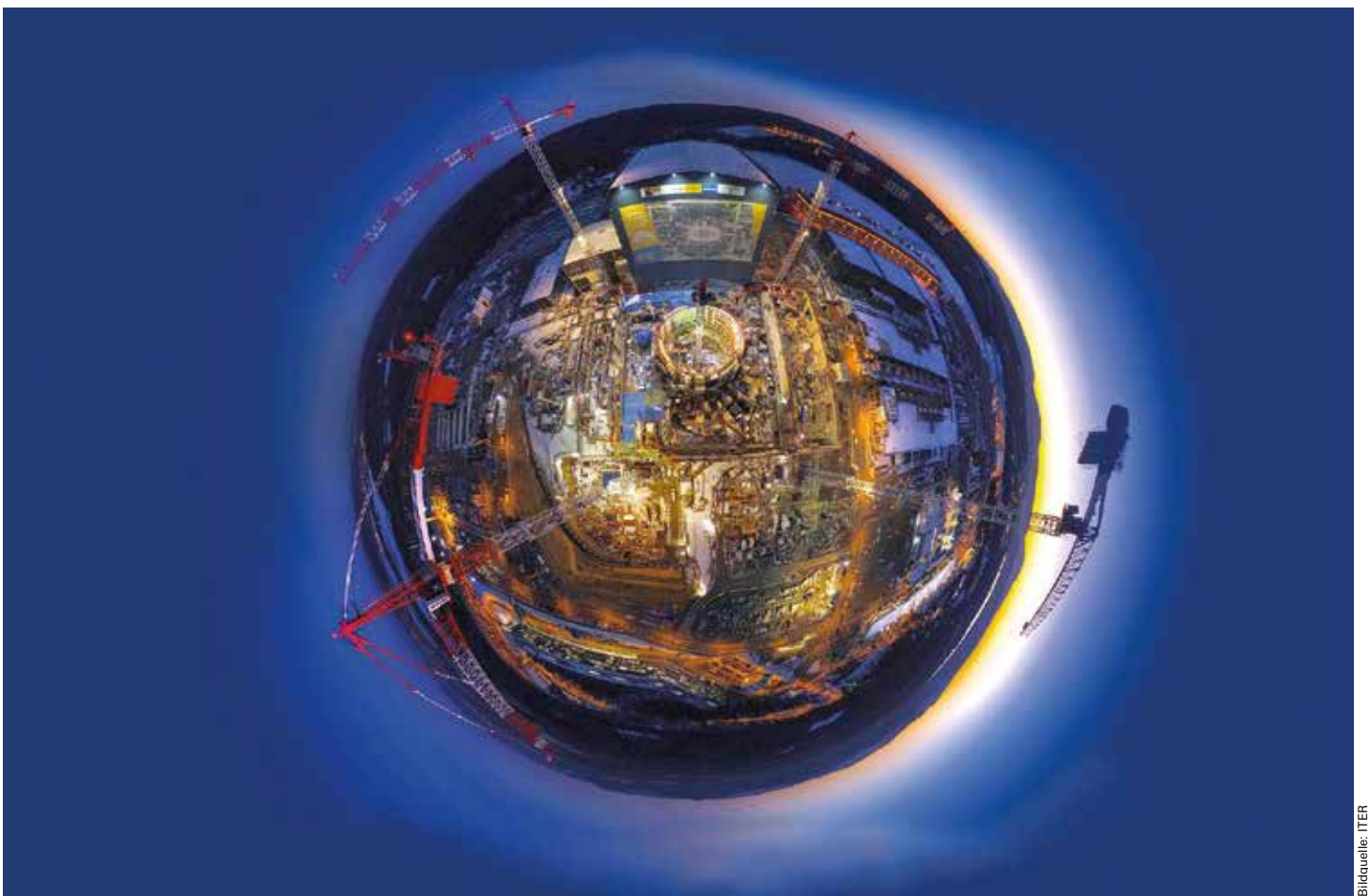


Vakuum im Fusionsreaktor

Die Reaktorprinzipien
Tokamak und Stellarator



Bildquelle: ITER

Die Sonne als Vorbild

Der Bedarf an und die Nachfrage nach sauberer Energie aus alternativen Quellen werden angesichts der fortschreitenden globalen Erwärmung und des Klimawandels immer größer. Bereits seit vielen Jahren versuchen Wissenschaftler, die Sonne auf der Erde nachzubilden, um nach ihrem Vorbild Energie zu erzeugen. Dazu müssten Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmolzen werden – es müsste also eine Kernfusion stattfinden. Die größte Schwierigkeit ist, die extremen Bedingungen nachzubilden, die auf dem Stern im Zentrum unseres Sonnensystems herrschen. Denn die Gegebenheiten auf der Sonne unterscheiden sich grundlegend von der Situation auf unserer Erde.

Das Prinzip der Kernfusion

Um das Prinzip der Kernfusion, mit der auf der Sonne eine Oberflächentemperatur von circa 6.000 Grad Celsius erreicht wird, irgendwann auch auf der Erde zur Gewinnung von Energie verwenden zu können, muss also die Reaktion der Sonne nachgebildet werden. Hierbei spielt Vakuumtechnologie eine wichtige Rolle, denn die Sonne ist von Vakuum umgeben.

Große experimentelle Aufbauten, sogenannte Kernfusionsreaktoren, sollen es ermöglichen, die solaren Bedingungen auf die Erde zu bringen.

Ein Kernfusionsreaktor ist eine technische Anlage, in der die Kerne von Atomen über eine thermonukleare Reaktion kontrolliert miteinander verschmolzen werden. Ziel der Kernfusion

ist das Erzeugen von Strom, denn beim Verschmelzen von Atomkernen wird eine große Energiemenge frei.

Aktuell gibt es zwei gängige Reaktorprinzipien: Tokamak und Stellarator. Grundsätzlich basieren beide Reaktortypen auf demselben Prinzip. Die Unterschiede liegen in der Form und der Anordnung der Magnetfeld erzeugenden Spulen. Bei beiden Prinzipien werden Wasserstoff oder Wasserstoffisotope auf bis zu 150 Millionen Grad Celsius erhitzt. Zur Erzeugung solcher Wärme muss sich das Plasma freischwebend in einem Vakuum befinden, denn jeder Kontakt mit anderen Teilchen oder Wänden lässt Wärme abfließen. Oft wird mithilfe von supraleitenden Elektromagneten daher ein Magnetfeld von bis zu 10 Tesla Stärke erzeugt. Anschließend wird durch elektrisches Aufheizen oder elektromagnetische Wellen das Plasma erhitzt, um im besten Fall eine Kernfusion hervorzurufen.

Welche Aufgaben erfüllt Vakuum in Fusionsreaktoren?

Ein wichtiger Faktor für den Betrieb eines Fusionsreaktors ist ein robustes, verlässliches und leistungsfähiges Vakuumsystem.

- **Isolation des freischwebenden Plasmas von den Wänden:** Die Übertragung von Wärme zwischen dem bis zu 150 Millionen Grad heißen Plasma und den Kammerwänden muss in jedem Fall verhindert werden. Andernfalls würde das Plasma sofort auskühlen und die Kernreaktion zusammenbrechen.
- **Entfernen von Helium und Verunreinigungen:** Das Abfallprodukt Helium sowie Kerne aus dem Wandmaterial wirken im Prozess als Verunreinigung. Daher müssen sie durch magnetische Ablenkung aus dem Plasma entfernt werden. Nach dem Verlassen des Plasmas kühlen das Helium und die Kerne ab und werden durch die Vakuumpumpen entfernt.
- **Thermische Isolation des Kryostaten:** In vielen Fusionsexperimenten kommen supraleitende Spulen für die Erzeugung des Magnetfeldes zum Einsatz. Diese werden mit flüssigem Helium gekühlt. Zur Erzeugung des notwendigen Isolationsvakuums kommen Vakuumpumpen zum Einsatz.

Anforderungen an Vakuumsysteme

Niedriger Enddruck ($< 1 \cdot 10^{-8}$ hPa im Plasmagefäß; $< 1 \cdot 10^{-5}$ hPa im Kryostat)

- Der Rezipient eines Fusionsreaktors muss vor dem Einlassen der Prozessgase auf einen Basisdruck von $< 1 \cdot 10^{-8}$ hPa evakuiert werden. Die Prozessgase sind Wasserstoff, Deuterium oder Tritium. Die im Betrieb anfallende Gaslast wird oft mit Turbopumpen gepumpt. Ebenso ist aber auch der Einsatz von Kryopumpen geplant. Generell gilt für alle zur Anwendung kommenden Pumpentechnologien, dass ein hohes Saugvermögen für die leichten Prozessgase notwendig ist.
- Zur Messung des Vakuumtotaldrucks werden verschiedene Sensoren eingesetzt. Neben den Wärmeleitungsvakuummetern (Pirani) sind vor allen Dingen Kaltkathodenmessgeräte im Einsatz. Letztere Sensoren dienen dazu, die Hoch- und Ultrahochvakuumdrücke im Rezipienten zu detektieren.
- Zur Analyse werden in Fusionsreaktoren in vielen Fällen hochauflösende Quadrupol-Massenspektrometer installiert. Diese Instrumente dienen dazu, das Verhältnis von Helium und Deuterium zu detektieren.



Wendelstein 7-X im März 2014, kurz vor dem Ende der Hauptmontage (Foto: IPP, Beate Kemnitz)

Experten Tipp

Turbomolekularpumpen sind während des Betriebs sehr empfindlich gegenüber externen Magnetfeldern. Der Grund dafür sind die in Magnetfeldern auftretenden Wirbelströme. Diese erhitzen den aus Aluminium gefertigten Rotor stark und können ihn im schlimmsten Fall zerstören. Dieser Effekt wird insbesondere durch Magnetfelder verursacht, die waagrecht zur Rotorachse verlaufen. Damit die Turbopumpen trotzdem innerhalb eines Magnetfelds betrieben werden können, bietet Pfeiffer Vacuum eine Magnetabschirmung für folgende Turbopumpen an:

- HiPace 80
- HiPace 300
- HiPace 700

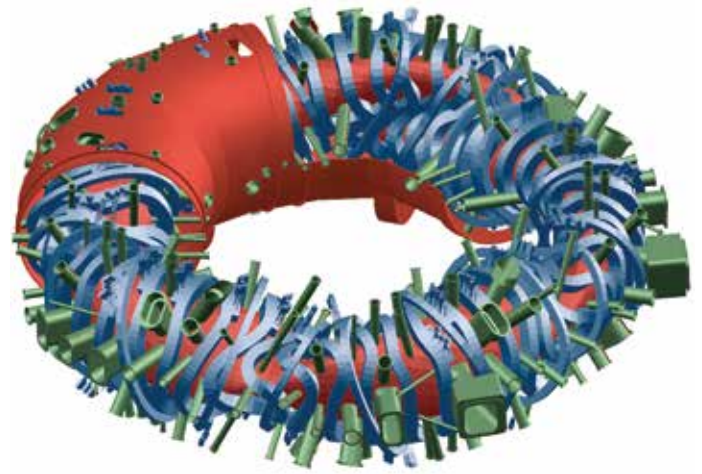
Die Varianten HiPace 300 H und HiPace 700 H zeichnen sich durch eine sehr hohe Kompression für leichte Gase aus. Daher eignen sie sich besonders für Fusionsexperimente. Material und Wandstärke der Magnetabschirmung werden individuell festgelegt. Abhängig von diesen Parametern ergibt sich auch die Stärke des Magnetfelds, welchem die Turbopumpe ausgesetzt werden darf.

Verträglichkeit mit Tritium

- In einigen Fusions-Experimenten kommt nicht nur Wasserstoff zum Einsatz, sondern auch Tritium. Zwar wird bei Tritium-Anwendungen unterschieden nach niedriger, mittlerer und hoher Konzentration, aber generell sind die Materialien für die Vakuumkomponenten klar vorgegeben. So dürfen z. B. keinerlei Elastomere verwendet werden. Ebenso ist aus Gründen der Dichtigkeit als Gehäusematerial für Vorpumpen Grauguss nicht erlaubt.
- Die Anforderungen an die Dichtigkeit von Vakuumkomponenten sind insbesondere bei Verwendung von Tritium mit $Q < 1 \cdot 10^{-10} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ sehr hoch. Aber auch in Anlagen, in denen Wasserstoff zum Einsatz kommt, muss neben den Pumpen und Messgeräten der komplette Rezipient mit all seinen Flanschen und Verbindungselementen auf Lecks untersucht werden.

Einsetzbar im radioaktiven Umfeld

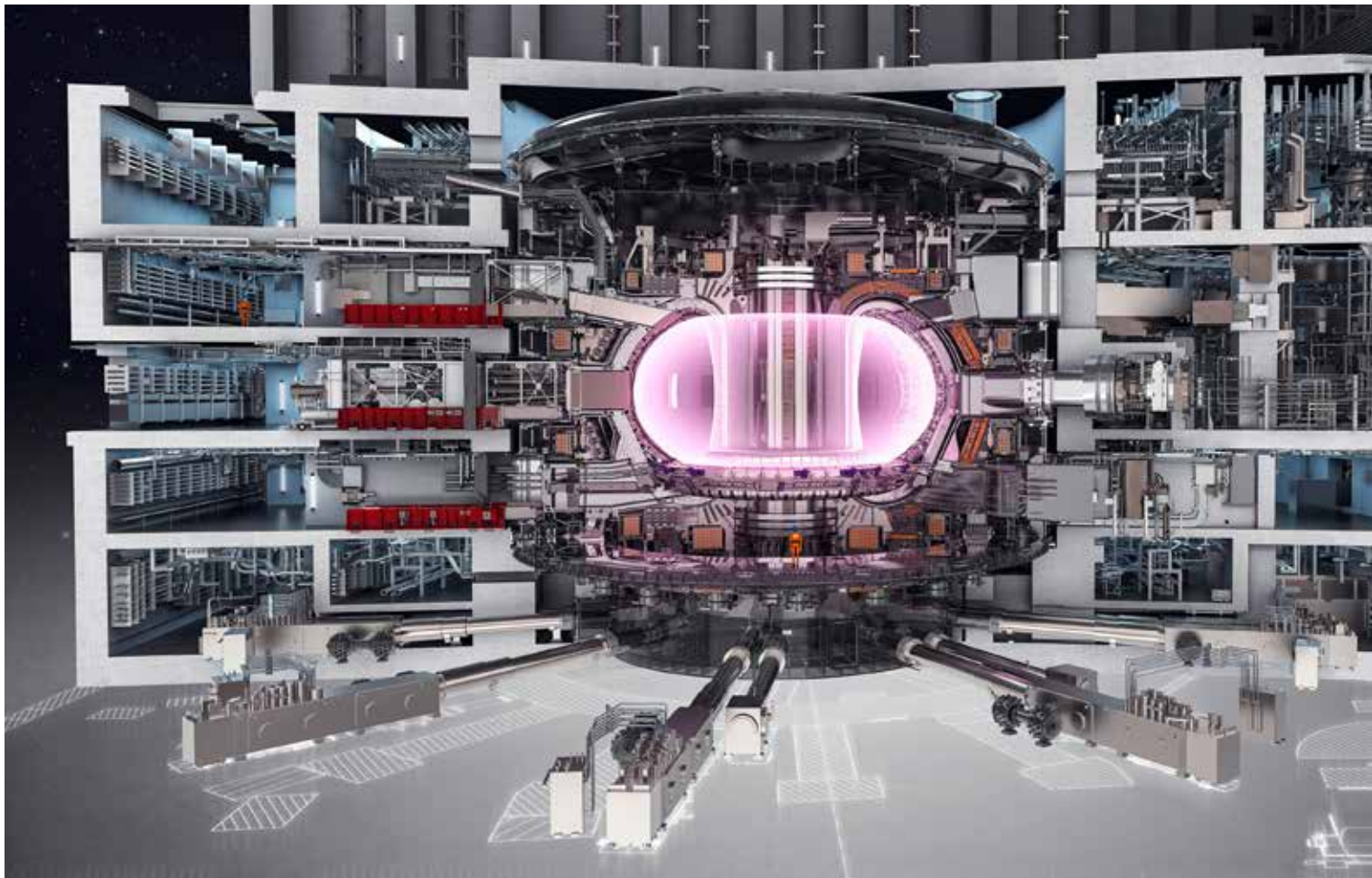
- Für alle zum Einsatz kommenden Vakuumkomponenten gilt die Prämisse, dass die Elektronik entfernt von der eigentlichen Pumpe oder dem Messgerät positioniert werden muss. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die modernen digitalen Elektronik durch die Radioaktivität geschädigt werden. Es bleibt also nur die Möglichkeit, die Steuergeräte und die Aktuatoren (Pumpen, Messgeräte etc.) mit Hilfe langer Kabel zu separieren. Oft besteht die Forderung nach Kabelverbindungen aus halogenfreien Materialien mit Längen bis 100 m und mehr.



Computergrafik: Kryostat, Magnetspulens und Plasmagefäß der Fusionsanlage Wendelstein 7-X (Foto: IPP)

Betrieb im Bereich hoher magnetischer Feldstärken

- Die hohen magnetischen Feldstärken (im Bereich von mehreren Tesla), die für den Betrieb der Fusionsreaktoren notwendig sind, können an den Anbaupositionen der vakuumtechnischen Komponenten immer noch im Bereich von $H > 100 \text{ mT}$ liegen. Grundsätzlich müssen deshalb alle Komponenten mit magnetischen Abschirmungen versehen werden. Besonders relevant ist die Schirmung bei Turbopumpen, um die Erwärmung des Rotors durch Wirbelströme zu verhindern.



- Das Umgekehrte gilt für das Material, aus dem der Vakuumrezipient gefertigt ist. Hier gilt es, eine möglichst hohe magnetische Permeabilität zu gewährleisten. Das heißt, weder sollen die von außen induzierten magnetischen Felder abgelenkt werden, noch darf sich das Material durch Wirbelströme erwärmen.

Referenzen

Pfeiffer Vacuum hat sich seit vielen Jahren als kompetenter Partner weltweit für Fusionsexperimente etabliert. Dabei ist es uns insbesondere wichtig, im Austausch mit dem Anwender gemeinsam eine Lösung zu erarbeiten. Ausschlaggebend ist dabei, die bestmögliche Produktkombination oder Lösung für die jeweilige Applikation zu nennen. Beispielhaft sind folgende Kundenreferenzen zu nennen:

Wendelstein 7-X (Stellarator)

- 47 x HiPace 2300 C Turbopumpe
- HiCube Eco Pumpstände
- ModulLine Messröhren (mit Remote-Elektronik)
- ASM 310 Lecksucher
- HPA 220 Massenspektrometer

ITER (Tokamak)

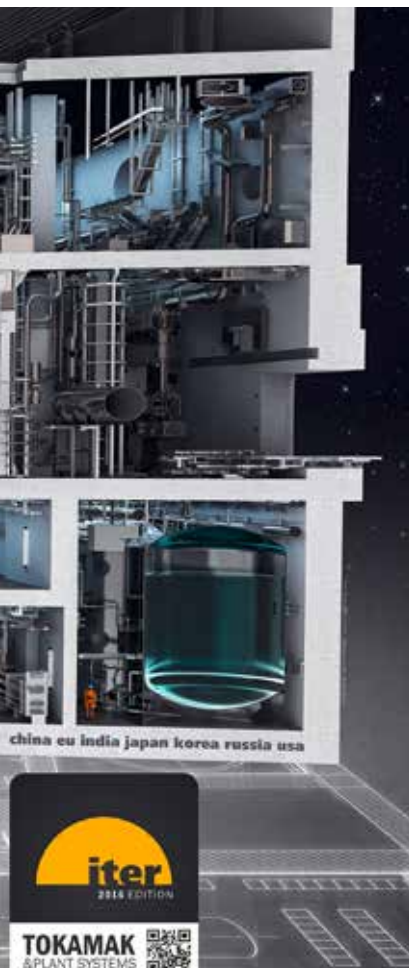
- Tritium-kompatible Wälzkolbenpumpe, patentiert und exklusiv von Pfeiffer Vacuum
- Mobile Restgasanalysesysteme
- Mobile Lecksucher



Tritium kompatible Rootspumpe Okta 1500 GM mit höchster Kompression für Wasserstoff



Spezieller Lecksucher für einen sehr breiten Anwendungsbereich. Es können alle Gase von H₂ bis Xe über einen weiten Druckbereich detektiert werden.



Pfeiffer Vacuum Produkte und ihre Vorteile auf einen Blick

HiPace Turbopumpen

- Hohes Saugvermögen
- Hohe Kompression für leichte Gase
- Varianten für hohe externe magnetische Felder
- Externe Antriebselektronik bis zu 100 m von der Pumpe entfernt
- Wartung vor Ort möglich



Mehrstufige Wälzkolbenpumpen ACP

- Externe Antriebselektronik
- Kein Verschleiß dank Reibungsfreiheit
- Kein Rückfluss von Kohlenwasserstoffen
- Erzeugung eines sehr sauberen Vakuums
- Berührungsfreies Pumpmodul
- Partikelfreies Vakuum
- Fluorfreie Version verfügbar

Wälzkolbenpumpen

- Aus Edelstahl gefertigt, patentiert
- Tritium-kompatibel
- Saugvermögen 250 bis 25000 m³/h
- Magnetkupplung – hohe Dichtigkeit und lange Lebensdauer
- hohe Kompression auch für leichte Gase



Kammern und Komponenten

- Große Abmessungen
- Individualisierbarkeit
- Vielseitige Komponenten

Messröhren

- Magnetabschirmung bis 70 mT (ModulLine)
- Kabellänge bis 500 Meter
- Profibusanschluss



Massenspektrometer

- Restgasanalyse und Lecktests
- Hochauflösende Massenspektrometer auch für die Detektion von Helium und Deuterium
- Varianten für multiple Anwendungen

Lecksucher

- Niedrigste Detektionsrate bis $1 \cdot 10^{-13}$ Pa m^3/s
- Einfache Bedienung
- Trockene Vorpumpen bis 40 m^3/h möglich



VAKUÜMLÖSUNGEN AUS EINER HAND

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuümlösungen, 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
Vakuümlösung?
Sprechen Sie uns an:

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

www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER  **VACUUM**