

Die KATRIN-Tritiumquelle im Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)

B. Bornschein, L. Dörr, M. Glugla, O. Kazachenko, ITP

Einleitung

Eine der Schlüsselkomponenten von KATRIN ist die fensterlose gasförmige Tritiumquelle (WGTS). Sie wird im Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) aufgebaut und muss hohen Anforderungen bezüglich Quellstärke, Quellstabilität und Tritiumisotopenreinheit genügen. Der vorliegende Beitrag erklärt die wesentlichen Komponenten der Tritiumquelle und ihre Einbettung in die geschlossenen Tritiumkreisläufe von KATRIN, die einerseits die stabilisierte Tritiumgaseinspeisung ermöglichen („Inner Loop“) und andererseits die Bereitstellung von Tritium hoher Reinheit garantieren soll („Outer Loop“). Abb. 1 zeigt die im Beitrag diskutierten Teilbereiche in ihrem funktionalen Zusammenhang inklusive der Schnittstellen

zur Infrastruktur des TLK. Eine Gesamtübersicht über KATRIN ist in [1] gegeben.

Das Prinzip der gasförmigen Tritiumquelle

KATRIN benötigt eine Tritiumquelle hoher isotoner Reinheit, hoher Stärke und großer Stabilität. Eine zusätzliche Bedingung ist, dass das Betaspektrum des Tritiums nur wenig durch Wechselwirkungen der Zerfallselektronen mit anderer Materie innerhalb der Quelle gestört wird. KATRIN wird aus diesem Grund eine fensterlose gasförmige Quelle aus molekularem Tritium verwendet.

Abb. 2 zeigt das Prinzip der gasförmigen Tritiumquelle, die im Wesentlichen aus einem an beiden

Enden offenen Rohr besteht, in das molekulares Tritium eingespeist wird. Die im Inneren des Rohres durch den Zerfall des Tritiums freiwerdenden Elektronen werden dann mit Hilfe von starken Magnetfeldern (3,6 T) ins Spektrometer geleitet, wo ihre kinetische Energie analysiert wird. Da das Rohr an seinen Enden offen ist, um einen Energieverlust der Elektronen beim Austritt aus dem Quellrohr zu vermeiden, kann auch das Tritium aus dem Rohr strömen. Mit Hilfe von differentiellen Pumpstrecken wird es abgepumpt (= Abfolge aus Pumpe – Rohrstück – Pumpe – Rohrstück usw.) und so verhindert, dass es ins Spektrometer gelangt. Durch das gleichzeitige Einspeisen und Abpumpen des Tritiumgases erhält man im Endeffekt eine stationäre Gassäu-

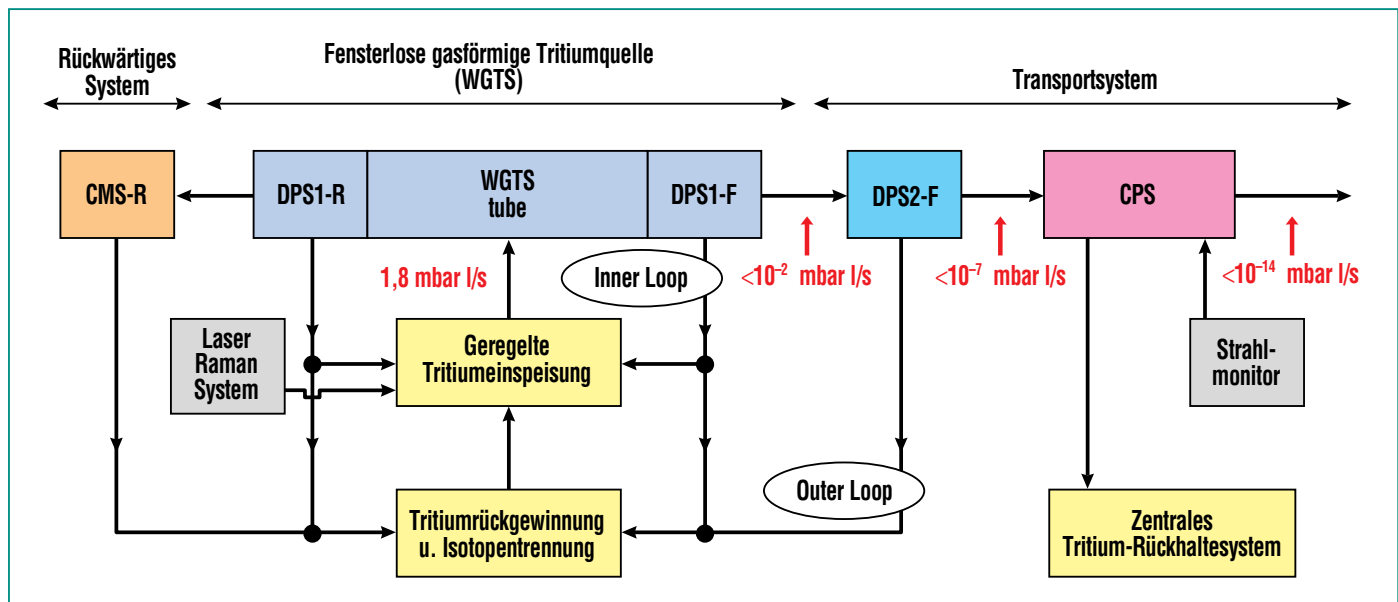


Abb. 1: Blockbild der KATRIN-Tritiumquelle und ihrer Schnittstellen zur Infrastruktur des Tritiumlabors Karlsruhe. Neben der fensterlosen gasförmigen Tritiumquelle befinden sich auf der Strahlachse des KATRIN-Experimentes noch das so genannte Kalibrations- und Monitoringsystem (CMS-R) im rückwärtigen Teil und das Transportsystem im vorderen Teil (Richtung Spektrometer). Das Transportsystem hat die Aufgabe, die Tritiumzerfallselektronen ins Spektrometer zu leiten und gleichzeitig über Pumpen den Tritiumgasfluss ins Vorspektrometer um mehr als 14 Größenordnungen zu reduzieren. Zusätzlich dargestellt sind die Tritiumkreisläufe (Inner Loop, Outer Loop), die für eine geregelte Tritiumgaseinspeisung sorgen und die Tritiumreinheit über dem gewünschten Wert von 95 % halten.

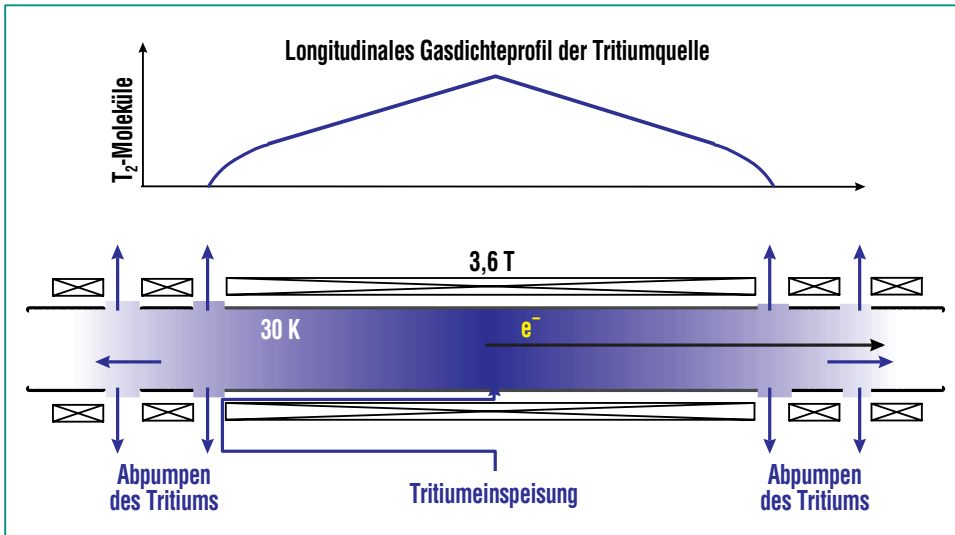


Abb. 2: Prinzip der fensterlosen gasförmigen Tritiumquelle. Tritiumgas wird auf halber Länge eines zu beiden Seiten offenen Rohres eingespeist und an den Enden des Rohres wieder abgepumpt. Dadurch entsteht ein longitudinales Gasdichteprofil (oben), das an den Enden des Rohres minimal ist. Das Rohr ist von supraleitenden Magneten umgeben, deren Magnetfeld die Elektronen des im Rohr zerfallenden Tritiums führen, und zwar ins Transportsystem (Richtung Spektrometer) und ins Kalibrationssystem.

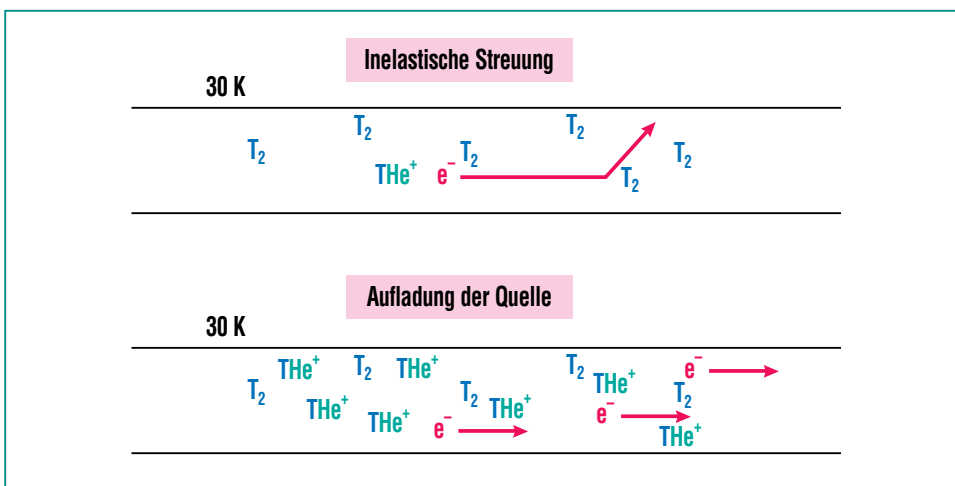


Abb. 3: Beispiele für systematische Effekte in der Quelle. Bei der inelastischen Streuung der Elektronen an den Tritiummolekülen verlieren diese Elektronen Energie. Dieser Energieverlust muss möglichst genau bekannt sein, da er in den systematischen Fehler für die Bestimmung der Neutrinomasse eingeht. Das Gleiche gilt für den Aufladeeffekt, der dadurch zustande kommt, dass die negativ geladenen leichten Elektronen mit großer Geschwindigkeit das Rohr verlassen (weniger als 1 Mikrosekunde), während die positiv geladenen Ionen deutlich länger brauchen (im Bereich von Sekunden). Das Ergebnis ist eine positive Aufladung der Quelle, die zu einer Potenzialverschiebung der startenden Elektronen führt.

lencichte im Rohr und damit eine definierte Tritiumquellstärke für KATRIN. Die Betriebstemperatur der Quelle liegt bei 30 K, um einerseits den Gasleitwert des Rohres so gering wie möglich zu halten und andererseits eine Kondensation von Tritium auf den Rohrwänden zu verhindern (bei noch tieferen Temperaturen wäre das der Fall).

Die Anzahl der Tritiummoleküle in der WGTS ist gegeben durch das Produkt aus Quellfläche, Säulendichte (Moleküle/cm²) und Tritiumreinheit (dimensionslose Größe) und sollte prinzipiell so groß wie möglich sein. Das kann durch Verwendung von reinem Tritium erreicht werden, und indem sowohl der Durchmesser des Quellrohres als auch die Gassäulendichte groß gewählt wird. Hier gibt es jedoch technische und physikalische Grenzen:

Der Durchmesser des Quellrohres (und damit die Quellfläche) ist wegen der magnetischen Führung der Elektronen ins Spektrometer limitiert: Bei einem vorgegebenen Spektrometerdurchmesser von 10 m und einer angestrebten Energieauflösung von 1 eV erhält man einen Quelldurchmesser von knapp 9 cm.

Elektronen aus dem Tritiumbeta-zerfall können inelastisch an Tritiummolekülen im Quellrohr gestreut werden und dabei Energie verlieren (siehe Abb. 3). Dies ist ein zu systematischen Fehlern führender, unerwünschter Prozess, um den das gemessene Betaspektrum korrigiert werden muss; die Korrektur, ist nicht beliebig perfekt und umso größer, je höher der Anteil der gestreuten Elektronen ist – letzterer ist

wiederum abhängig von der Gassäulendichte: je größer die Dichte, um so größer der Anteil der gestreuten Elektronen. Es gibt also einen Kompromiss zwischen erwünschter hoher Gassäulendichte und einem möglichst niedrigen Anteil an gestreuten Elektronen. Die für KATRIN optimale Gassäulendichte beträgt 5×10^{17} Moleküle/cm². Damit ergibt sich ein Tritiuminventar von ca. $1,1 \times 10^{11}$ Bq (3 Ci) im Rohr.

Etwa 90 % der systematischen Unsicherheiten des KATRIN-Experimentes haben ihren Ursprung entweder in physikalischen Effekten in der Tritiumquelle oder in der technischen Realisierung der Tritiumquelle. Um die projektierte Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ für die Neutrinomasse erreichen zu können [1], müssen sowohl die Tritiumreinheit als auch die Gassäulendichte mit einer Genauigkeit von 0,2 % bekannt sein. Da eine permanente Messung dieser Größen technisch kaum machbar ist, wird ein anderer Weg der Realisierung beschritten: Tritiumreinheit und Gassäulendichte werden auf einem Niveau von 0,1 % stabilisiert und lediglich periodisch gemessen. Die geforderte Stabilität von 0,1 % ist die größte Herausforderung an die KATRIN-Tritiumquelle und hat ihr Design und das der angeschlossenen Tritiumkreisläufe wesentlich beeinflusst.

Die KATRIN-WGTS wird mit zwei differenziellen Pumpstrecken bei 30 K betrieben. Das gesamte Magnetkryostatsystem hat eine Länge von 16 m und wird momentan bei einem industriellen Partner gefertigt. Die Quellrohrtemperatur und ihre geforderte Stabilität von 0,1 % kann nur durch ein speziel-

les Kühlsystem erreicht werden, das auf Ankopplung an ein mit siedendem Neon gefülltes Kühlrohr beruht (siehe auch [2] in diesem Heft).

Die stabilisierte Tritiumgaseinspeisung („Inner Loop“)

Um die von KATRIN geforderte Gassäulendichte im Quellrohr aufrechterhalten zu können, benötigt man eine Tritiumeinspeiserate von 1,8 mbar l/s (Bezugstemperatur 273 K). Dies entspricht einem Durchsatz von $1,7 \times 10^{11}$ Bq/s oder 40 g Tritium pro Tag. KATRIN beabsichtigt pro Jahr 3 bis 5 Messphasen mit zu jeweils 60 Tagen durchzuführen (Durchsatz bis zu 12 kg Tritium pro Jahr!), um insgesamt 3 Jahre reine Messzeit zu akkumulieren. Das TLK mit einem derzeitigen Inventar von 20 g Tritium ist das einzige wissenschaftliche Labor, das sowohl die behördliche Genehmigung als auch die Infrastruktur besitzt, um die Anforderungen von KATRIN zu erfüllen.

Abb. 4 zeigt das Prinzipfließbild der gasförmigen Tritiumquelle und des dazugehörigen Inneren Tritiumkreislaufes, der dafür sorgt, dass das an den Enden des Quellrohres austretende Tritium geregelt wieder eingespeist wird.

Die Stabilisierung der Gassäulendichte auf 0,1% in einem dynamischen System, wie es die WGTS darstellt, verlangt neben der Stabilisierung der Quellrohrtemperatur auch die Stabilisierung des Tritiumgasdurchsatzes auf 0,1%. Da eine direkte Kontrolle des Gasflusses mittels eines Gasflussreglers in dem gewünschten Bereich

technisch nicht machbar ist, wird die Stabilisierung über eine Kapillare mit festem Leitwert und einem druckgeregelten Tritiumpufferbehälter realisiert. Das entspricht dem Einstellen eines elektrischen Stromes mit Hilfe eines Widerstandes und einer Spannungsquelle. Das Konzept ist im Rahmen des Testexperimentes TILO (Test of Inner Loop) erfolgreich mit Protium (= leichtestes Wasserstoffisotop) und Deuterium erprobt worden [3].

Bereitstellung von Tritium hoher Reinheit („Outer Loop“)

Die KATRIN-Quelle soll bei einer Tritiumreinheit von 95 % (stabilisiert auf 0,1 %, Rest Protium und Deuterium) mit weniger als 1 ppm Verunreinigungen in Form von Nichtwasserstoffisotopen, wie z. B. Methan, Stickstoff und Helium betrieben werden. Dieses Ziel soll durch zwei Maßnahmen erreicht werden:

Im Inneren Tritiumkreislauf wird ein Palladium-Silber-Membranfilter („Permeator“,) installiert, der nur für Wasserstoffisotope durchlässig ist (Abb. 4).

Um die hohe Tritiumkonzentration von 95 % in der WGTS sicherzustellen, wird ein bestimmter Anteil des zirkulierenden Gases (ca. 1 %) aus dem Inneren Tritiumkreislauf entnommen und zur Aufarbeitung in den sogenannten Äußeren Tritiumkreislauf von KATRIN geschickt. Der innere Kreislauf wird parallel durch Tritiumgas der gewünschten Reinheit aus einem Vorratsbehälter wieder aufgefüllt. Das Gesamtinventar der KATRIN-Triti-

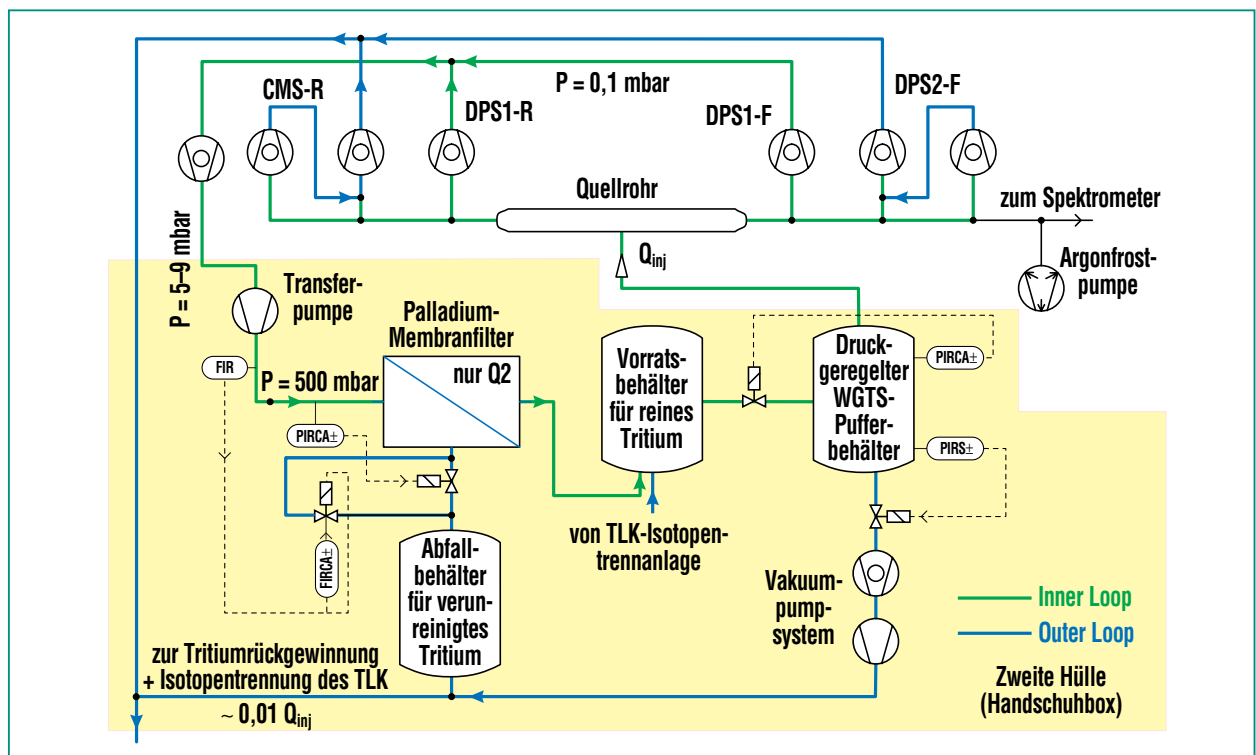


Abb.4: Prinzipfließbild der gasförmigen Tritiumquelle und des dazugehörigen Inneren Tritiumkreislaufes. Der Innere Tritiumkreislauf ist für die geregelte Tritiumgaseinspeisung in die WGTS zuständig. Zusätzlich zu sehen sind Teile des sogenannten Äußeren Tritiumkreislaufes, der die Reinigung des Tritiums ermöglicht und fast die gesamte Infrastruktur des TLK involviert (siehe auch Abb. 5).

umkreisläufe beträgt bis zu zehn Gramm Tritium.

Der Äußere Tritiumkreislauf gewährleistet eine stationäre Reinheit des Tritiums in der WGTS und umfasst nahezu die gesamte Infrastruktur des TLK. Abb. 5 zeigt in einer vereinfachten Darstellung wie KATRIN in den schon vorhandenen geschlossenen Tritiumkreislauf des TLK [4] inkorporiert wird. KATRIN profitiert hier von den Ergebnissen im Programm FUSION – der Gründungsauftrag des TLK (Inbetriebnahme 1994) war die Entwicklung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufes für die Kernfusion. Dieser Kreislauf ist in den Hauptkomponenten in den letzten 20 Jahren entwickelt, aufgebaut und betrie-

ben worden und umfasst mit sieben Handschuhboxen und den dazugehörigen Tritiumrückhaltesystemen mehr als 70 % des Tritiumlabors.

Im Folgenden werden die einzelnen Stationen (siehe Abb. 5 und 6) kurz beschrieben:

Tritiumlager:

Tritium wird chemisch gebunden gespeichert. Der zugrunde liegende Prozess ist die Bildung von Metallhydriden durch reversible Reaktion der Wasserstoffisotope mit Metallen: Im TLK wird aus abgereichertem Uran und Tritium unter Freisetzung von Wärme ein festes Metallhydrid gebildet; zur Freisetzung des Gases muss das Uran lediglich erwärmt werden. Diese Art

der Wasserstoffspeicherung bietet den Vorteil, dass das Gas drucklos gelagert wird. Die maximale Speicherkapazität des Tritiumlagers im TLK beträgt 30 g Tritium.

Tritiumrückgewinnung:

In einem 3-Stufenprozess (CAPER-Prozess), der im TLK entwickelt und realisiert worden ist, werden zunächst die molekularen Wasserstoffisotope (H_2 , D_2 , T_2 , HD, HT, DT) über einen Palladium/Silber-Membranfilter zu mehr als 95 % abgetrennt. In der zweiten Stufe werden tritiierte Kohlenwasserstoffe und Wasser durch eine Kombination von katalytischen Reaktionen mit der Permeation durch Palladium/Silber-Membranen detritiiert und so auch chemisch gebunde-

nes Tritium zurückgewonnen. In einem letzten Schritt werden unter Verwendung einer PERMCAT genannten Komponente über Isoto-

penaustausch mit Protium im Gegenstrom auch geringste Restmengen an Tritium zurück gewonnen [5].

Wasserstoffisotopentrennung:

Das TLK ist mit einer gaschromatografischen Isotopentrennanlage (ISS) ausgerüstet. Der Hauptbestandteil dieser Anlage ist eine Aluminium und Palladium (20 %) enthaltende Säule, welche bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck betrieben und nach dem Prinzip der Verdrängungschromatographie funktioniert. Reine Wasserstoffisotope werden in die ISS eingespeist und in H_2 , D_2 und T_2 separiert. Eine Tritiumreinheit von bis zu 99 % kann erreicht werden und wird später bei KATRIN mittels der Laser-Ramanspektroskopie überwacht.

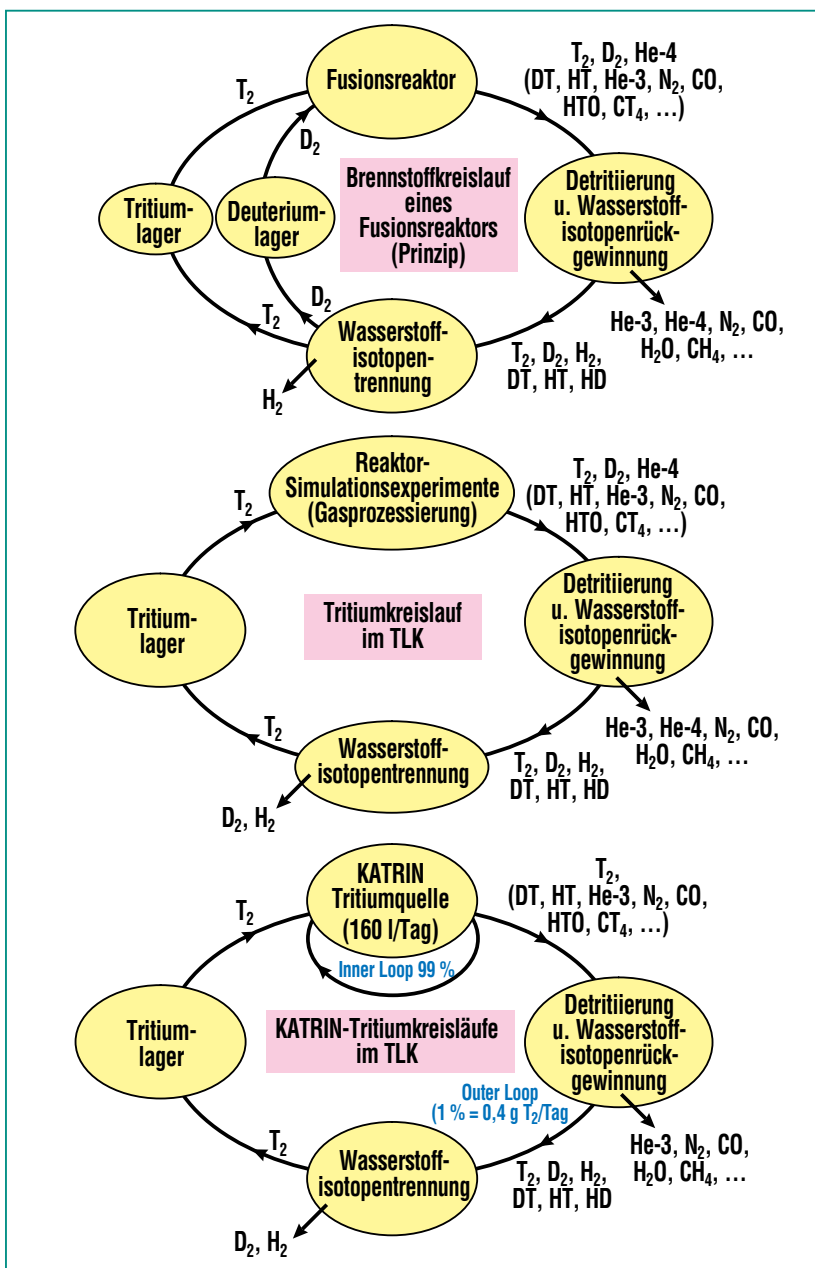


Abb. 5: Geschlossene Tritiumkreisläufe in der Kernfusion, im TLK und bei KATRIN. Dargestellt sind die vier Hauptstationen eines solchen Kreislaufes, der im TLK seit mehr als zehn Jahren realisiert ist und der eine notwendige Voraussetzung für den Betrieb von KATRIN ist. Das TLK ist weltweit das einzige Tritiumlabor, das einen solchen Kreislauf besitzt.

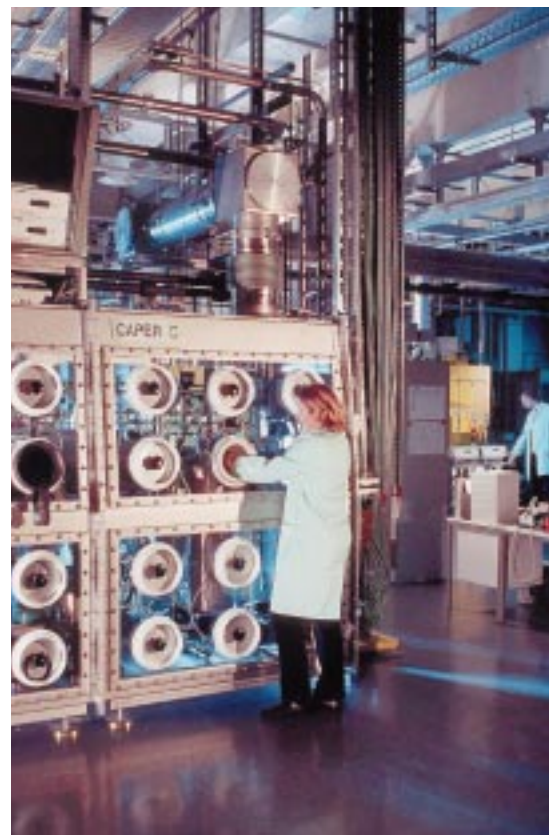


Abb. 6: Tritiumrückgewinnung. Zu sehen ist die CAPER-Anlage im TLK, die in einem 3-Stufen-Prozess die anfallenden Gase detritiiert und die Wasserstoffisotope zurückgewinnt.

Zusammenfassung

Die Tritiumquelle ist eine der Schlüsselkomponenten des KATRIN-Experiments, die sehr hohen Anforderungen genügen muss. Im Vergleich mit bisher verwendeten Quellen in kleineren Experimenten hat die fensterlose gasförmige Tritiumquelle (WGTS) von KATRIN eine um zwei Größenordnungen höhere Intensität. Nur die am Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) verfügbare, weltweit einzigartige Infrastruktur erlaubt den Betrieb einer solchen Quelle mit der geforderten Stabilität von 0,1 % und bei Tritiumkonzentrationen >95%. Eine Sensitivität von 0,2 eV/c² für die Neutrinomasse verlangt bei gegebener WGTS-Geometrie eine Einspeiserate von 40 g Tritium pro Tag. Auf der Basis der Anforderungen wird im TLK ein geschlossener Tritiumkreislauf für KATRIN konzipiert und aufgebaut.

Danksagung

Die KATRIN-Tritiumquelle mitsamt der dazugehörenden Tritiumkreisläufe ist hochkomplex und erfordert das Spezialwissen vieler Mitarbeiter aus dem Forschungszentrum Karlsruhe. Ohne die Unterstützung der Kollegen vom ITP, IK, IPE, BTI und HAP wäre die Quelle nicht zu realisieren. Die Autoren danken ebenfalls den externen Kollaborationspartnern für ihre Unterstützung.

Literatur

- [1] G. Drexlin, Ch. Weinheimer, *Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe*
- [2] M. Noe, R. Gehring, F. Glueck, S. Grohmann, H. Neumann, *Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe*
- [3] B. Borschein, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 57 (2006) 38
- [4] L. Dörr, U. Besserer, M. Glugla, G. Hellriegel, P. Schäfer, J. Wendel, *Fusion Sci. Technol.*, 48 (2005) 262
- [5] B. Borschein, M. Glugla, K. Günther, T.L. Le, K.H. Simon, S. Welte, *Fusion Sci. Technol.* 48 (2005) 11