

WIE SCHWER IST EIN NEUTRINO?

Pfeiffer Vacuum und KATRIN

Neutrinos gehören zu den faszinierendsten Arten von Elementarteilchen. Sie sind die leichtesten Partikel im Universum. Bei der Bestimmung ihrer Masse jedoch stößt die Physik seit Jahrzehnten an die Grenzen ihrer Forschung. Dabei sind Neutrinos der Schlüssel zu vielen noch unerforschten Fragen der Wissenschaft - egal, ob zum Mikrokosmos von Elementarteilchen oder die größten Strukturen unseres Universums betreffend. Denn Neutrinos können als kosmische Architekten bezeichnet werden; sie spielen bei der Formgebung der sichtbaren Strukturen des Universums eine Rolle und beeinflussen auch die Formierung und Anordnung von Galaxien.

Um diese fundamentalen Fragen der Astrophysik und Kosmologie zu beantworten sowie wertvolle Informationen für das

Verständnis von Elementarteilchen zu erlangen, ist die präzise Kenntnis der Neutrinomasse enorm wichtig. Deren Bestimmung hat sich das Karlsruhe Tritium Neutrino (KATRIN) Experiment zum Ziel gesetzt.

Seit über 15 Jahren arbeiten im Rahmen von KATRIN mehr als 150 nationale und internationale Experten zusammen, um mittels einer modellunabhängigen, hochpräzisen Messung der Kinematik von Elektronen beim Beta-Zerfall von Tritium die Neutrino-Masse zu bestimmen. Der dafür notwendige Experimentaufbau wird dabei zurzeit auf dem Campus des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) installiert. Dabei stellen die Anforderungen des hochpräzisen Experiments die Technologie der Untersuchungsinstrumente vor große Herausforderungen.



Abbildung 1: Der imposante Hauptspektrometertank von KATRIN

Der Experimentaufbau des Karlsruhe Tritium Neutrino (KATRIN)

KATRIN ist insgesamt 70 Meter lang und besteht aus mehreren Abschnitten mit fünf wesentlichen Komponenten:

- einer fensterlosen Tritiumquelle
- einer Transportstrecke, in der das Tritium mit Turbopumpen und Kryofallen entfernt wird und die die Elektronen zum Spektrometer führt
- einem elektrostatischen Vorspektrometer
- dem riesigen elektrostatischen Hauptspektrometer sowie
- einem Detektor für die Elektronen

Im Inneren des Hauptspektrometers formt ein präzise positioniertes Netzwerk aus über 23.000 dünnen Drähten einen elektrostatischen Filter mit hoher Auflösung für die Messung der Elektronenenergie. Die Geometrie des Filters bestimmt die Form des Hauptspektrometers mit einem zylindrischen Mittelteil und konischen Enden. Die geforderte Energieauflösung definiert die Abmessungen des Hauptspektrometers mit einem Durchmesser von 9,80 Metern und einer Länge von 23,28 Metern.

Hohe Anforderungen an die Vakuumtechnik

Design und Herstellung des Hauptspektrometers müssen den Anforderungen an Ultrahochvakuumanlagen genügen. Im Spektrometer soll ein Totaldruck von 10^{-11} mbar erreicht werden. Die flächenbezogene Ausgasungsrate für Wasserstoff soll weniger als 10^{-12} mbar $l\ s^{-1}\ cm^{-2}$ betragen. Das ist rund zehntausendmal weniger als die Gasabgaberrate einer sauberen Oberfläche nach etwa einer Stunde pumpen.

Hohe Qualitätsstandards und -kontrollen

Weltweit gibt es nur wenige Unternehmen, die einen derartigen Behälter bauen können. Die MAN DWE GmbH in Deggendorf an der Donau (heute ein Teil der MAN Diesel & Turbo SE) ist eine der ersten Adressen für chemische Reaktoren und Großbehälter. Sie wurde mit der Fertigung des Hauptspektrometers beauftragt.

Der für die Größenverhältnisse eher dünnwandige Behälter besteht aus reinem Edelstahl EN 1.4429. Viele Stützen, vor allem für das Pump- sowie das Heiz- und Kühlsystem, geben ihm sein unverwechselbares Aussehen. An wohl keinen Großbehälter wurden bislang während des Aufbaus gleichzeitig so hohe Anforderungen im Hinblick auf Schweißtechnik und Sauberkeit gestellt. Diese Präzisionsarbeit wurde unter anderem mittels Lecksuche ständig kontrolliert und durch einen umfangreichen Vakuumtest bestätigt. Dazu waren Lecksuchlösungen von Pfeiffer Vacuum im Einsatz. Durchgeführt wurde die Lecksuche erstmals 2006, als der Spektrometertank seinen ersten großen Bewährungstest bestehen musste.

Dazu wurde der Spektrometertank mit einer 2.600-l/s-Turbopumpe auf 10^{-7} mbar evakuiert. Bereits nach zwei Tagen Pumpzeit war der dabei erreichte Enddruck um drei Zehnerpotenzen besser als der vorher abgeschätzte erforderliche Prüfdruck für die Leckageprüfung.



Abbildung 2: Der folienbedeckte Spektrometertank belegt eindrucksvoll, dass sich Techniker auch als Verpackungskünstler bewähren müssen.

Anforderungen an die Lecksuchlösungen

Bei der Leckageprüfung sollte jede mögliche Verunreinigung vermieden werden. Alle Prüfverfahren, die auch nur die geringste Gefahr der Behälterverschmutzung beinhalten, wie zum Beispiel Farbeindringprüfungen oder der Einsatz von Schaumbildnern, waren nicht erlaubt.

Zusammen mit den Spezialisten des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelte MAN DWE ein umfassendes Konzept zur Durchführung der Leckageprüfungen. Auch dabei kamen die Produkte von Pfeiffer Vacuum zum Einsatz. Der erforderliche Enddruck für die Dichtheitsprüfung gab die zu installierende Pumpkapazität vor.

Der geforderte Grenzwert für die integrale Helium-Leckageprüfung des fertig montierten Hauptspektrometers lag bei $< 5 \cdot 10^{-9}$ mbar l/s. Das Helium-Untergrundsignal sollte bei $< 5 \cdot 10^{-10}$ mbar l/s liegen. Erste Berechnungen machten klar, dass die Abpumpzeit des Behälters mit seinem Volumen von 1.240 m³ etwa drei Tage betragen würde, bis der geforderte Heliumuntergrund erreicht sein würde.

Die Ansprechzeit bei der Leckageprüfung würde somit auch bei Einsatz einer leistungsfähigen Turbopumpe mit einem nominellen Saugvermögen von circa 2.600 l/s für Helium rund 20 Minuten betragen. Das Signalmaximum wäre erst nach rund eineinhalb Stunden erreicht, das Abklingen des Signals würde noch wesentlich länger dauern.

Aus diesen Gründen erschien eine einzige Integralprüfung mit der Gefahr mehrerer Leckagen nicht als praktikabel. Daher wurde eine Vorgehensweise für fertigungsbegleitende Dichtheitsprüfungen mit einer sinnvollen Anzahl an Einzelprüfungen und möglichst wenig Integralprüfungen ausgearbeitet. Ziel dieser Vorgehensweise war es, das Risiko von Nacharbeiten zum Beispiel an Dichtflächen oder Schweißnähten zu einem späteren Projektzeitpunkt zu vermeiden. Bei einer fertigungsbegleitenden Prüfung können eventuell auftretende Leckagen zum Produktionszeitpunkt erkannt und Qualitätsabweichungen früher und punktgenau nachgearbeitet werden. Zeitintensive Wiederholungsprüfungen und mögliche Beschädigungen der bereits veredelten Oberfläche werden vermieden.

Einzelprüfungen

Für den Test einzelner Wurzelschweißnähte wurden kleine Kammern aus Elastomermaterial gegossen, die an die Rundungen der Wände angepasst werden konnten. Die Kammern dienten entweder als Prüfgasbehälter oder Vakuumkammer am Lecksuchgerät.

An fest installierten Prüftischen wurden einzelne Flansche und Bauteile geprüft, deren Größe und Gewicht eine Einzelplatzprüfung noch zuließen.

Für mobile Messungen an Schweißnähten wurde der Helium-Schnüffeltest eingesetzt. Dies geschah überall dort, wo fertigungsbegleitend niedrigere Dichtheitsanforderungen, zum Beispiel bei Kühlkreisläufen, gestellt wurden.



Abbildung 3: Prüfung einer Schweißnaht am Übergang vom Hauptbehälter zu einem Stutzen.

Für den Test von einzelnen Flanschen in bereits eingebautem Zustand wurden flanschspezifische Prüfhauben entwickelt. Die Hauben wurden direkt an das Helium-Lecksuchgerät angeschlossen und evakuiert.

Vorbereitung der Integralprüfung

Für die Integralprüfung wurde der Behälter mit einer Folie umwickelt, die nur eine minimale Permeationsrate für Helium besitzt. Zur Vorbereitung der Abdeckung wurden alle Flansche und Vorsprünge am Behälter gepolstert, um die Folie nicht zu beschädigen. Eine Endbahn der Folie wurde am Spektrometer befestigt und das Bauteil zusammen mit der Folie auf einer Rollenbockanlage gedreht. Nach einer Drehung wurden die Folienenden am Hallenboden verklebt und nur eine einzige Öffnung gelassen.

Zusätzlich zur Bestimmung der Leckrate von der Umgebung in den Behälter wurde auch die Leckrate des Heiz-/Kühlsystems nach außen sowie in den Behälter gemessen. Vor der Messung wurden präzise Kalibrierungen sämtlicher Lecksuchaufbauten in Bezug auf Ansprechzeit und Quantifizierung durchgeführt.

* Hinweis: Seit Durchführung der Messungen wurde das beschriebene Lecksuchgerät ASM 122 D durch das neue Hochleistungs-Lecksuchgerät ASM 380 ersetzt. Die ebenfalls erwähnten Lecksucher HLT 550 und ASM 142 D wurden zwischenzeitlich von den Lecksuchern der neuesten Generation ASM 340 abgelöst. Diese sind sowohl ölgeschmiert als auch ölfrei erhältlich. Weitere Informationen zu den Helium-Lecksuchgeräten von Pfeiffer Vacuum finden Sie im Internet unter: www.pfeiffer-vacuum.de

Die Lösung von Pfeiffer Vacuum

Für die anspruchsvollsten Messaufgaben, die Integralprüfung des Spektrometertanks sowie die Dichtheitsprüfung des Heiz-/Kühlsystems zum Spektrometertank, wurde das ölfreie Lecksuchgerät ASM 122 D(*) eingesetzt. Es zeichnet sich aus durch:

- schnellsten Abbau des Untergrundsignals während des Abpumpens
- beste Langzeitstabilität während der Messungen
- höchste Empfindlichkeit
- schnellste Ansprechzeit
- schnellsten Signalabbau nach Detektion einer Leckage
- keine Beeinflussung des Untergrundsignals durch Schwankungen der Prüfgaskonzentration in der Umgebungsluft
- beste Transportierbarkeit und einfaches Handling

Das mit ölgeschmierten Vorpumpen ausgerüstete Lecksuchgerät HLT 550(*) wurde unter anderem für die Leckageprüfungen an den Heiz-/Kühlkreisläufen nach außen eingesetzt. Diese Anwendungen sind im Gegensatz zur Messung am Vakuumtank unempfindlich gegen eventuelle Verunreinigungen durch das Betriebsmittel der Vorpumpe.

Zudem wurde das KATRIN-Vakuumlabor mit dem ASM 142 D* von Pfeiffer Vacuum ausgestattet. Hier können einzelne Komponenten geprüft werden. Für anspruchsvollere Aufgaben stehen mit dem ASM 122 D und dem ASM 192 T2D+ leistungsfähige ölfreie Helium-Lecksuchgeräte für den mobilen und stationären Einsatz zur Verfügung.



Abbildung 4: Die Arbeiten am Hauptspektrometertank erforderten höchsten Einsatz von den KATRIN-Mitarbeitern

Alle Messungen wurden unter strengsten Versuchsbedingungen und unter Wahrung der hohen Qualitätsansprüche durchgeführt. Dabei wurde zu keiner Zeit der Messung die spezifizierte integrale Leckrate für den Behälter überschritten. Nach der erfolgreichen Leckageprüfung wurde das KATRIN-Hauptspektrometer belüftet und auf spektakuläre Weise vom Deggendorfer Produktionsstandort zum Karlsruher Institut für Technologie transportiert. Obwohl die Entfernung Luftlinie nur etwa 330 Kilometer beträgt, war es jedoch unmöglich, den Spektrometerkoloss von 200 Tonnen Gewicht, 24 Meter Länge und 10 Meter Durchmesser über Land an seinen Bestimmungsort zu transportieren.

Am 28. September 2006 begann daher die 8.800 Kilometer lange Reise vom bayerischen Deggendorf ins badische Leopoldshafen über Flüsse und Meere. Die nur sieben Kilometer lange, per Tieflader zurückgelegte Schlussetappe von der sogenannten „NATO-Rampe“ am Rhein bei Eggenstein-Leopoldshafen stellte die größten Anforderungen an die Logistik. Die engen Straßen von Eggenstein-Leopoldshafen erforderten eine zentimetergenaue Planung. Am 29. November 2006 hob einer der größten Kräne Europas das Spektrometer durch das offene Hallendach in seine endgültige Position in der eigens dafür gebauten Experimentierhalle.

Ausblick

Nach der Installation in der dafür vorgesehenen Experimentierhalle wurde der Spektrometertank auf seine endgültige Bestimmung vorbereitet. Die notwendige Sauberkeit erforderte das Arbeiten unter Reinraumbedingungen.

Zwischen 2007 und 2012 wurde das komplexe innere Elektrodensystem mit circa 120.000 Einzelteilen unter Reinraumbedingungen eingebaut, das die innere Oberfläche nahezu verdoppelt. Das Spektrometer- und Detektorsystem wurde 2013 in Betrieb genommen und erste Tests mit einer monoenergetischen Elektronenquelle durchgeführt. Bei diesen Messungen wurde ein Druck im oberen 10^{-11} -mbar-Bereich erreicht.

Nach dem Anschluss der Tritiumquelle und der Transportstrecke wurde KATRIN als genaueste Waage der Welt in Betrieb genommen, um Messungen durchzuführen und um endgültig die Frage zu beantworten: Wie schwer ist ein Neutrino?

Die Autoren:

Dr. Rudolf Konwitschny, Pfeiffer Vacuum GmbH, Asslar;
 Werner Herz, Institut für Technische Physik, Karlsruher Institut für Technologie (im Ruhestand);
 Uwe Fuhrmann, Institut für Technische Physik, Karlsruher Institut für Technologie;
 Rainer Heger, Institut für Technische Physik, Karlsruher Institut für Technologie;
 Franz Ranzinger, MAN DWE GmbH (heute MAN Diesel & Turbo SE), Deggendorf;
 Joachim Wolf, Institut für experimentelle Kernphysik, Karlsruher Institut für Technologie

VAKUMLÖSUNGEN AUS EINER HAND

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuumlösungen, für technologische Perfektion, kompetente Beratung und zuverlässigen Service.

KOMPLETTES PRODUKTSORTIMENT

Vom einzelnen Bauteil bis hin zum komplexen System:

Wir verfügen als einziger Anbieter von Vakuumtechnik über ein komplettes Produktsortiment.

KOMPETENZ IN THEORIE UND PRAXIS

Nutzen Sie unser Know-how und unsere Schulungsangebote!

Wir unterstützen Sie bei der Anlagenplanung und bieten erstklassigen Vor-Ort-Service weltweit.

Sie suchen eine perfekte
Vakuumlösung?
Sprechen Sie uns an:

Pfeiffer Vacuum GmbH
Headquarters · Germany
T +49 6441 802-0

www.pfeiffer-vacuum.com