

# Neutrinomassen-Experiment KATRIN liefert erste Ergebnisse

## Den kosmischen Leichtgewichtigen auf der Spur

GUIDO DREXLIN | KATHRIN VALERIUS | CHRISTIAN WEINHEIMER

*Nach mehr als 60 Jahren der Erforschung von Neutrinos sind deren Massen nach wie vor nicht bekannt. Das Karlsruher Tritium Neutrinoexperiment KATRIN soll die bisherige Messgenauigkeit um das Zehnfache verbessern. Im Herbst letzten Jahres hat die Anlage ihr erstes vorläufiges Ergebnis geliefert und damit die Neutrinomasse bereits um einen Faktor zwei stärker eingegrenzt als bisher.*

Wer Neutrinos verstehen will, braucht offenbar einen langen Atem und muss sich experimentell einiges einfallen lassen. Dies erkannte schon Wolfgang Pauli, der im Jahr 1930 die Existenz einer bis dahin unbekanntes Teilchenart postulierte. Pauli wusste, dass die besonderen Eigenschaften, die er für sein neues Teilchen forderte, dessen experimentellen Nachweis dramatisch erschweren würden. Es sollte nämlich elektrisch neutral und sehr leicht sein sowie nur extrem selten mit Materie in Wechselwirkung treten. Tatsächlich brauchte es ein Vierteljahrhundert bis zur Entdeckung der Neutrinos in einem eigens dafür gebauten Detektor.

Am 11. Juni 2018 herrschte gespannte Ruhe im großen Hörsaal des Karlsruher Instituts für Technologie. Vor über 250 Zuschauern drückten 16 hochrangige Vertreter der Wissenschaft und der Forschungspolitik, Ehrengäste und Physiker des Karlsruher Tritium Neutrinoexperiment (KATRIN) gleich eine ganze Batterie von Startknöpfen. Damit schalteten sie im wenige hundert Meter entfernten Kontrollraum das Spektrometer ein. Als auf dem Bildschirm die ersten vom Detektor registrierten Ereignisse sichtbar wurden, brach unter den Zuschauern großer Applaus aus: In der langen Geschichte der Vermessung der Neutrinomasse wurde ein neues Kapitel aufgeschlagen. Mehr als 15 Jahre an beharrlicher Planungs- und Aufbauarbeit waren dem vorangegangen. Heute umfasst die internationale Kollaboration etwa 150 Personen aus mehr als 20 Forschungseinrichtungen aus sechs Ländern (s. „Internet“). Im September 2019 präsentierte die KATRIN-Kollaboration das erste Ergebnis. Mit einer neuen Obergrenze von  $1,1 \text{ eV}/c^2$  wurde der seit langem bestehende Bestwert um fast einen Faktor zwei verbessert.

### Allgegenwärtige Neutrinos

Dabei kommen Neutrinos keinesfalls selten vor. Im Gegenteil: Sie sind wortwörtlich überall zu finden. Jeder Kubikzentimeter des Universums enthält mehr als 300 Neutrinos aus dem Urknall. Damit sind sie die am häufigsten vorkommende Teilchensorte, die eine Ruhemasse besitzt. Zahlenmäßig überlegen sind ihnen nur Photonen, die jedoch keine Ruhemasse tragen. Die Anzahl der Neutrinos übertrifft die der Atome milliardenfach.

Neutrinos bilden den einzigen gesicherten, kleinen und heißen Anteil der noch immer mysteriösen Dunklen Materie. Als Zeitzeugen der vergangenen 13,8 Milliarden Jahre haben Neutrinos nicht nur die gesamte Entwicklungsgeschichte des Universums seit seinen Anfängen begleitet, sondern dank ihrer kleinen, aber eben nicht verschwindenden Masse diese auch als „kosmische Architekten“ mit geprägt. Dieser prägnante Einfluss auf die Bildung großskaliger Strukturen im Universum erlaubt es, eine im Rahmen des kosmologischen Standardmodells  $\Lambda$ CDM gültige obere Grenze für die Summe aller Neutrinomassen von etwa  $0,12$  bis  $0,5 \text{ eV}/c^2$  abzuleiten (s. „Wege zur absoluten Neutrinomassen-Skala“, S. 118).

Doch auch andere astrophysikalische und terrestrische Quellen sorgen dafür, dass Neutrinos uns ständig und überall begegnen. Sie entstehen in fernen Supernova-Explosionen, in radioaktiven Prozessen im Erdinneren, in Kollisionen hochenergetischer kosmischer Teilchen in der Erdatmosphäre oder im Zerfall der Spaltprodukte in nuklearen Reaktoren. Vor allem aber entstehen sie bei den Fusionsprozessen im Innern der Sonne. Von dort erreichen jeden

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.*

#### INTERNET

KATRIN am KIT  
[www.katrin.kit.edu](http://www.katrin.kit.edu)

Video über Neutrinos und KATRIN  
<https://t1p.de/Video-KATRIN>



**Das Innere des Hauptspektrometertanks ist mit einer doppelagigen Drahtelektrode (etwa 23 000 Drähte) zur Untergrundabschirmung und Feinformung des elektrischen Feldes ausgekleidet. Außen umgibt den Tank ein „Hamsterkäfig“ aus Magnetspulen, um das Magnetfeld passgenau einzustellen und zudem den Einfluss des Erdmagnetfeldes kompensieren zu können.**

Quadratmeter der Erdoberfläche pro Sekunde an die 65 Milliarden Neutrinos – und dies ganz unabhängig davon, ob es bei uns gerade Tag oder Nacht ist, denn sie durchqueren auch den Erdkörper nahezu ungehindert. Wie kommt es also, dass sich die Neutrinos im Alltag nicht bemerkbar machen?

Gerade dieser Umstand hat den Neutrinos auch den Beinamen „Geisterteilchen“ eingebracht. Er lässt sich mit einem Blick auf die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit erklären: Neutrinos tragen im Gegensatz zu den übrigen Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik keinerlei elektrische, magnetische oder Farbladung. Sie nehmen nur an der schwachen Wechselwirkung und aufgrund ihrer Masse auch an der Gravitation teil. Im Vergleich zu anderen physikalischen Prozessen ist die Wechselwirkungsrate in Materie dadurch verschwindend gering. Um ein Beispiel zu nennen: In dem etwa 50 000 Tonnen umfassenden Wassertank des Super-Kamiokande-Detektors in Japan werden ungefähr 10 bis 15 atmosphärische und solare Neutrinos pro Tag registriert. Dies macht Neutrinos einerseits zu den perfekten Informationsboten aus ansonsten unzugänglichen Regionen, wie dem Inneren von Sternen oder den Prozessen in astrophysikalischen Beschleunigern. Andererseits bedingt diese „Wechselwirkungsabneigung“ aber auch, dass ihre experimentelle Erforschung einen enormen instru-

mentellen Aufwand verlangt und die Forschung sich geistreiche Tricks einfallen lassen muss, um den Geheimnissen der scheuen Teilchen auf die Spur zu kommen.

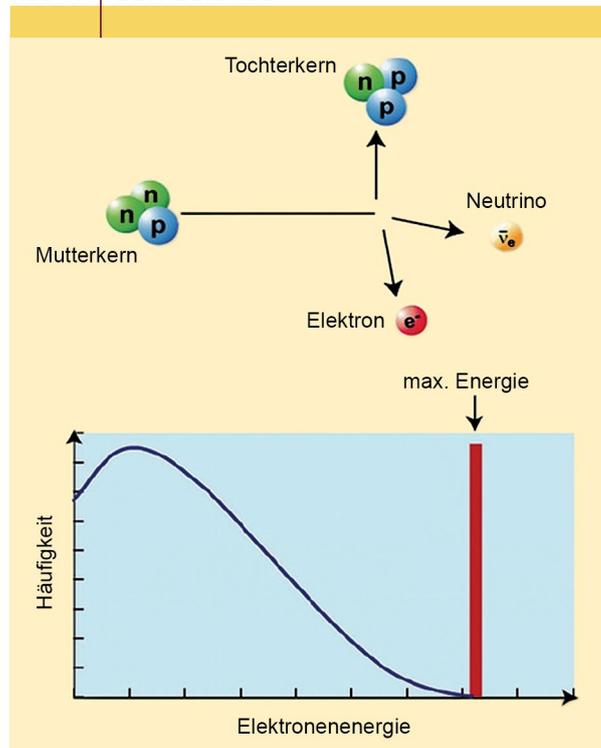
### Rätselhafte Neutrinos

Bis heute sind denn auch viele Charakteristika der Neutrinos rätselhaft geblieben – darunter die grundlegenden Fragen, ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind und welche Ruhemasse sie besitzen.

Im Standardmodell der Elementarteilchen galten Neutrinos jahrzehntelang als masselos. Weder waren belastbare experimentelle Anzeichen für eine von Null verschiedene Ruhemasse vorhanden, noch konnte das Standardmodell in seiner etablierten Form eine schlüssige Erklärung für die Erzeugung einer Masse liefern. Erst vor etwas mehr als 20 Jahren setzte sich die Erkenntnis durch, dass Neutrinos doch eine Masse besitzen müssen. Dieses bahnbrechende Ergebnis, welches das lange bestehende Rätsel der „verschwindenden Sonnenneutrinos“ löste (Physik in unserer Zeit **2002**, 33(6), 250) und die Unvollständigkeit des sonst so überaus erfolgreichen Standardmodells bewies (siehe „Teilchen auf der Wippe“, S. 120), wurde mit dem Physik-Nobelpreis des Jahres 2015 bedacht (Physik in unserer Zeit **2015**, 46(6), 272). Hierbei wurde die Beobachtung, dass Neutrinos im Flug chameleonartig ihre Erscheinungsform

ändern (Neutrino-Oszillation) ausgenutzt, um aus quantenmechanischen Überlegungen auf die Existenz von Neutrinomassen zu schließen (Physik in unserer Zeit 2015, 46(1), 18).

ABB. 1 | BETAZERFALL



**Schema des Betazerfalls von Tritium. Das Energiespektrum der emittierten Elektronen ist kontinuierlich bis zu einer maximalen Energie von circa 18,6 keV.**

Heute gehen wir davon aus, dass es drei Neutrinoarten  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  gibt, die als Mischung sogenannter Massen-Eigenzustände  $\nu_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) existieren. Die Frequenz der beobachteten Oszillation hängt von den relativen quadratischen Massendifferenzen  $\Delta m^2_{ij} = m^2_j - m^2_i$  dieser Eigenwerte ab. Experimente zu Neutrino-Oszillationen ermöglichen also eine recht genaue Aussage über die *relativen* Massendifferenzen. Diese Messungen zeigen, dass mindestens zwei der drei Neutrinomassen größer sind als etwa  $8 \cdot 10^{-3} \text{ eV}/c^2$ . Jedoch können Oszillationsexperimente prinzipiell keine Aussage über die *absolute* Massenskala machen. Dies erfordert grundlegend andere Zugangswege, die heute, basierend auf den Methoden der beobachtenden Kosmologie und der Kern- und Teilchenphysik, parallel und intensiv verfolgt werden (siehe „Wege zur absoluten Neutrinomassen-Skala“, S. 118).

### Neutrinos auf der Waage

Die direkteste, von Modellannahmen unabhängige Methode betrachtet die Kinematik von Prozessen der schwachen Wechselwirkung, an denen Neutrinos beteiligt sind – so wie etwa dem Betazerfall. Hierbei wandelt sich im Atomkern ein Neutron in ein Proton um. Aufgrund der Ladungserhaltung entstehen bei diesem Prozess ein negativ geladenes Elektron und ein Elektron-Antineutrino. Beide teilen sich die gesamte Zerfallsenergie, wobei sie unterschiedlich große kinetische Energien mitbekommen können. Elektronen und Neutrinos weisen also über viele Zerfälle summiert jeweils ein kontinuierliches Energiespektrum auf. Am Ende der Neutrino-Energieverteilung besitzen diese Teilchen keine kinetische Energie mehr, weswegen ein hier von null verschiedener Wert die Ruhemasse angibt.

Um die geforderte Genauigkeit erreichen zu können, bedienen sich die Wissenschaftler eines Tricks: Vermessen wird nicht das Neutrino selbst, sondern das Elektron. Das Prinzip beruht auf der Energie-Impuls-Erhaltung nach Einstein. Wenn bei einem bestimmten Kernumwandlungsprozess stets eine feste Menge Energie freigesetzt wird, kann man aus der fehlenden Energie der Elektronen in der Nähe des spektralen Endpunktes an der Obergrenze der Elektronenenergien auf die Masse des gleichzeitig emittierten Neutrinos schließen. Genauer betrachtet bewirkt die Neutrinomasse eine minutiöse Verformung des Spektrums der Elektronen (Abbildung 1). Doch auch diese Messung stellt eine gewaltige Herausforderung dar, denn die Kleinheit der Neutrinomasse erfordert eine enorme experimentelle Präzision: Bisherige Versuche in Mainz und Troitsk [1, 2] haben eine Neutrinomassen-Obergrenze von  $2 \text{ eV}/c^2$  ergeben. Das ist etwa ein 250 000stel der Elektronenmasse – des nächst leichtesten Elementarteilchens.

Für die kinematische Messmethode ist das superschwere Wasserstoffisotop Tritium ideal, da es bei einer sehr niedrigen Endpunktsenergie von etwa 18,6 keV gleichzeitig eine kurze Halbwertszeit von 12,3 Jahren sowie eine einfache Kern- und Atomstruktur besitzt. Sein Betazerfall lautet:

### WEGE ZUR ABSOLUTEN NEUTRINOMASSEN-SKALA

Aus den Experimenten zu Neutrino-Oszillation können nur relative Differenzen der Neutrinomassenquadrate abgeleitet werden. Die absolute Skala der Neutrinomassen blieb trotz zahlreicher Messversuche bislang verborgen. Die Forschung verfolgt heute drei komplementäre Wege, um dieses Rätsel zu lösen. Neben der im Artikel beschriebenen direkten kinematischen Suche sind dies:

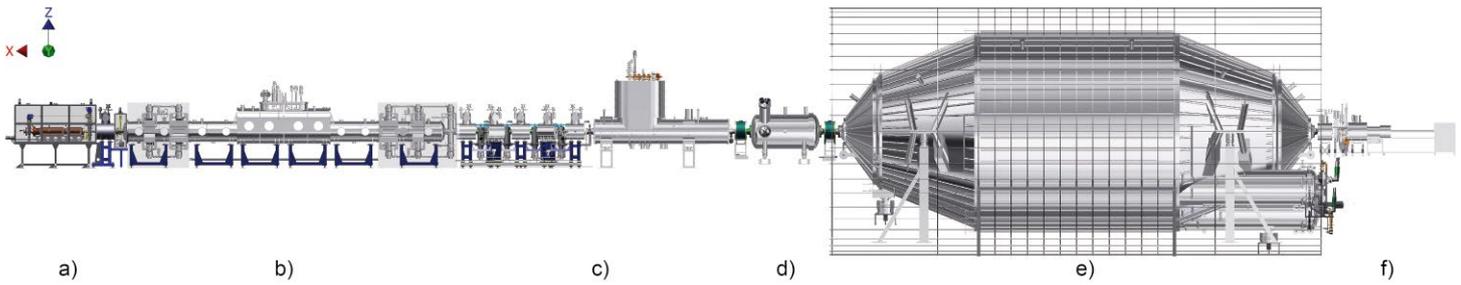
#### Beobachtende Kosmologie

Die immer präzisere Bestimmung kosmologischer Parameter, beispielsweise aus der Vermessung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes, ermöglichte eine Eingrenzung der Massensumme aller drei Neutrinoarten auf etwa  $0,12$  bis  $0,5 \text{ eV}/c^2$ . Diese Abschätzung beruht jedoch auf der Gültigkeit des kosmologischen Standardmodells ( $\Lambda$ CDM-Modell) mit seinen wesentlichen Bestandteilen

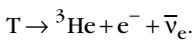
der Dunklen Materie und Dunklen Energie, über die wir sehr wenig wissen.

#### Neutrinoloser Doppelbeta-Zerfall

Die Kernumwandlung durch zwei simultan stattfindende Betazerfälle ist extrem selten, mit Halbwertszeiten viele Größenordnungen jenseits des Alters des Universums. Bisher wurde nur die Umwandlungsart mit Emission zweier Neutrinos beobachtet. Es gibt aber möglicherweise auch die Variante ohne Aussendung von Neutrinos. Dieser neutrinolose Doppelbeta-Zerfall kann dann eintreten, wenn Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind. Unter der Annahme dieser sogenannten Majorana-Natur der Neutrinos lässt sich heute eine Obergrenze der Neutrinomasse von ca.  $0,1$  bis  $0,4 \text{ eV}/c^2$  ableiten. Experimente mit verbesserter Empfindlichkeit laufen oder sind in Vorbereitung.



**Abb. 2** KATRIN besteht aus folgenden Bauelementen: a) Kalibrations- und Monitoringsystem, b) Tritiumquelle, c) Elektronentransport- und Pumpstrecke, d) und e) Vor- und Hauptspektrometer, f) Detektor. Die etwa 70 m lange Anlage erstreckt sich über mehrere Gebäude.



Deswegen verwendet das KATRIN-Experiment diesen Betastrahler. Die beiden wichtigsten Komponenten von KATRIN sind die gasförmige, fensterlose molekulare Tritiumquelle ( $T_2$ ) sowie ein riesiges Spektrometer. Durch diese Kombination soll KATRIN eine Neutrinomassen-Empfindlichkeit von  $0,2 \text{ eV}/c^2$  erreichen.

### Das Karlsruher Tritium Neutrinoexperiment

Was zunächst nach einer Verbesserung um nur einen Faktor 10 klingt, bedeutet in Wirklichkeit eine Empfindlichkeitssteigerung um einen Faktor 100, da die Messgröße das Neutrinomassenquadrat ist. Um diese Steigerung der Empfindlichkeit um ganze zwei Größenordnungen zu erreichen, wurde die gesamte Apparatur bis an die Grenze des Machbaren ausgelegt (Abbildung 2).

Tritiumgas wird in der Mitte eines 10 m langen und 90 mm durchmessenden Strahlrohrs eingelassen, wo es zu beiden Seiten frei ausströmt und mittels kräftiger Turbomolekularpumpen wieder ausgepumpt, gereinigt und erneut eingelassen wird. Dadurch entsteht eine Gassäule mit einer Belegungszahldichte von  $5 \cdot 10^{17}$  Tritiummolekülen/cm<sup>2</sup>, resultierend in einer Gesamtzerfallsrate von  $10^{11}$  pro Sekunde. Die aus dem Betazerfall des Tritiums resultierenden Elektronen werden durch supraleitende Magnete in ein Tandem aus Vor- und Hauptspektrometer geführt. Auf dem Weg dorthin reduzieren differentielle und kryogene Pumpstrecken sowie geometrische Schikanen den Tritiumfluss um 14 Größenordnungen, sodass dieser bis zum Eingang der Spektrometersektion effektiv eliminiert wird.

Beide Spektrometer arbeiten nach dem Prinzip der magnetisch-adiabatischen Kollimation mit elektrostatischem Filter (MAC-E): Ein elektrostatisches Retardierungspotential lässt nur Elektronen oberhalb einer Filterenergie durch. Die magnetischen Linsen im Ein- und Ausgang des Spektrometers kollimieren die Impulse bezüglich der Magnetfeldrichtung so, dass praktisch die gesamte Energie der einfliegenden Elektronen elektrostatisch analysiert werden kann. Damit stellt ein MAC-E-Filter einen sehr scharfen energetischen Hochpassfilter dar, der für die Untersuchung des Tritium-Betaspektrums am Endpunkt optimal ist, weil die übrigen Elektronen für die Analyse des Endpunktes des

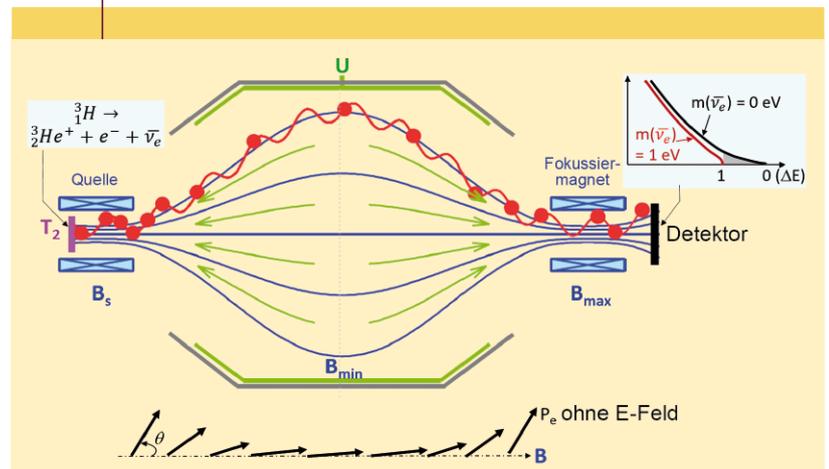
Energiespektrums nicht relevant sind. Außerdem werden die Elektronen in alle Richtungen emittiert und müssen deswegen in Richtung des Detektors umgelenkt werden. Die Energieauflösung des MAC-E-Filters wird primär von den Dimensionen (genauer: dem Durchmesser) des Instruments bestimmt (Abbildung 3). Diesen Zusammenhang erkennt man durch die Betrachtung von zwei wichtigen Erhaltungsgrößen:

1) Das magnetische Bahnmoment  $\mu$  gibt das Verhältnis aus der Zyklotron-Energie  $E_{\perp}$  - entsprechend der Energie des Elektrons transversal zu der Magnetfeldlinie - und der lokalen Magnetfeldstärke  $B$  an und ist nach dem Drehimpulserhaltungssatz entlang der Bahn des Elektrons konstant:

$$\mu = E_{\perp} / B = \text{const.}$$

Die in der Zyklotron-Komponente der Elektronenbahn gespeicherte Energie ist der Messung durch den MAC-E-Filter nicht zugänglich und muss daher minimiert werden, um

**ABB. 3** | MAC-E-FILTER



**Elektronen aus der Quelle bewegen sich im Magnetfeld auf Spiralbahnen durch das Spektrometer. Aufgrund der magnetisch-adiabatischen Kollimation im sich abschwächenden Magnetfeld werden die isotrop verteilten Impulse in Vorwärtsrichtung gebündelt, sodass die Transversalkomponente des Impulses minimiert und damit die Energieaufteilung der Elektronen optimiert wird. Zur Suche nach dem winzigen Signal der Neutrinomasse am Endpunkt des Betaspektrums ist eine hohe Energieauflösung und damit eine besonders gute Kollimation der Impulse essenziell.**

eine möglichst genaue Messung durchzuführen. Hierzu dient der Magnetfeldgradient: Vom Eingang des Spektrometers bis zur Energiefilterung in der Analysierebene fällt die Magnetfeldstärke  $B$  um etwa einen Faktor 20000 ab. Dadurch verringert sich im gleichen Maße die Zyklotron-Energiekomponente, die fast vollständig in analysierbare Energie  $E_{||}$  parallel zum Magnetfeld umgewandelt wird (Abbildung 3 unten). Man spricht davon, dass die Impulse der isotrop emittierten Elektronen durch das Spektrometer kollimiert werden.

2) Zusätzlich ist der magnetische Fluss erhalten:

$$\phi = \int B \, dA = \text{const.}$$



**Abb. 4** Die letzten Kilometer auf dem Transport des Hauptspektrometer-Tanks durch Eggenstein-Leopoldshafen begleiteten im November 2006 bis zu 30 000 neugierige Besucher. Zuvor hatte der 200 Tonnen schwere Koloss bereits einen Seeweg von mehr als 8 000 km hinter sich gebracht, um vom bayerischen Deggen-dorf rund um Europa herum bis ins badische Karlsruhe zu gelangen.

## TEILCHEN AUF DER WIPPE

Neutrinos sind mit vielen Größenordnungen Abstand die unangefochtenen Leichtgewichte unter den Elementarteilchen. Dies legt die Erwartung nahe, dass derart kleine Massen nicht durch eine normale Kopplung an das Higgs-Teilchen entstehen, sondern einem anderen Mechanismus der Massenerzeugung folgen.

Da Neutrinos elektrisch neutral sind, könnten sie mit ihren Antiteilchen identisch, also Majorana-Teilchen, sein. Dann könnte der Mechanismus einer sogenannten Wippe (englisch: Seesaw) für die Winzigkeit

der Neutrinomassen sorgen: Hierzu braucht es als „Gegengewicht“ zu den sehr geringen Massen der bekannten Neutrinos hypothetische neue Neutrinozustände mit einer extrem hohen neuen Teilchenmassenskala, die wir mit Beschleunigern nicht erreichen und somit nicht direkt beobachten können.

Doch egal, welcher Mechanismus am Ende tatsächlich dahintersteckt, eines ist jetzt schon klar: Dass Neutrinos überhaupt eine Masse erhalten, ist unser erstes handfestes Indiz für Physik jenseits des Standardmodells.

Ein starker Abfall der Magnetfeldstärke um einen Faktor 20000 bedeutet also, dass sich die von den Magnetfeldlinien durchsetzte Querschnittsfläche – der magnetische Flußschlauch – im Bauch des Spektrometers dramatisch aufweitet und in der Analysierebene schließlich einen Durchmesser von knapp 10 m einnimmt, obwohl der Elektronenstrahl im starken Magnetfeld der Quelle nur wenige Zentimeter weit ist. Damit wird anschaulich, weshalb das hochauflösende Hauptspektrometer solche gigantischen Ausmaße besitzt (Aufmacherfoto auf S. 117).

Die Aufgabe des vorgeschalteten kleineren Vorspektrometers ist es, den niederenergetischen Anteil der Elektronen abzuschneiden, da dieser keine Information über die Neutrinomasse trägt. Das hochauflösende Hauptspektrometer von den Ausmaßen eines Mehrfamilienhauses mit 10 m Durchmesser und knapp 24 m Länge (Abbildung 4) dient mit seiner Energieauflösung im Elektronvoltbereich zur genauen Spektroskopie der höchstenergetischen Elektronen. Die vom Hauptspektrometer durchgelassenen Elektronen werden in einem segmentierten Siliziumdetektor nachgewiesen. Das Betaspektrum wird abgetastet, indem die Retardierungsspannung des Hauptspektrometers in feinen Schritten variiert wird.

Das klingt nach einer vergleichsweise einfachen Messaufgabe, allerdings sind die Genauigkeitsanforderungen enorm. Um sich die daraus resultierenden experimentellen Schwierigkeiten zu verdeutlichen, kann man die Signalrate betrachten: So entfällt von hundert Millionen in der Quelle erzeugten Elektronen statistisch gesehen gerade mal ein einziges auf das etwa 40 eV breite Messfenster unterhalb des Endpunktes, das für KATRIN interessant ist. Dies bedingt die geforderte Quellstärke und, damit einhergehend, auch die enorme Größe der Apparatur. Auch die notwendige Präzision der Energiemessung ist extrem hoch. Übersehene oder nicht erkannte Systematiken im Spektrum führen schnell zu einem fehlerhaften Wert des rekonstruierten Neutrinomassenquadrates.

So wurde in den 1980er Jahren vermeintlich eine Neutrinomasse gefunden, weil man die inelastische Streuung in einer Tritiumfestkörperquelle überschätzt hatte. In den 1990er Jahren wurden von verschiedenen Experimenten negative Neutrinomassenquadrate berichtet, weil man zunächst Energieverluste oder die elektronische Anregung des Tochtermoleküls nach dem Zerfall unterschätzt hatte, bis rigorose Untersuchungen der systematischen Effekte der jeweiligen Tritiumquellen entweder die zusätzlichen Prozesse genau quantifizierten oder es erlaubten, sie zu unterbinden. Deshalb besitzt KATRIN ein komplexes Kalibrations- und Monitorsystem, sodass sämtliche Systematiken, wie die Quellstärke, die inelastische Streuung von Elektronen in der Tritiumquelle, die Retardierungsspannung oder Austrittsarbeiten der Apparaturflächen mit höchster Präzision *in situ* gemessen werden können.

In vielen technologischen Aspekten mussten zunächst intensive Entwicklungsarbeiten geleistet werden, um das ehrgeizige Projekt überhaupt realisieren zu können. So

stellt das Hauptspektrometer den größten bisher gebauten Ultrahochvakuumbehälter der Welt mit einem Restgasdruck von  $10^{-11}$  mbar dar – eine Leere von einer Qualität, wie sie sonst nur auf der Mondoberfläche herrscht. Für den 16 m langen und etwa 25 t schweren Quillkryostaten mussten neuartige kryogene Konzepte her, um die Temperatur des Tritiumgases auf dem Niveau von Millikelvin beim Betriebspunkt von 30 K stabil zu halten und die Menge des Gases im Strahlrohr exakt zu regeln. Die Präzisions-Hochspannungsanlage, welche die Energieskala der Neutrinowaage bestimmt, liefert eine Genauigkeit von weniger als ein Millionstel, was bei einer Spannung von 18600 V einer Empfindlichkeit von 10 mV entspricht. Die gesamte Strahlführung ist mit supraleitenden Magneten in spezieller Konfiguration ausgestattet, in großen Kryostaten oder als Einzelmagnete mit geometrischen Schikanen dazwischen. Speziell für die Anforderungen von KATRIN wurde ein Simulationspaket für die Präzisionsberechnung elektrischer und magnetischer Felder entwickelt, das inzwischen auch für andere Experimente zum Standard geworden ist. Um den Anteil von Tritium und der anderen Wasserstoffisotope in der Quelle genau zu bestimmen, wurde eine schnelle, bis auf ein Promille genaue Anlage zur Laser-Raman-Spektroskopie entwickelt, die nun auch in der Fusionstechnologie eingesetzt wird. Dies sind nur einige von vielen Beispielen, in denen das Experiment als Technologietreiber Maßstäbe setzt.

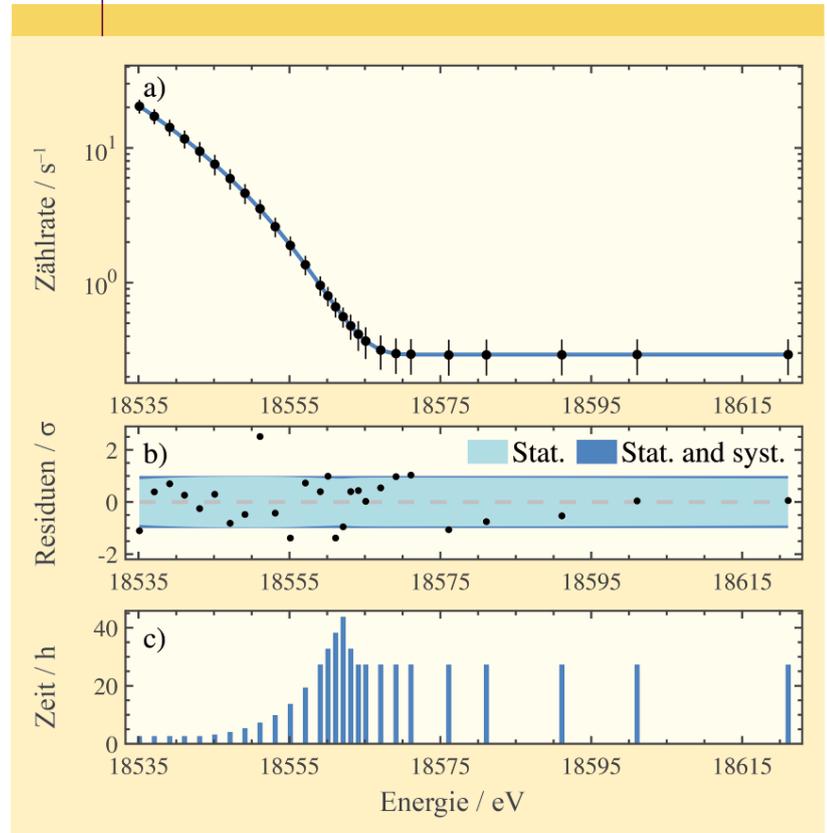
### Erste Ergebnisse nach wenigen Wochen

Bei der Einweihung von KATRIN im Juni 2018 wurde noch mit einer geringen Tritiummenge über wenige Tage die Stabilität der Tritiumquelle demonstriert [3]. Nach intensiven weiteren Inbetriebnahmemessungen und gezielten Untersuchungen zu den systematischen Unsicherheiten konnte im Frühjahr 2019 die Aktivität schrittweise auf das 50-Fache erhöht und der erste Science Run gestartet werden.

Alles lief wie am Schnürchen, die entscheidenden Quellparameter Temperatur, Einlassdruck und Tritiumanteil waren wie geplant stabil, ebenso die Hochspannungsversorgung der Spektrometer. Mehrere Teams arbeiteten parallel und unabhängig an der Datenanalyse. Als nur wenige Monate nach Abschluss der Messkampagne im Sommer 2019 die Box mit den Ergebnissen schließlich geöffnet wurde, war die Aufregung riesengroß. Das Ergebnis: Das Neutrinomassenquadrat ist innerhalb der Messunsicherheit mit Null verträglich, der Fit des Zerfallspektrums (Abbildung 5) beschreibt die Messdaten sehr gut, und der rekonstruierte Endpunkt des Spektrums – ein wichtiger Kontrollparameter für das Verständnis der Daten – ist mit der in Penning-Fallen gemessenen Massendifferenz von  $^3\text{He}$  und Tritium kompatibel.

KATRIN hat gezeigt, dass es von dem komplexen Messaufbau über die Stabilität der Langzeit-Datennahme bis hin in die Feinheiten der Analyse funktioniert. Eine Neutrinomasse wurde mit diesen ersten vier Wochen an Daten noch nicht gefunden, was auch nicht zu erwarten war. Aus den

ABB. 5 | BETASPEKTRUM



**Ergebnis der ersten Neutrinomassen-Kampagne: a) gemessenes Betaspektrum im Bereich von 40 eV unterhalb und 50 eV oberhalb des Endpunktes bei circa 18574 eV mit Anpassung des Modells an die Daten. Die Fehlerbalken sind zur besseren Sichtbarkeit um einen Faktor 50 vergrößert. b) Abweichung der Messwerte von der Modellanpassung, c) Messzeitverteilung pro Energiebereich (aus [4]).**

Daten kann eine Obergrenze für die Neutrinomasse von  $1,1 \text{ eV}/c^2$  gezogen werden – ein Wert, der KATRIN gleich an die Weltspitze der direkten Neutrinomassen-Experimente katapultiert und den seit vielen Jahren bestehenden Bestwert um fast einen Faktor zwei verbessert [4].

### Wohin die Reise geht

Zur Zeit nimmt KATRIN weiter Daten und hat dabei die Quellaktivität fast auf den Zielwert erhöht. Etwas Sorgen bereitet noch die zu hohe Untergrundrate. Bislang wurde eine Untergrundunterdrückung um einen Faktor 10 erreicht. Zusätzliche Ideen für die noch ausstehende weitere Größenordnung gibt es bereits; diese sollen in den nächsten Jahren umgesetzt werden.

Für die endgültige Empfindlichkeit von  $0,2 \text{ eV}/c^2$  werden insgesamt tausend Tage an Daten benötigt. Um diese zu erreichen, hat KATRIN weitere fünf bis sieben Jahre vor sich; ein verbessertes Zwischenergebnis wird noch 2020 erwartet. Dann wird sich zeigen, welche spannenden neuen Fragen das Ergebnis der Messung aufwerfen wird: Eine Evidenz für Neutrinomassen im Bereich der angestrebten Empfindlichkeit könnte das heute gängige Paradigma des

kosmologischen Standardmodells in Bedrängnis bringen oder Fragen bei der Interpretation der kosmologischen Daten aufwerfen.

Doch selbst wenn sich die Neutrinomasse der Bestimmung mit KATRIN entziehen sollte, können aus der stark verbesserten neuen Obergrenze wertvolle Eingrenzungen der theoretischen Modelle zur Neutrinomassen-Erzeugung abgeleitet werden. Welches Ergebnis auch immer die Zukunft bringen wird: Bereits heute arbeiten die Neutrinoforscher an neuen und noch genaueren Messkonzepten, um entweder ein bestehendes Resultat mit einer unabhängigen Methode überprüfen oder eben die Empfindlichkeit weiter verbessern zu können.

### Zusammenfassung

*Auch 90 Jahre nach ihrer „Erfindung“ und über 60 Jahre nach ihrem experimentellen Nachweis geben uns die Neutrinos zahlreiche Rätsel auf. So konnte bisher ihre Masse nicht bestimmt werden, obgleich bereits lange bekannt ist, dass Neutrinos mit Abstand die leichtesten Elementarteilchen sind. Der Mechanismus, durch den die Neutrinos ihre winzige Masse erhalten, bleibt bisher ebenfalls im Dunkeln. Mit dem KATRIN-Experiment in Karlsruhe, einer hochkomplexen technischen Anlage, ist es nun in einer ersten Messphase gelungen, den erlaubten Bereich der Neutrinomasse um einen Faktor zwei stärker einzugrenzen als bisher. Durch die in den kommenden Jahren bevorstehende weitere Datennahme hofft die Forschung, der Neutrinomasse endlich auf die Spur zu kommen und damit wichtige Fragen in der Kosmologie und der Teilchenphysik zu beantworten.*

### Stichwörter

Neutrinomasse, KATRIN-Experiment, Neutrino-Oszillation, Standardmodell der Elementarteilchenphysik

### Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen: KIT.

### Literatur

- [1] C. Kraus et al., Eur. Phys. J. C **2005**, 40, 447.
- [2] V. N. Aseev et al., Phys. Rev. D **2011**, 84, 112003.
- [3] KATRIN Coll., arXiv:1909.06069, zur Veröffentlichung angenommen bei Eur. Phys. J. C.
- [4] KATRIN Coll., Phys. Rev. Lett. **2019**, 123, 221802.

## Die Autoren



Guido Drexlin ist seit 2006 Professor für Teilchenastrophysik am KIT. Als Projektleiter von KATRIN ist er verantwortlich für den Aufbau und den Betrieb des wissenschaftlichen Großgeräts der Helmholtz Gemeinschaft und zusammen mit Christian Weinheimer einer der wissenschaftlichen Sprecher von KATRIN. Neutrinos und die Erforschung ihrer Eigenschaften sowie wie die direkte Suche nach Dunkler Materie stehen im Zentrum seines wissenschaftlichen Interesses (Foto: T. Schwerdt).



Kathrin Valerius promovierte nach ihrem Physikstudium an der Universität Bonn in Münster über das KATRIN-Hauptspektrometer. Auf Forschungsstellen in Erlangen und Paris erforschte sie mit den Gammateleskopen von H.E.S.S. das hochenergetische Universum. Von 2014 bis 2020 leitete sie eine Nachwuchsgruppe bei KATRIN am KIT, wo sie nun eine Professur mit den Schwerpunkten Neutrinos und Dunkle Materie innehat (Foto: A. Bramsiepe, KIT).



Christian Weinheimer hat an der Universität Mainz studiert. Nach Stationen als CERN-Fellow und einer Professur an der Universität Bonn ist er seit 2004 Professor an der Universität Münster. Sein wissenschaftliches Hauptinteresse gilt den Neutrinoeigenschaften und der Dunklen Materie. Wie Guido Drexlin ist er einer der beiden wissenschaftlichen Sprecher von KATRIN (Foto: B. von Puttkamer, KIT).

### Anschriften

Prof. Dr. Guido Drexlin, Prof. Dr. Kathrin Valerius, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Kernphysik und Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe. [guido.drexlin@kit.edu](mailto:guido.drexlin@kit.edu), [kathrin.valerius@kit.edu](mailto:kathrin.valerius@kit.edu)

Prof. Dr. Christian Weinheimer, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Kernphysik, Wilhelm-Klemm-Straße 9, D-48149 Münster. [weinheimer@uni-muenster.de](mailto:weinheimer@uni-muenster.de)