

Ein neuer ^4He -Verdampfer-Kryostat zum Testen und Vermessen supraleitender Magnete für das polarisierte Target.

Einführung

Für zukünftige Polarisationsmessung am Crystal Barrel Detektor an der Bonner Beschleunigeranlage ELSA soll das existierende polarisierte ‚Bonner Frozen Spin Target‘ zu einem ‚ 4π -continuous-mode polarized target‘ erweitert werden. Dabei wird im Dilution-Kryostaten des vorhandenen polarisierten Targets die sogenannte supraleitende ‚interne Haltespule‘ durch einen supraleitenden Magneten gleicher Bauform aber deutlich höherem Magnetfeld ($B=2.5\text{T}$) und besserer Homogenität ($\Delta B/B < 10^{-4}$) ersetzt (interner Polarisationsmagnet)^{1 2}. Der ‚interne Polarisationsmagnet‘ wiederum ersetzt den bisher verwendeten externen supraleitenden Polarisationsmagneten und durch den Wegfall des äußeren Magneten wird die ‚Figure of Merit‘ des polarisierten Targets deutlich verbessert. Im Gegensatz zum ‚frozen spin mode‘ wird in diesem Schema während der Datennahme die Polarisation der Targetnukelonen kontinuierlich dynamisch (DNP³) auf hohem Niveau gehalten. Dies ergibt eine deutlich höhere mittlere Polarisation während des Streuexperiments und damit bei gleichbleibender Messzeit eine Steigerung der Qualität der Messdaten. Allerdings stößt man bei diesem Prinzip an die Grenzen des technisch machbaren bei der Herstellung des internen Polarisationsmagneten: die Spule (Solenoid) soll einerseits ein hohes Magnetfeld generieren und andererseits so dünn wie irgend möglich werden (Gesamtdicke aus Spulenträger und Windungen $\leq 2\text{mm}$). Das bedingt die Verwendung dünnster supraleitender Drähte für den Magneten. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus der Homogenitätsanforderung: Da das homogene Feldvolumen von der gleichen Größenordnung wie das gesamte Feldvolumen des Magneten ist, werden an den Wickelprozess (Herstellungsprozess) der Spule höchste Ansprüche bezüglich der Positioniergenauigkeit der dünnen Drähte auf dem Spulenkörper gestellt⁴. Erste Prototypen konnten auf speziell für die Herstellung der Spulen im Physikalischen Institut entwickelten Spulenwickelmaschinen angefertigt werden. In aufwändigen Testverfahren wurden die Spulen bei 4.2K im Helium-Dewar vermessen. Es fehlte bisher jedoch eine einfache Möglichkeit die Eigenschaften der Spulen bei ihren Designparametern (1K , 2.5T) zu untersuchen oder noch besser, ein einfaches polarisierbares Target-Sample in situ dynamisch zu polarisieren.

Dieser kurze Bericht beschreibt das Design eines einfachen ^4He -Verdampferkryostaten in dem über ein Einschubsystem die supraleitenden Spulen bei 1K betrieben werden können. Das System ermöglicht einen schnellen Wechsel der Spule auch bei kaltem Kryostaten und bietet alle Messmöglichkeiten zum Vermessen des Magnetfeldes mittels NMR oder Hallsonde. Darüber hinaus kann ein geeignetes Targetmaterial im Zentrum der Testspule bei 1.78T , 2T und 2.5T dynamisch polarisiert werden. Es handelt sich somit um eine realistische mit einem polarisierten Target vergleichbare Testfacility zum Vermessen der internen supraleitenden Magnete.

Design

Das generelle Design des neuen ^4He -Verdampfer-Kryostaten (Spulen-Test-Kryostat) folgt im Wesentlichen unserem vorhandenen 1K -Polarisationskryostaten (Laborkryostat)⁵ des polarisierten Targets zur Vermessung von Targetmaterialien im polarisierten Target Labor (PT-Labor). Er hat eine Gesamtlänge von etwa 1000mm und ist so konzipiert, dass das vorhandene Pumpsystem des Setups ohne Umbau genutzt werden kann. Alle Vakuumschlüsse, die Abmessungen des Pumptopfs und der Vakuummhülle sind identisch mit denen des Laborkryostaten. Damit kann das neue System auch im externen supraleitenden Hochfeldmagneten des Laboraufbaus des polarisierten Targets genutzt werden. Es eröffnet

sich also die Möglichkeit, den Einfluss eines starken äußeren Magnetfeldes auf die internen supraleitenden Spulen und deren Eigenschaften zu vermessen. Darüber hinaus stehen alle weiteren Komponenten zum dynamischen Polarisieren bei 1K zur Verfügung. In Abbildung 1 ist der bestehende Aufbau des Polarisierten Targets im PT-Labor wiedergegeben.

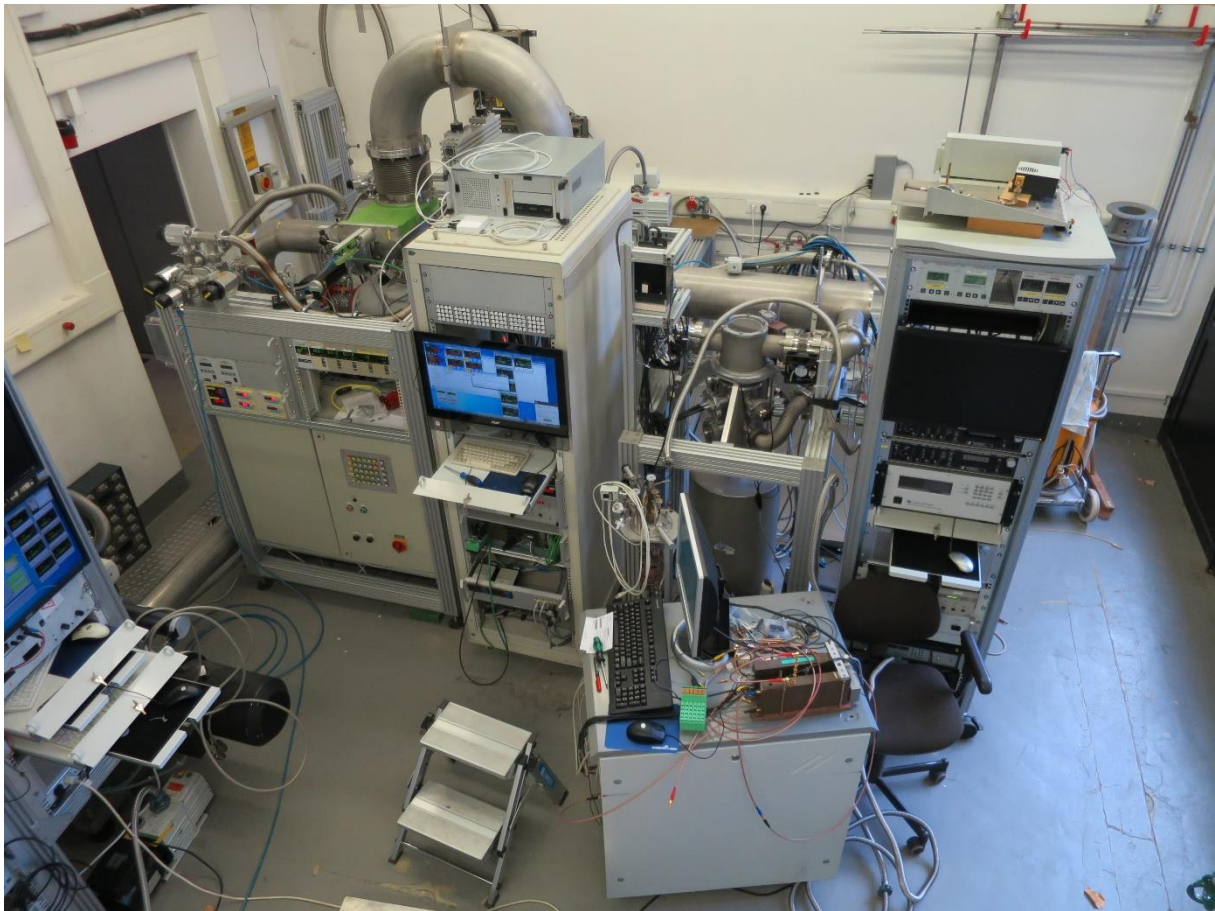


Abbildung 1 PT-Labor

Auch der innere Aufbau des Spulen-Test-Kryostaten ist an den Laborkryostaten angelehnt (siehe Abbildung 2). Jedoch sind im Gegensatz zum Laborkryostaten die Kühlstufen und die umgebende Vakuumschleim nicht separat und teilbar aufgebaut, sondern wurden als zusammenhängende Einheit konzipiert. Die Kühlstufen und der 1K-Probenraum sind von einer doppelwandigen Vakuumschleim umgeben. In der Vakuumschleim selbst befindet sich ein Kupferrohr (Wärmeschild) zur Reduzierung der thermischen Belastung der Tieftemperaturkomponenten des Kryostaten durch Wärmestrahlung. Das Wärmeschild ist am oberen Ende der Vakuumschleim über einen guten thermischen Kontakt mit der Innenseite der Hülle verbunden. Die Abstufung im Durchmesser der äußeren Hülle ergibt sich aus der Randbedingung, dass der Probenraum des Kryostaten und damit auch die äußere Hülle in der warmen Bohrung des externen supraleitenden Polarisationsmagneten eingebaut werden kann. Wir verwenden zwei Kühlstufen, um das aus einem Helium-Dewar über eine Transferline zugeführte flüssige Helium von 4.2K auf 1K abzukühlen. Die erste Stufe (Separator) ist als hohlzylinderförmiger Vorratsbehälter für das einlaufende Helium ausgeführt. Zur Optimierung des Kühlmittelverbrauchs kann der Heliumzufluss über ein Tieftemperatur-Nadelventil reguliert werden. Der Dampfdruck im Separator wird über eine Drehschieberpumpe leicht erniedrigt und damit die Temperatur im Behälter auf ca. 3.5K abgesenkt. Das abgepumpte gasförmige kalte Helium kühlt über Wärmetauscher 1 (Heat Exchanger 1) und den thermischen Kontakt das Wärmeschild in der Vakuumschleim. Die zweite Kühlstufe (Wärmetauscher/Heat Exchanger 2) ist zwischen Separator und dem Probenraum (Experimental Area) platziert.

Sie arbeitet als Gegenstromwärmetauscher in dem das flüssige Helium aus dem Separator dem Probenraum zugeführt wird. Der Zufluss kann auch hier je nach erforderlicher Kühlleistung des Kryostaten

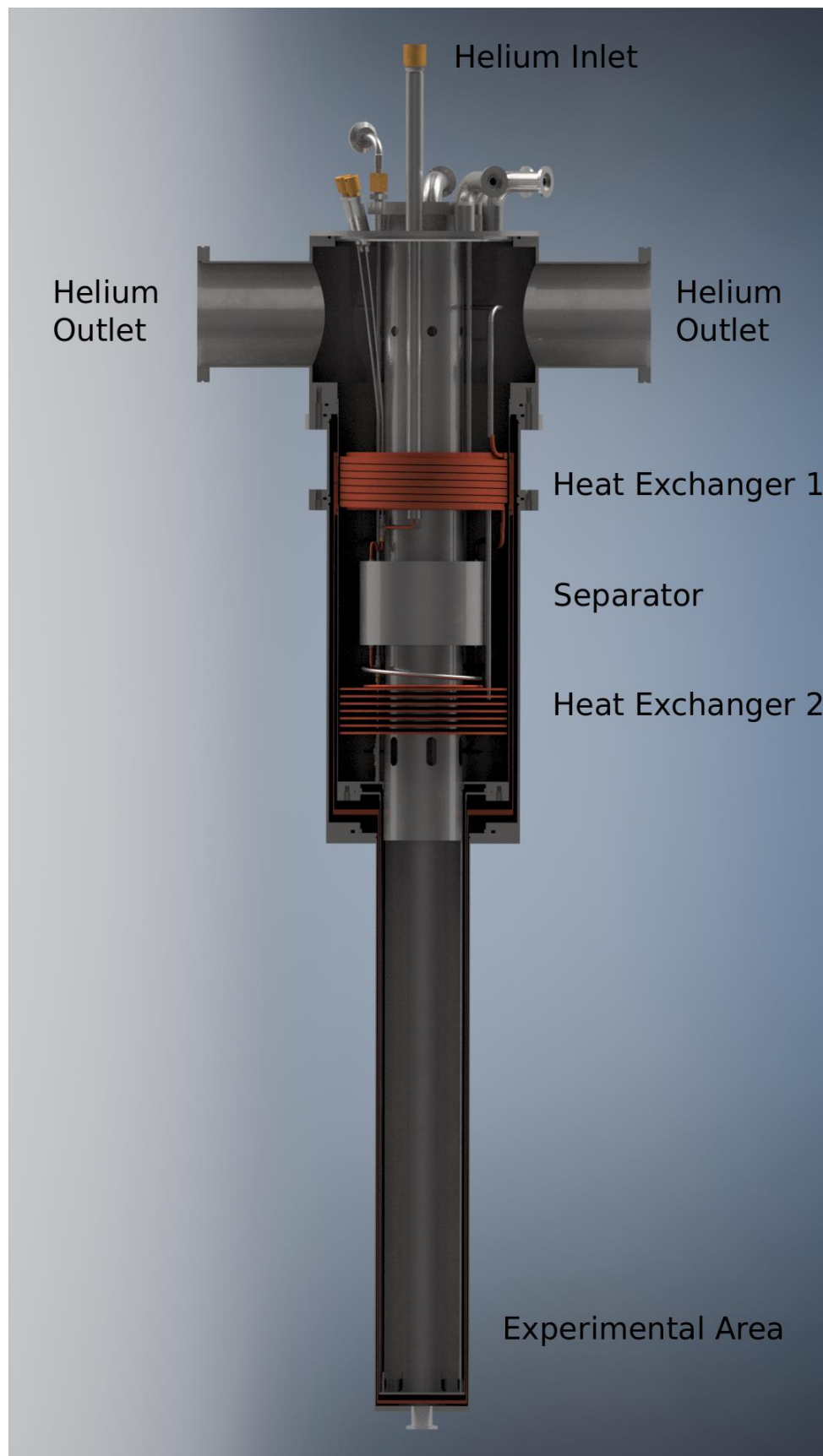


Abbildung 2. Schnittansicht des 4He -Spulen-Test-Kryostaten ohne Einschub

über ein Tieftemperatur-Nadelventil (1K-Ventil) eingestellt werden. Mit einem Wälzkolbenpumpstand wird der Dampfdruck über dem flüssig Heliumbad erniedrigt. Das zurückströmende Heliumgas kühlt im Gegenstrom im Wärmetauscher 2 das einfließende Helium aus dem Separator und wird über die beiden Vakuumflansche (Helium Outlet 1 und 2) und dem Wälzkolbenpumpstand der Heliumrückgewinnung zugeführt. Bei diesem Kühlverfahren kann die Temperatur im Heliumbad und damit im Probenraum auf 1K abgesenkt werden. Wärmetauscher 2 ist als Scheibenwärmetauscher ausgeführt und besteht aus 7 Kupferblechscheiben. Alle Wärmetauscher und kryotechnischen Komponenten des Kryostaten wurden nach unserem thermodynamischen Simulationsverfahren⁶ berechnet und ausgelegt. Zum schnelleren Vor- und Abkühlen des Kryostaten und Füllen des Probenraumes ist ein sogenanntes Bypass-Ventil als Tieftemperatur-Nadelventil eingebaut. Das geöffnete Ventil überbrückt Wärmetauscher 2, so dass flüssiges Helium aus dem Separator direkt in den Proberaum eingelassen werden kann. Im 1K-mode des Kryostaten wird das Bypass-Ventil geschlossen und das 1K-Ventil entsprechend der benötigten Kühlleistung oder Endtemperatur geöffnet. Alle Ventile sind vom Deckelflansch aus zu bedienen und bieten die Möglichkeit der Fernsteuerung über angebaute Schrittmotoren. Neben den Ventilen befinden sich auf dem Deckelflansch auch die Anschlüsse für die Druckmessungen (Separator und Probenraum), die Vakuumdurchführungen für die Messleitungen der Temperaturmesswiderstände und der Pumpanschluss für die Separator-Pumpe.

Anders als der Laborkryostat ist der Spulen-Test-Kryostat mit einem zentralen Einschubsystem ausgestattet, d.h., der Nutzer hat einen direkten Zugang von außen über den Deckelflansch zum Probenraum des Kryostaten. Das Führungsrohr reicht über die gesamte Länge des Kryostaten vom Deckelflansch bis zum unteren Ende des Probenraums und hat einen Innendurchmesser von ID=74.9 mm. Das bietet ausreichend Raum, um auch Messeinschübe mit großem Durchmesser einzusetzen. Der Probenraum, d.h. das 1K flüssig Helium Volumen, umfasst den gesamten unteren Bereich des Kryostaten bis zur Abstufung unterhalb von Wärmetauscher 2 und hat ein Volumen von ca. 2.2l.

Spulen-Testeinschub

In Abbildung 3 ist der Spulen-Test-Kryostat mit eingesetztem Spulen-Testeinschub als Schnittbild dargestellt. Der Spulen-Testeinschub wurde im Rahmen einer Masterarbeit⁷ zum Vermessen des Magnetfeldes der internen supraleitenden Magnete aufgebaut (Abbildung 4). Er ist so konstruiert, dass er sowohl in einem unserer 450l flüssig Helium-Dewars (also bei 4.2K) als auch im Spulen-Test-Kryostat eingesetzt werden kann. Der Einschub hat eine Gesamtlänge von etwa 1500 mm und taucht vom Anschlussflansch in etwa 1100 mm in den Spulen-Test-Kryostaten hinein. Am oberen Ende (Kopf) befindet sich der Doppel-Kreuzflansch mit den Vakuumdurchführungen für die Stromzuleitungen der Spule, die Messleitungen der Temperaturmesswiderstände, die Koaxial-Leiter der NMR (Abbildung 7) und den Mikrowellenleiter für den dynamischen Polarisationsprozess (DNP)(Abbildung 6). Im Unteren Bereich ist die Spule über einen Anschlussadapter aus Aluminium an das Verbindungsrohr zum Deckelflansch montiert. Direkt oberhalb des Anschlussadapters sind auch die Übergänge von den normalleitenden Stromzuführungen auf den supraleitenden Draht der Spule auf das GFK-Verbindungsrohr montiert (Abbildung 5). Damit wird sichergestellt, dass der supraleitende Draht immer von flüssigem Helium gekühlt wird. Die normalleitenden Zuleitungen werden auf ihrem Weg vom Einschubkopf zum flüssig Heliumbad von zurückströmendem gasförmigem Helium gekühlt. Der Mikrowellenleiter und die Koaxial-Leiter für die NMR werden durch das Verbindungsrohr vom Doppel-Kreuzflansch zur Mikrowellen-cavity geführt. Es handelt sich hierbei um eine Multimodencavity (Abbildung 8), die sich auf der Achse des Verbindungsrohrs und der internen Spule befindet, in der ein polarisierbares Targetmaterial befestigt und im Magnetfeld der angeschlossenen supraleitenden Spule dynamische polarisiert werden kann. Das Targetmaterial kann aber auch durch eine tieftemperaturtaugliche Hall-Sonde oder eine NMR-Spule zur Magnetfeldvermessung ersetzt werden. Beide Messsonden können über einen mechanischen Verstellmechanismus auf der Achse vertikal (axial: $\pm 10\text{mm}$) und radial nach außen ($r=+10\text{mm}$)

aus der Sollposition individuell positioniert werden. Damit kann eine Feldmappe der angeschlossenen Spule erstellt werden. Im Verlaufe der Masterarbeit konnte gezeigt werden, dass sich mit einer kleinen NMR-Probe (Spulenvolumen $\sim 3.2 \text{ mm}^3$, Abbildung 9) unter Verwendung einer gepulsten NMR-Apparatur das Magnetfeld der supraleitenden Spule bei verschiedenen Feldstärken vermessen lässt. Das NMR-System⁸ wurde von unserem Kooperationspartner von der Ruhr-Universität Bochum für das Projekt zur Verfügung gestellt und technisch betreut⁹. Die ersten Feldvermessungen der Spulen mit dem Spulen-Testeinschub wurden allesamt bei 4.2K in flüssigem Helium, in einem unserer Helium-Dewars durchgeführt. Unter diesen Temperaturbedingungen erreichen die internen supraleitenden Polarisationsmagnete mit dem verwendeten supraleitenden Draht allerdings nur ein maximales Magnetfeld von etwa 2.2 Tesla. Da die Magnete auf minimale Dicke und damit geringstmögliche Windungszahl optimiert wurden, erreichen sie ihr Sollfeld erst bei einer Spulen-/Drahttemperatur von unter 1.5K. Zwar konnten wir im Laborkryostaten zeigen, dass die Spule mit diesen Parametern ihr Sollfeld erreicht, allerdings lässt sich die Spule in diesem Kryosystem nur kurz im „single shot“ modus des Kryostaten auf Temperaturen unter 1.5K abkühlen. Unter diesen Bedingungen ist eine systematische Feldvermessung der Magnete nicht möglich.

Der neue ^4He -Verdampferkryostat ist mit seiner Kühlleistung so ausgelegt, dass die internen supraleitenden Spulen mithilfe des Spulen-Testeinschubs kontinuierlich bei 1K betrieben werden können. Damit steht einer systematischen Vermessung der Magnetfelder in den bereits vorhandenen kleinen supraleitenden Magneten und den geplanten internen supraleitenden Polarisationsspulen nichts mehr im Wege. Auch im Hinblick auf weitere zylindersymmetrische Magnetfeld- und Spulenkonfigurationen bietet das System die Möglichkeit der experimentellen Feldbestimmung. Da der Spulen-Test-Kryostat selbst in die warme Bohrung des externen supraleitenden Polarisationsmagneten eintaucht, kann die Wechselwirkung des externen starken Magnetfeldes mit dem der internen Spulen untersucht und getestet werden. Ersetzt man die interne supraleitende Spule durch einen Hohlzylinder aus Hochtemperatursupraleiter, können im externen Magnetfeld die Abschirmeigenschaften des Hochtemperatursupraleiters bei tiefen Temperaturen ($T < 4.2\text{K}$) und hohen Magnetfeldern im Zentrum des Hohlzylinders erstmals systematisch bestimmt werden.

Aktueller Stand

In der Zwischenzeit (Stand September 2020) liegen alle technischen Zeichnungen für den Aufbau des Spulen-Test-Kryostaten und die Einzelteilzeichnungen der inneren Kühlstufen vor. Die Einzelteile für die äußere Vakuumschale befinden sich in der Fertigungsphase in der institutseigenen Feinmechanischen Werkstatt. Die speziell für dieses System anzufertigenden dünnwandigen Edelstahlrohre und hier im Besonderen das innere Führungsrohr für den Einschub wurden im Sommer geliefert und können weiterverarbeitet werden. Vorarbeiten an den Einzelteilen der Kühlstufen sind abgeschlossen. Da einige Fertigungsschritte (Hochtemperatur-Vakuumlöten, Laserschweißen) bei externen Dienstleistern erfolgen, müssen die betroffenen Komponenten vorher vollständig gefertigt werden. Auch hier sind wir auf einem guten Weg. Wir sind zuversichtlich, dass das System in Teilen im ersten Quartal des kommenden Jahres erstmals getestet werden kann. Dann lässt sich auch verlässlich abschätzen, wann die ersten Messungen der internen supraleitenden Spule mit dem Spulen-Testeinschub im neuen Kryostaten durchgeführt werden können.

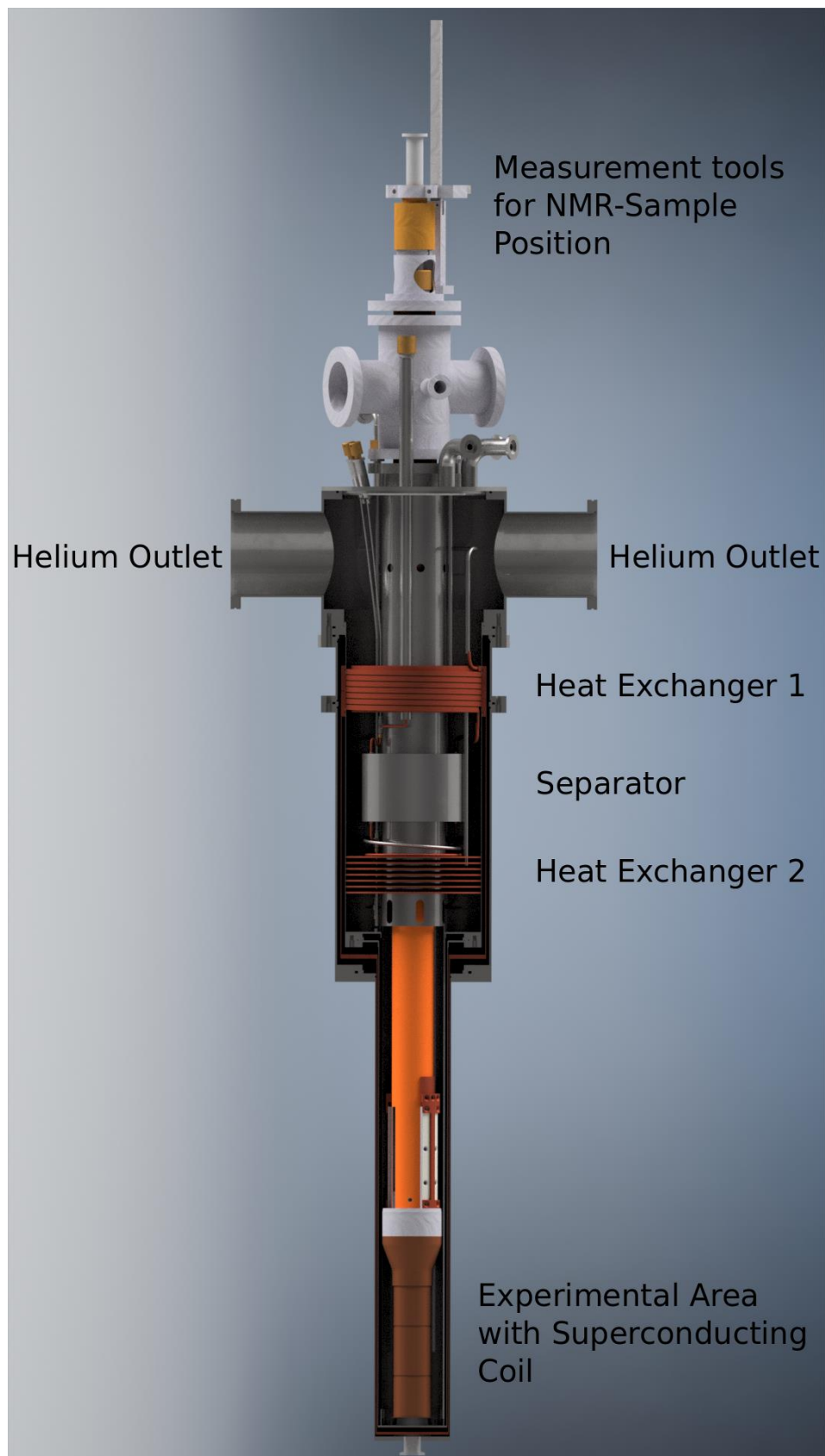


Abbildung 3. Schnittbild des 4He -Spulen-Test-Kryostaten mit Einschub



Abbildung 7. Kopf des Spulen-Testeinschubes, Vakuumdurchführungen für Messleitungen, Stromzuführungen und NMR-Koaxialleiter (v.l.n.r)

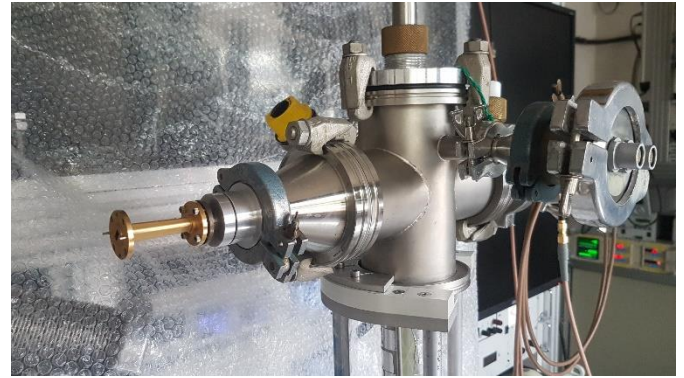


Abbildung 6. Kopf des Spulen-Testeinschubes, Vakuumdurchführung für Mikrowellenleiter (links)

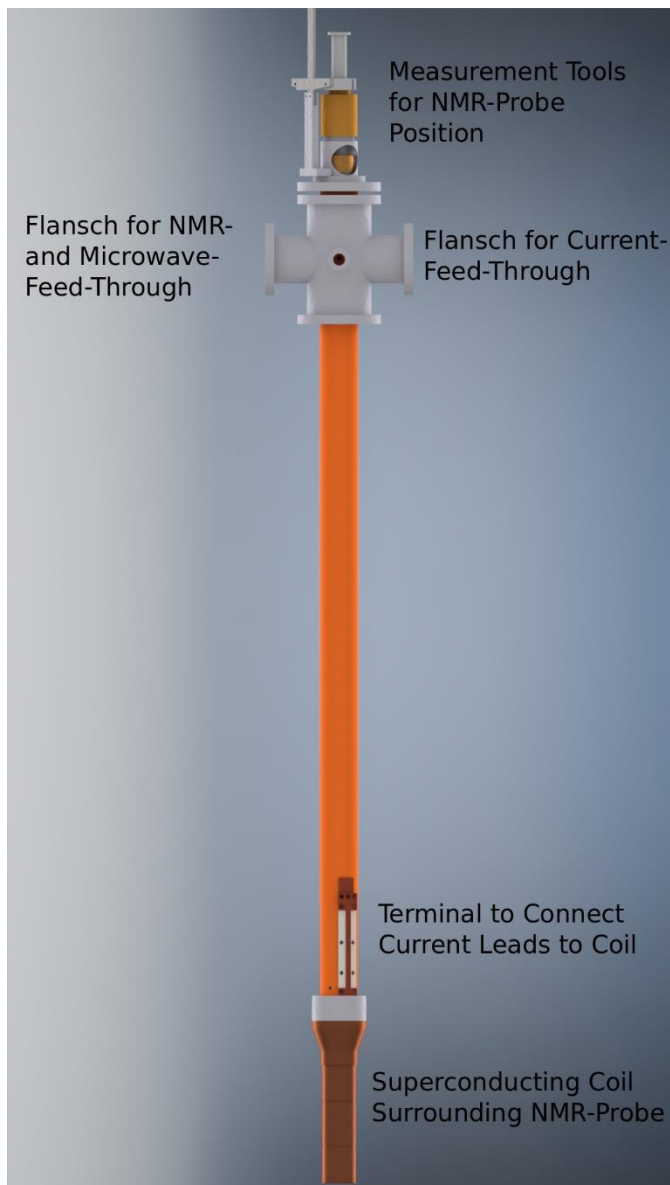


Abbildung 4. Spulen-Testeinschub, Gesamtansicht



Abbildung 5. Übergang Normalleiter auf Supraleiter

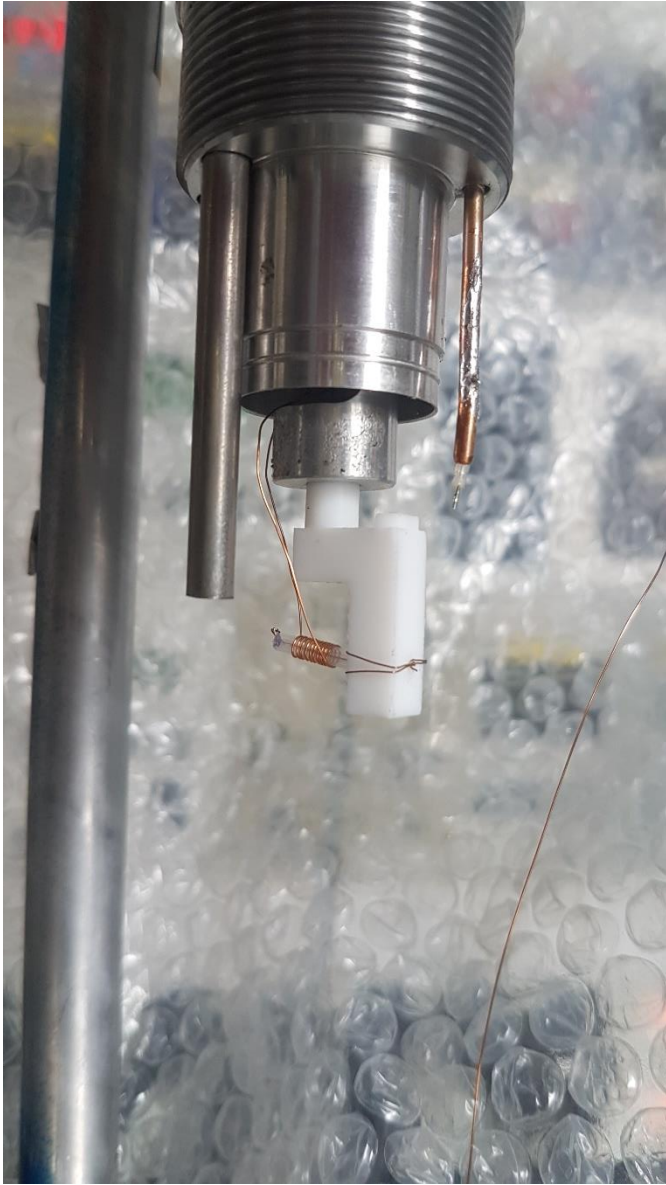


Abbildung 9. NMR-Spule zur Feldvermessung

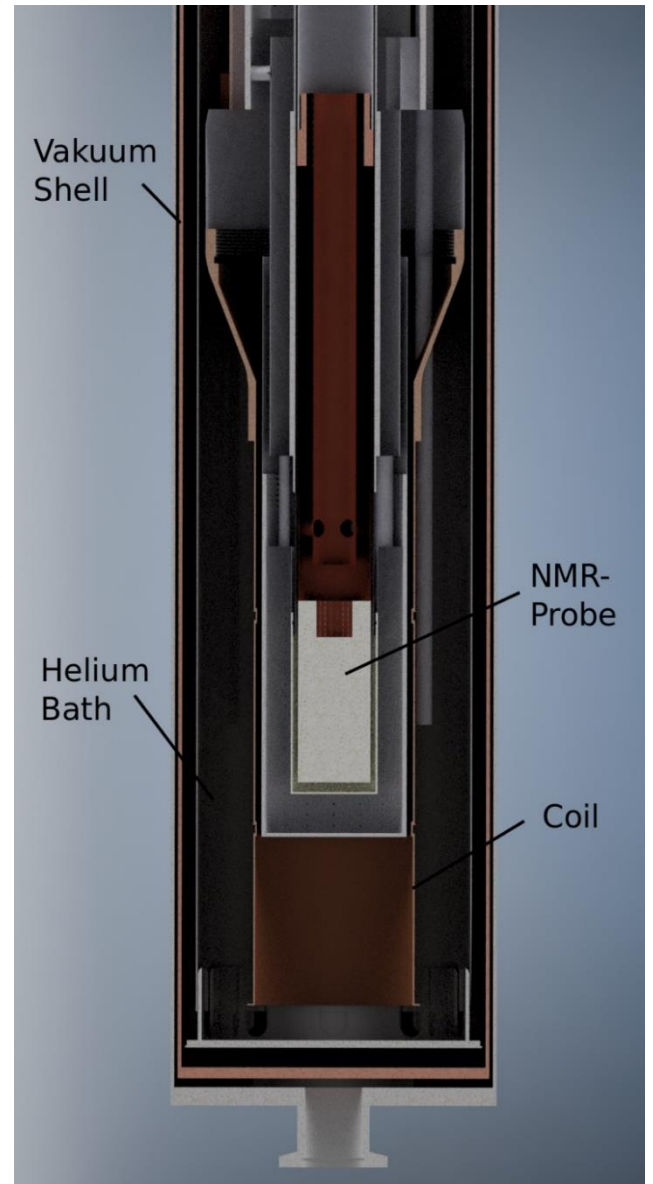


Abbildung 8. Schnittbild des Probenraumes

Referenzen

- ¹ M. Bornstein, Diplomarbeit, Bonn-IR-2013-11, 2013; <https://www.polarisiertes-target.physik.uni-bonn.de/files/diplom-bornstein.pdf>
- ² H. Dutz, *Recent activities of the Bonn Polarized Target Group*, 23rd International Spin Physics Symposium - SPIN2018 -10-14 September, 2018, Ferrara, Italy; https://www.polarisiertes-target.physik.uni-bonn.de/files/dutz_spin2018
- ³ Dynamic Nuclear Polarization, vgl. S. Goertz, W. Meyer, G. Reicherz, *Polarized H, D and ³He targets for particle physics experiments*, Prog. Part. Nucl. Phys. 49 (2002) 403-489, https://www.polarisiertes-target.physik.uni-bonn.de/files/ProgPartNuclPhys_49_403.pdf
- ⁴ M. Bornstein, *Development of a thin, internal superconducting polarisation magnet for the Polarised Target*, XVIth International Workshop in Polarized Sources, Targets, and Polarimetry, PSTP2015, 14-18 September 2015, Bochum, Germany, <https://pos.sissa.it/243/006/pdf>
- ⁵ S. Runkel, Diplomarbeit, BONN-IB-2012-10 (2011); https://www.polarisiertes-target.physik.uni-bonn.de/files/dipl_runkel.pdf
- ⁶ S. Runkel, Doktorarbeit, Bonn, 2018; <http://hdl.handle.net/20.500.11811/7498>
- ⁷ E. Bickmann, *Magnetic Field Measurements with a cryogenic NMR-system*, Masterarbeit, Bonn, 2019;
- ⁸ D. Kammer, *Aufbau einer gepulsten NMR-Anlage für die Polarisationsuntersuchung an Festkörpertargets*, Masterarbeit, Bochum, 2009
- ⁹ G. Reicherz, priv. Kommunikation, Bochum, 2019