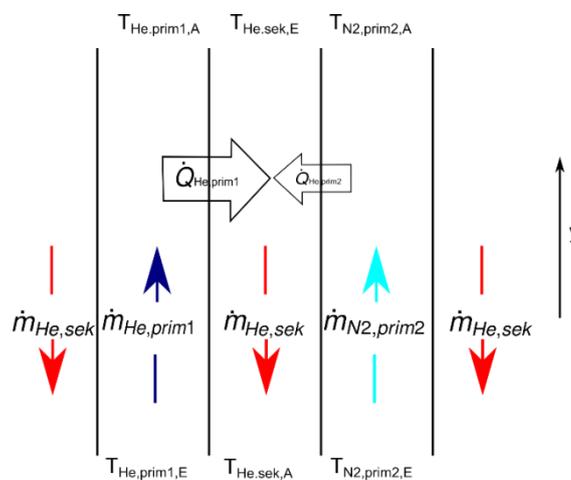


Abb. 8: Dualwärmeübertrager – prinzipieller Aufbau und Energiebilanz

Er hat zwei Primärseiten, die beide der Sekundärseite Wärme entziehen.

Die Sekundärseite wird mit dem vom warmen Teil kommenden Heliummassenstrom $\dot{m}_{He,sek}$ des Heliumkreislaufs durchflossen (s. Abb. 7).

Der erste Primärkreis ist mit dem vom kalten Verbraucher bzw. Heizer kommenden Heliummassenstrom $\dot{m}_{He,prim1}$ belegt und prägt eine Kälteleistung $\dot{Q}_{prim,1}$ auf den sekundärseitigen Massenstrom $\dot{m}_{He,sek}$ auf (s. Abb. 7 und Abb. 8). Es handelt sich somit energetisch um einen normalen Gegenstromwärmeübertrager, wie er bei Anordnungen mit warmen Kompressoren Standard ist.

Die zweite Primärseite wird mit dem gasförmigen Stickstoffmassenstrom $\dot{m}_{GN2,prim2}$ (s. Abb. 1 und Abb. 8) aus dem Verdampfer (LN2-B, Abb. 1) durchströmt. Dieser prägt eine zusätzliche Kälteleistung $\dot{Q}_{prim,2}$ auf den Sekundärkreis auf.

Dadurch verändert sich der Temperaturverlauf im Dualwärmeübertrager (s. Abb. 9).

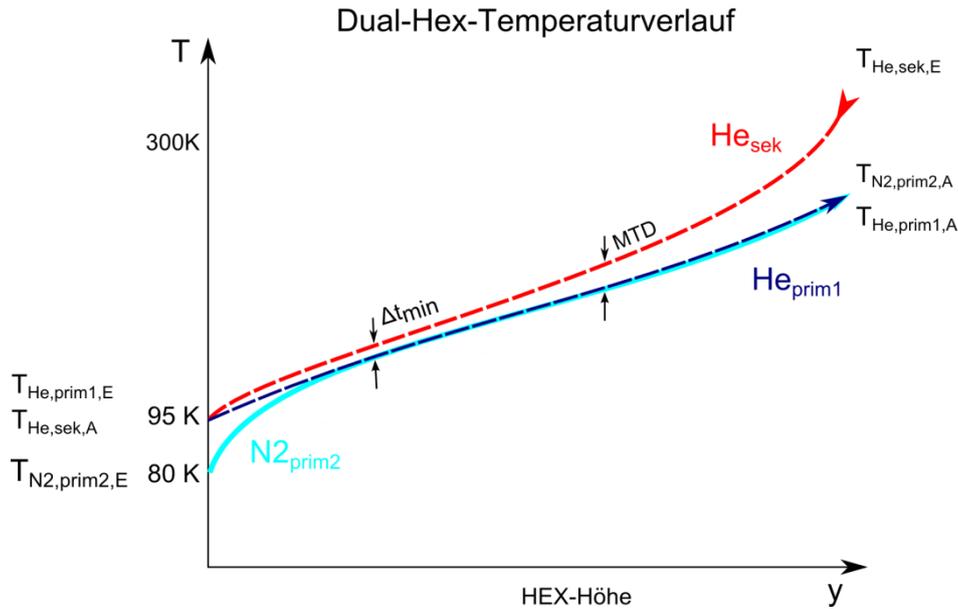


Abb. 9: qualitativer Temperaturverlauf eines Dualwärmeübertragers (Dual-Hex)

Dabei sind zwei wünschenswerte Effekte zu sehen. Im kalten, unteren Teil des Dualwärmeübertragers kühlt der gasförmige Stickstoffmassenstrom, der aus dem Verdampfer mit der Temperatur $T_{GN_2,VD,A} = 80 \text{ K}$ kommt den Heliumstrom $\dot{m}_{He,sek}$ weiter ab.

Der zur Reduktion des Flüssigstickstoffverbrauchs verwertbare Anteil der sensible Anteil der Kälte $\dot{Q}_{N_2,pot}$ (3.2) lässt sich unter der Bedingung (3.1) beschreiben.

$$\dot{Q}_{prim,1} \ll \dot{Q}_{prim,2} \text{ da } T_{He,sek,A} \approx T_{He,prim1,E} \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_{N_2,pot} = \dot{Q}_{prim,2} = \int_{80K}^{95K} \dot{m}_{N_2,prim2} \cdot c_{p,N_2} \cdot dT \quad (3.2)$$

Damit ergibt sich für $T_{He,sek,A}$:

$$T_{He,sek,A} = (T_{He,prim1,E} + \Delta T_{min}) - \frac{\dot{Q}_{N_2,pot}}{\dot{m}_{He,sek} \cdot c_{p,He}} \quad (3.3)$$

Im warmen, oberen Teil des Dualwärmeübertragers werden die beiden primären Gasströme weniger stark aufgewärmt. Dadurch steigt die Temperaturdifferenz und somit die flächenspezifische Übertragungsleistung im oberen Teil des Wärmeübertragers. Im unteren Teil sinkt dagegen die flächenspezifische Übertragungsleistung, was sich in einer kleinen Temperaturdifferenz ΔT_{min} zwischen den Kreisen ausdrückt. Damit kann die für die Dimensionierung der Wärmeübertragerfläche A wichtige mittlere Temperaturdifferenz (MTD) (s. Abb. 9) groß sein, ohne dass die für den Wärmeeintrag in den Verdampfer \dot{Q}_{HEX} wichtige minimale Temperaturdifferenz ΔT_{min} ebenfalls groß sein muss (s. Abb. 9). ΔT_{min} (s. Abb. 9) stellt auch die Grenze zwischen dem oberen, warmen Teil und dem unteren, kalten Teil des Dualwärmeübertragers dar.

Gleichzeitig wird der gasförmige Stickstoff bereits in der Coldbox aufgewärmt, sodass auf den Einbau eines zusätzlichen Heizers verzichtet werden kann.

3.2.2 Verdampfer

Der Verdampfer ist ein Edelstahlbehälter mit integriertem Spiralwärmeübertrager. Der Behälter an sich dient als Badkryostat und wird mit flüssigem Stickstoff (LN_2) gefüllt. Der Spiralwärmeübertrager hängt in flüssigem Stickstoff und kühlt das aus dem Dualwärmeübertrager kommende, bereits vorgekühlte Helium $T_{\text{He,sek,A}}$ auf konstante 80 K ab (s. Abb. 7, Abb. 10).

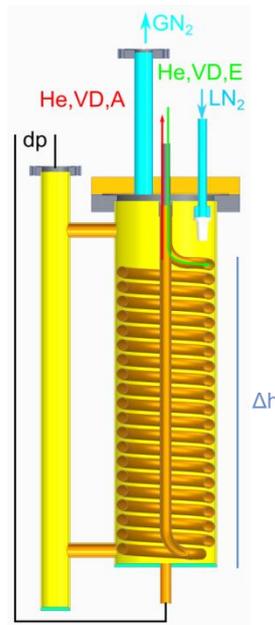


Abb. 10: Verdampfer –Schnittbild

Der Füllstand im Verdampfer wird hydrostatisch ermittelt. Die Druckdifferenz dp korrespondiert dabei direkt proportional zur Höhe dh der Flüssigstickstoffsäule, also dem Füllstand (3.4).

$$\int_{p_0}^{p_h} dp = \int_{h=0}^h \rho_{\text{LN}_2} \cdot g \, dh \quad (3.4)$$

Der verwendete Differenzdrucksensor, welcher sich außerhalb der Coldbox befindet, ist durch zwei $d_a = 6 \text{ mm}$ -Röhrchen mit dem Behälter verbunden. Für p_0 ist der Anschluss im Behälterboden und für p_h im Ausleger (s. Abb. 10) angebracht.

Das Kryoverventil (5CV9605, s. Abb. 1) dient zum Befüllen des Verdampfers mit flüssigem Stickstoff. Es ist als Regelventil ausgeführt, welches in Verbindung mit der kontinuierlichen Füllstandsmessung eine dynamische Füllstandsregelung erlaubt.

4 Test Gesamtanlage

4.1 Erster Test – stationärer Betrieb

Bei dem ersten Test (s. Abb. 11) wurde der Heizer (s. Abb. 1) auf eine Heizleistung von 250 W eingestellt, was der erwarteten und benötigten Kälteleistung von GunLab entspricht. Die Drehzahl des Turbokompressors wurde bei diesem Test auf 158 krpm (P9210 97,5%) eingestellt, wodurch bereits der in der Auslegung geforderte Drucksprung von 1 bar geliefert werden konnte.

Anschließend wurde das Bypass-Ventil 5CV9230 (s. Abb. 1) langsam geschlossen, bis sich die Auslegungstemperaturdifferenz von $\Delta T = 15 \text{ K}$ über dem Heizer (zwischen 5TI9190 und 5TI 9230, s. Abb. 1) und somit ein Massenstrom von $m_{He} \approx 3,2 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ einstellte.

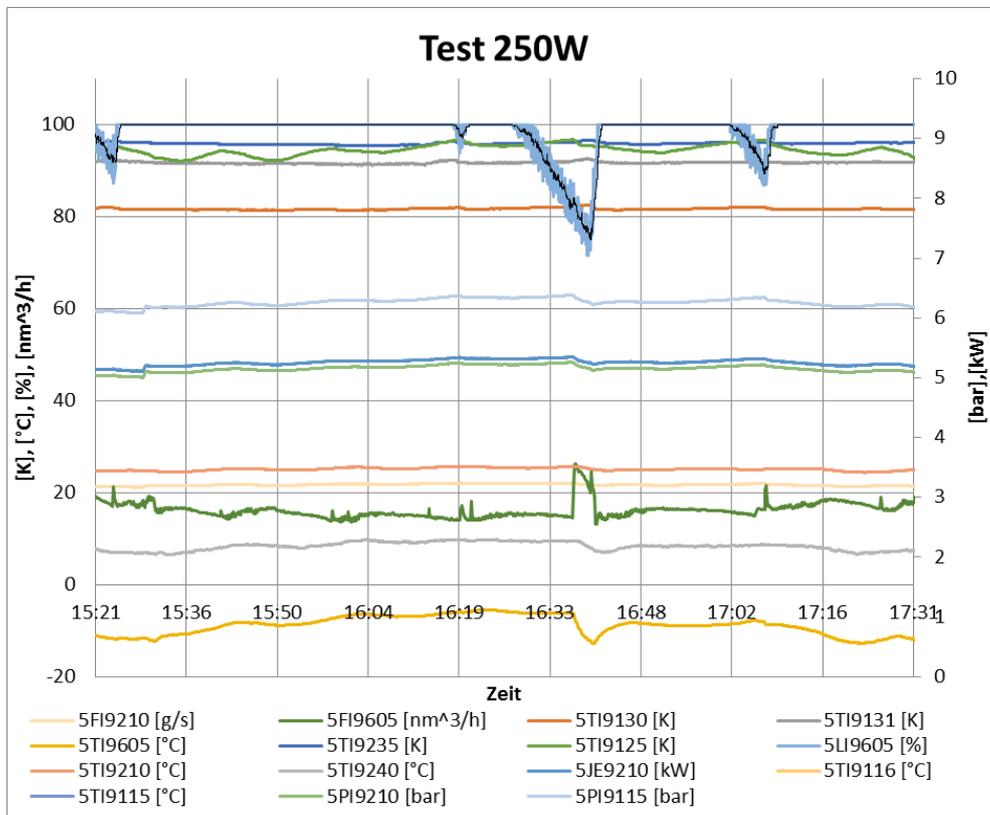


Abb. 11: Erster Test – stationärer Betrieb

Wie aus Abb. 11 ersichtlich, kann von einem stationären Betrieb ausgegangen werden.

Es gibt keine größeren Aufwärm- und Abkühlprozesse in der Anlage, ablesbar an den sehr konstanten Drücken 5PI9210 und 5PI9115.

Betrachtet man den Verlauf der Heliumaustrittstemperatur aus dem Dualwärmeübertrager 5TI9210, ist diese konstant unter der Heliumeintrittstemperatur 5TI9235. Damit ist der Wärmeeintrag \dot{Q}_{HEX} des Wärmeübertragers in den Verdampfer überkompensiert (s. Kapitel 3.2.1) und der Dualwärmeübertrager erfüllt das Ziel einer großen MTD bei minimalem Wärmeeintrag \dot{Q}_{HEX} bzw. einem negativen Wärmeeintrag \dot{Q}_{HEX} in den Verdampfer. Trotz des stationären Betriebs gibt es leichte Temperaturschwankungen am Sensor 5TI9125 (s. Abb. 11), welche als Regelgröße für den Füllstand dienen (s. Kapitel 3.2.1 und 3.2.2).

4.2 Zweiter Test - Regelung

In einem weiteren Test (s. Abb. 12) wurde das Konzept einer Leistungsregelung allein durch Drehzahlanpassung überprüft. Bei diesem Test ist das kalte Bypass-Ventil 5CV9230 fest auf 30 % eingestellt. Dieser Wert hat sich beim vorherigen Test für den Regelungsbereich als günstig herausgestellt und simuliert den späteren Anlagenwiderstand von GunLab. Als Last wurde in diesem Test die maximale Auslegelast von 500 W gewählt. Der warme Bypass 5CV9210 wurde für diesen Test auf feste 70 % eingestellt. Diese Kennlinie hatte bereits bei der Inbetriebnahme (s. Kapitel 3.1.2, Abb. 5) einen nahezu parallelen Verlauf mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand zur Pumpengrenze. Das bedeutet, dass die Regelung ausschließlich über die Drehzahländerung erfolgt. Begonnen wurde der Test mit einer Drehzahl von 158 krpm (5P9215: 97,5%), die dann schrittweise auf 100 krpm (5P9215:

61,7 %) reduziert wurde. Abgeschlossen wurde der Test mit voller Drehzahl 162 krpm (5P9215: 100 %), bei der schließlich die Heizleistung auf 250 W reduziert wurde.

In Abb. 12 ist gut zu erkennen, dass die 81,5 K am Austritt 5T19125 auch bei dieser hohen Last über den ganzen Testzeitraum konstant gehalten werden konnte und somit eine Kälteversorgung der Komponenten zu jeder Zeit gesichert war.

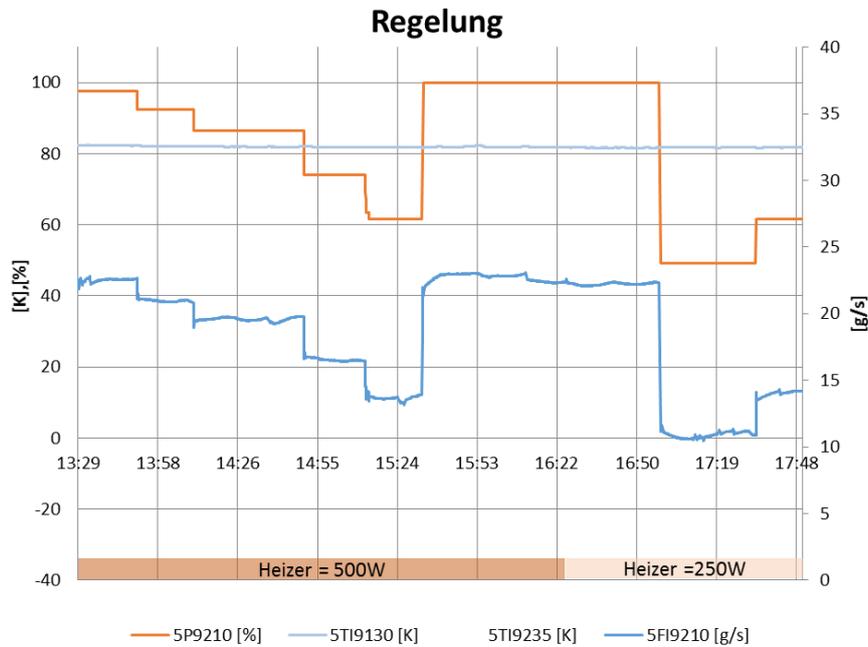


Abb. 12: Zweiter Test – Regelung

Werden die Heliummassenströme in der Gesamtanlage und der Coldbox über das drehzahlabhängige Druckverhältnis π des Turbokompressors aufgetragen (s. Abb. 13), lässt sich ein Regelungsbereich erkennen.

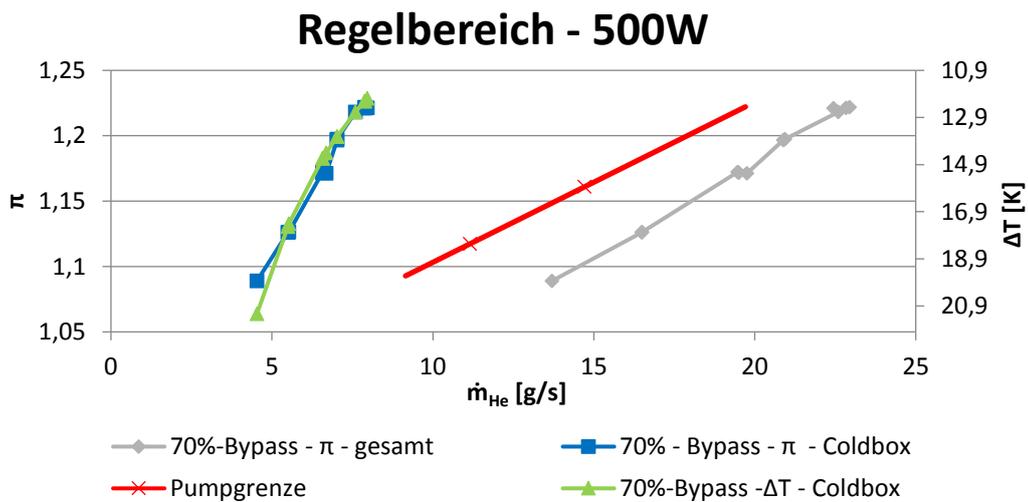


Abb. 13: Regelungsbereich der Coldbox durch Drehzahlanpassung

Für den Gesamtmassenstrom zeigt sich, dass sich die Regelung allein über die Drehzahl bei einem fest auf 70 % eingestellten warmen Bypass-Ventil (5CV9215) durch eine gute Parallelität zur Pumpgrenze auszeichnet. Allerdings könnte die Kennlinie mit einer geringeren Ventilöffnung (5CV9215) noch näher an die Pumpgrenze gezogen werden, um den Bypass-Massenstrom zu verringern und somit die Effektivität der Anlage zu erhöhen.

Bei einer gleichbleibenden thermischen Last von 500 W ergibt sich aus dem Heliummassenstrom in der Coldbox eine umgekehrt proportionale Temperaturspreizung (s. Abb. 13) über den Heizer. Im Betrieb wird sich allerdings eher der umgekehrte Fall einstellen, da es bei den thermischen Lasten von GunLab dynamische Anteile gibt. Wenn in GunLab kein Test durchgeführt wird, fallen diese Anteile weg und die thermische Last verringert sich. Dadurch wird die Temperaturspreizung reduziert (s. Abb. 12, Zeit: 16:22 Uhr). Durch Reduktion der Drehzahl des Turbokompressors und damit des Heliummassenstromes durch die Coldbox wird wieder die Temperaturspreizung aus der Auslegung erreicht (s. Abb. 12, 16:59 Uhr).

Die eigentliche Regelung kann dann wie vorgeschlagen über die Temperaturdifferenz zwischen 5TI9130 und 5TI9235 erfolgen.

5 Zusammenfassung

Die in diesem Paper beschriebene Anlage dient als 80 K-Versorgung des Teststands für die supraleitende Elektronenquelle am HZB (GunLab) und als Prototyp für die nächste größere Anlage für bERLinPro.

Da eine Direktverdampfung von Flüssigstickstoff im Modul aus Sicherheitsgründen nicht erwünscht ist, arbeitet die Anlage mit einem Heliumzwischenkreis.

Für die Umwälzung des Heliums kommt eine neue Art eines warmen Kompressors zum Einsatz. Der Radialturbo-Kompressor ist ölfrei, wodurch auf eine für kryogene Prozesse notwendige, aufwendige Ölabscheidung verzichtet werden kann. Darüber hinaus ist er dynamisch gasgelagert, was lange Standzeiten und Partikelfreiheit verspricht. Wegen der halbhermetischen Bauart kommt er ohne eine dynamische Wellendichtung aus. Somit sind keine Heliumverluste nachweisbar ($q_{Leck} < 1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{s}}$). Um diese in dieser Leistungsklasse einzigartigen Eigenschaften zu nutzen, wurde der Turbokompressor von der Fischer Engineering AG für Heliumanwendungen angepasst.

Der Kompressor konnte die Anforderung, einen Drucksprung von 1 bar zu generieren, erfüllen. Durch den gewählten, erhöhten (Nieder-)Druck von $p_{ND} = 5 \text{ bar}$ konnten das Verdichtungsverhältnis ($\pi = 1,2$) und die Volumenströme verkleinert werden, was die Umwälzung effektiver macht und für die volumenstromabhängigen Komponenten (Ventile, Rohrleitungen,...) kleinere Dimensionierungen zulässt.

Die Heliummassenstromregelung ist über die Regelung der Drehzahl und des warmen Bypass-Ventils auf einer Kennlinie innerhalb des Kennfelds des Turbokompressors möglich. Mit den, hier beschriebenen Tests konnte gezeigt werden, dass eine rein drehzahlvariierende Regelung bereits gute Ergebnisse liefert.

Auch beim späteren Betrieb von GunLab hat sich gezeigt, dass eine Drehzahlregelung bei fest eingestellten, warmen Bypassventil zur Regelung der dynamischen Lasten ausreicht.

Die Kältebereitstellung erfolgt bei der Anlage zweistufig. Um nicht nur die latente Kälte des flüssigen Stickstoffs, sondern auch den sensiblen Anteil zu nutzen, wird ein neues Konzept, bestehend aus einem Dualwärmeübertrager und einem Badkryostaten (Verdampfer) verwendet.

Durch den Einsatz des Dualwärmeübertragers ergeben sich folgende Vorteile:

- Reduzierter Stickstoffverbrauch durch Nutzung des sensiblen Kälteanteils
- Höhere mittlere Temperaturdifferenz (MTD) und damit kleinere, benötigte Übertragerfläche A bei gleichzeitig kleiner minimaler Temperaturdifferenz ΔT_{\min} auf der kalten Seite durch Aufprägen eines zusätzlichen Stickstoffkältestroms $\dot{Q}_{prim,2}$
- Kein Heizer für die Erwärmung den gasförmigen Stickstoff nötig

Prinzipiell kann durch dieses Konzept ca. 10 % der Nutzkälte \dot{Q}_{NLast} durch den sensiblen Kälteanteil eingespart werden. Steigt der Stickstoffmassenstrom durch thermische Verluste, insbesondere in der Zuleitung, steht mehr

nutzbare sensible Kälte zur Verfügung und die potentielle Stickstoffeinsparung $\dot{Q}_{N_2,pot}$ steigt. Damit ist es möglich, den Wärmeeintrag des Dualwärmeübertragers \dot{Q}_{HEX} in den Verdampfer zu überkompensieren. So konnten im Test an der kalten Seite des Dualwärmeübertragers deutlich tiefere Temperaturen am Heliumaustritt im Vergleich zum Heliumeintritt gemessen werden. Allerdings zeigt sich auch, dass der Dualwärmeübertrager besonders bei höheren Heliummassenströmen zu klein dimensioniert ist. Dadurch steigt ΔT_{min} und die Stickstoffeinsparung im Verdampfer wird geringer.

Beim Verdampfer zeigten die Tests, dass sich eine kontinuierliche Befüllung mit flüssigem Stickstoff aufgrund der nicht kontinuierlichen Zweiphasenströmung in der Stickstoffversorgung als schwierig erweist. Durch eine gezielte Erhöhung des Füllstands mit einem Flüssigkeitsspiegel über dem Stickstoffeintrittsdiffusor kann allerdings ein Durchströmen der Gasphase verhindert und so der Füllvorgang stabilisiert werden. Trotz einer zu kleinen Dimensionierung des Dualwärmeübertragers kann durch die isotherme Verdampfung von Stickstoff im Verdampfer die konstante Versorgung mit Helium bei 80 K in jedem getesteten Betriebszustand garantiert werden.

Im Zuge der Inbetriebnahme von GunLab wurde ein Gasabscheider in die Stickstoffversorgungsleitung installiert, so dass eine stabilere Versorgung mit LN2 möglich ist. Diese Maßnahme erlaubt einen sehr stabileren Betrieb der Anlage. Ferner haben sich der benötigte Drucksprung und die benötigte Kälteleistung deutlich kleiner herausgestellt, so dass die knappe Dimensionierung des Dualwärmeübertrager weniger ins Gewicht fällt. Die inzwischen weitgehend automatisierte Regelung runden die positiven Betriebserfahrungen mit der 80 K-Versorgung ab. Daher wird für die Nachfolganlage bei bERLinPro ein grundsätzlich identischer Aufbau verwendet.

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
\dot{Q}	kW	Wärmestrom
Q	kWh	Wärme
ϑ	°C	Temperatur
T	K	Temperatur
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
p	bar	Druck
c_p	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
q_{des}	$\frac{mbar \cdot l}{s \cdot cm^2}$	Flächenbezogene Desorptionsrate
π	-	Verdichtungsverhältnis
A	m^2	Fläche
MTD	K	Mittlere Temperaturdifferenz
x	-	Gasanteil in 2-phasen-Strömung

Indexverzeichnis

Index	Bezeichnung
A	Austritt
DH	Druckhaltung
E	Eintritt
el	elektrisch
ges	gesamt
VD	Verdampfer (Badkyrostat)
He	Helium
HEX	Wärmeübertrager
k	kalter Teil
KW	Kühlwasser
L	Leitung
Last	Thermische Nutzlast
m	mittlere
max	Maximum
min	Minimum
N2	Stickstoff
ND	Niederdruck
pr	primär
sek	sekundär
TK	Turbokompressor
w	warmer Teil
LN2	flüssiger Stickstoff
v	Phasenwechsel-/Gleichgewichts-
a	außen
i	Innen
1,2,...	Index - Zustandspunkte

Literaturverzeichnis

- [1] FISCHER ENGINEERING. *FENG-Einlegeblatt-Mikroluftverdichter-EMTC-150k-Air_low* [online] [Zugriff am: 9. Dezember 2014]. Verfügbar unter: http://www.fischerspindle.com/media/91610/FENG-Einlegeblatt-Mikroluftverdichter-EMTC-150k-Air_low.pdf
- [2] Glöckner, F., Konzeption und Auslegung, Aufbau, Inbetriebnahme und Test eines 80 K- Heliumkreislaufes zur Kühlung von Komponenten eines supraleitenden Elektronenbeschleunigers, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2016
- [3] DUBBEL, H. Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau; mit ... Tabellen. 22., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [4] FREY, H., R.A. HAEFER und F.X. EDER. Tieftemperaturtechnologie. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981. ISBN 3184005038.