

Elektrostatische Spektrometer und Detektoren für KATRIN

R. Gumbsheimer, M. Steidl, IK; S. Wüstling, IPE; C. Day, ITP;
J. Wolf, L. Bornschein, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe;
J. Bonn, Institut für Physik, Universität Mainz; Ch. Weinheimer, Institut für Kernphysik, Universität Münster

Einleitung

Im KATRIN-Experiment soll die Neutrinomasse aus der präzisen Vermessung des Energiespektrums der β -Elektronen aus dem Tritiumzerfall bestimmt werden. Von der gasförmigen Tritiumquelle werden die Elektronen magnetisch in das Spektrometersystem geführt [1,2,3].

Die Energieanalyse erfolgt mit einem elektrostatischen Gegenfeld, das die Elektronen abbremst. Nur Elektronen mit einer kinetischen Energie, die größer ist als das Analysierpotenzial, können das Spektrometer passieren. Alle anderen Elektronen werden reflektiert. Die Spektrometertanks selbst liegen auf Hochspannung. Drahtelektroden im Inneren sind für die Feinformung des Feldes verantwortlich. Die Energiemessung geschieht in zwei Stufen. Zunächst wird in dem kleineren Vorspektrometer mit begrenzter Auflösung und fester Retardierungsspannung der niederenergetische Anteil des β -Spektrums abgetrennt. Nur jedes 10-millionste Elektron erreicht das große Hauptspektrometer, das mit einer variablen Retardierungsspannung die Feinanalyse durchführt. Elektronen, die das Hauptspektrometer passieren, werden in einem segmentierten Siliziumdetektor gezählt.

Neben anderen Faktoren beeinflusst der Restgasdruck im Spektrometer wesentlich die Untergrundrate. Für den angestrebten Enddruck von weniger als 10^{-11} mbar stellt der 1250 m³ große Ultrahochvakuum-(UHV)-Tank des Hauptspektrometers eine technische Herausforderung dar, deren Umsetzung am Vorspektrometer

erfolgreich getestet wurde. Auch an Stabilität und absolute Genauigkeit der elektrostatischen Felder werden sehr hohe Anforderungen gestellt.

Vorspektrometer

Das Vorspektrometer filtert β -Elektronen heraus, die keine verwertbare Information über die Neutrinomasse tragen, um die Untergrundrate im Hauptspektrometer zu reduzieren. Dazu reicht eine vergleichsweise moderate Energieauflösung von 70 eV aus. Ebenso wichtig ist der „kleine Bruder“ des Hauptspektrometers als Prototyp für das Vakuumkonzept und das elektromagnetische Design des Hauptspektrometers.

Das Vorspektrometer ist ein zylindrischer Edeltank mit einem Durchmesser von 170 cm und einer Länge von 338 cm (Abb.1), der

2003 von der französischen Firma SDMS gebaut wurde. Das innere Elektrodensystem kann über einen großen metallgedichteten Flansch an einem Ende des Tanks eingebracht werden. Das Vakuumsystem, das an den beiden seitlich wegführenden Stützen montiert ist, besteht aus einer Kombination von Getterpumpen (25000 l/s) für Wasserstoff und kaskadierten Turbomolekularpumpen (1000 l/s) für andere Gase.

Der angestrebte Enddruck von weniger als 10^{-11} mbar erfordert hohe Dichtheit der Flanschverbindungen, eine große Saugleistung der Vakuumpumpen, extreme Sauberkeit der Oberfläche und niedrige Ausgasraten der Tankwand ($<10^{-12}$ mbar l/s cm²). Darum wurden die Innenflächen des Edeltankstanks in mehreren Schritten geschliffen, gebeizt, elektropoliert und gereinigt. Zusätzlich kann der

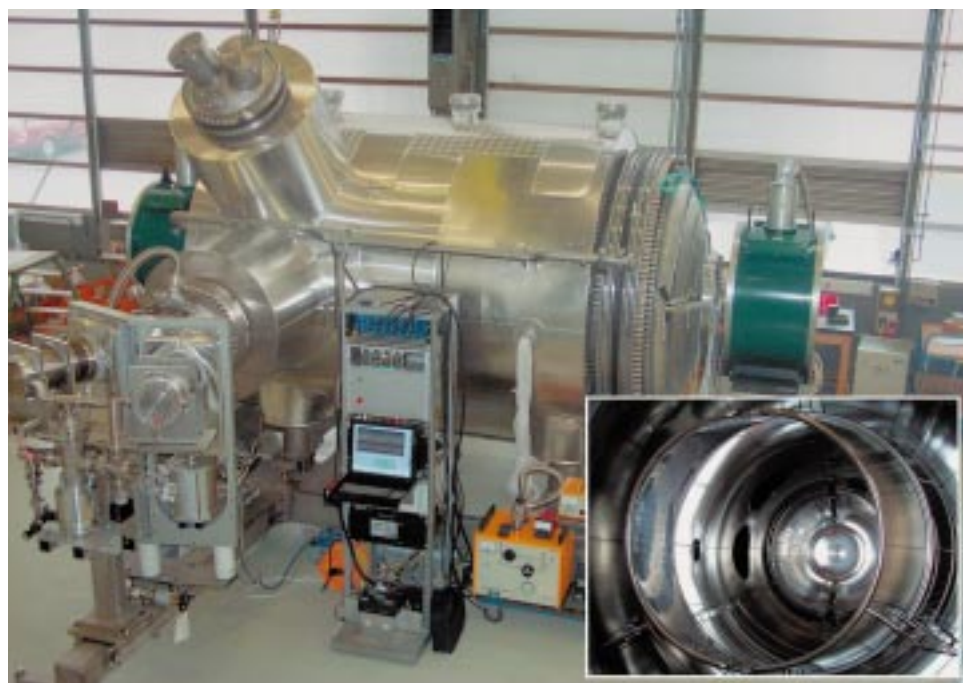


Abb. 1: Vorspektrometer mit Vakuumsystem und supraleitenden Magneten im März 2004. Unten rechts: inneres Elektrodensystem.

gesamten Tank unter Vakuum bei 350 °C ausgeheizt werden. Während des Messbetriebes kann er auf -20 °C abgekühlt werden, wodurch sich die Ausgasrate um nahezu eine Größenordnung gegenüber +20 °C senken lässt.

Ende 2004 wurden die Vakuumtests erfolgreich abgeschlossen. Der Enddruck von $<10^{-11}$ mbar wurde ebenso wie die erforderliche Ausgasrate von $<10^{-12}$ mbar l/s cm^2 bereits bei Raumtemperatur nach dem Ausheizen auf 230 °C erreicht [4]. Durch den Vergleich dieser Ergebnisse mit detaillierten Simulationsrechnungen konnte die Gettermenge für das Hauptspektrometer gegenüber ersten Schätzungen halbiert werden. Ebenso wurde auf die aufwändige Kühlung verzichtet.

Das Vorspektrometer wurde 2005 als Prototyp für das elektroma-

agnetische Design umgebaut. Die verschiedenen Teile wurden in enger Zusammenarbeit mit internationalen Kollaborationspartnern aufgebaut. Als Quelle dient eine Elektronenkanone für quasi monoenergetische Elektronen bis 30 keV Energie des INR in Troitsk/Russland. Das innere Elektroden-system (Abb. 1) wurde von der University of Washington in Seattle/USA gefertigt und im Frühjahr 2005 installiert. Eine präzise Hochspannungsversorgung der Universität Münster und zwei supraleitende 4,5-T-Magnete komplettieren das System.

Das seit Sommer 2006 laufende umfangreiche Messprogramm wird im Wesentlichen von Studenten der Universitäten Karlsruhe, Münster und Seattle im Rahmen ihrer Diplom- und Doktorarbeiten durchgeführt. Abb. 2 zeigt eine Messung der Transmissionseigenschaf-

ten des Vorspektrometers für Elektronen niedriger Energie, sowie das Ergebnis der entsprechenden Simulationen [5]. Das Messprogramm wird im Jahr 2007 fortgesetzt um insbesondere Fragen zur Hochspannungsstabilisierung und zum Untergrund der Spektrometer zu klären.

Hauptspektrometer

Das Hauptspektrometer ist das Kernstück der „Neutrino Waage KATRIN“. Es misst die kinetische Energie der β -Elektronen mit einer Auflösung von 0,93 eV. Der UHV-Tank besteht aus bis zu 32 mm dicken Edelstahlblechen, die mit 650 m Schweißnähten verbunden sind. Er hat einen inneren Durchmesser von 9,8 m und eine Länge von 23,3 m. Die magnetischen Führungsfelder für die Elektronen werden von zwei supraleitenden Solenoiden erzeugt. Große Korrekturspulen mit 12 m Durchmesser dienen der Feinjustierung und kompensieren den Einfluss des Erdmagnetfeldes. Die Drahtelektrode für das Retardierungsfeld liegt auf einem Potenzial von -18,6 kV. Die Tankwand selbst liegt ebenfalls auf Hochspannung (-18,5 kV) und dient als Schirmelektrode, die äußere Störungen auf das Feld im Innern des Tanks stark unterdrückt.

Durch die kleine negative Gegen-spannung zwischen Tankwand und Drahtelektrode werden außerdem niederenergetische Elektronen reflektiert, die z. B. durch Myonen der kosmischen Strahlung aus der massiven Tankwand herausgeschlagen werden. Aufgrund des Verlaufs der magnetischen Feldlinien sollten Elektronen, die trotz-

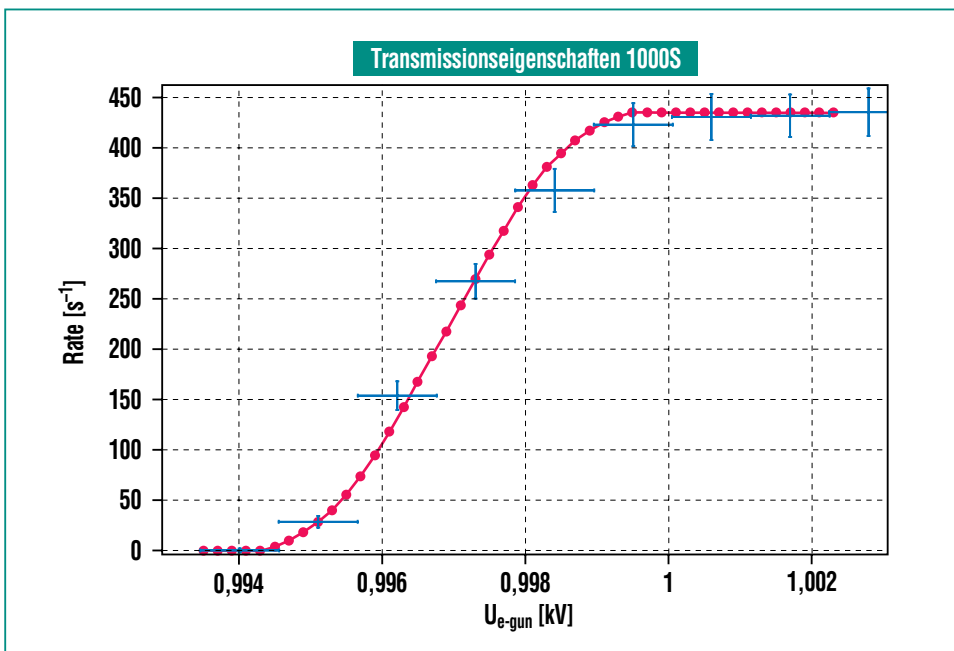


Abb. 2: Transmissionseigenschaft des Vorspektrometers für Elektronen der Energie 993–1003 eV bei einer Retardierungsspannung von 1000 V. In blau sind die Messwerte dargestellt, in rot die entsprechende Simulation [5].

dem in das Spektrometervolumen eindringen, den Detektor nicht erreichen. Stößt jedoch ein Elektron im Vakuum mit einem Gasmolekül zusammen, kann es vorkommen, dass es doch in Richtung des Detektors abgelenkt wird. Da nicht mehr als ein Elektron in 1000 s zum Detektor abgelenkt werden soll, muss der Druck bei Neutrinomessungen unter 10^{-11} mbar liegen. Dies entspricht etwa einem Nanogramm Wasserstoff in einem Volumen von 1250 m^3 .

Die am Vorspektrometer erfolgreich getestete Kombination von Getterpumpe und kaskadierten Turbomolekularpumpen (TMP) wird auch hier eingesetzt. Mit 3000 m Getterstreifen erreicht man eine Pumpleistung von ca. 1 Million l/s für Wasserstoff. TMPs saugen Edelgase und Kohlenwasserstoffe mit 10000 l/s ab. Zur Reinigung der Oberflächen und zum Aktivieren der Getterpumpen kann der gesamte Tank unter Vakuum bei $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgeheizt werden. Dazu wurde ein Heizsystem mit 12 m^3 Wärmeträgeröl installiert, das eine Heizleistung von 435 kW aufbringt.

Die Fertigung bei der Deggendorfer Firma MAN-DWE musste unter extrem sauberen Bedingungen stattfinden. Für die Arbeiten wurde eine komplette Halle saniert und für KATRIN reserviert. Entsprechend den Erfahrungen mit dem Vorspektrometer wurden die Innenflächen des Edelstahltanks behandelt. Der erste Vakuumtest in Deggendorf verlief sehr erfolgreich (Abb. 3). Obwohl der Tank nicht ausgeheizt werden konnte, wurde mit nur einer TMP-Kaskade bereits ein Enddruck von 6×10^{-8} mbar erreicht. Nach der kompletten Installation der Heizung und der Va-

kuumanlage am Forschungszentrum Karlsruhe wird sich Mitte 2007 zeigen, ob wir die geforderten Endwerte erreichen können.

Von der Auftragsvergabe bis zur Ankunft des Tanks am Forschungszentrum am 25.11.2006 vergingen nicht einmal 2 Jahre. Ende Oktober 2006 wurde der Tank auf seine lange Reise nach Karlsruhe geschickt. Obwohl Deggendorf nur 340 km Luftlinie von Karlsruhe entfernt ist, musste der Tank aufgrund seiner Größe einen fast 9000 km

langen Umweg auf sich nehmen. Von Deggendorf führte die Reise über die Donau mit dem Frachterschiff „Taifun“ flussabwärts zum Schwarzen Meer. Die engste Stelle, mit nur 7 cm Abstand unter einer Brücke, passierte der Tank an der Schleuse Jochenstein. In Constanta am Schwarzen Meer wurde der Tank auf einen Hochseefrachter verladen. Nach einer teils stürmischen Fahrt über Schwarzes Meer, Mittelmeer und Atlantik, erreichte das Spektrometer am 17. November Rotterdam, wo es

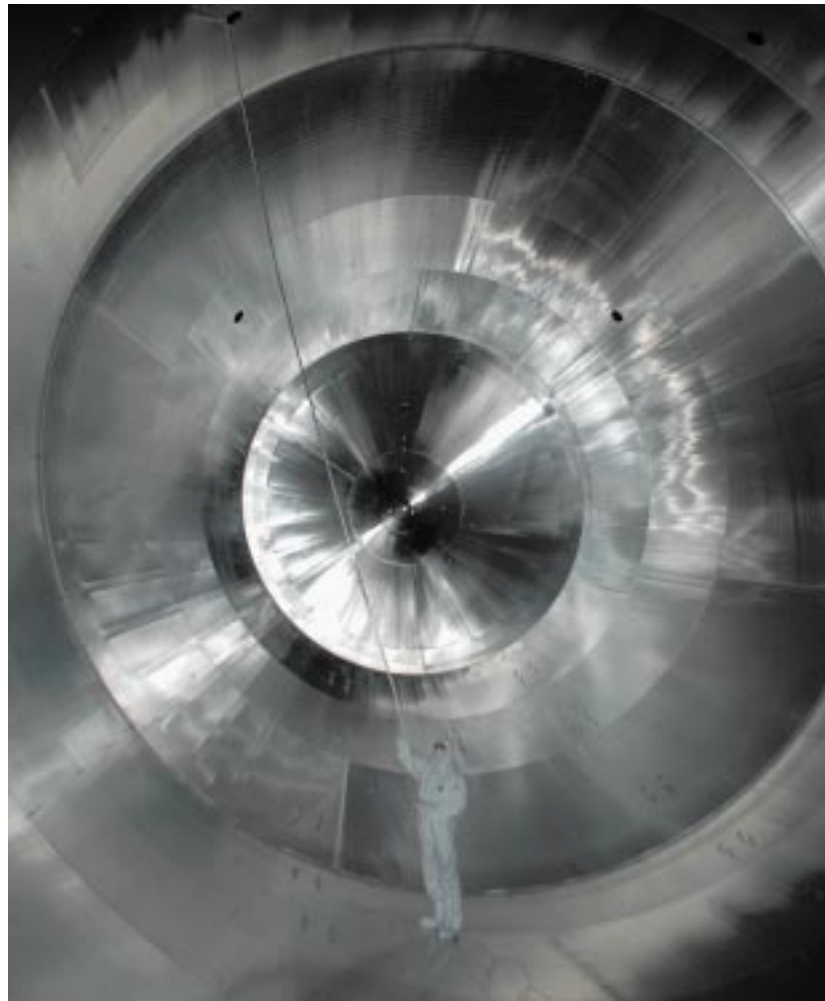


Abb. 3: Techniker im elektropolierten Hauptspektrometertank leitet Heliumgas an eine Flanschverbindung in 9 m Höhe für einen Lecktest.



Abb. 4: Transport des Hauptspektrometers durch Leopoldshafen.

auf einen Ponton verladen und den Rhein hinauf bis nach Eggenstein-Leopoldshafen geschleppt wurde.

Unter großem Interesse der Bevölkerung und der Medien wurde der knapp 200 t schwere Tank am 25.11.2006 mit einem der größten Autokräne Europas vom Ponton auf einen 5 m breiten Transporter gehoben. Im Schrittempo fuhr der Tank durch Leopoldshafen (Abb. 4). Etwa 30000 Zuschauer beobachteten, wie sich das Spektrometer mit zum Teil nur wenigen Zentimetern Spielraum an den Häusern vorbeischiebte, bis es gegen Abend das Forschungszentrum erreichte. Vier Tage später wurde der Tank durch das geöffnete Hallendach in seine endgültige Position in der neu gebauten KATRIN-Spektrometerhalle gehoben. Internet-Links mit Bildern und Filmaufnahmen der Fertigung und des Transports

sind auf der KATRIN-Homepage zu finden [3].

Nach dem Schließen des Hallendachs begannen die Arbeiten an den Heiz- und Vakuumsystemen, die im Frühjahr 2007 abgeschlossen werden. Nach dem Ende der Vakuumtests im Sommer 2007 begannen die Vorbereitungen zur Installation der inneren Drahtelektrode. Die Elektrodenstruktur besteht aus 250 einzelnen Modulen, die unter Reinraumbedingungen an der Tankwand angebracht werden. Die Module werden an der Universität Münster entwickelt und gebaut. Die Konstruktion der HV-festen und UHV-tauglichen Elektrodenhalterungen im Inneren des Tanks, sowie die Logistik der Montage werden in enger Zusammenarbeit von Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Erste Testmes-

sungen der elektromagnetischen Eigenschaften des Hauptspektrometers sind für 2008 geplant. Neben den supraleitenden Detektormagneten und der sehr genauen (1 ppm) Hochspannungsversorgung, werden dazu der Detektor [6] und die Elektronenkanone von den bis dahin abgeschlossenen Vorspektrometermessungen verwendet.

Detektor

Die Aufgabe des Fokalebene-detektors ist der Nachweis der β -Elektronen, die das elektrostatische Gegenfeld des Hauptspektrometers überwinden. Wichtigste Anforderungen an den Silizium-Halbleiterdetektor sind hierbei ein effizienter Nachweis des Signals ($>90\%$) und niedriger Untergrund ($<1\text{ mHz}$). Die benötigte sensitive Fläche für den Detektor von

ca. 64 cm^2 wird durch die Querschnittsfläche der Quelle und das Verhältnis der Magnetfeldstärken in Quelle und Detektor festgelegt. Die Wahl des Detektor-Magnetfeldes von 3 Tesla limitiert dabei die Einfallswinkel der β -Elektronen auf maximal 45° und begrenzt damit Störeffekte durch Rückstreuung.

Die Reduktion des Detektor-Untergrundes aus natürlicher Radioaktivität und kosmischer Strahlung auf weniger als 1 mHz erfordert eine sorgfältige Materialauswahl der eingesetzten Bauteile, eine Kupfer-Blei-Abschirmung zur Unterdrückung der Umgebungsaktivität und ein aktives Vetosystem für kosmische Strahlung. Durch eine Nachbeschleunigung der Elektronen vor dem Detektor mit 30 kV soll das Signal zu Untergrundverhältnis um den Faktor zwei bis drei verbessert werden, da bei höheren Energien Untergrundbeiträge durch Fluoreszenzprozesse der umgebenden Materialien entfallen.

Der Detektor besteht aus einem Wafer mit segmentierten Photodioden mit sehr dünnem Eintrittsfenster ($<100 \text{ nm}$). Diese Technologie erlaubt eine anwenderspezifische Aufteilung der Diodenformen auf dem Wafer ohne Verluste der Nachweiswahrscheinlichkeit durch insensitive Zwischenräume. Der Detektor wird in 145 Sektoren eingeteilt (Abb. 5). Die Segmentierung erlaubt die Identifizierung der Bahn eines Elektrons durch das Spektrometer. Damit lassen sich nachträglich räumliche Inhomogenitäten der elektrischen und magnetischen Felder im Spektrometer für die Energiemessung korrigieren.

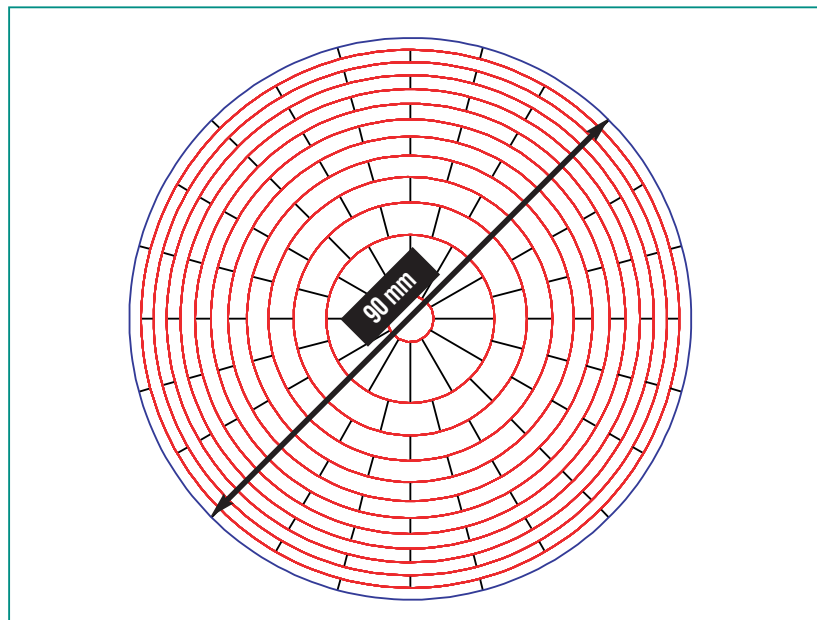


Abb. 5: Segmentierter Siliziumdetektor mit 145 Photodioden mit jeweils gleicher Fläche auf einem Wafer.

Die Detektorkammer mit Siliziumdetektor, Vakuumkammer und supraleitendem Detektormagnet wird zur Zeit von unseren Kollaborationspartnern an der University of Washington in Seattle konstruiert und gebaut. Die eingesetzte Technologie erlaubt eine hohe Flexibilität in der Aufbau- und Verbindungstechnik ohne die Energieauflösung des Detektors stark zu beeinflussen.

Die am IPE entwickelte Ausleseelektronik ist modular in Hybrid-SMD-Technik aufgebaut und erlaubt eine kompakte Installation der analogen Eingangsstufen. Die Signale der rauscharmen, ladungsempfindlichen Verstärker werden mit 10 MHz 12-Bit ADCs digitalisiert und zusammen mit anderen Prozessparametern des KATRIN-Experimentes gespeichert. Neben dem Fokalebendendetektor existieren entlang des Strahlrohrs weitere kompakte Monitor-Detektoren,

um in situ die Luminosität der Quelle mit einer Genauigkeit von 10^{-3} zu überwachen.

Zusammenfassung

Die beiden elektrostatischen Spektrometer bilden zusammen mit dem segmentierten Detektorsystem die „Neutrinowaage“ des KATRIN-Experimentes. Die UHV-Tanks sind bereits am Forschungszentrum aufgestellt und werden für die Messungen vorbereitet. Umfassende Vakuumtests am Vorspektrometer und erste Messungen mit dem Hauptspektrometer zeigen bereits sehr gute Werte. Es wird erwartet, dass die Arbeiten am Elektrodensystem des Hauptspektrometers in 2008 abgeschlossen werden und erste elektromagnetische Testmessungen beginnen können. Der Beginn der Messungen des Gesamtsystems von KATRIN wird für 2010 erwartet.

Literatur

- [1] *KATRIN-Beiträge, Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe*
- [2] J. Angrik *et al.*, *KATRIN Design Report 2004, FZKA Scientific Report 7090, 2005*
- [3] *offizielle KATRIN Homepage: <http://www-ik1.fzk.de/tritium/>*
- [4] L. Bornschein *et al.*, *ISOHIM 2005, AIP Conference Proceedings 837 (2006), 200-209*
- [5] F. Fränkle, *Diplomarbeit 2006, Universität Karlsruhe (TH)*
- [6] S. Wüstling *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth , 568 (2006), p. 382*