

# Der Brennstoffkreislauf von Fusionsreaktoren

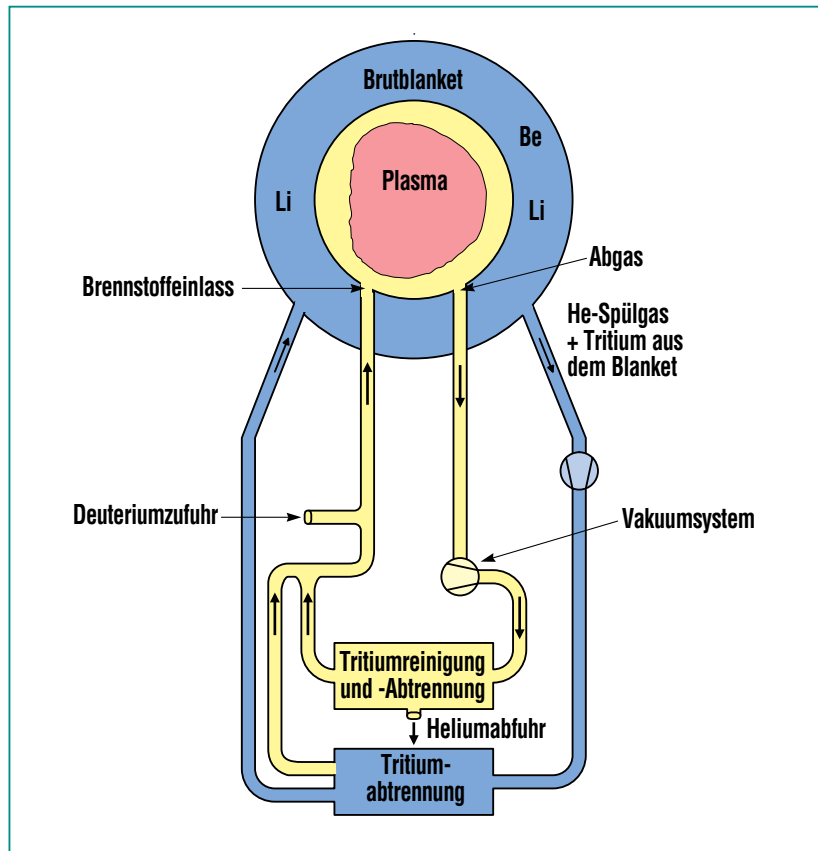
I. R. Cristescu, L. Dörr, M. Glugla, HVT; Ch. Day, A. Mack, ITP; S. Gross, FUSION

## Einleitung

In kommenden Fusionsreaktoren werden die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium als Brennstoffe verwendet. Um die Reaktionsbedingungen zur Energieerzeugung innerhalb des Plasmas aufrecht zu erhalten, muss das bei der Fusionsreaktion gebildete Helium bereits bei geringen Konzentrationen kontinuierlich entfernt werden. Daher besteht das Abgas eines Tokamaks typisch aus etwa 95% unverbranntem Deuterium und Tritium, begleitet von der Helium-„Asche“ sowie von durch Plasma-Wand-Wechselwirkungen gebildeten Verunreinigungen. Der hohe Anteil an unverbrauchtem Brennstoff fordert einen inneren Brennstoffkreislauf (Abb. 1), in welchem die Begleitgase abtrennt und das gewonnene Gemisch aus reinem Deuterium und Tritium direkt zurückgeführt wird.

Während verbrauchtes Deuterium von außen ersetzt wird, muss das radioaktive Tritium in einem Brutblanket durch Einfang von Fusionsneutronen aus Lithium mit Beryllium als Neutronenvervielfacher gewonnen werden. In diesem äußeren Brennstoffkreislauf wird das Tritium mit Hilfe des Spülgases Helium aus dem Blanket extrahiert, vom Helium abgetrennt und in den inneren Brennstoffkreislauf eingeleitet. Letztlich werden Deuterium und Tritium in äquimolarem Verhältnis wieder in das Plasma des Fusionsreaktors eingespeist.

Ausführliche Kenntnisse und Erfahrungen im Bereich der fusions-spezifischen Vakuumtechnik und der Tritiumtechnologie sind unab-



**Abb. 1: Der Brennstoffkreislauf eines Fusionsreaktors gliedert sich in einen inneren und äußeren Teil, wobei im inneren Teil (gelb) die Brenngase Deuterium und Tritium sowie das Fusionsprodukt Helium prozessiert werden, während im äußeren Teil (blau) das Tritium erbrütet und abgetrennt wird.**

dingbare Voraussetzungen für den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb eines Fusionsreaktors. Innerhalb des Forschungszentrum Karlsruhe beschäftigen sich speziell das Institut für Technische Physik (ITP) und das Tritiumlabor Karlsruhe der Hauptabteilung Versuchstechnik (HVT-TLK) seit mehr als einer Dekade mit diesen Technologien. Beide Arbeitsgruppen können bis heute nicht nur auf umfangreiche F+E-Ergebnisse verweisen, sondern testen bereits prototypische Komponenten. Die Resultate der Arbeiten haben längst auch Eingang in de-

taillierte Auslegungsstudien für den geplanten Experimentalreaktor ITER gefunden [1, 2].

## Systeme und Komponenten des inneren Brennstoffkreislaufs von ITER

Im Gegensatz zu zukünftigen, energieliefernden Fusionskraftwerken wird der geplante Experimentalreaktor ITER nicht über ein vollständiges Brutblanket verfügen – allerdings soll die Technologie des Brütens von Tritium im Rahmen des Einsatzes von

kleineren Testblankets unmittelbar weiterentwickelt werden. Ohne äußeren Brennstoffkreislauf mit ausreichender Kapazität muss das Tritium für den ITER-Betrieb von außen bereitgestellt werden. Betrachtet man den verbleibenden inneren Brennstoffkreislauf (Abb. 2), so lassen sich drei Systeme unterscheiden: die Brennstoffeinspeisung, das Pumpsystem des Torus und die Tritiumanlage. Insbesondere die Komponenten der beiden letztgenannten Systeme stehen im Mittelpunkt der Arbeiten des Forschungszentrums.

Das Pumpsystem des Torus besteht aus zwei Untersystemen, dem Vorvakuumssystem und dem Hochvakuumssystem. Bei der

Auswahl der Hochvakuumumpen sind neben dem hohen erforderlichen Saugvermögen erschwerende Randbedingungen am Einbauort der Pumpen zu berücksichtigen. Dort herrschen hohe Magnetfelder, die den Einsatz schnell laufender Rotoren verbieten, weil sie sich durch induzierte Wirbelströme unzulässig erwärmen würden. Organische Materialien, wie Schmiermittel, Dichtungsmaterialien oder elektrische Isolierungen, können im prozessgasexponierten Teil der Pumpen nicht verwendet werden, da sie gegenüber Tritium und der vorherrschenden Neutronenstrahlung nicht resistent sind. Die Pumpen müssen auch unter mechanischen Erschütterungen, die von Plasmaabbrüchen aus-

gelöst werden, störungsfrei arbeiten. Da für all diese Anforderungen keine handelsüblichen Vakuumpumpen verfügbar sind, wurden im Forschungszentrum spezielle Kryopumpen entwickelt. Deren Wirkungsweise beruht auf der Kondensation oder Adsorption der abzupumpenden Gase an extrem kalten Pumpflächen, bzw. an speziell präparierten Aktivkohlebeschichtungen [3]. Das Pumpsystem des ITER Torus besteht aus acht Kryopumpen, die über den Divertor und nachgeordnete Kanäle das Abgas des Torus sammeln. Während des Plasmabetriebs von ITER befindet sich ein Teil der Kryopumpen im Pumpmodus, während ein anderer Teil regeneriert wird. Zur Regenerierung wird

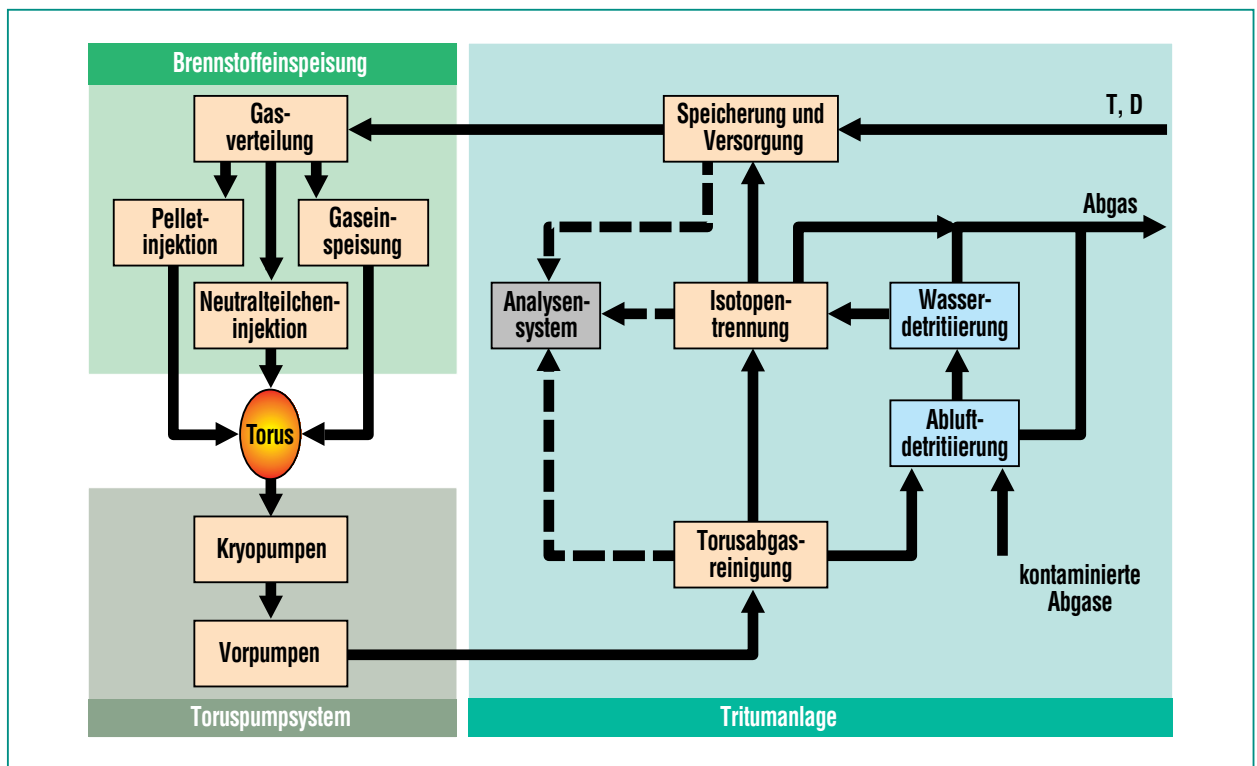


Abb. 2: Der innere Brennstoffkreislauf von ITER besteht neben der Brennstoffeinspeisung aus dem Pumpsystem des Torus und der Tritiumanlage mit einer Reihe von Komponenten zum Fördern und Prozessieren der Brennstoffe.

der Zugang zum Torus verschlossen, die auf den Pumpflächen abgeschiedenen Gase durch Aufheizen ausgetrieben und vom Vorpumpsystem abgesaugt. Die Vorpumpen sind weitgehend konventioneller Bauart, müssen aber für den Betrieb mit Tritium ertüchtigt werden, da die Verwendung ölgeschmierter oder gar ölgedichteter Pumpen in tritiumführenden Systemen nicht möglich ist.

Da Tritium im Plasma des Tokamak über D-D-Fusionsreaktionen gebildet wird, muss die Tritiumanlage schon während des anfänglichen Betriebs von ITER mit reinem Deuterium voll verfügbar sein. Tritiierte Gasströme mit unterschiedlichstem Ursprung müssen hier prozessiert und Deuterium und Tritium zu spezifizierten Massenflüssen und Isotopenzusammensetzungen für den Reaktorbetrieb bereitgestellt werden; Ab-

gase sind vor deren Abgabe vollständig zu detritieren. Die Tritiumanlage muss darüber hinaus für den Empfang externer Tritiumlieferungen und gegebenenfalls die Abgabe von überschüssigem Tritium ausgerüstet sein. Dabei müssen natürlich die ein- und ausgehenden Tritiummengen gemessen werden und das gesamte Tritiuminventar von ITER über entsprechende Analysen verfolgt werden. Übergeordnete Designkriterien für die Tritiumanlage sind z.B. die Minimierung des Tritiuminventars und die Minimierung von Abfallmengen.

Das System zur Speicherung und Versorgung hat die Aufgabe, Deuterium und Tritium bei einem Druck von 0,13 MPa und Flüssen bis herauf zu  $200 \text{ Pam}^3\text{s}^{-1}$  zu liefern. Andererseits werden hier die Wasserstoffisotope durch Speicherung als Metallhydrid sicher verwahrt. Die Isotopentrennung

basiert auf der kryogenen Destillation der Wasserstoffisotopengemische. Diese Anlage ist von besonderer sicherheitstechnischer Bedeutung, da sie ein hohes Tritiuminventar besitzt und die Hauptquelle für die Abgabe von Tritium in molekularer Form als HT in die Umgebung darstellt. Ein weiteres Kernstück der Tritiumanlage ist die Torus-Abgasreinigung, die dreistufig aufgebaut ist. Komplettiert wird die Tritiumanlage durch Systeme zur Detritierung von Abluft und von Wasser.

### Versuchseinrichtungen des Forschungszentrums

#### Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)

Da keine ausreichenden Erfahrungen im Umgang mit Deuterium und vor allem in der Handhabung des radioaktiven Isotops Tritium bestanden, wurde 1994 das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) in Betrieb genommen. Zentrale Aufgabe des TLK ist die Entwicklung von Technologien für den Brennstoffkreislauf von Fusionsreaktoren über Experimente mit signifikanten Konzentrationen an Tritium und bei Durchsätzen, die eine belastbare Skalierung auf die bei ITER zu prozessierenden Ströme erlauben [4]. Das TLK ist neben einem Labor in Japan weltweit einzigartig und besitzt eine Genehmigung für den Betrieb mit bis zu 40 g Tritium, was einer Aktivität von ca.  $1,5 \times 10^{16} \text{ Bq}$  ( $4 \times 10^5 \text{ Ci}$ ) entspricht. Auf einer Grundfläche von ca.  $1000 \text{ m}^2$  sind Handschuhboxen mit einem Gesamtvolumen von ca.  $125 \text{ m}^3$  untergebracht (Abb. 3). Kernstück



**Abb. 3: Blick in das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK): Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium wird in Anlagen prozessiert, die in Handschuhkästen als zweiter Barriere gegen den Austritt von Tritium untergebracht sind.**

der Infrastruktursysteme des TLK ist das zentrale Tritiumtransfersystem, welches über Rohrleitungen mit dem Tritiumlager, der Isotopentrennung, der Tritiummesstechnik und mit Experimentiersystemen verbunden ist. Das TLK hat einen geschlossenen Tritiumkreislauf. Die in Metallhydridspeichern aus Kanada jeweils angelieferte Menge Tritium (dort wird es aus dem schweren Wasser der CANDU Reaktoren extrahiert) wird im TLK zunächst über kalorimetrische Messungen (von der Zerfallswärme des Tritiums schließt man auf das Inventar) genau ermittelt und danach die Reinheit analysiert. Über das Transfersystem gelangt das Tritium dann in die Experimentieranlagen. Aktuell für Tests nicht mehr benötigtes oder nicht mehr brauchbares Tritium wird zur weiter unten beschriebenen Anlage

CAPER transferiert, dort gereinigt und über das Transfersystem an die chromatographisch arbeitende Isotopentrennung geleitet. Von dort wird reines Tritium dann entweder im Tritiumlager zwischengespeichert oder unmittelbar wieder den Experimenten zur Verfügung gestellt.

Handschuhkästen bilden die sekundäre Barriere im Konzept des TLK für den sicheren Einschluß von Tritium. Sie haben inertisierte Atmosphären und unterliegen im Hinblick auf die Konzentration an Tritium einer ständigen Überwachung. Alle Handschuhkästen sind individuell mit Tritiumrückhaltesystemen ausgestattet, die auf der katalytischen Oxidation von Tritium und tritiierten Verbindungen zu Wasser mit anschließender Absorption an Molsieben basieren. Das in den Rückhalte-

systemen des TLK anfallende tritiierte Wasser wird gesammelt und zukünftig in einer im TLK im Aufbau befindlichen Wasserdetritierung und kryogenen Isotopentrennung aufgearbeitet (Abb. 4).

Letztlich deckt das TLK mit seinen Experimenten und seinen Infrastruktursystemen nahezu die gesamte Tritiumtechnologie für ITER ab.

### Die Testanlage für Kryovakuumpumpen (TIMO)

Die Anlage TIMO (Test Facility for ITER Model Pump) dient der Untersuchung des Betriebsverhaltens einer Modellkryopumpe, die, im Maßstab 1:2 verkleinert, der ITER-Toruspumpe weitgehend entspricht (Abb. 5). Es können komplette Pumpzyklen (Abpumpen und anschließendes Regenerieren) mit ITER-relevanten Gas-

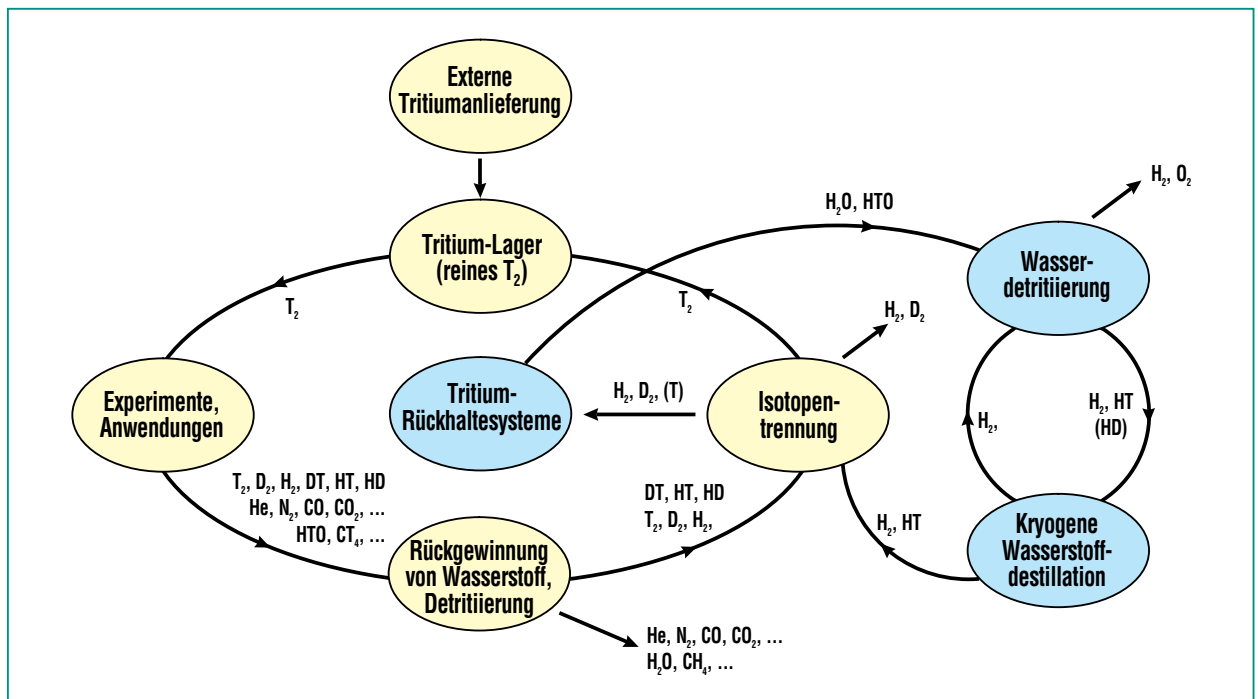
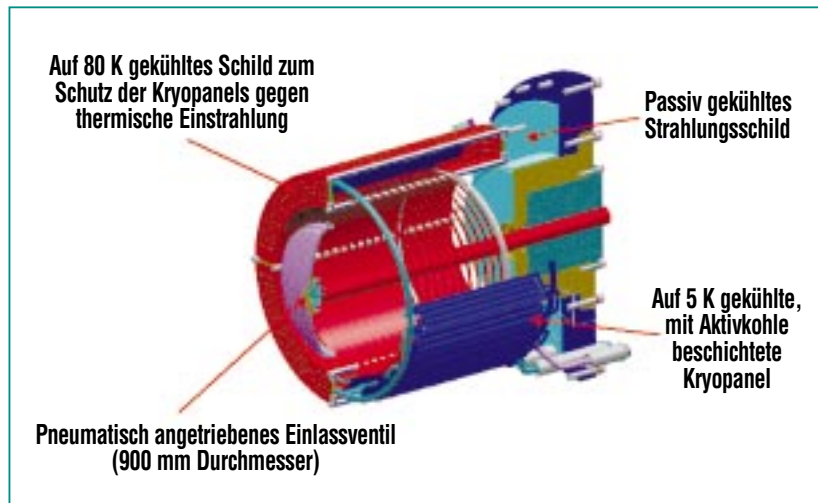


Abb. 4: Der geschlossene Tritiumkreislauf des TLK mit der im Aufbau befindlichen Wasserdetritierung und kryogenen Destillation.

mischungen simuliert werden und die quantitative Bestimmung von Saugvermögen, Beladung, Enddruck, erforderlicher Regenerierungstemperatur etc. vorgenommen werden [2]. Der Betrieb mit Tritium ist in TIMO nicht möglich, dessen Einfluss wird durch ergänzende Versuche, z.B. in der Tritiumanlage von JET (Joint European Torus), ermittelt. Die Modellpumpe mit einer auf 16 Einzelflächen aufgeteilten Pumpfläche von 4 m<sup>2</sup> ist in einem Ultrahochvakuumbehälter untergebracht, über den die Einspeisung des zu pumpenden Gases erfolgt. Zur Regeneration sowie zum Drosseln des Durchsatzes bzw. des Druckniveaus dient ein pneumatisch angetriebenes Einlassventil. Die Versorgung der Pumpe mit kryogenen Medien erfolgt über zwei Kältekreisläufe mit 80 K kaltem Helium und 4,5 K kaltem Helium mit Hilfe der 2-kW-LINDE-Anlage des ITP. Superkritisches Helium wird über einen Kontrollkryostat geliefert, mit dem durch Zwischenspeicherung kurzfristig erhöhte Durchflüsse realisiert werden können. Gasförmiges Helium zur Versorgung der Abschirmung wird durch eine spezielle Anlage über Wärmeaustausch gegen flüssigen Stickstoff zur Verfügung gestellt.

### Exemplarische Ergebnisse

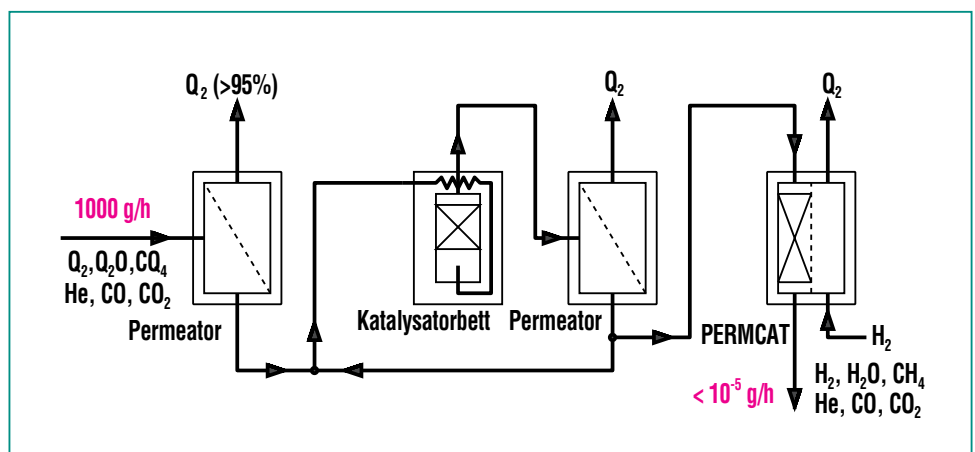
Während des Plasmabetriebs von ITER muss etwa 1000 g Tritium pro Stunde zugeführt werden. Angesichts des geringen Umsatzes im Reaktor entspricht dies auch dem Abgasstrom aus dem Tokamak und damit dem Eingangsfloss in die Tritiumanlage.



**Abb. 5:** Die Torusvakuumpumpe von ITER ist eine Kryopumpe, deren Funktionsweise auf der Kondensation bzw. Adsorption der zu pumpenden Gase an extrem kalten Oberflächen (5 K) beruht.

Gemäß den Anforderungen von ITER darf über das detritiierte Abgas nicht mehr als 10<sup>-5</sup> gh<sup>-1</sup> Tritium abgeführt werden. Daraus errechnet sich ein geforderter Dekontaminationsfaktor von 10<sup>8</sup> bezogen auf die Tritiumflüsse in der Reinigungsanlage für das Plasmaabgas. Ein derart hoher Wert der Tritiumabreicherung kann nur über mehrstufige Prozesse erzielt werden (Abb. 6). Im TLK ist hierzu das Reinigungsverfahren CAPER

entwickelt und experimentell getestet worden [5]. In einer ersten Stufe des Prozesses wird das unverbrannte und in molekularer Form vorliegende Deuterium und Tritium über sogenannte Permeatoren mit Palladium/Silber-Membranen abgetrennt. Experimentell wurden für diese Stufe unter ITER relevanten Bedingungen Dekontaminationsfaktoren zwischen 10 und 100 ermittelt. Damit kann mehr als 95% des unverbrauch-



**Abb. 6:** Die Torusabgasreinigung nutzt einen dreistufigen Prozess, der im Gesamtergebnis zu einem Dekontaminationsfaktor für Tritium von 10<sup>8</sup> führt.

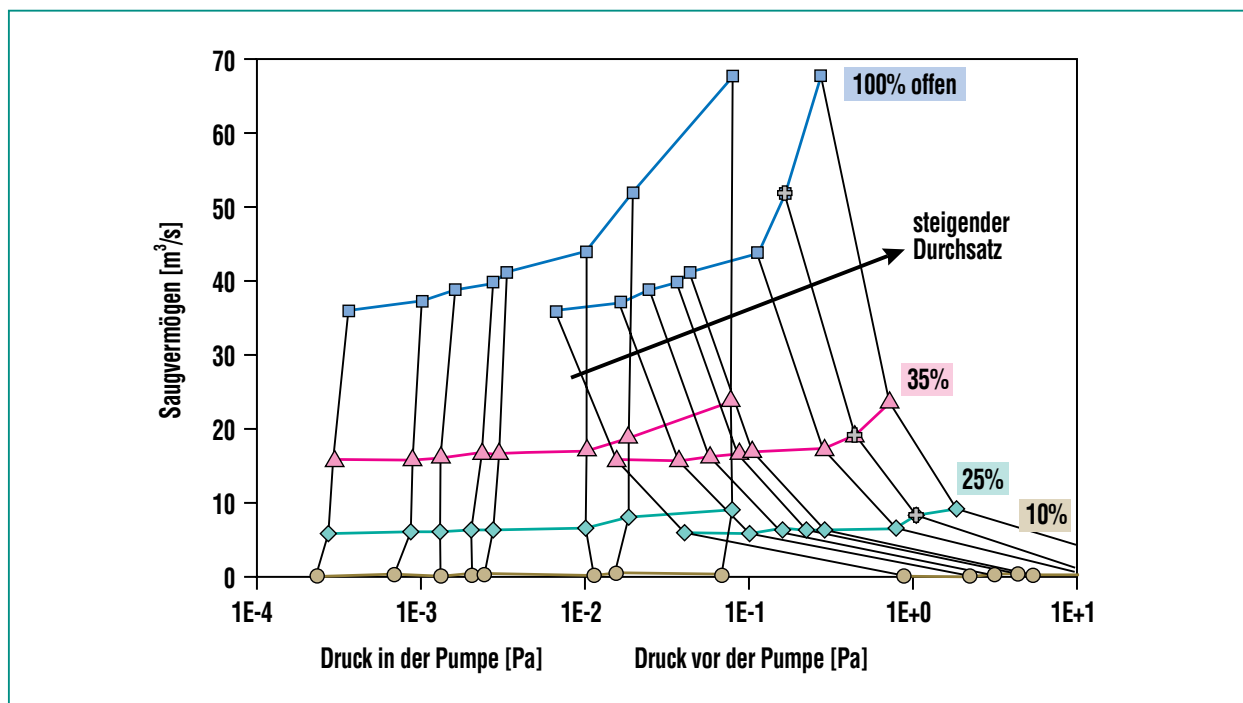


Abb. 7: Das Saugvermögen der Modellkryopumpe ist sowohl über dem Druck vor der Pumpe als auch in der Pumpe dargestellt. Das Parametergitter wird vom Öffnungsgrad des Drosselventils und dem Durchsatz gebildet.

ten Fusionsbrennstoffs unmittelbar in hochreiner Form zurückgewonnen und über die Isotopentrennung dem Reaktor erneut zur Verfügung gestellt werden. Durch Plasma-Wand-Wechselwirkungen im Tokamak werden deuterierte und tritiierte Kohlenwasserstoffe (z.B.  $CQ_4$ ,  $Q=H, D, T$ ) und Wasser ( $Q_2O$ ) gebildet, welche in der zweiten Stufe des CAPER-Prozesses durch eine Kombination von heterogen katalysierten Reaktionen mit der Permeation von Deuterium und Tritium durch Palladium/Silber-Membranen aufgearbeitet werden. Der experimentell ermittelte Dekontaminationsfaktor dieser Stufe ist typischerweise größer als 1000. In dem letzten Schritt zur Feinreinigung werden unter Verwendung einer PERMCAT genannten Kompo-

nente, in welcher die Technologie der Wasserstoffpermeation durch Membranen direkt mit heterogen katalysierten Reaktionen kombiniert ist, über Isotopenaustausch mit Protium ( $H$ , „leichter“ Wasserstoff) im Gegenstrom auch geringste Restmengen an Deuterium und Tritium zurückgewonnen. Der experimentell mit Tritium für die dritte Stufe nachgewiesene Dekontaminationsfaktor beträgt bis zu 200 000 [6]. Damit ist der Abgasreinigungsprozess als wesentliches Teilsystem für die Tritiumanlage von ITER prinzipiell bereits in der Praxis im TLK demonstriert und ein Dekontaminationsfaktor von  $10^8$  nachgewiesen.

Die Testkampagnen mit der Modellkryopumpe in der TIMO-Anlage haben den Nachweis erbracht, dass die gewählte Bauart den

ITER-Anforderungen entspricht und die Pumpe allen auftretenden Betriebsweisen von ITER mit den verschiedensten Gasgemischen gerecht wird. Darüber hinaus ergaben sich durch die Versuche Hinweise darauf, welche Detailverbesserungen für Auslegung und Bau der 1:1 Pumpe noch möglich sind [7]. In Abb. 7 ist beispielhaft das Saugvermögen von Kryopumpen für ein ITER-typisches Abgasgemisch dargestellt. Aufgezeigt sind die Zusammenhänge zwischen Saugvermögen, den Drücken am Einlass und im Innern der Pumpe, dem Öffnungsgrad des Pumpenventils (10% bis 100%) und dem Durchsatz. Dieses Parameterfeld deckt alle denkbaren Betriebsarten ab.

## Ausblick

Das Forschungszentrum Karlsruhe wird seine langjährigen Erfahrungen bei der Entwicklung der Schlüsselkomponenten des inneren Brennstoffkreislaufs in den anstehenden Bau des Experimentalreaktors ITER einbringen. Deshalb wurde eine Task Force „Brennstoffkreislauf“ etabliert, deren Aufgabe vom Design der Systeme und Komponenten bis hin zu Fertigungsunterlagen und zugehörigen Dokumentationen reicht. Der Bau wird zu gegebener Zeit durch kompetente

Industriepartner erfolgen. Voraussetzung dazu ist die Auswertung aller F+E-Ergebnisse unter qualitätssichernden Gesichtspunkten, sowie ein die Konstruktion von ITER begleitendes F+E-Programm, das der Absicherung der für die Auslegung benötigten Daten und der Modellierung der Systeme dienen soll. Da die Verantwortung für den bestimmungsgemäßen Betrieb der Tritiumanlage und der Vakuumsysteme von ITER während der gesamten Betriebszeit von ITER bei den Designern bleiben wird und nicht an die Industrie abgetreten

werden kann, wird die Fertigungsbegleitung unter dem Augenmerk der Qualitätskontrolle und -sicherung von höchster Wichtigkeit sein. Die Fachkompetenz ist auf wenige Personen beschränkt, so dass die bisher bereits gepflegte internationale Zusammenarbeit angesichts der Herausforderungen weiter intensiviert werden muss.

## Literatur

- [1] M. Glugla, R. Lässer, L. Dörr, D. Murdoch, R. Haange, H. Yoshida, *The Inner Deuterium/Tritium Fuel Cycle of ITER*, *Fusion Eng. Design* 69, 39 (2003).
- [2] H. Haas, Chr. Day, A. Mack, D.K. Murdoch, *Performance tests of the ITER model pump*, *Fusion Eng. Design* 69 (2003) 91-95.
- [3] Chr. Day, *The use of active carbons as cryosorbent*, *Colloids and Surfaces A* 187-188 (2001) 187-206.
- [4] R.D. Penzhorn, N. Bekris, P. Coad, L. Dörr, M. Friedrich, M. Glugla, A. Haigh, R. Lässer, A. Peacock, *Status and Research Progress at the Tritium Laboratory Karlsruhe*, *Fusion Eng. Design* 49 - 50, 753 (2000).
- [5] M. Glugla, L. Dörr, R. Lässer, D. K. Murdoch, H. Yoshida, *Recovery of Tritium from Different Sources by the ITER Tokamak Exhaust Processing System*, *Fusion Eng. Design* 61 - 62, 537 (2002).
- [6] B. Bornschein, M. Glugla, K. Günther, R. Lässer, T. L. Le, K. H. Simon, S. Welte, *Tritium Tests With a Technical Permeat for Final Clean-up of ITER Exhaust Gases*, *Fusion Eng. Design* 69, 51 (2003).
- [7] A. Mack, A. Antipenkov, J.C. Boissin, Chr. Day, S. Gross, H. Haas, V. Hauer, D.K. Murdoch, Th. Waldenmaier, *Design of the ITER torus cryopump*, *Fusion Eng. Design* 61-62 (2002) 611-615.