

# Magnet- und Kryotechnologie für KATRIN

M. Noe, S. Grohmann, R. Gehring, W. Gil, M. Süsser, H. Neumann, ITP;  
F. Glueck, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

## Einleitung

Eine wichtige und spannende Aufgabe der nächsten Jahre im Bereich der Astroteilchenphysik ist die Bestimmung der Masse von Neutrinos. Einen Schlüsselbeitrag dazu wird das Karlsruhe-Tritium-Neutrino-Experiment KATRIN liefern [1], [2].

Das Messprinzip basiert auf der so genannten MAC-E-Filter-Technik [3], [4]. Dabei werden unterschiedlich energiereiche Elektronen zunächst adiabatisch, das heißt ohne Energieverlust, in einem Magnetfeld geführt und anschließend in einem Spektrometer gefiltert. Die Elektronen erhält man durch den  $\beta$ -Zerfall von Tritium. Über die Messung des Energiespektrums am oberen Endpunkt kann dann direkt, ohne weitere Annahmen, auf die Neutrinomasse geschlossen werden.

Eine vereinfachte Skizze des Aufbaus des KATRIN-Experimentes ist in Abb. 1 dargestellt. Um die Elektronen zu erzeugen und von ihrer Erzeugungsquelle bis zum Detektor zu führen, ist ein Magnetsystem aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Magneten erforderlich. Diese Magnete können technisch und wirtschaftlich sinnvoll nur in supraleitender Ausführung mit einer Kühlung durch flüssiges Helium bei etwa 4 K ( $-269\text{ }^\circ\text{C}$ ) realisiert werden. Wegen ihrer unterschiedlichen Funktion sind die Magnete dabei in die folgenden unterschiedlichen Abschnitte eingeteilt:

- In der fensterlosen gasförmigen Tritiumquelle (Windowless Gaseous Tritium Source, WGTS) werden die Elektronen erzeugt und durch das Magnetfeld adiabatisch geführt.

- An die WGTS schließen sich einige differentielle Pumpstrecken (DPS) mit Turbomolekularpumpen an, die den Tritiumgehalt reduzieren und die Elektronen adiabatisch führen.
- Um sicherzustellen, dass kein Tritium in die Spektrometer gelangt, ist ein weiteres Magnetsystem mit einer kryogenen Pumpstrecke (Cryogenic Pumping Section, CPS) erforderlich, welches in seinem Inneren die Tritiummoleküle an einer kalten Oberfläche absorbiert.
- Die Vor- und Hauptspektrometern magnete an den jeweiligen Enden der Spektrometer erzeugen ein Streufeld auf dem die Elektronen durch das Spektrometer geführt werden. Weiterhin bestimmt das Verhältnis der Magnetfelder in der Mittenachse des Hauptspek-

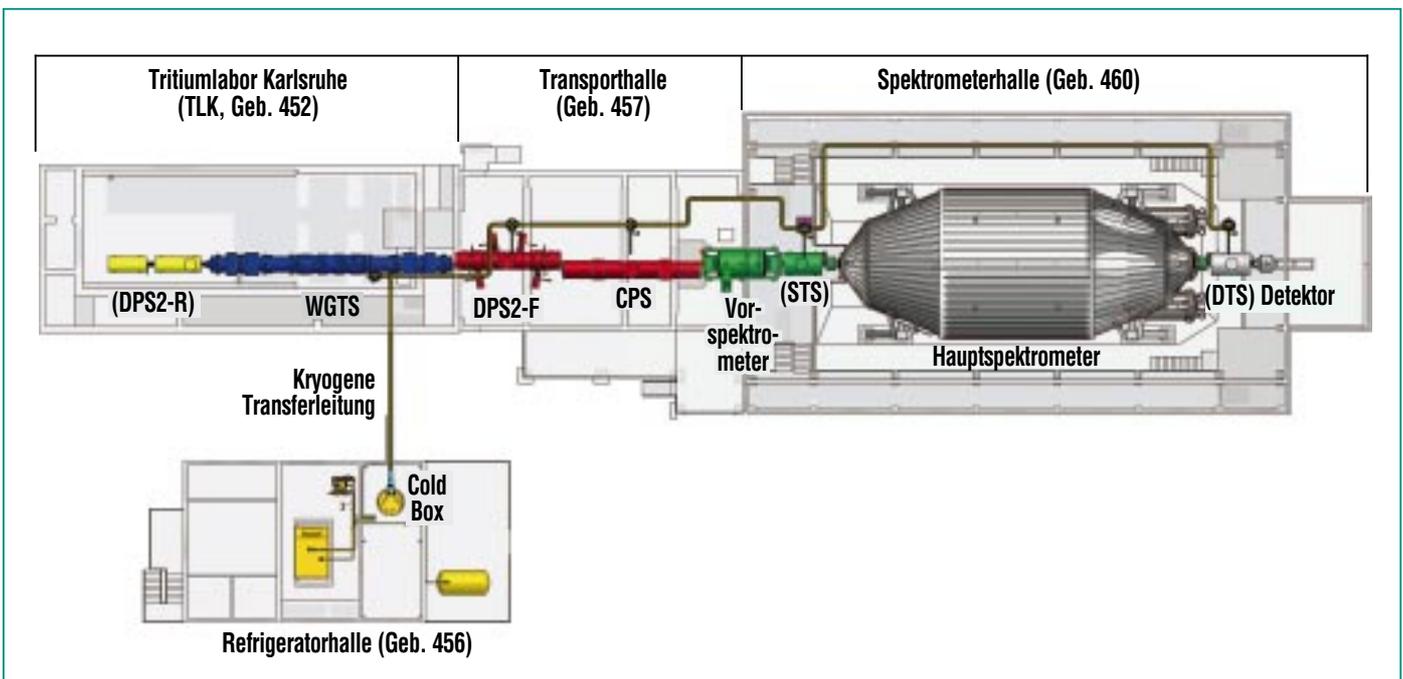


Abb. 1: Anordnung des KATRIN-Experimentes und der kryogenen Versorgung.

trometers zum maximalen Magnetfeld in der Strahlachse die Auflösung des Experimentes.

- Der Detektormagnet hat die Hauptaufgabe den Detektor aufzunehmen und den sehr empfindlichen Detektor gegen unerwünschte Strahlung von außen zu schützen.

Eine wichtige Anforderung ist bei fast allen Magneten an die zeitliche Stabilität des Magnetfeldes gestellt. In einem Zeitraum von 3 Mo-

naten darf die Magnetfeldstärke nur um 0,01 % absinken. Die Magnete werden dabei im sogenannten „persistent mode“ betrieben, das heißt die supraleitenden Magnetwicklungen führen einen Dauerstrom und sind kurzgeschlossen.

Am Beispiel des Quellmagneten und der differentiellen Pumpstrecke werden die magnet- und kryotechnischen Herausforderungen des KATRIN-Experimentes näher erläutert.

### WGTS Magnetabschnitt

Der Aufbau der WGTS ist in Abb. 2 dargestellt. Sie besteht aus drei Abschnitten, in der Mitte das WGTS-Strahlrohr und zu beiden Enden des Strahlrohres jeweils eine differentielle Pumpstrecke. An den Enden ist die WGTS mit einem Ventil auf Raumtemperatur mit den anschließenden Magnetgruppen verbunden.

Im Inneren des WGTS-Strahlrohres mit einer Länge von 10 m und ei-

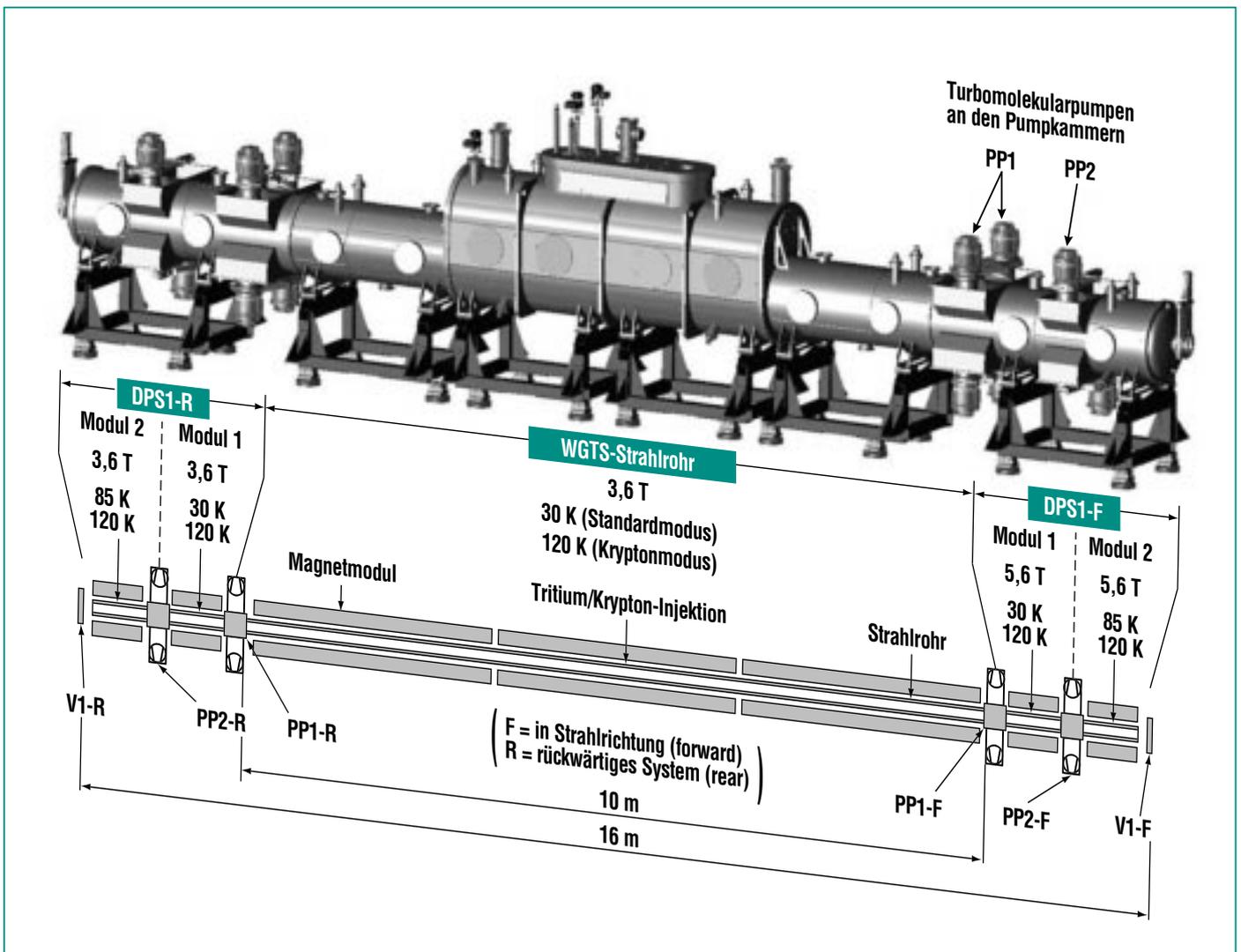


Abb. 2: Aufbau der Windowless Gaseous Tritium Source (WGTS) im Experiment KATRIN (3D-Grafik Fa. ACCEL).

nem Durchmesser von 90 mm wird kontinuierlich hochreines molekulares Tritium injiziert. Von der Injektionskammer in der Mitte des Strahlrohres diffundiert das Tritium über 5 m zu beiden Rohrenden, wobei der Druck etwa linear abnimmt. Am Ende des WGTS-Strahlrohres werden die Tritium- und beim  $\beta$ -Zerfall entstehende  $3\text{He}$ -Moleküle in einer ersten differenziellen Pumpstrecke (DPS1) abgepumpt, die aus jeweils 2 Pumpkammern und 2 Strahlrohrabschnitten von 1 m Länge besteht. An der ersten Pumpkammer (PP1) sind dabei 4 und an der zweiten (PP2) 2 Turbomolekularpumpen angeschlossen.

Das WGTS-Strahlrohr ist eingeschlossen von drei supraleitenden Solenoidmagneten von jeweils 3 m Länge, deren zentrale Magnetfeldstärke von 3,6 T die  $\beta$ -Zerfallselektronen adiabatisch zu den Strahlrohrenden führt. Die Feldstärken in den 1 m langen Modulen der DPS1 betragen 5,6 T in

Strahlrichtung und 3,6 T im sog. Rear-System. Zusammen mit den geometrischen Bedingungen ergibt sich ein magnetischer Fluss von  $191 \text{ Tcm}^2$ . Der gesamte Aufbau ist in einem 16 m langen Kryostaten untergebracht.

### WGTS-Strahlrohrkühlung

Von zentraler Bedeutung für das Experiment ist die Anforderung nach einer extrem zeitlich stabilen ( $\pm 30 \text{ mK} \cdot \text{h}^{-1}$ ) und örtlich homogenen Temperaturverteilung ( $\pm 30 \text{ mK}$  über 95 % der Länge) des WGTS Strahlrohres im Standardbetriebsmodus bei 30 K ( $-243 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Dies ist zwingend erforderlich, um die Genauigkeit der Messung in den zulässigen Grenzen zu halten.

Dazu wurde zusammen mit der Technischen Universität Dresden ein spezieller Kühlkreislauf entwickelt, der in Abb. 3 dargestellt ist. Das Kühlsystem besteht aus zwei 16-mm-Verdampferrohren, die als

Teil eines Thermosiphons beidseitig an das Strahlrohr angelötet werden. Dadurch wird ein sehr guter thermischer Kontakt zwischen den Verdampferrohren und dem Strahlrohr erzeugt. Die Verdampferrohre werden je nach Betriebsmodus zur Hälfte mit siedendem Neon (bei 30 K) bzw. Argon (bei 120 K) gefüllt. Über den Druck oberhalb der Flüssigphase kann nun sehr präzise die Temperatur geregelt werden. Zur Temperaturmessung des Strahlrohres werden am Institut für Technische Physik Dampfdruckthermometer entwickelt, da handelsübliche Temperatursensoren nicht anwendbar sind. Eine weitere technische Schwierigkeit ist das Einstellen eines stabilen Füllstandes in beiden Verdampferrohren, die über die komplette Länge von 10 m etwa zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllt sein müssen. Das (lokale) Über- oder Unterfüllen würde zu Strömungsinstabilitäten, beziehungsweise zum Austrocknen der Verdampferrohre führen.

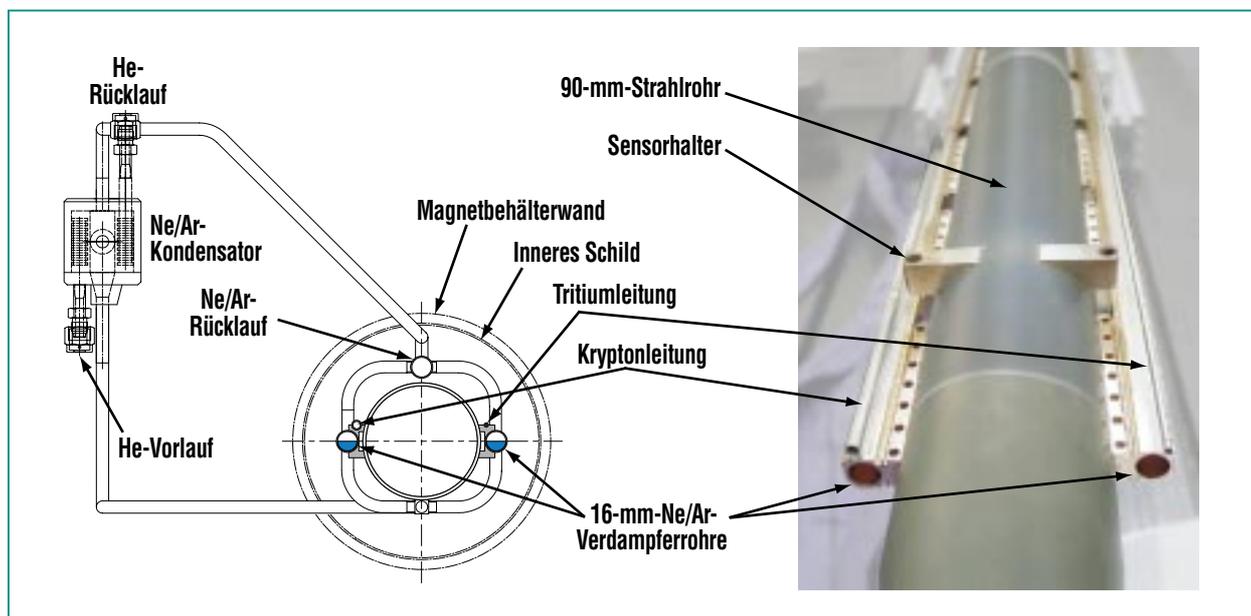


Abb. 3: Strahlrohrkühlung mittels Thermosiphon, Strahlrohr-Lötprobe (Fa. ACCEL).

Weiterhin ist es erforderlich, die durch die Rohrenden eingeführte Wärmemenge zu minimieren. Dies geschieht über eine spezielle Konstruktion der Pumpkammern (Abb. 4), indem versucht wird, den Großteil der über die Pumpstutzen eingeführte Wärmelast bereits in den Pumpkammern abzufangen.

Die bisher durchgeführten Berechnungen bestätigen die Tauglichkeit des Kühlkonzeptes. Da dies bisher aber noch nicht technisch realisiert und verifiziert wurde, ist im Fertigungsprozess der WGTS als wichtiger Zwischenschritt ein so genannter Demonstratortest der Strahlrohrkühlung vorgesehen. Bei diesem Test, der am späteren Standort im Tritiumlabor des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt wird, werden überwiegend Originalkomponenten verwendet. So wird beispielsweise für die kryogene Versorgung dieses Tests die bereits

fertiggestellte Kälteanlage von KATRIN verwendet.

### DPS2-F Magnet

Die Designskizze des DPS2-F-Magneten (Differential pumping system 2-forward direction) ist in Abb. 5 dargestellt. Der DPS2-F-Magnet besteht aus 5 Solenoidmagneten von je 1 m Länge, die um  $\pm 20$  Grad gegeneinander verkippt sind. Diese Verkipfung ist erforderlich um eine natürliche Barriere für neutrale Teilchen darzustellen. Zwischen den Solenoidmagneten befinden sich weitere Pumpstutzen zum Anschluss von Turbomolekularpumpen. Beim Anschluss der Pumpen ist darauf zu achten, dass ein maximales Magnetfeld von 50 Gauß ( $1 \text{ Gauß} = 10^{-4} \text{ T}$ ) in den Pumpen nicht überschritten wird, da dies zu einer unzulässigen Erwärmung im Betrieb und somit zur Zerstörung der Pumpen führen würde.

Das zentrale Magnetfeld in der Mitte eines Solenoiden beträgt 5,6 T. Das Strahlrohr hat einen Durchmesser von 88 mm und wird im Standardbetrieb bei etwa 77 K ( $-196 \text{ °C}$ ) betrieben.

Beim Design der differentiellen Pumpstrecke ergeben sich zwei gegensätzliche Anforderungen. Um eine hohe Pumpleistung ( $\geq 2000 \text{ l/s}$ ) zu erzielen, ist ein möglichst großer Abstand zwischen den einzelnen Solenoidmagneten erforderlich. Andererseits darf die magnetische Feldstärke zwischen zwei Solenoiden nicht kleiner werden als 0,5 T, da sonst kein adiabater Elektronentransport mehr möglich ist. Dies erfordert geringe Abstände.

Eine Vielzahl durchgeführter Monte-Carlo-Simulationen zum Saugvermögen und FEM-Magnetfeldrechnungen ergaben ein Design, das beide Anforderungen erfüllen kann. Zur Korrektur des Magnet-

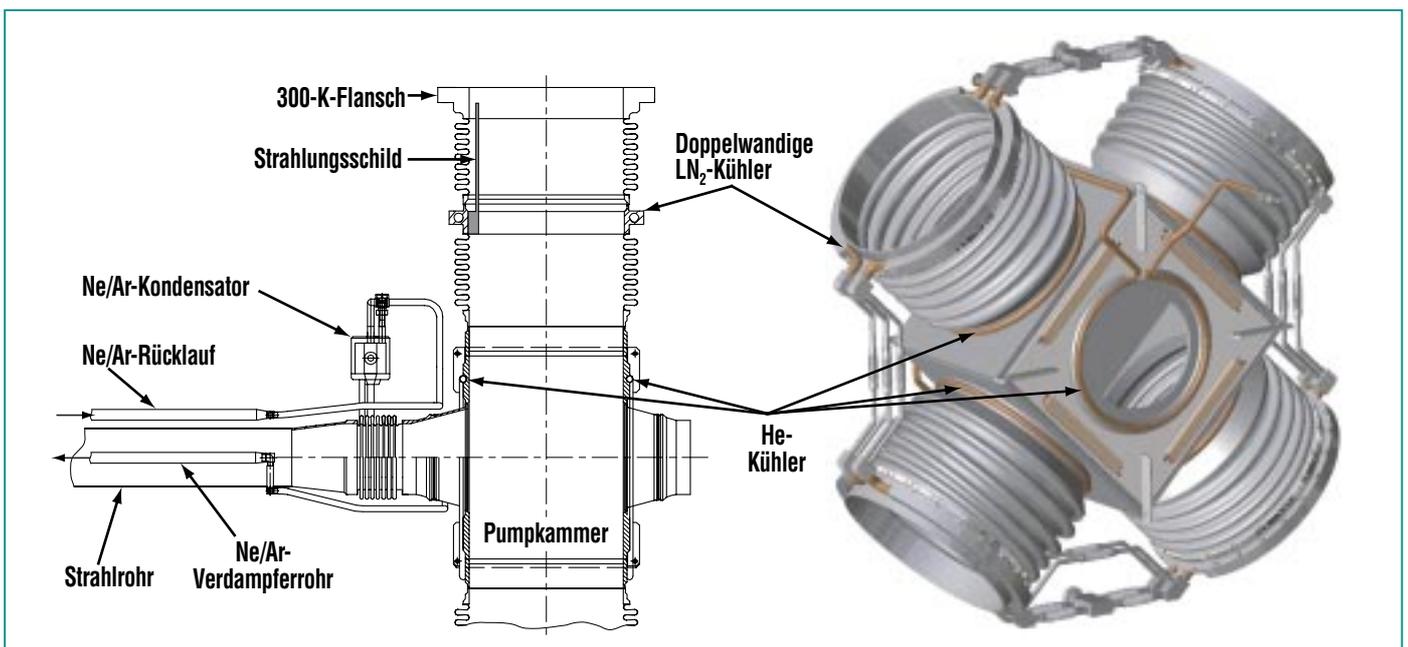


Abb. 4: Konstruktion der Pumpkammern PP1 (3D-Grafik Fa. ACCEL).

feldes zwischen zwei Magneten wurden dabei Korrekturspulen an den Enden der Solenoide eingeführt. Durch die Verkippung der Magnete ergeben sich zusätzliche Kräfte senkrecht zur Strahlachse, die durch entsprechende mechanische Verstärkungen abgefangen werden.

### Status und Ausblick

Die erste Inbetriebnahme von KATRIN ist für 2010 vorgesehen. Bereits 2003 erreichten die Vorspektrometermagnete das Forschungszentrum. Sie sind am Vorspektrometer installiert und befinden sich in Betrieb. Ende 2003 wurde der DPS2-F-Fertigungsauftrag an die Industrie vergeben. Wichtige Komponenten wie die Magnete sind gefertigt und erfolgreich getestet. Der Zusammenbau und die erste Inbetriebnahme der DPS2-F erfolgen 2007. Der Auftrag zur WGTS-Magnetfertigung wurde Ende 2004 vergeben. Die Designphase ist abgeschlossen und die Konstruktion wurde begonnen. Für 2008 ist der Demonstratortest der WGTS-Strahlrohrkühlung vorgesehen. Die erste Inbetriebnahme der WGTS wird im Tritiumlabor Karlsruhe am späteren Aufstellort erfolgen und ist für 2009 geplant. Die Erstellung der Ausschreibungsunterlagen für die CPS-Magnetgruppe ist in Kürze beendet. Da-

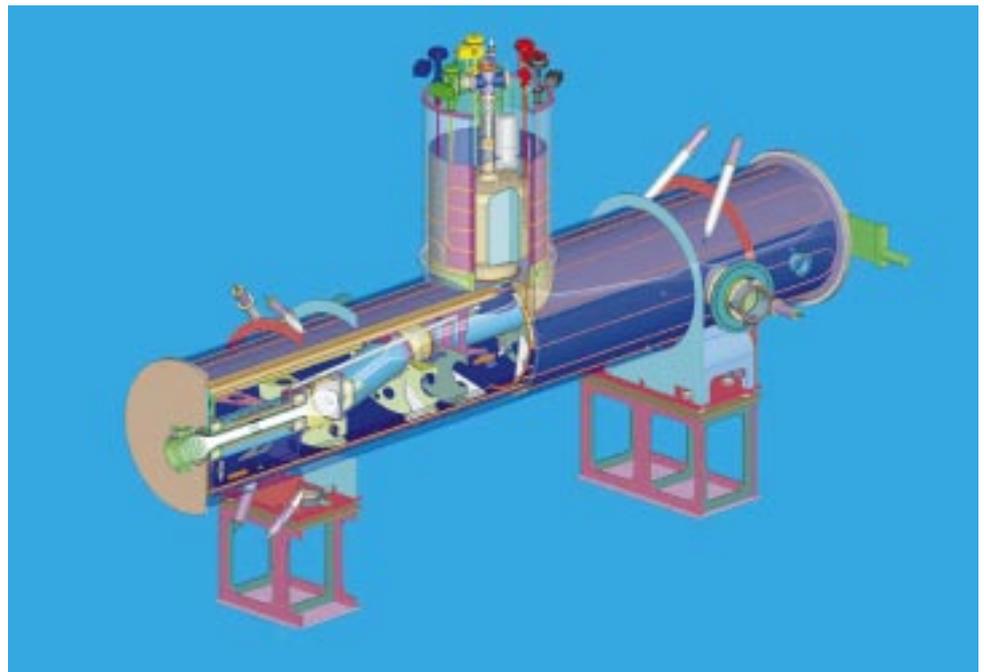


Abb. 5: Designskizze des DPS2-F-Magneten für KATRIN (Fa. Ansaldo).

nach erfolgt die Ausschreibung und die Vergabe an die Industrie.

Die Kälteanlage für KATRIN wurde 2006 geliefert und installiert. Der erste Abschnitt zur Fertigung und Installation des kryogenen Transfersystems zur Versorgung des WGTS-Demonstratortests ist vergeben und wird rechtzeitig zu dessen Inbetriebnahme installiert.

Ab 2010 ist ein fünfjähriger Betrieb des KATRIN-Experimentes geplant, damit letztendlich eine der fundamentalen Fragen der Astroteilchenphysik geklärt werden kann. Wie schwer ist ein Neutrino?

### Danksagung

Die Autoren danken den beteiligten Kollaborationspartnern für ihre sehr wertvolle Unterstützung. Besonderer Dank geht an die Hauptabteilung Projekte (HAP) und den Bereich Technische Infrastruktur des Forschungszentrums Karlsruhe für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Qualitätskontrolle und Fertigungsbegleitung.

### Literatur

- [1] G. Drexlin, C. Weinheimer, (2007) *KATRIN – ein Schlüssel-experiment der Astroteilchenphysik*, Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe
- [2] B. Bornschein et al., (2007) *Die KATRIN-Tritiumquelle im TLK*, Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe
- [3] A. Picard, E. Otten et al., (1992) *A solenoid retarding spectrometer with high resolution and transmission for keV electrons*, Nucl. Instr. Meth., vol. B63, Issue 3, 345-358
- [4] V.M. Lobashev, P.E. Spivak, (1985) *A method for measuring the electron antineutrino rest mass*, Nucl. Instr. Meth., vol. A240, Issue 2, 305-310