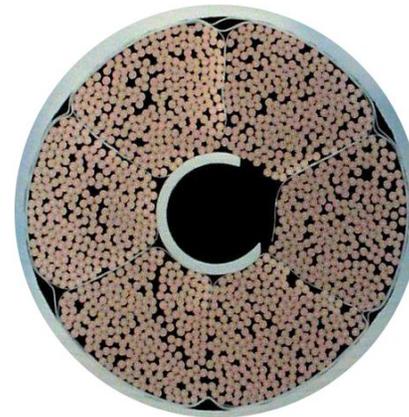
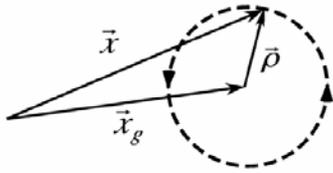
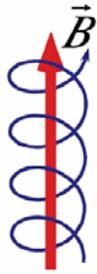


Die Cable-in-Conduit Leiter für ITER und deren Evaluierung in SULTAN

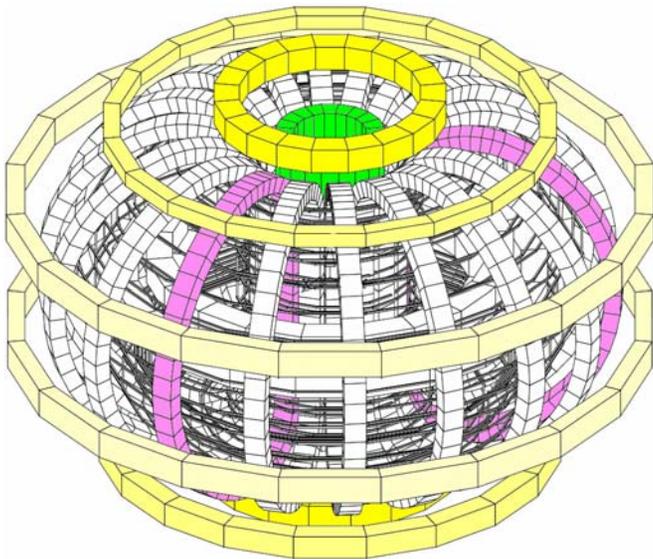


~ 44 mm

Robert Herzog
EPFL CRPP

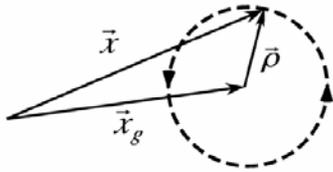
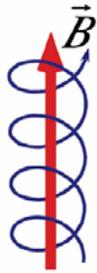


Geladene Teilchen auf Helixbahnen

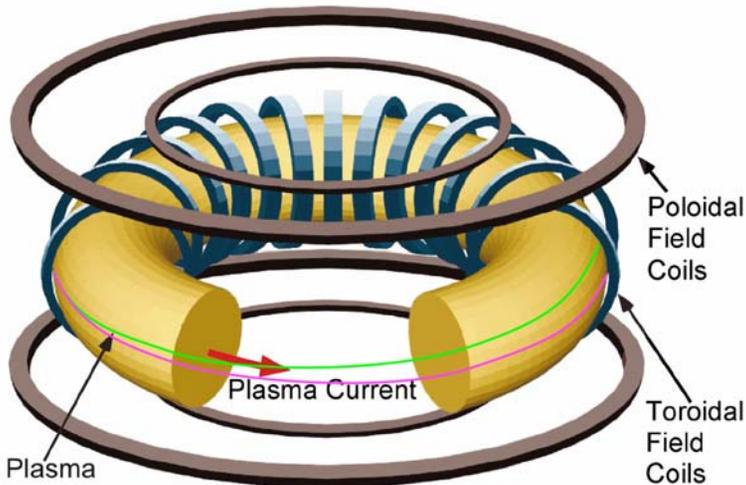


Spulenfamilien von ITER

- Magnetfelder für ITER
 - Magnetfelder schließen das Plasma ein
 - Drei Familien von Hauptspulen
 - Nur Supraleiter erzeugen sehr starke Felder in großen Volumina
- Supraleiter für Fusionsreaktoren
 - Ein Quantenphänomen bei tiefen Temperaturen
 - Drähte, Kabel, Leiter, Spulen
- Die SUPraLeiterTestANlage - *der* SULTAN
 - Ein langlebiges Experiment
 - 100 kA mit nur einem Schaltschrank
- Tests von CICC's in SULTAN
 - Volle Erfassung der Leistung von CICC's
 - Manche CICC's wurden ‚mürbe‘
 - Einige Meßergebnisse

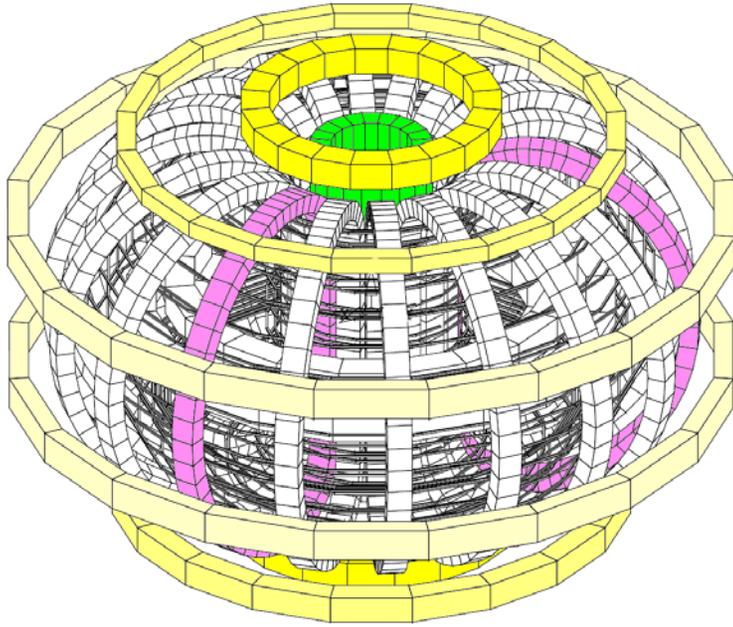


Geladene Teilchen auf Helixbahnen



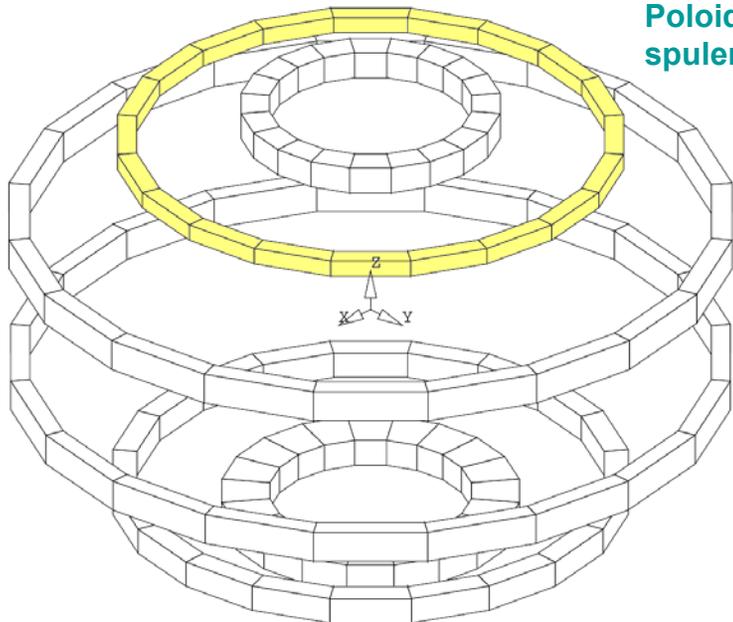
Spulen, Plasma und Teilchenbahnen

- **Magnetischer Einschluss** - Idee:
Geladene Teilchen bewegen sich um eine magnetische Feldlinie entlang einer Helixbahn:
Erzeuge geschlossene Feldlinien !
- Torus ist die einfachste Form eines geschlossenen Volumens das von geschlossenen Feldlinien begrenzt ist.
- Axensymmetrischer Torus: **Tokamak**
Die Form des magnetischen Einschlusses definiert den Fusionsreakortyp.
- Nicht stabil ohne großen Strom entlang des Plasmas: ‚aufgewickelte‘ Teilchenbahnen.
- **Magnetfeld muß einige Tesla haben:**
 - **Druck des Magnetfeldes** > Plasmadruck;
 - ρ der hochenergetischen α muß klein genug sein um diese im Plasma zu halten;
 - **Wärmetransport klein genug um Energieeinschluß lange genug zu erhalten**
- → **Nur mit Supraleitern möglich!**

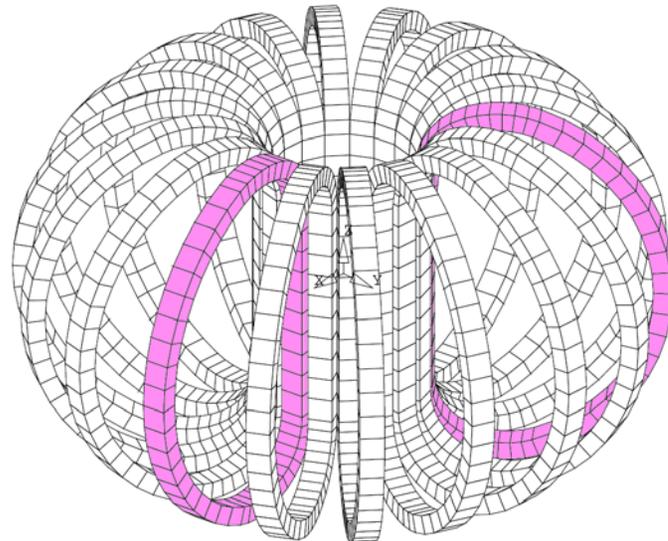


- 18 Toroidal­feldspulen erzeugen das Hauptfeld
- 6 Poloidal­feldspulen formen das Plasma
- 5 Elemente des zentralen Solenoides induzieren den notwendigen Plasmastrom

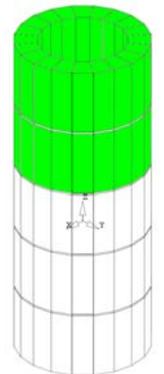
Poloidal­feld­spulen

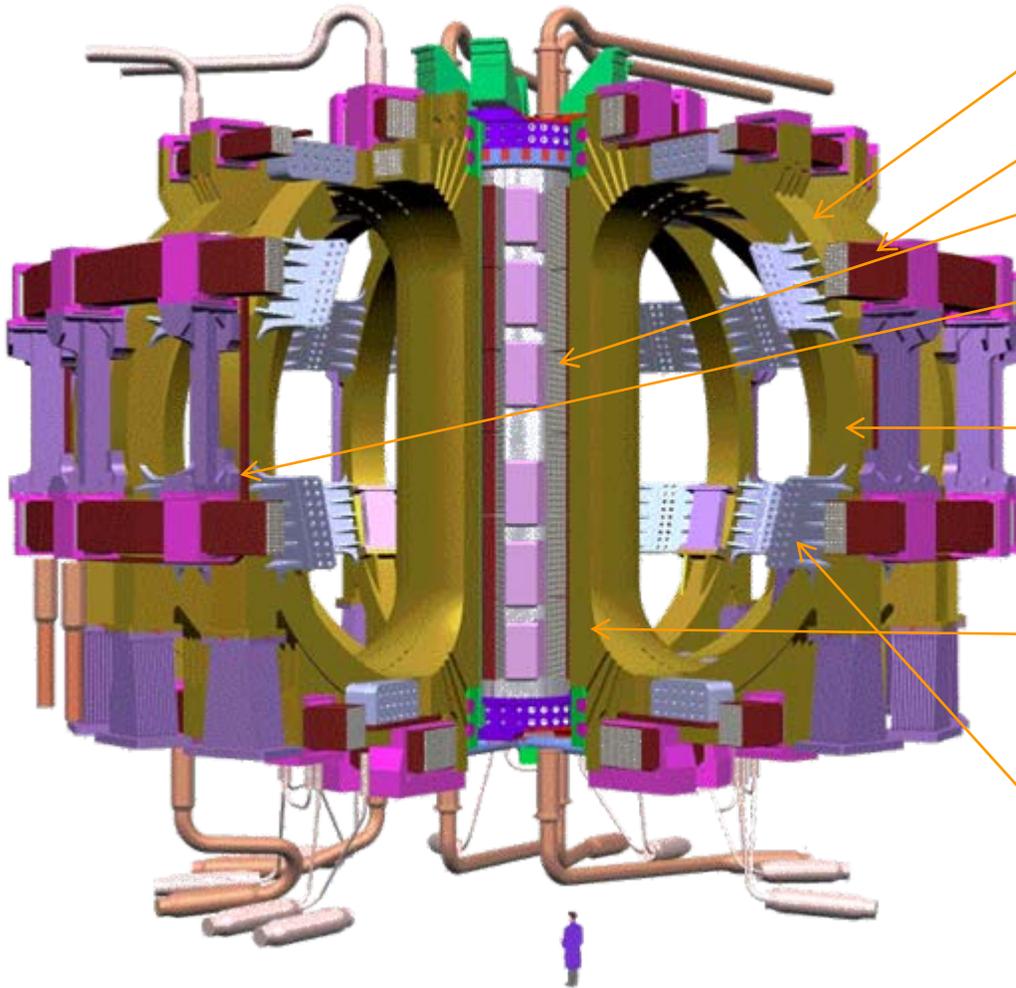


Toroidal­feld­spulen

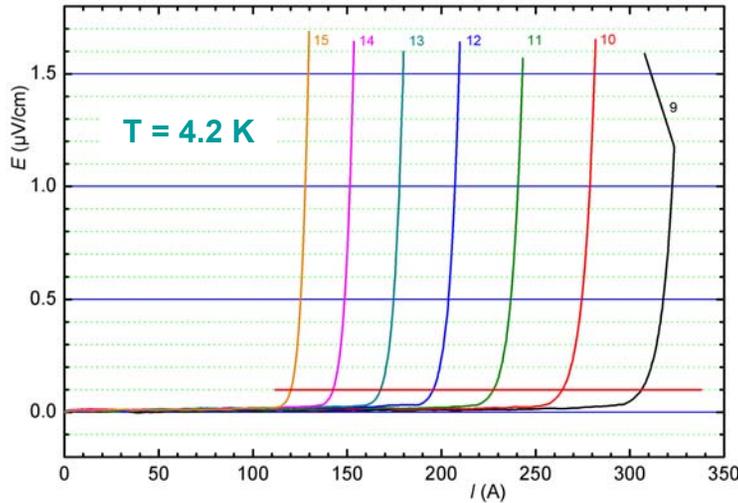


Zentrales Solenoid



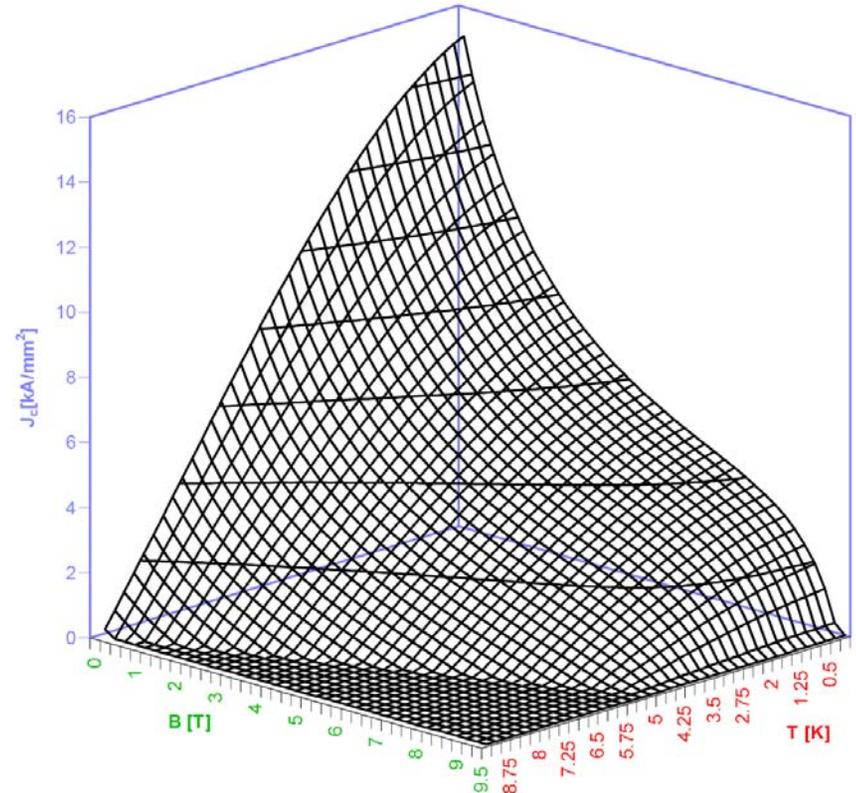
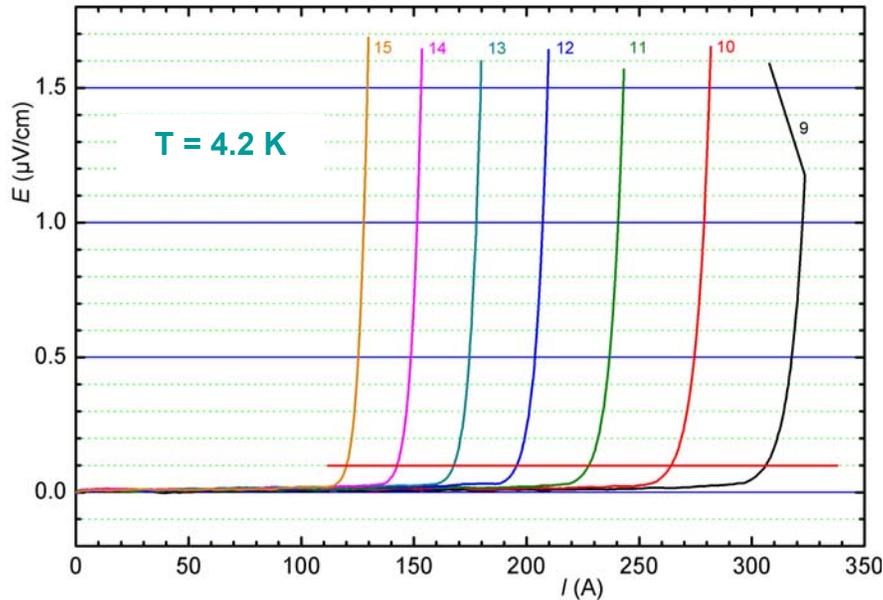


- **Superconducting.**
- **Nb₃Sn toroidal field (TF)** coils produce confining/stabilizing toroidal field;
- **NbTi poloidal field (PF)** coils position and shape plasma;
- modular **Nb₃Sn central solenoid (CS)** coil induces current in the plasma.
- **correction coils** correct error fields due to manufacturing/assembly imperfections, and stabilize plasma against resistive wall modes.
- TF coil case provides main structure of the magnet system and the machine core. PF coils and vacuum vessel are linked to it. All interaction forces resisted internally.
- TF coil inboard legs wedged together along their side walls and linked at top and bottom by two strong coaxial rings which provide toroidal compression and resist the local de-wedging of those legs under load.
- On the outboard leg, out-of-plane support provided by inter-coil structures integrated with TF coil cases.
- Magnet system weighs ~ **8700 t**.
- Very **strong magnetic forces**.



TFMC CICC

- Magnetfelder für ITER
 - Magnetfelder schließen das Plasma ein
 - Drei Familien von Hauptspulen
 - Nur Supraleiter erzeugen sehr starke Felder in großen Volumina
- Supraleiter für Fusionsreaktoren
 - Ein Quantenphänomen bei tiefen Temperaturen
 - Drähte, Kabel, Leiter, Spulen
- Die SUPraLeiterTestANlage - der SULTAN
 - Ein langlebiges Experiment
 - 100 kA mit nur einem Schaltschrank
- Tests von CICCs in SULTAN
 - Volle Erfassung der Leistung von CICCs
 - Manche CICCs wurden ‚mürbe‘
 - Einige Meßergebnisse

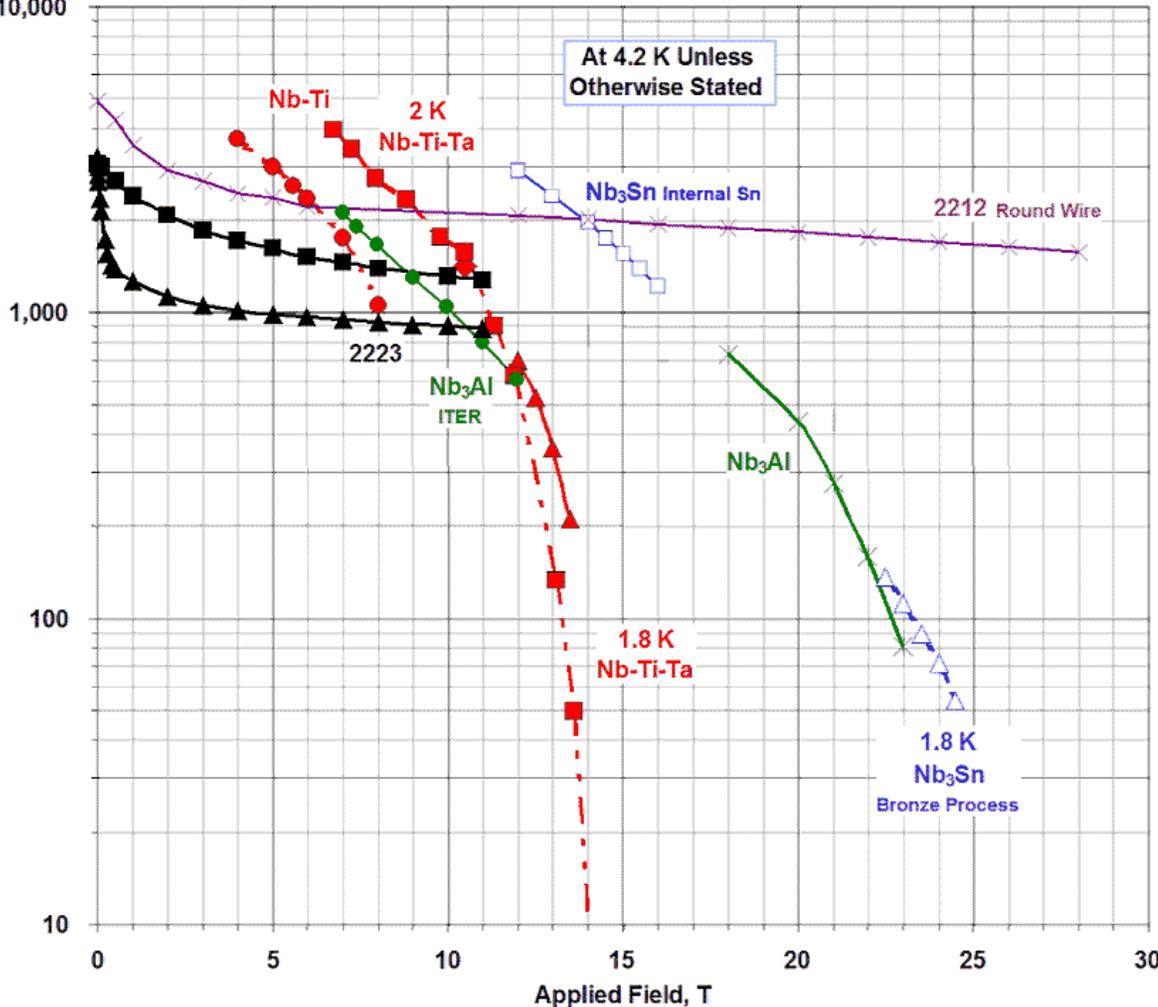


- Supraleitung ist ein makroskopischer Quantenzustand: ziemlich komplex
- Bei Strom(dichte)-, Magnetfeld- oder Temperaturerhöhung über kritische Werte entstehen elektrische Spannungen und daher ohmsche Verluste.
- Die Stromdichten sind sehr hoch! $250 \text{ A} \rightarrow 0.55 \text{ mm}^2 = 450 \text{ A/mm}^2$ (J_e Draht)
- Haushaltsinstallation: 16 A Sicherung $\rightarrow 2 \text{ mm}^2 = 8 \text{ A/mm}^2$

Advancing Critical Currents in Superconductors

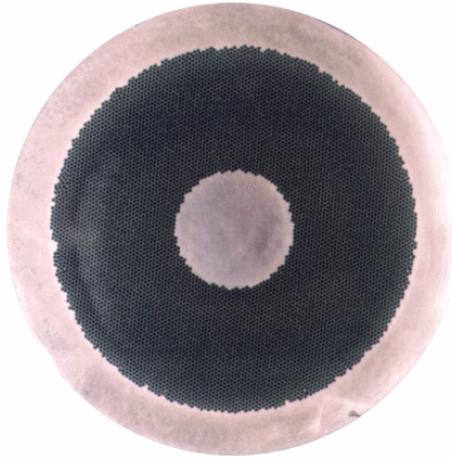
University of Wisconsin-Madison
Applied Superconductivity Center
December 2002 - Compiled by Peter J. Lee

Critical Current
Density, A/mm²
10,000



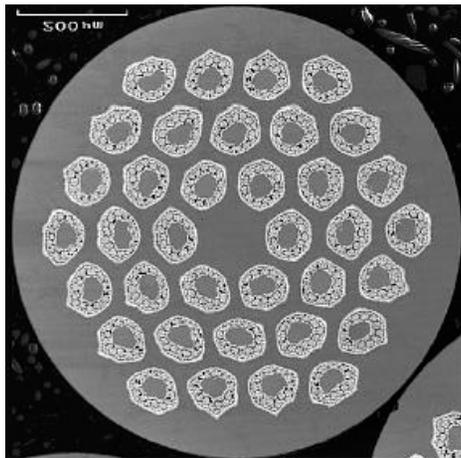
- Nb-Ti: Example of Best Industrial Scale Heat Treated Composites ~1990 (compilation)
- ◆ Nb-Ti(Fe): 1.9 K, Full-scale multifilamentary billet for FNAL/LHC (OS-STG) ASC'98
- ▲ Nb-44wt.%Ti-15wt.%Ta: at 1.8 K, monofil. high field optimized, unpubl. Lee et al. (UW-ASC) '96
- Nb-37Ti-22Ta: at 2.05 K, 210 fil. strand, 400 h total HT, Chernyi et al. (Kharkov), ASC2000
- △ Nb₃Sn: Bronze route VAC 62000 filament, non-Cu 0.1μW m 1.8 K J_c, VAC/NHMFL data courtesy M. Thoener.
- Nb₃Sn: Non-Cu J_c Internal Sn OI-ST RRP #6555-A, 0.8mm, LTSW 2002
- * Nb₃Al: Nb stabilized 2-stage JR process (Hitachi,TML-NRIM,IMR-TU), Fukuda et al. ICMC/ICEC '96
- Nb₃Al: JAERI strand for ITER TF coil
- × Bi-2212: non-Ag J_c, 427 fil. round wire, Ag/SC=3 (Hasegawa ASC2000+MT17-2001)
- Bi 2223: Rolled 85 Fil. Tape (AmSC) B||, UW'6/96
- ▲ Bi 2223: Rolled 85 Fil. Tape (AmSC) B||, UW'6/96

- NbTi: duktile Legierung
- Nb₃Sn: spröde intermetallische Phase

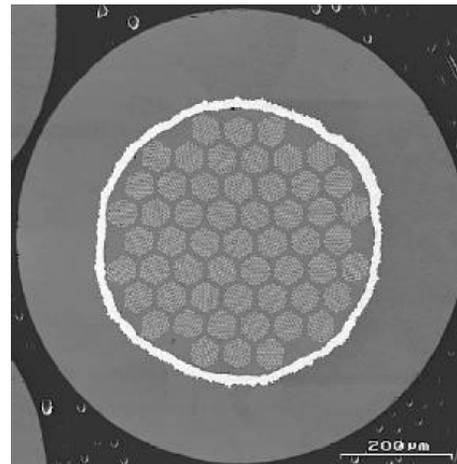


LHC dipole inner layer
with 8900 NbTi filaments

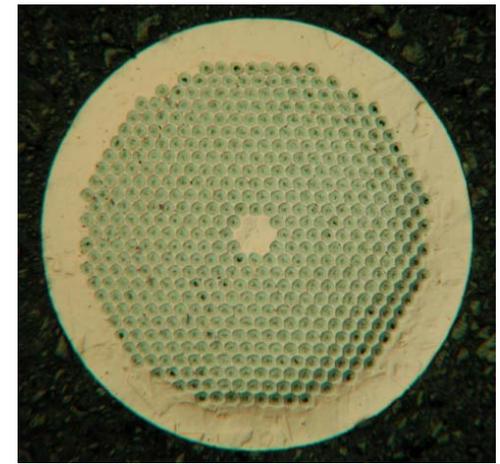
- NbTi Drähte werden mit Zehntausenden Filamenten mit μm -Durchmessern hergestellt
- Für Nb_3Sn Drähte gibt es mehrere Verfahren die eine Synthese der A15 Phase bei $\sim 650\text{ }^\circ\text{C}/200\text{ h}$ erlauben.
- Spulen aus Nb_3Sn Draht müssen (meist) zuerst gewickelt und dann wärmebehandelt werden. Sonst brechen die Nb_3Sn Filamente.



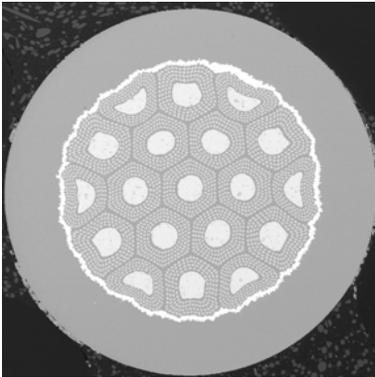
EM-LMI, Internal Tin
 $\varnothing = 0.81\text{ mm}$
Cu:nonCu: 1.4
5400 filaments
with 10 mm twist pitch
TFMC.



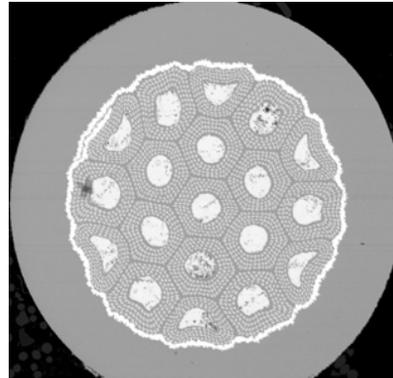
VAC, Bronze
 $\varnothing = 0.81\text{ mm}$
Cu:nonCu: 1.5
4565 filaments
with 9 mm twist pitch
CSMC-1A.



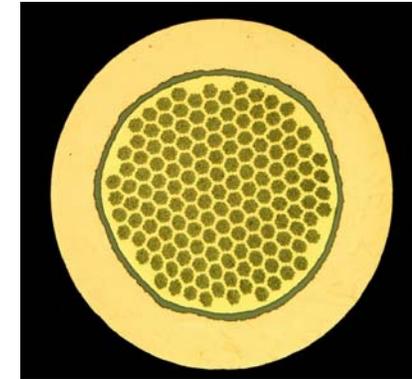
SMI, Powder In Tube
 $\varnothing = 0.81\text{ mm}$
Cu:nonCu: 0.74
504 filaments
with 10 mm twist pitch.
(non-ITER, binary)



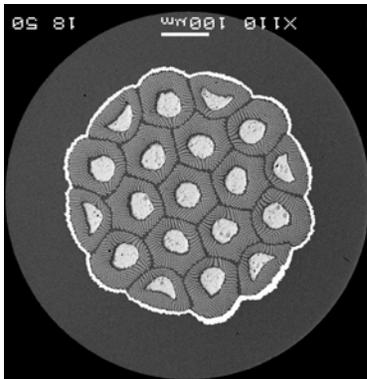
OST-I
 $\varnothing = 0.82 \text{ mm}$
 Cu:nonCu: 1



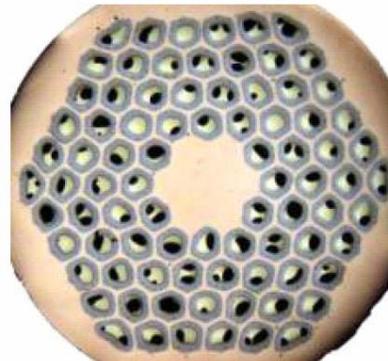
OST-II
 $\varnothing = 0.82 \text{ mm}$
 Cu:nonCu: 1



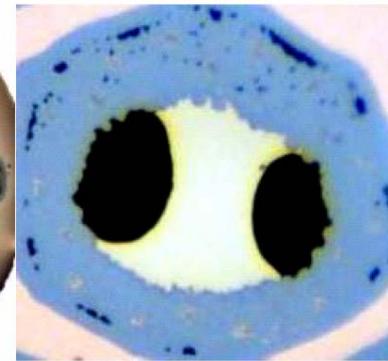
EAS
 $\varnothing = 0.82 \text{ mm}$
 Cu:nonCu: 1

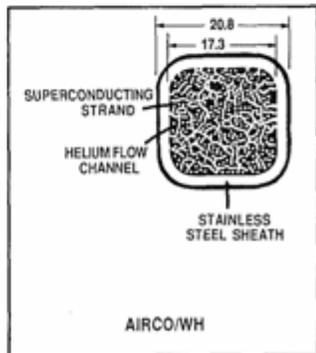
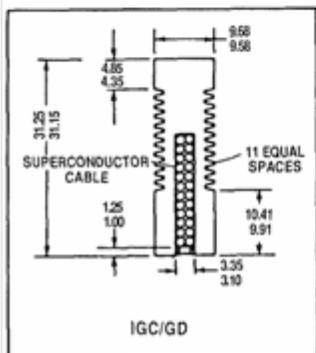
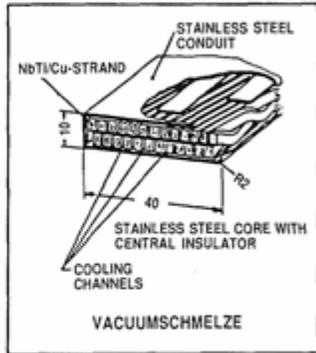
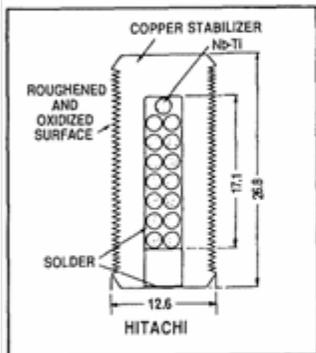
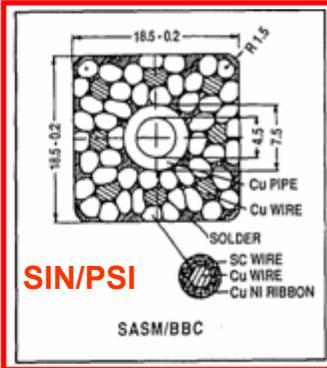
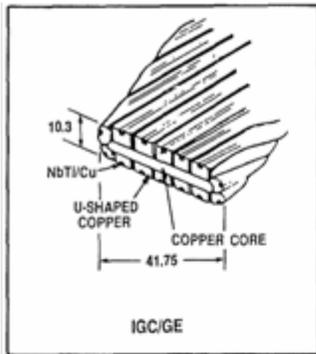


NIN&WST
 $\varnothing = 0.77 \text{ mm}$
 Cu:nonCu: 1.15
 19 x 324 filaments



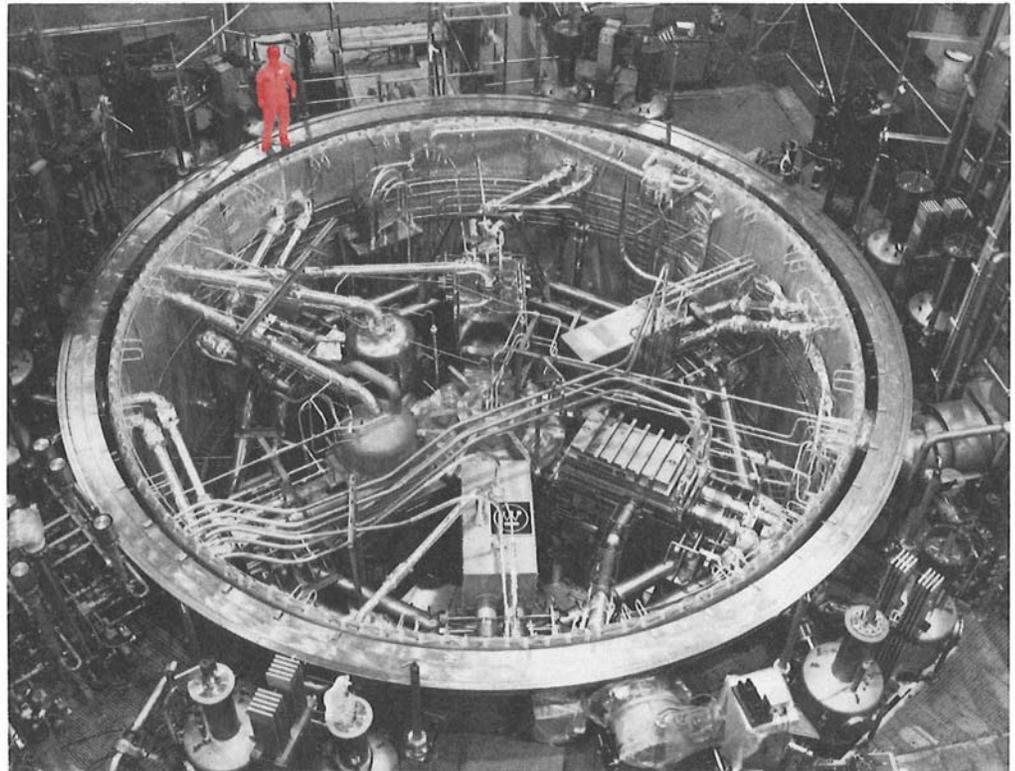
OST EFDA Dipole
 $\varnothing = 0.81 \text{ mm}$, Cu:nonCu: 1.15
 19 x 324 filaments
 HT cross section.





DIMENSIONS IN mm

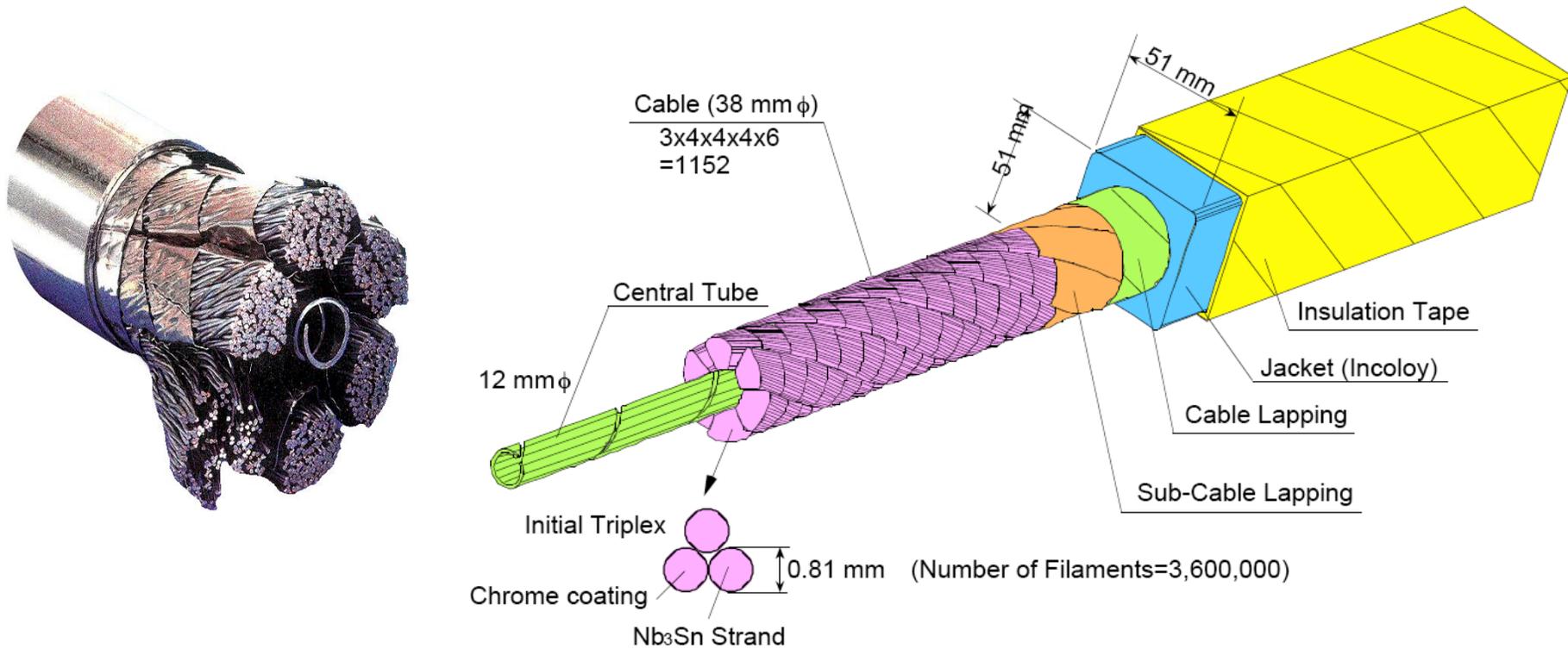
Configurations of conductors in the LCT coils.



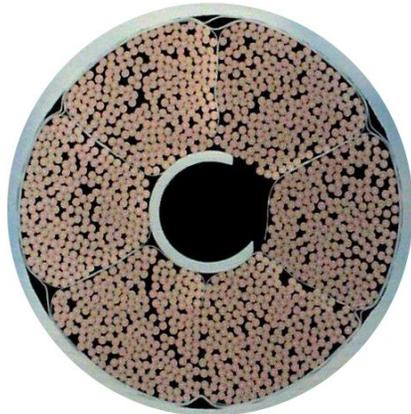
Test stand with six LCT coils—October 1985.

Large Coil Task in den 80ern

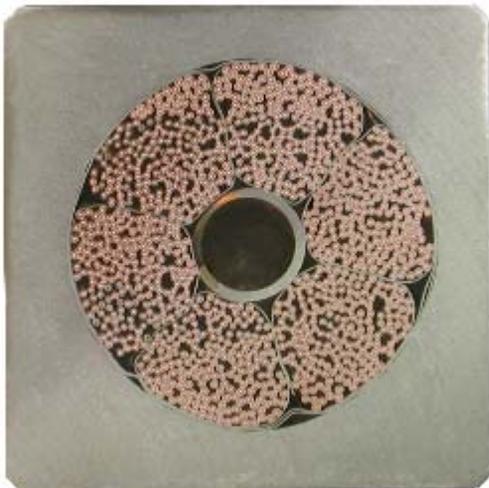
- Sehr verschiedene Leiter 'ausprobiert'
- Zwei Typen: Bad- und Kanalkühlt
- 3 US Spulen, 1 EU, 1 Japan, 1 CH: SIN/PSI
- Erfolgreich und relativ schnell
(Leiterproben in Sultanhalle ausgestellt)



- Elektrischer Strom und Helium zur Kühlung fließen parallel.
- Leiter ist (hydraulisch) im Vakuum und *nicht* in einem Heliumbad! Einfachere Isolierung!
- Der Zentralkanal für Helium erlaubt eine Anpassung der hydraulischen Impedanz.
- Über 1000 Drähte in 6 Subkabeln; die Drahtpositionen permutieren komplett.
- Mechanische Auflage der Drähte ist nicht ideal (Skalierungsproblem).

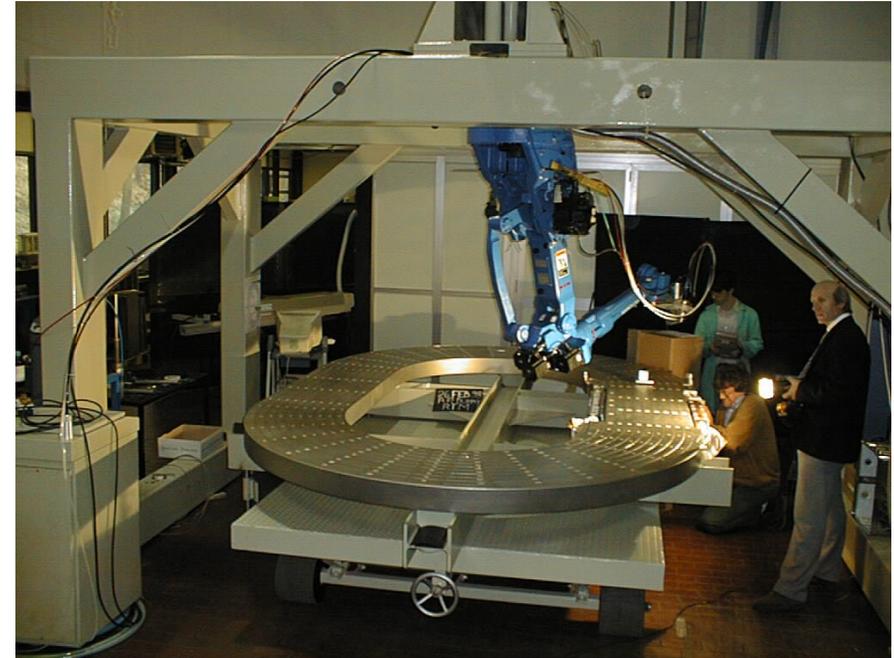
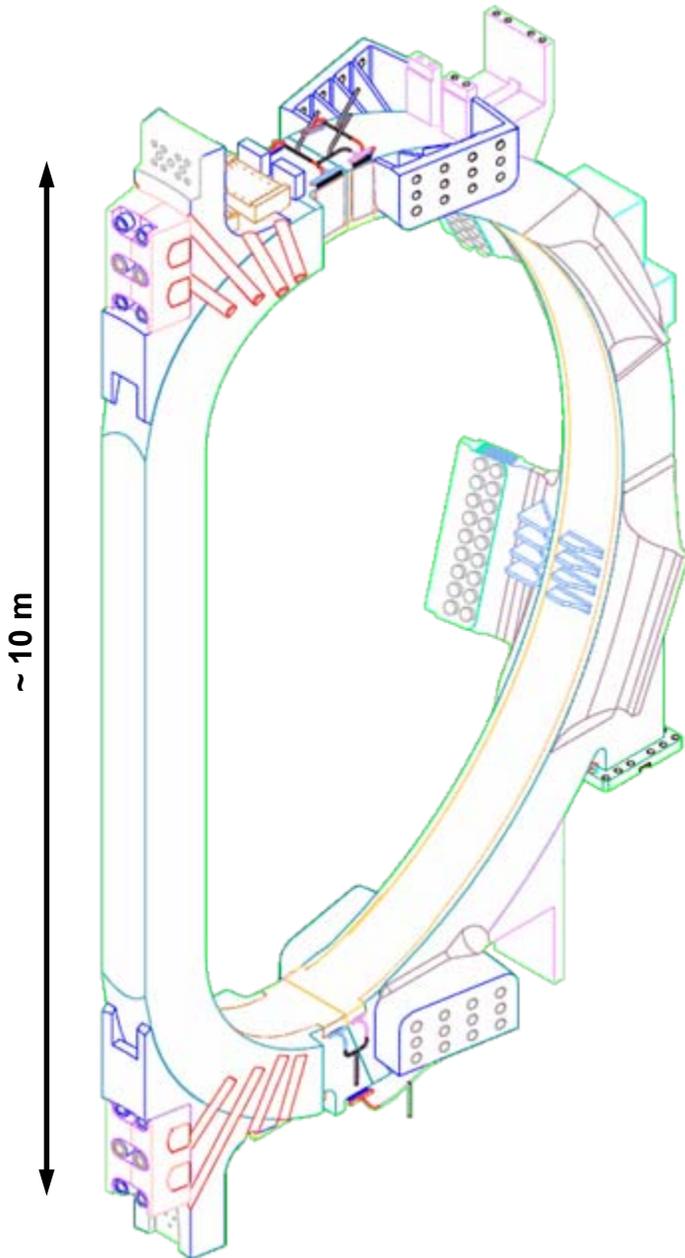


~ 44 mm



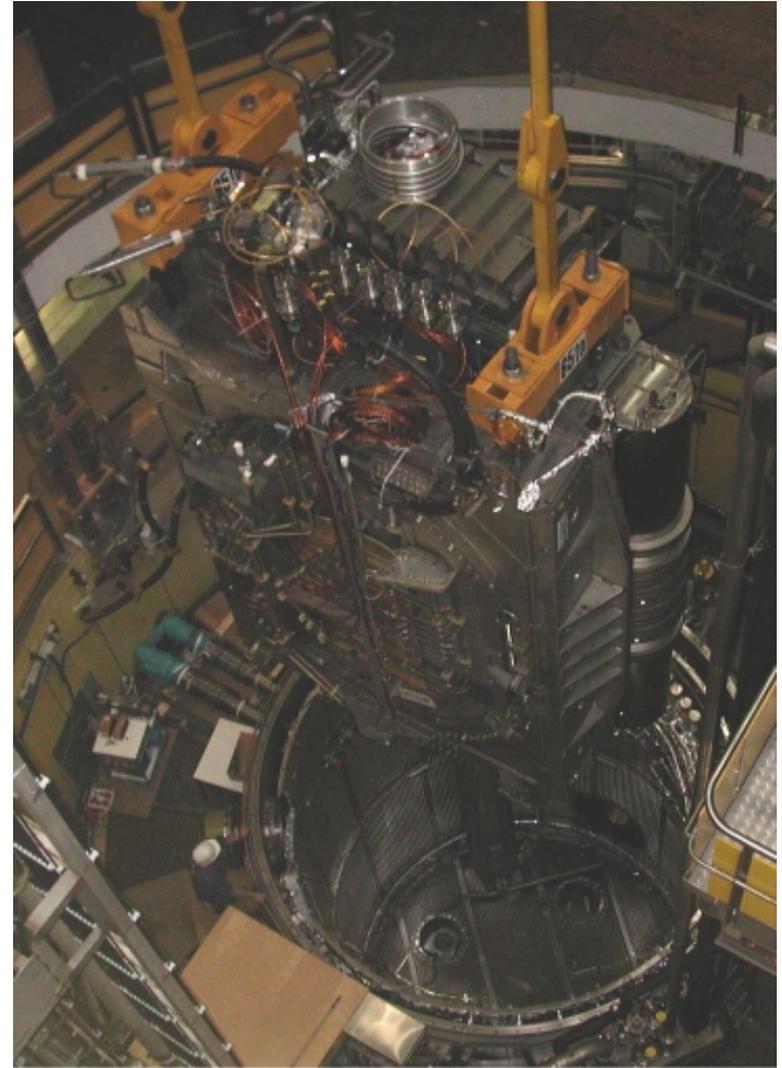
- Zusammenfassung der ITER Leiterdaten

ITER LEITER	TF	PF	CS
Anzahl der Nb ₃ Sn Drähte	900		576
Anzahl der NbTi Drähte		1440	
Gesamtzahl der Drähte	1422	1440	864
Drahtdurchmesser (mm)	0.82	0.73	0.83
Cu:nicht Cu Verhältnis	1	1.6	1
Holraumanteil (ohne Zentralkanal)	29	36	33
Kabeldurchmesser (mm)	39.7	37.7	32.6
Mantelwandstärke (mm)	2		
Leiterdurchmesser (mm)	43.7		
Leiterabmessungen (mm × mm)		53.8 × 53.8	49.5 × 49.5
(Maximaler) Betriebsstrom (kA)	69	45	40
(Maximales) Magnetfeld (T)	13	6	13



Automatisiertes Testschweißen der Deckplatte für das Spulenpaket.

- ‘Radial Plates’ sollen die großen Kräfte auf die TF Leiter aufnehmen
- Große Platten mit gefrästen Nuten die die wärmebehandelten Leiter aufnehmen sollen
- Große Herausforderung für die Herstellung



The 112 t test configuration for the test of the TFMC in the background field of the LCT coil



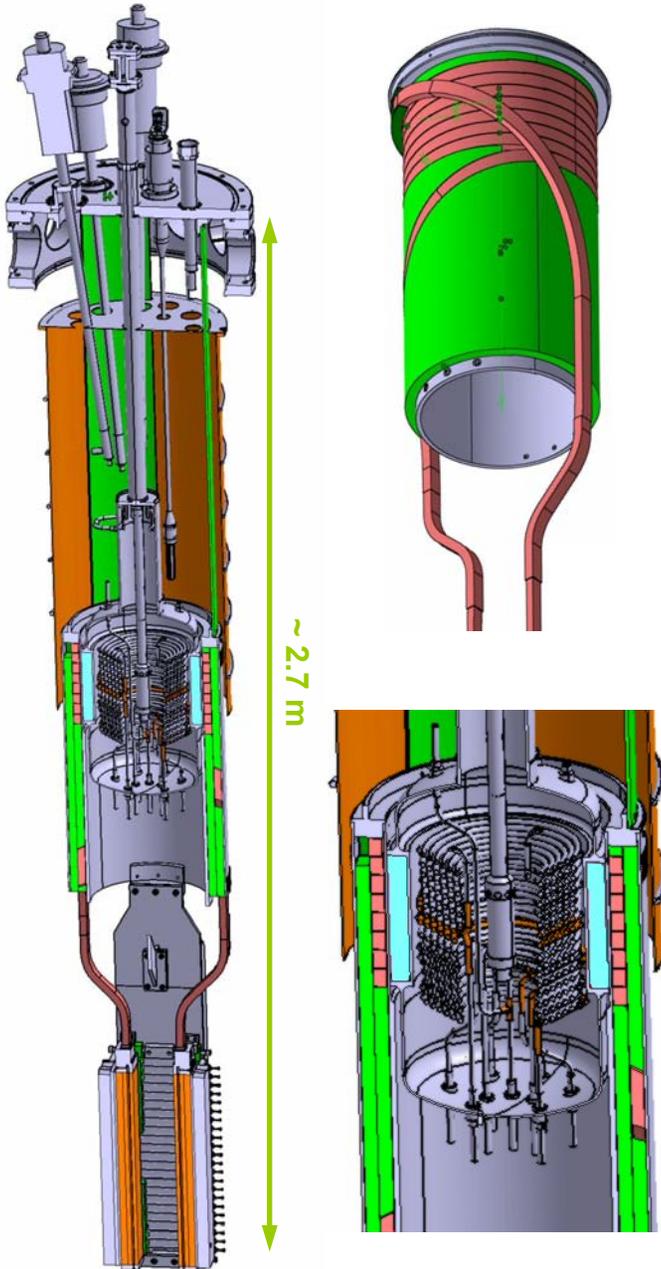
SULTAN am PSI

- Magnetfelder für ITER
 - Magnetfelder schließen das Plasma ein
 - Drei Familien von Hauptspulen
 - Nur Supraleiter erzeugen sehr starke Felder in großen Volumina
- Supraleiter für Fusionsreaktoren
 - Ein Quantenphänomen bei tiefen Temperaturen
 - Drähte, Kabel, Leiter, Spulen
- Die SUPraLeiterTestANlage - *der* SULTAN
 - Ein langlebiges Experiment
 - 100 kA mit nur einem Schaltschrank
- Tests von CICC's in SULTAN
 - Volle Erfassung der Leistung von CICC's
 - Manche CICC's wurden ‚mürbe‘
 - Einige Meßergebnisse

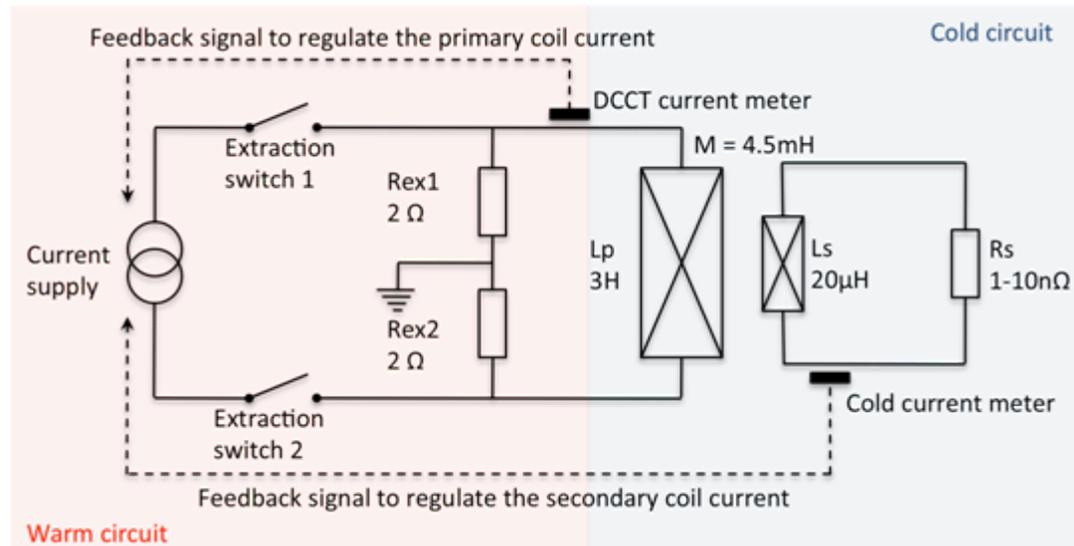


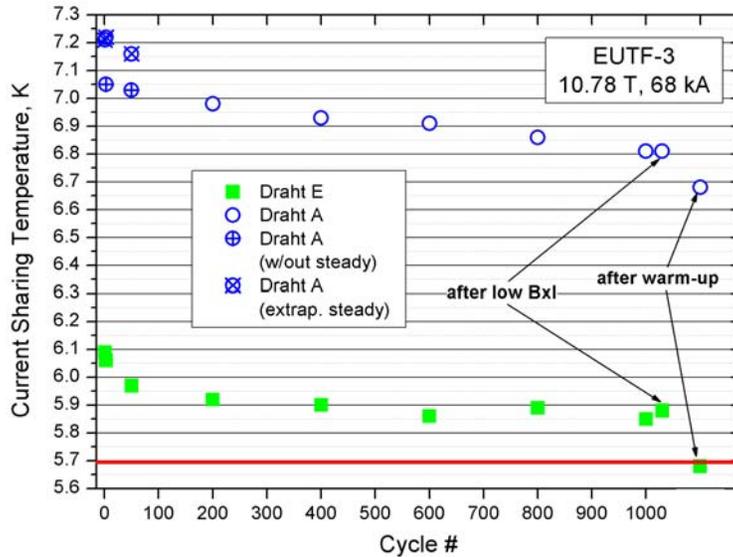
- Wurde in den 1980ern begonnen um die Machbarkeit von großen supraleitenden Spulen mit Kühlung durch gepumptes Helium (forced flow cooling) zu studieren.
- Das Spulensystem ist historisch (und politisch/ finanziell) gewachsen: 6 T → 9 T → 12 T
- Im letzte Umbau (SULTAN III) wurden die Spulen in der Mitte getrennt (bzw. anders/erst) eingebaut um große Leiter in transversalem Feld testen zu können.
- SULTAN testet seit vielen Jahren nicht mehr ‚sich selbst‘ sondern verschiedenste Testleiter, auch in form von Spulen.
- Weltweit einzigartig kann SULTAN in relativ kurzer Zeit (1-4 Wochen) vorbereitete Testleiter evaluieren
- Die Anlage funktioniert Dank der feinfühligem Techniker seit vielen Jahren sehr zuverlässig.
- Rundgang im Anschluß

Der 100 kA SULTAN Trafo



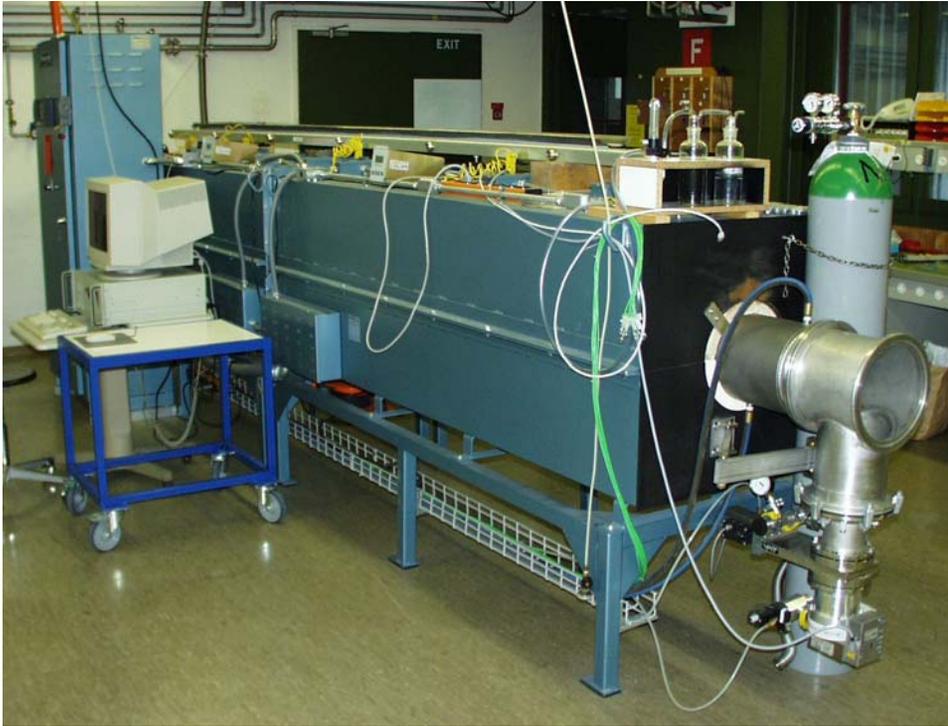
- Ein supraleitender Transformator funktioniert auch mit Gleichstrom!
- Bei Änderungen des Primärstroms ‚versucht‘ der Sekundärstrom den magnetischen Fluß im Trafo konstant zu halten. → Flußtransformator
- Der sehr kleine Restwiderstand im Sekundärkreis führt zu einem Abklingen des Sekundärstroms. → Nachregelung des Primärstroms
- Mit einem Heizer kann der Sekundärstrom auf ~ 0 A gehalten werden
- Trafo Windungszahlen: 3370:8



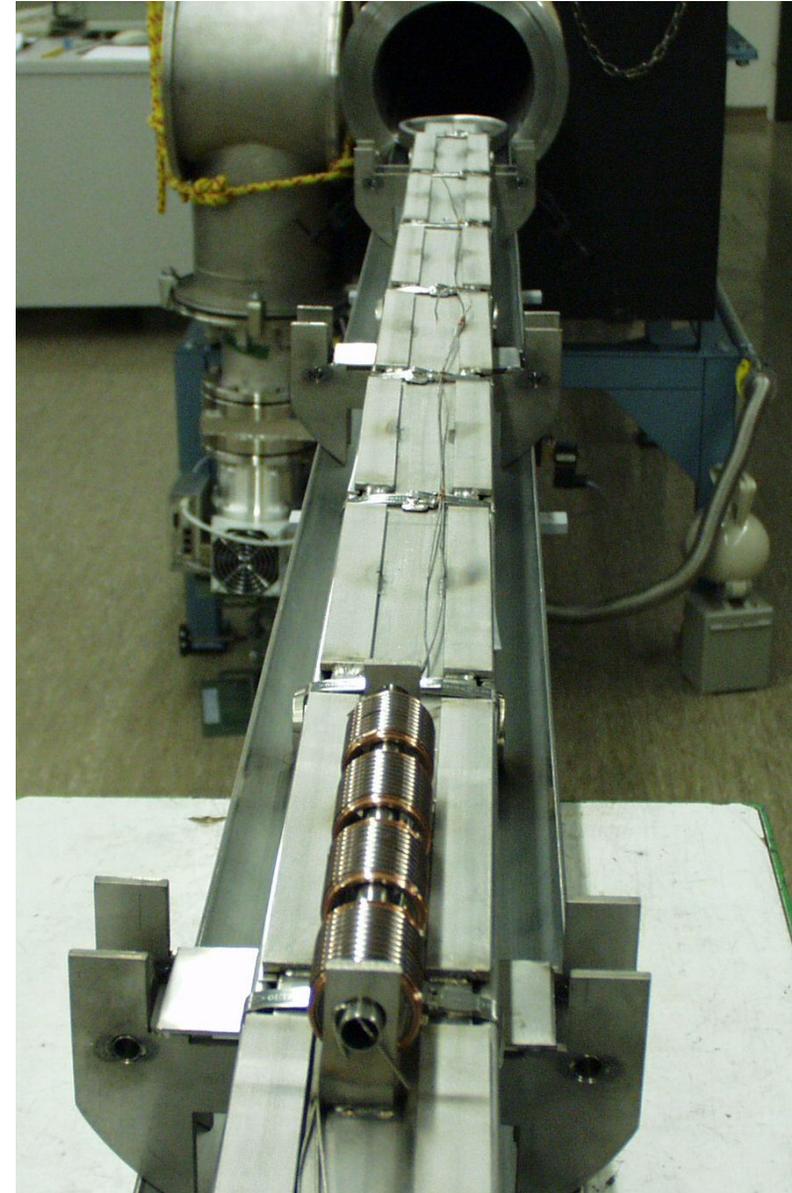


T_{cs} Entwicklung nach Lastzyklen

- Magnetfelder für ITER
 - Magnetfelder schließen das Plasma ein
 - Drei Familien von Hauptspulen
 - Nur Supraleiter erzeugen sehr starke Felder in großen Volumina
- Supraleiter für Fusionsreaktoren
 - Ein Quantenphänomen bei tiefen Temperaturen
 - Drähte, Kabel, Leiter, Spulen
- Die SUPraLeiterTestANlage - der SULTAN
 - Ein langlebiges Experiment
 - 100 kA mit nur einem Schaltschrank
- Tests von CICC's in SULTAN
 - Volle Erfassung der Leistung von CICC's
 - Manche CICC's wurden ‚mürbe‘
 - Einige Meßergebnisse



- Zweck: Synthese der Nb_3Sn Phase
- Wärmebehandlung in Vakuumofen bei ca. $650\text{ }^\circ\text{C}$ während ca. einer Woche
- Testleiter werden intern mit Ar ‚gespült‘
- Einige Drähte der selben Produktion werden zu Prüfzwecken mitbehandelt.

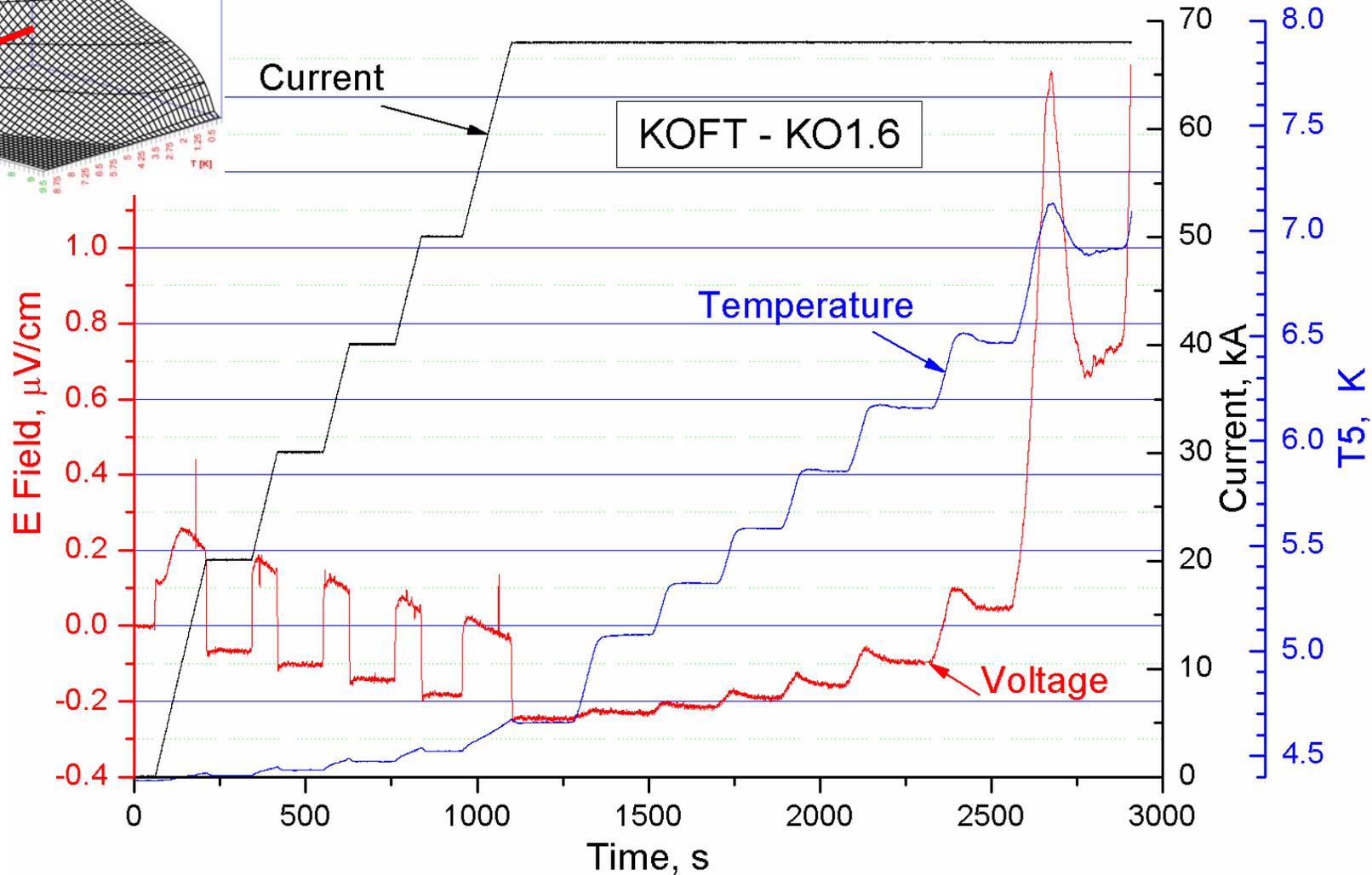
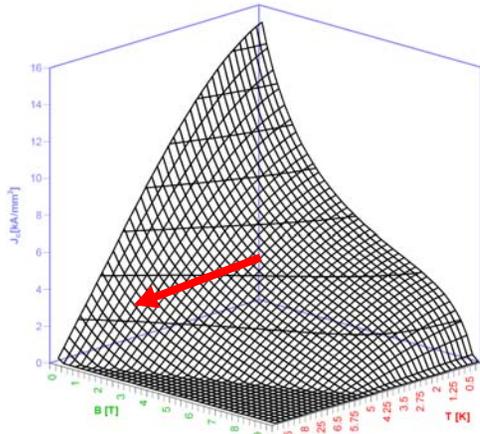




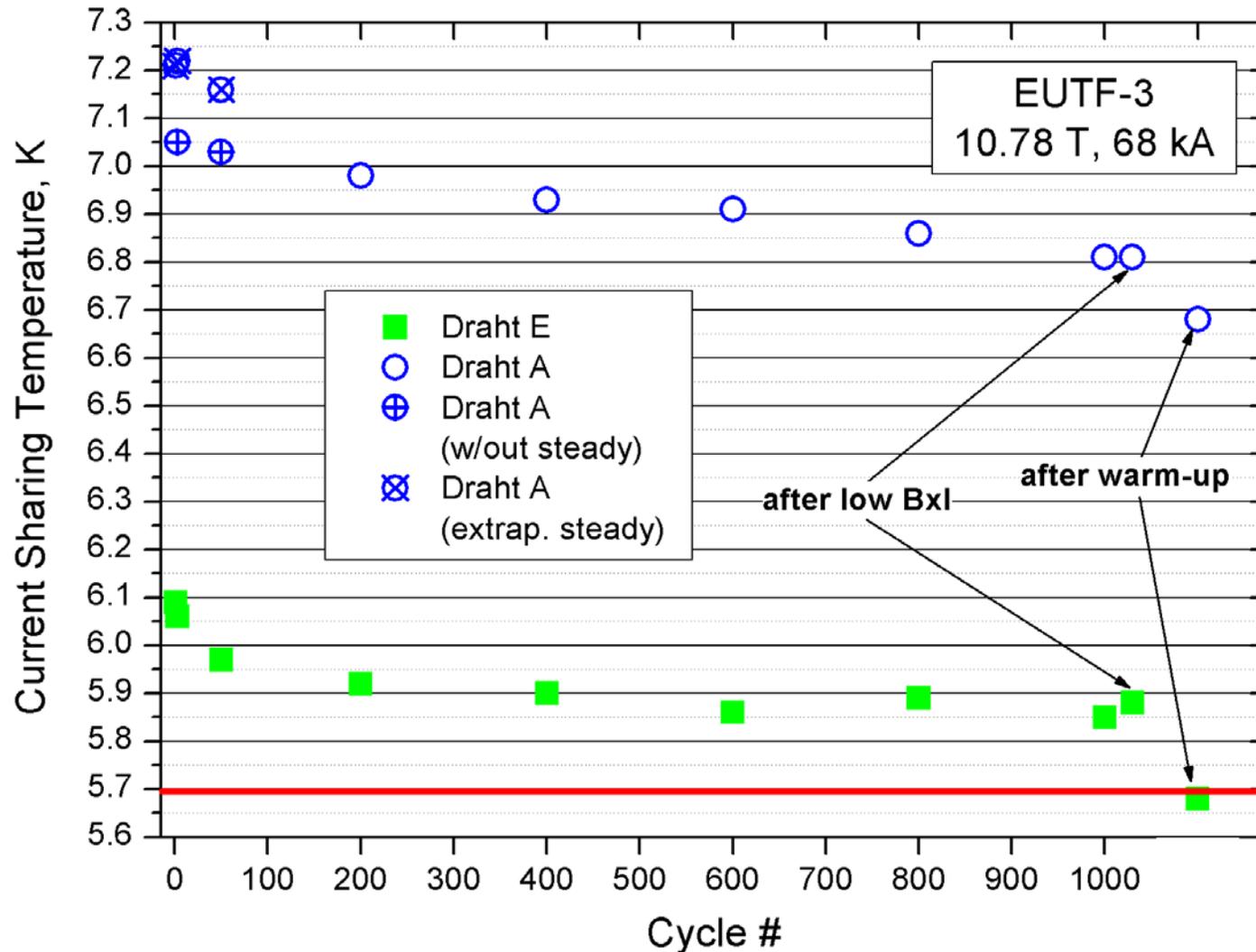
• Eine Lötverbindung für 70 kA und mit weniger als 3 nΩ ist nicht klein!

Eine typische T_{cs} Messung in SULTAN

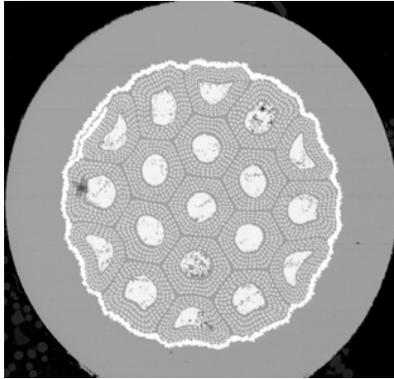
- T (und nicht B oder I) wird erhöht um EM Störungen zu minimieren!
- Meßspannung ist sehr klein: $V_{crit} = 5 \mu\text{V}$!



T_{cs} Entwicklung während zyklischer Lastwechsel



- Eine etwas unerfreuliche Eigenschaft *mancher* ITER TF Testleiter ist ihre Leistungsabnahme (T_{cs} Abnahme) durch zyklische Lastwechsel.
- Test an 1:1 (full size) Testleitern in SULTAN haben diese Tatsache ans Licht gebracht.



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

