

Dichtheitsprüfung an supraleitenden Magneten für den Forschungsbereich und deren Komponenten

Holger SCHELLER¹

¹ Babcock Noell GmbH, Alfred Nobel Straße 20, 97080 Würzburg

Kontakt E-Mail: holger.scheller@bilfinger.com

Kurzfassung

Supraleitende Magnete müssen für den Betrieb auf extrem tiefe Temperatur abgekühlt werden. Die meisten kommerziell genutzten Supraleiter verwenden flüssiges Helium bei einer Temperatur von 4 K (-269°C) oder darunter als Kühlmittel. Deswegen befinden sich supraleitende Magnete immer in einer Vakuumumgebung. Einer der wesentlichsten Punkte bei Auslegung und Fertigung dieser Geräte ist daher die Dichtigkeit aller medienführenden Leitungen an den Magneten und ihren Komponenten, die im Verlauf der Fertigung wiederholt geprüft werden muss.

Für diese Prüfungen sind spezielle Prüfanordnungen erforderlich, auf deren Besonderheiten im Vortrag eingegangen werden soll.

Aufgrund der typischerweise im Bereich 10^{-7} mbar l/sec oder darunter liegenden zulässigen Werte für die Leckrate kommen im allgemeinen nur Methoden zum Einsatz, welche die Erzeugung eines inneren oder äußeren Vakuums erfordern. Damit stellen sich nicht nur Anforderungen an das zu prüfende Bauteil sondern zusätzlich auch an die Prüfeinrichtung selbst.

Bereits die Größe der zu prüfenden Geräte sorgt darüber hinaus für Randbedingungen, die weitergehende Überlegungen zur Zusammenstellung der Systeme für die Dichtheitsprüfung erforderlich machen, da Phänomene wie Dichtigkeit des Prüfbehälters selbst und Ausgasvorgänge, aber auch die technischen Randbedingungen und Grenzen der auf dem Markt erhältlichen Systeme berücksichtigt werden müssen.

Anhand einiger Beispiele aus der Praxis werden solche Prüfeinrichtungen vorgestellt und die entsprechenden Überlegungen und Lösungen diskutiert.

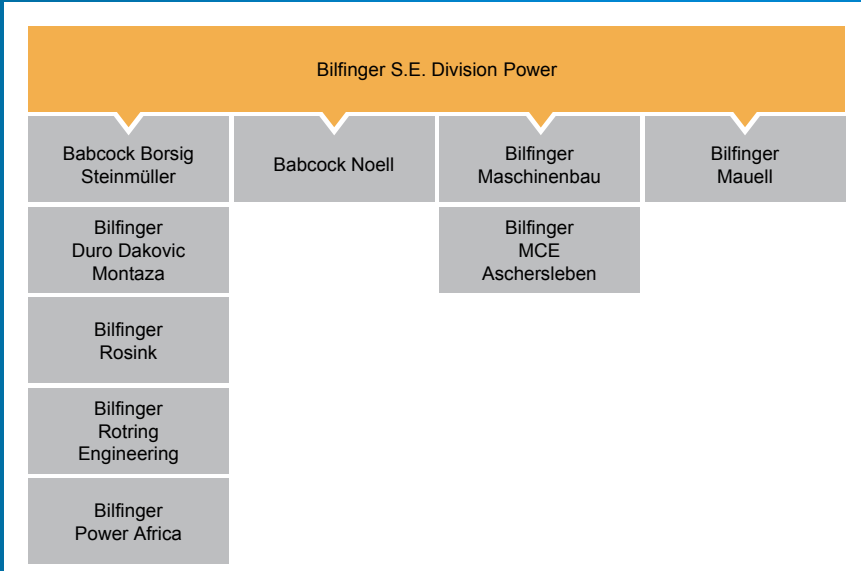
Babcock Noell GmbH

Dichtheitsprüfung an supraleitenden Magneten für den Forschungsbereich und deren Komponenten

Holger Scheller | 7. Fachseminar Dichtheitsprüfung und Lecksuche
21.09.2016

Gliederung

- Die Babcock Noell GmbH
- Supraleitende Magneten
- Dichtheitsprüfung an supraleitenden Magneten
- Konkrete Projektbeispiele
 - Wendelstein 7-X
 - SIS 100
 - ITER



Nuklearservice



Personenschleuse-Vorbereitung der Dichtfläche zur Dichtheitsprüfung

Nukleartechnik



Einheben eines Liner-Doppelschusses beim neuen EPR Reaktor OL 3 Finnland

Magnettechnik



Supraleitende Dipole für den LHC Beschleuniger, CERN, Genf

Umwelttechnik



Rauchgasentschwefelungsanlage

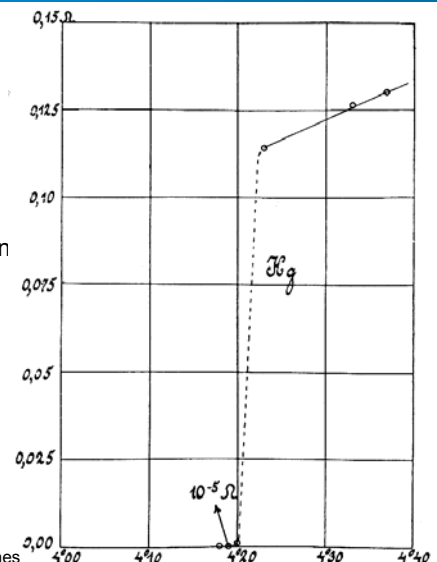
Supraleitung

Entdeckung im Jahr 1911 an reinem Quecksilber:

- Elektrischer Widerstand (für Gleichstrom) fällt schlagartig unter messbare Werte, wenn die Temperatur unterhalb eines bestimmten Wertes fällt

Der Traum von verlustfreier elektrischer Energieübertragung könnte wahr werden wenn nicht 3 kritische Parameter, die sich auch noch gegenseitig beeinflussen, eingehalten werden müssten:

- Temperatur
- Magnetfeld
- Stromdichte



Randbedingungen:

- + kein Widerstand unter Gleichstrombedingungen → keine Verlustleistung
- + Bei Verwendung geeigneter Materialien sehr große Magnetfelder in großen Volumina möglich
- + Dauerhafte Magnetfelder möglich
- Temperaturen weit unter Umgebungstemperatur erforderlich
- Elektrische Verluste unter Wechselstrombedingungen
- Teuer (bis zu 1000 fachen Kupferpreis)

Einsatzgebiete:

Einsatz von supraleitenden Magneten dort, wo es wirtschaftlich ist, d.h. die Einsparung an Energiekosten übersteigt die Investitionskosten:

- ✓ Große Feldstärken erforderlich (> 2 T)
- ✓ Große magnetische Räume erforderlich (> 10 cm)
- Biologie und Medizin (Magnetresonanz)
- Energietechnik (HGÜ, Kabel, Generatoren)
- Grundlagenforschung (Beschleuniger)
- Energieforschung (Kernfusion)

Dichtheitsprüfung beim Bau supraleitender Magneten



POWER

Tiefe Temperaturen zum Betrieb erforderlich

- Helium ist das Kühlmittel, aber
- Helium ist teuer und
- Helium lässt sich nur sehr aufwändig zurückgewinnen

- Hohe Dichtheit der Kühlmittel führenden Komponenten ist eine essentielle Eigenschaft.
- Typischer Wert:

10^{-7} mbar l/sec bei
Prüfdruck >20 bar

Babcock Noell GmbH

Dichtheitsprüfung beim Bau supraleitender Magneten

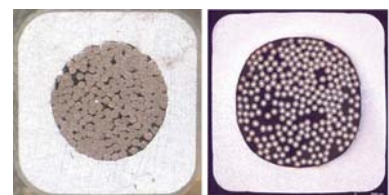


POWER

Verfahren:

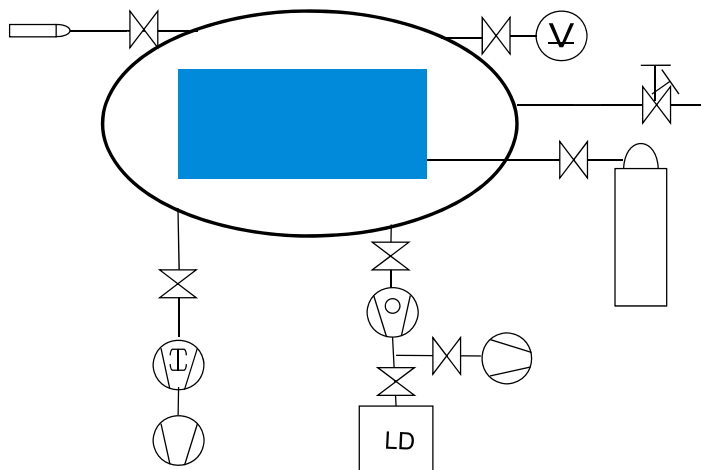
Aufgrund der kleinen nachzuweisenden Leckrate und des hohen Prüfdrucks kommt nur das Verfahren B6 der EN1779 als Nachweismethode in Frage. Dabei sind die folgenden (besonderen) Randbedingungen zu beachten:

- Keine Prüfgasgemische
- Behältergrundsignal < 10^{-7} mbar l/sec erforderlich
- Damit ist eine ausreichende Dichtheit für den Behälter selbst erforderlich
- Gaslasttoleranz der Leckdetektoren
- Ausgascharakteristik der Prüflinge **und** Prüfeinrichtungen dominiert Zeit bis zur Prüfung
- Industrielle Umgebung, keine Laborbedingungen



Babcock Noell GmbH

Grundsätzlicher Aufbau einer Prüfanlage:



- Behälter
- Prüfling
- Heliumversorgung
- Grobvakuumpumpsatz
- Feinvakuumpumpsatz
- Vakuumanzeige
- Leckdetektor
- Kalibriertes Leck
- Belüftungsvorrichtung

Wendelstein 7-X (1998 – 2008)

Für das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X in Greifswald fertigte BNG zwischen 1998 und 2008 die 50 nichtplanaren Spulen, die den Magnetkäfig für das Plasma bilden.

Es gibt 5 Typen, von denen jeweils 10 Spulen benötigt wurden

Zu testen waren

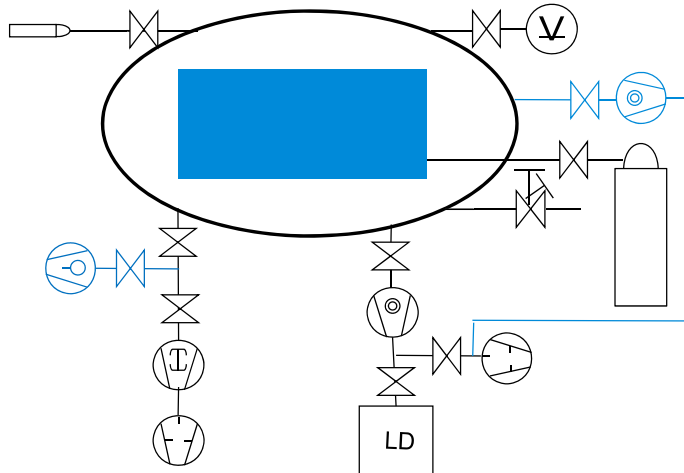
- Teile der Supraleiterlieferungen
- die 50 Wicklungen vor dem Einbau in die Gehäuse
- die 50 komplettierten Spulen, da beide Hauptkomponenten (Wicklung und Gehäuse) Kühlmittleitungen enthielten
- Diverse Spulen nach Reparaturen

Maße der Spulen: ca. 3,5m × 2,5 m × 1,5 m

Etwa 6 t pro Spule



Schematischer Aufbau der Prüfanlage:



Ergänzte Elemente:

- Sperrschieberpumpe für die großen Gasvolumina
- 2. Turbopumpe

Pumpzeiten:

- ca. 90 Min bis 0,1 mbar (Einschalten der Turbos)
- Tank leer: etwa 8 h bis Prüffähigkeit
- Tank mit Spule: etwa 20 h bis Prüffähigkeit

Nachgewiesene Dichtigkeiten

- Größenordnung 10^{-9} mbar l/s (wenn Behälter hinreichend „sauber“)

- Tank mit 4,5 m Durchmesser und 2,5 m nutzbare Höhe, Volumen: ca. 37 m³
- Material: Schwarzstahl innen mit niedrig ausgasender Beschichtung
- 2 Heliumleitungen für Gehäuse und Wicklung
- Grobvakuumpumpe: Leybold Heraeus DK 180 (Sperrschieberpumpe)
- Grob- und Feinvakuum 1: Edwards EH 500 mit Edwards E2M Vorpumpe
- Feinvakuum 2: Alcatel TMP 5400 mit Leybold D25 B oder Alcatel Pascal 2033 und Leybold TurboVAC 361 mit Alcatel Pascal 2015
- Lecksucheinheit: Alcatel TMP 5400 als Booster vor Leckdetektor mit
- Leckdetektor: Alcatel ASM 110 (bis 2002)
Alcatel ASM 142 (ab 2002)
- Lecktest gaslastlimitiert, daher nur die TMP 5400 während des Tests im Einsatz



Wendelstein 7-X (1998 – 2008)



POWER



ASM 110 im (letzten) Einsatz

Juni 2002



ASM 142 im Einsatz

Babcock Noell GmbH

Wendelstein 7-X (1998 – 2008)



POWER

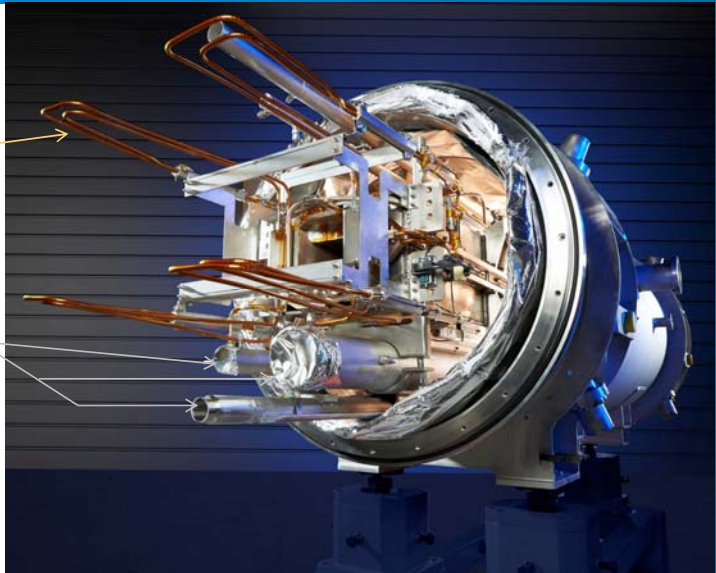
Wesentliche Ergebnisse

- Einsatz des ASM 142 vereinfachte die tatsächliche Prüfdurchführung im Vergleich zum ASM 110, da keine Detektorjustierung vor jeder Prüfung mehr erforderlich war
- Mehr Probleme mit der Dichtigkeit der Durchführungen und Anschlüsse als mit den eigentlichen Prüflingen; Sauberkeit ist ein essentielles Thema
- Permeation an GfK Bauteilen (Potentialtrenner) kann die Testempfindlichkeit stark limitieren.

Babcock Noell GmbH

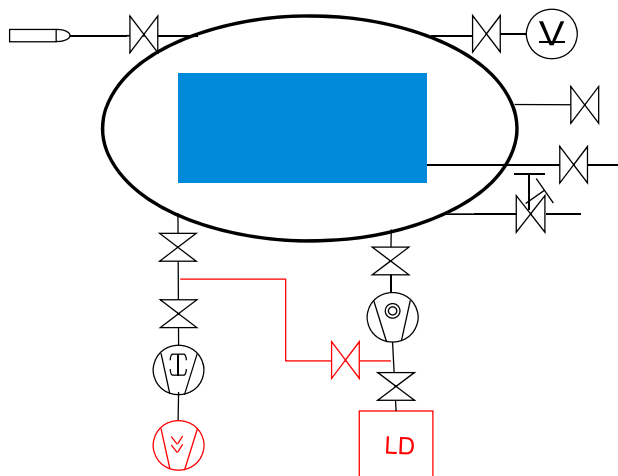
SIS 100 (2012 / 2016 -)

- 110 Dipolmagnete für den SIS 100 Beschleuniger (FAIR Projekt an der GSI, Darmstadt)
- Länge 4,26 m
- Supraleiter ($<5 \times 10^{-9}$ mbar l/sec)
- Spule ($<5 \times 10^{-9}$ mbar l/sec)
- Medienrohre ($<5 \times 10^{-9}$ mbar l/sec)
- Kalte Masse ($<5 \times 10^{-8}$ mbar l/sec)
- **Ölfreies** System gefordert
- W7-X Prüfkammer erhielt neues Pumpensystem



SIS 100 (2012 / 2016 -)

Schematischer Aufbau der Prüfanlage:



Komponenten

- Grobvakuumsystem: ScrewVAC Schraubenpumpe 250 m³/h und Roots 500 m³/h
- Feinvakuum und Booster: TurboVAC 600
- Leckdetektor: Adixen ASM 380

Pumpzeiten:

- ca. 60 Min bis 0,1 mbar (Einschalten der Turbos)
- Tank leer: etwa 4 h bis Prüffähigkeit (Normalmodus des LD)
- Tank mit Spule: etwa 12 h bis Prüffähigkeit

Testkammer für ITER CS Spulen (2014 - 2016)



ITER:

- Fusionsexperiment mit dem Ziel, ein brennendes Plasma zu erzeugen, d.h. die Fusionsleistung soll wesentlich größer als die Heizleistung sein
- Wesentliche Komponenten sind die Magnetspulen:
 - ✓ Zentralsolenoid (CS) Spulen
 - ✓ Toroidalfeld (TF) Spulen
 - ✓ Poloidalfeld (PF) Spulen

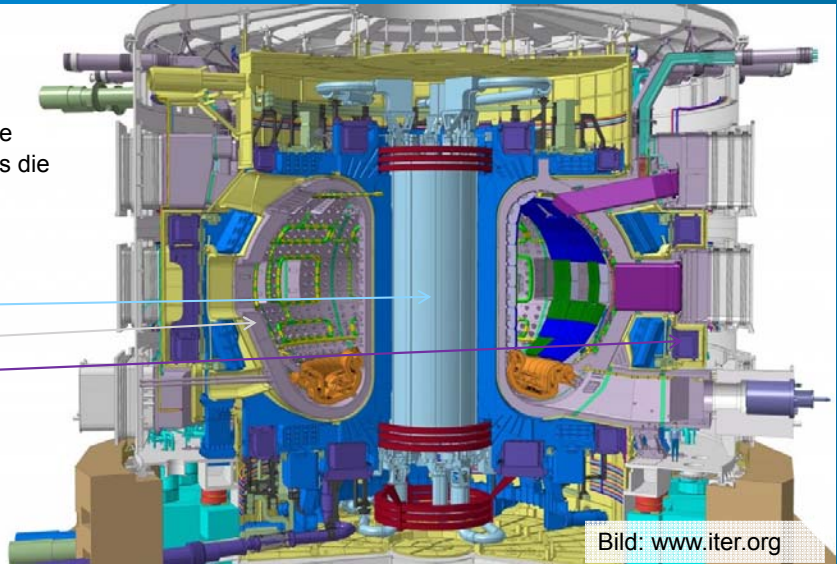


Bild: www.iter.org

Babcock Noell GmbH

Testkammer für ITER CS Spulen (2014 - 2016)



Im Auftrag von General Atomics (USA)

- Auslegung
- Konstruktion
- Beschaffung der Komponenten
- Fertigung
- Transport an Aufstellort (Poway, CA)
- Inbetriebnahme

des Testbehälters für Vakuum- und Dichtheitsprüfungen, Abkühlung der Module der CS Spule auf 4 K (-269°C) und Test mit Nominalstrom (48500 A)

Babcock Noell GmbH

Testkammer für ITER CS Spulen (2014 - 2016)



POWER

Randbedingungen:

Bauseitig

- Hallenhöhe 13 m
- Flanschlevel (1,52 m über Hallenboden) und Spulenlevel vorgegeben (2,69 m über Hallenboden)
- Aufstellort in Hallenecke
- Hallenkonstruktion aus Baustahlträgern → Magnetische Kräfte
- Aufstellort in erdbebenaktivem Gebiet (Südkalifornien)
- Kein Kran in Halle → Hubvorrichtung erforderlich

Geometrisch

- Spulenhöhe 3 m (+ 2 m für Anschlüsse)
- Spulendurchmesser 4,16 m
- Spulenmasse: 120 t

Babcock Noell GmbH

Testkammer für ITER CS Spulen (2014 - 2016)



POWER

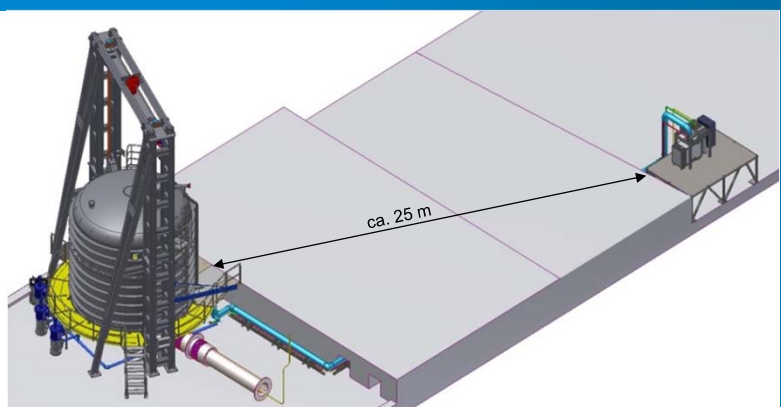
Randbedingungen:

Physikalisch:

- Behälter ist 4 K Kryostat (d.h. zusätzliche Oberflächen durch thermische Schilde)
- Starke Magnetfelder in unmittelbarer Umgebung (ca. 12 T im Zentrum und 1.5 T an Behälterwand) während Stromtest (48,5 kA der Spule)
- Zusätzliche Belastung durch Wirbelströme während einer Schnellabschaltung

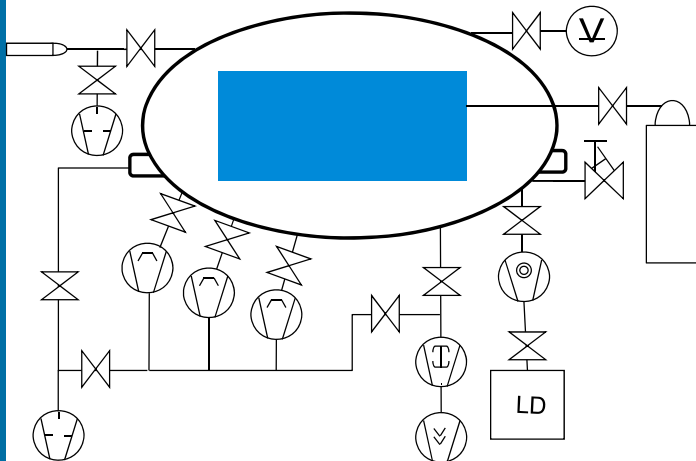
Vakuumtechnisch

- Nachzuweisende Leckrate 5×10^{-7} mbar l/sec
- Abpumpzeit auf 0,01 mbar: 4 h
- Abpumpzeit auf 5×10^{-4} mbar: 24 h
- Kammervolumen: 160 m³, innere Oberflächen ca. 800 m² (ohne Prüfling)



Babcock Noell GmbH

Schematischer Aufbau der Prüfanlage:



Komponenten

- Grobvakuumssystem: DryVAC 5000 (Saugleistung bis zu 3.800 m³/h)
- Feinvakuum: 3 × DIP 8000 in Sonderausführung Edelstahl
- Booster TurboMAG 600 (demontierbar!)
- Leckdetektor: Oerlikon Leybold PhöniXL 500 inkl. Schnüffelsonde mit 20 m Schlauch
- Hilfspumpen:
 - ✓ D65 B für Konditionierung DIP und Zwischenraumevakuierung
 - ✓ D25 B für Testleck
- Alle „beweglichen“ Komponenten und die Messeinheiten durch 35 m Rohrleitung mit Behälter verbunden

Pumpensystem



Grobvakuumssystem

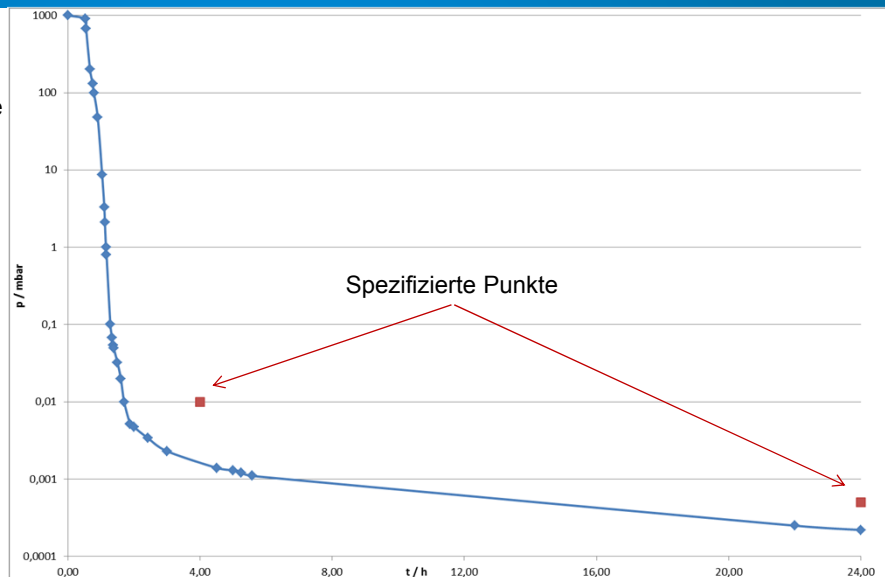


Feinvakuumssystem und Lecksucheinheit
(im Hintergrund die Tragstruktur für die Spule)

Reale Auspumpkurve

Zu berücksichtigen, dass keine ideale Sauberkeit möglich ist:

- Beladung durch Rolltor
- Bodenschild ist demontierbar
- ➔ Eintrag von Sand und Staub nicht vermeidbar
- ➔ Pumpleistung hat ausreichend Reserve



Wesentliche Ergebnisse

- Durch die Schilde verlängert sich die (theoretisch) errechnete Ansprechzeit des Systems ($\tau = V/S$) bei ausschließlichem Betrieb über die Turbopumpe von etwa 5 Minuten auf etwa 7 Minuten
- Bei Tieftemperatur im Behälter verlängert sich die Ansprechzeit weiter. Mit den Schilden geflutet mit flüssigem Stickstoff (aber ohne Spule) ist die Ansprechzeit etwa 10 Minuten
- Bei Tieftemperatureinsatz erzeugt jede Diffusionspumpe ein Teilstromverhältnis von etwa 1:10 für Helium.



Teststation für die ITER TF Wickelpakete (2014 -)



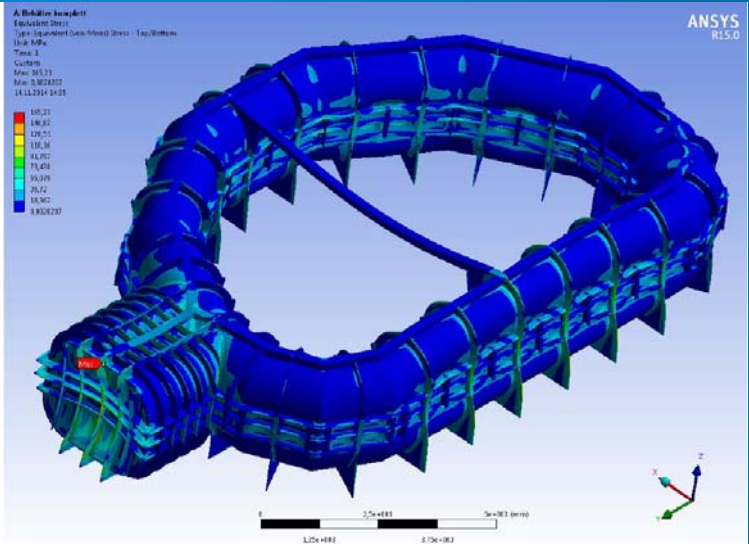
POWER

Im Auftrag von SIMIC (Italien)

- Auslegung
- Konstruktion
- Beschaffung der externen Komponenten
- Inbetriebnahme
- Betrieb und Durchführung der Tests an den Wickelpaketen

- Fertigung des Behälters durch SIMIC

Vakuum- und Dichtheitsprüfung der Wickelpakete, Abkühlung auf etwa 80 K (-193 °C)



Teststation für die ITER TF Wickelpakete (2014 -)



POWER

Randbedingungen:

Physikalisch:

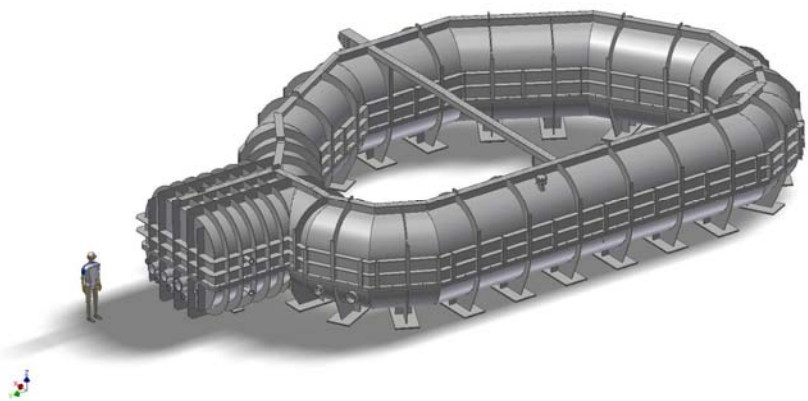
Behälter ist auch Kryostat für 80 K
Wickelpakete werden durch vorgekühltes Helium gekühlt

Geometrisch:

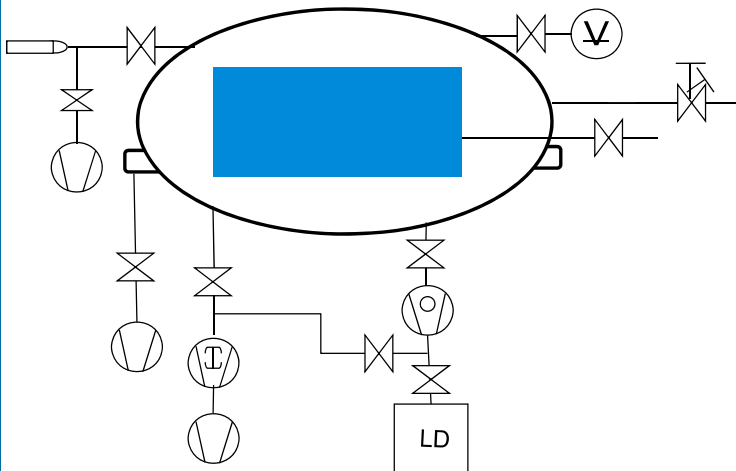
Abmaße des WP: ca. 17 m x 9 m
Masse eines WP: etwa 110 t

Vakuumtechnisch

- Abpumpzeit auf 0,1 mbar: 4 h
- Abpumpzeit auf 1×10^{-3} mbar: 16 h
- Nachzuweisende Leckrate 5×10^{-7} mbar l/sec bei Raumtemperatur und 80 K
- Kammervolumen: 110 m³, innere Oberflächen ca. 850 m² (ohne Prüfling)



Schematischer Aufbau der Prüfanlage:



Komponenten

- Grobvakuumsystem: SogeVAC 300 und RuVAC 501
- Feinvakuum und Booster: TurboMAG 600 (demontierbar!)
- Leckdetektor: Adixen ASM 340
- Hilfspumpen:
 - ✓ D25 B für Zwischenraumevakuierung
 - ✓ D4 B für Testleck

Besonderheit

Heliumversorgung (Druckaufbau) kommt aus externer Kälteanlage

Danksagung

Ganz herzlicher Dank an meine Kolleginnen und Kollegen bei der BNG, die immer wieder als „Sparringspartner“ bei der Diskussion zur Verfügung stehen.

Vielen Dank an unsere Partner für viele interessante Diskussionen:

Leybold:

Markus Nothhelfer
Hans Werner Schweizer

Pfeiffer Vacuum:

Torsten Franke
Dr. Rudolf Konwitschny
Eileen Nennstiel



POWER

Vielen Dank für Ihr Interesse und
Ihre Aufmerksamkeit!

Babcock Noell GmbH

Kontaktadresse



POWER

Babcock Noell GmbH
Alfred-Nobel-Str. 20
97080 Würzburg
Deutschland

Telefon +49 931 903 - 0
Fax +49 931 903 - 6000
info.bng@bilfinger.com
www.bng.bilfinger.com

Registergericht Würzburg, HRB 7156
USt-Id. Nr.: DE211420259

Geschäftsführung:
Helmut Welp, Vorsitzender
Dr. Ronald Hepper
Roland Pecht

Babcock Noell GmbH