

# **Herausforderungen am Supraleiterkabel von ITER zu DEMO**

Pierluigi Bruzzone

EPFL-Swiss Plasma Center, Villigen PSI, Switzerland

- Kernfusionsmagnete: Warum Hochstromkabel?
- In Frage kommende Supraleiter: NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn, HTS
- Anforderungen aus Mechanik und Kühlung
- ITER - Leiterauslegung und Leiterherstellung
- Andere Kernfusionsmaschinen: EAST, KSTAR, W7-X, JT60
- DEMO – Neue Anforderungen, neue Herausforderungen

# Hochstromkabel für Kernfusionsmagnete

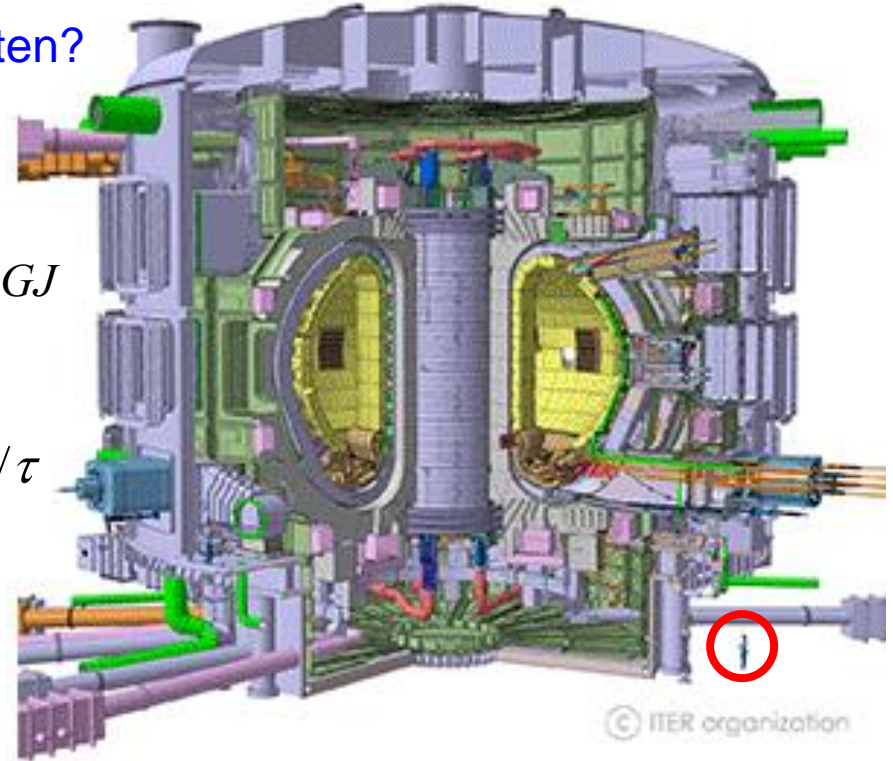
Welche Attribute passen zu Fusionsmagneten?

Hoch Feld, Gross...

Die gespeicherte Energie ist, z.B. für eine DEMO TF Spule,  $E = LI_{op}^2 / 2 = 1/2 \int B^2 dV \approx 9 GJ$

In Fall eines Quenchs, werden die Spulen schnell entladen, mit  $V_d = L dI/dt = LI_{op} / \tau$

Betriebsstrom, Entladungsspannung und Energie sind verknüpft  $V_d = 2 E / \tau I_{op}$



Um  $V_d$  in einem vernünftigen Bereich,  $< 10 kV$ , auszulegen, muss  $I_{op} > 60 kA$  sein.  
Wäre die Spule aus einem Einzeldraht mit  $I_{op} = 100 A$  gewickelt, wäre  $V_d > 700 MV$

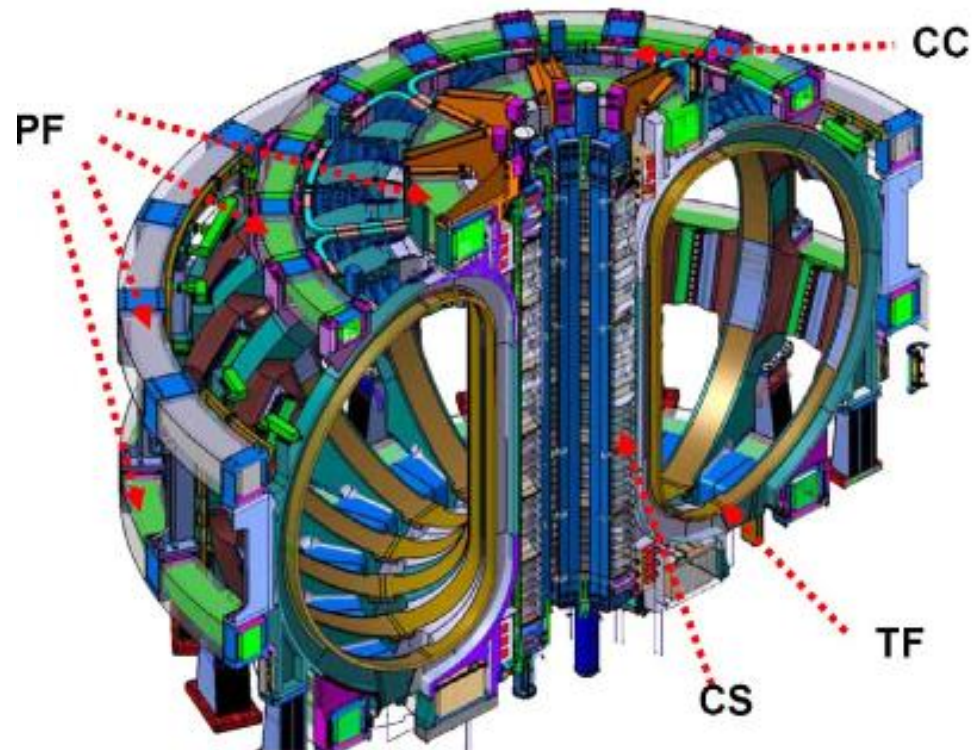
# Supraleiter Anforderungen - Magnetfeld

Das Betriebsfeld ist maßgebend für die Wahl des Supraleitermaterials

Das Zentralsolenoid (**CS**) liefert den Magnetfluss um den Plasmastrom aufrechtzuerhalten. **Höchstes Feld** wird benötigt für ein langes Plasmabrennen.

Das Toroidalfeld erzeugt von den **TF** Spulen schliesst das Plasma ein. Das Feld an der Torusachse ist 5-7 T, während in der Wicklung **11-14 T** erreicht werden.

Die Poloidalfeldspulen (**PF**) und die Korrekturspulen (**CC**) formen und stabilisieren das Plasma. Das Feld in der Wicklung ist **2-6 T**.



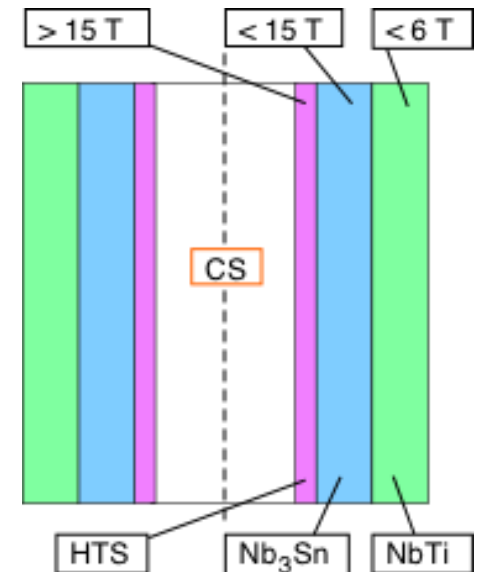
# Gängige und Potenzielle Supraleiter

PF und CC Spule: ITER und JT60 verwenden **NbTi** Supraleiter bei 4.5 K. DEMO wird voraussichtlich auch NbTi wählen.  $MgB_2$  wird im Moment nicht betrachtet und schneidet nicht besser als NbTi ab (Stromdichte, Kabelherstellung, AC Verluste, usw.)

TF Spule: Für ITER, DEMO und künftige Anlagen ist **Nb<sub>3</sub>Sn** bei 4.5 K die Standardwahl. Hochfeld HTS scheiden aus Kostengründen aus.

Zentralsolenoid: Zur Zeit wird nur **Nb<sub>3</sub>Sn** verwendet und betrachtet. Wenn das Betriebsfeld 15 T überschreitet, kämen Hochfeld HTS in Frage.

In DEMO und zukünftigen Kraftwerken, werden aus Kosten- und Platzgründen TF und CS lagenweise gewickelt und abgestuft, wie in Labormagneten, NMR, usw.



# Wenn die HTS Kosten kein Problem wären...

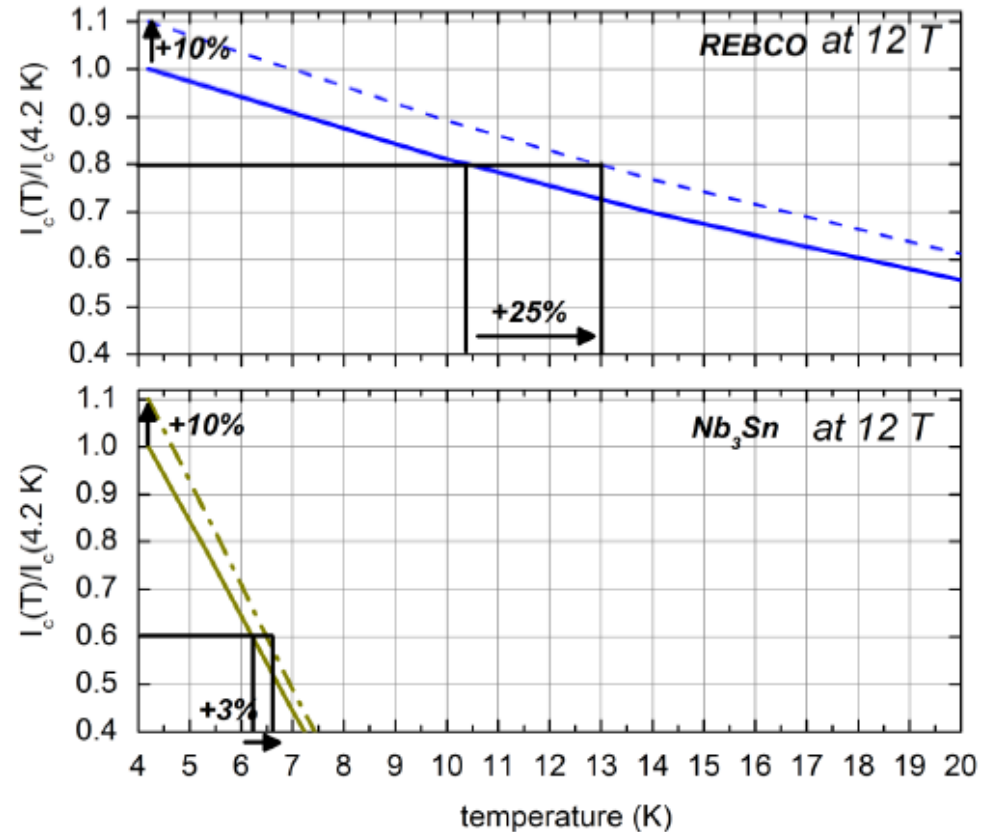
## Welche Vorteile könnten HTS bringen?

Wie weit kann die Betriebstemperatur erhöht werden?

- ☹ Bei 12 T halbiert sich die Stromdichte wenn  $T_{op}$  von 4 K auf 22 K erhöht wird.
- ☹ Bei 20 K, He Gas und flüssiger H haben sehr niedrige Dichte -> schlechte Wärmeabfuhr.

☺ Verglichen mit  $Nb_3Sn$ , erlaubt das niedrigere  $dJ_c/dT$  des HTS einen Betriebsstrom  $I_{op}$  nahe bei  $I_c$  mit relativ großer Temperaturmarge.

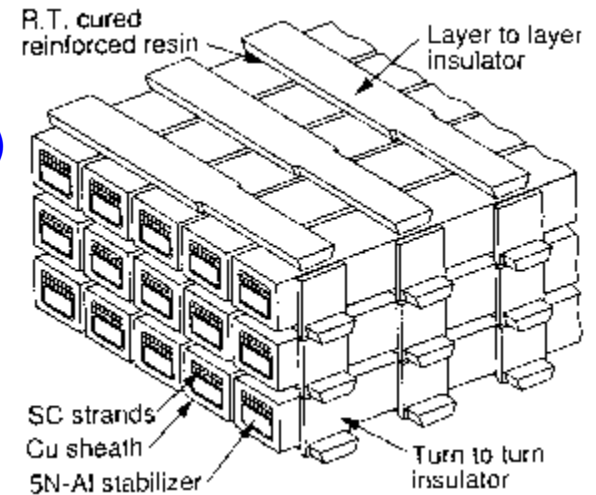
☹ Die hohe  $T_c$  ( $\gg T_{op}$ ) verlangsamt die Quenchausbreitung und stellt Herausforderungen für Quenchschutz.



# Anforderungen aus Mechanik und Kühlung

Auf Grund der großen Lorentzkräfte ( $F \propto BJR$ ) ist im Leiterquerschnitt von Kernfusionsmagnete der Stahl (>50%) dominierend. Das Wicklungspaket muss über eine hohe Steifigkeit verfügen.

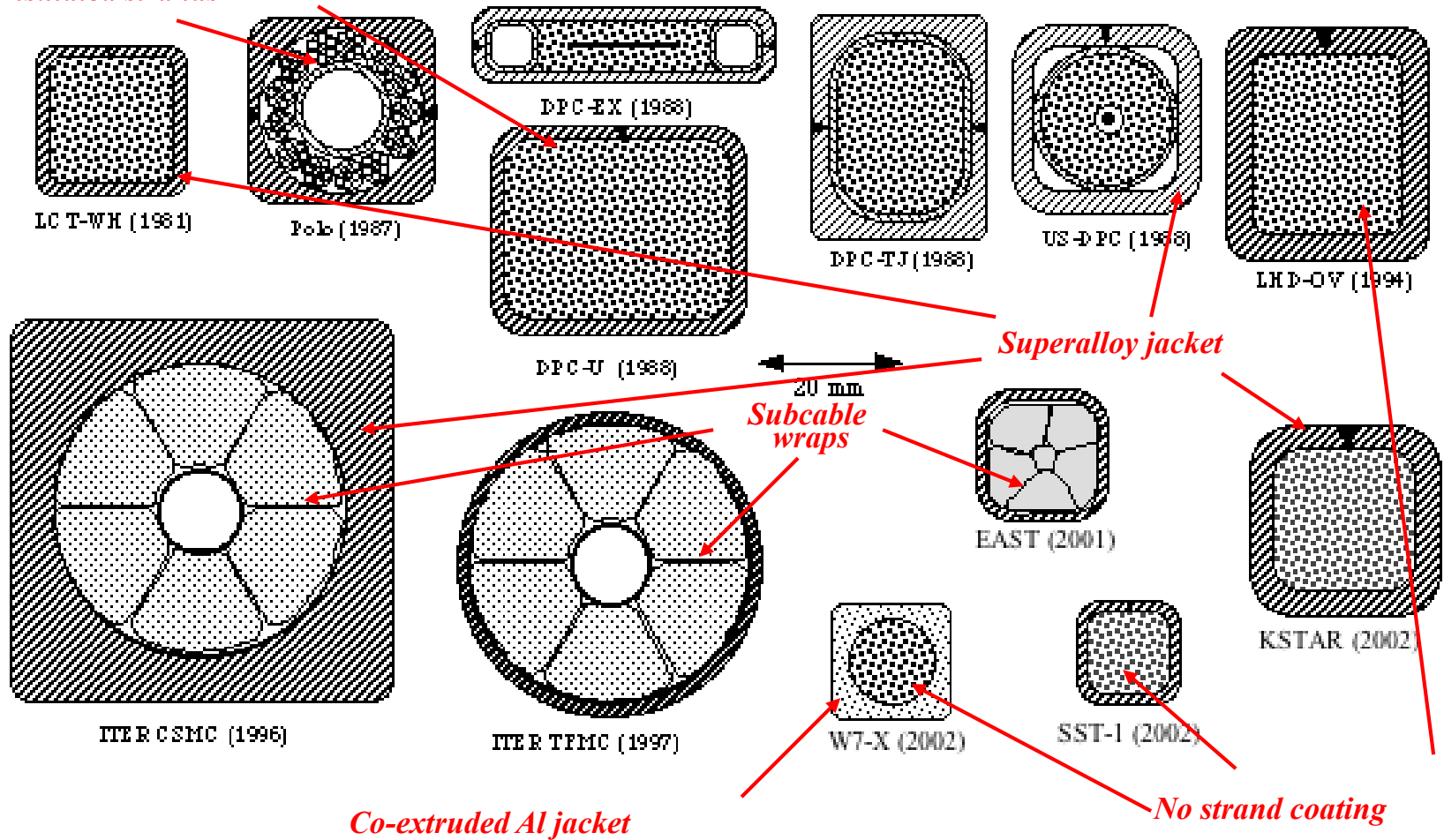
Heliumdurchlässige Wicklungspakete (Badkühlung) sind aus mechanischen Gründen nicht zulässig



Um die mechanischen und thermohydraulischen Anforderungen (steifes Wicklungspaket und effiziente Wärmeabfuhr) zu erfüllen, wird **forcierte Kühlung** mit überkritischem Helium und Epoxy **Imprägnierung** unter Vakuum eingesetzt.

# Die "Cable-in-Conduit" Leiterauslegung wurde in den letzten zwei Jahrzehnten am meisten für Kernfusionsmagnete verwendet

*Insulated strands*





Vor 25 Jahren wurde die „Cable-in-Conduit“ Auslegung für die ITER Leiter gewählt, mit den entsprechenden Vor- und Nachteilen.

Grosse benetzte Drahtoberfläche -> Thermische Stabilität

Nur Punktkontakte am Drähten -> Niedrige AC Verluste

Einfache Mehrfachverseilung des Drahtbündels

Umhüllung durch Einziehverfahren und Verdichtung

Großer Heliumquerschnitt -> Niedrige Stromdichte

Kleiner hydraulischer Durchmesser -> Großer Druckabfall

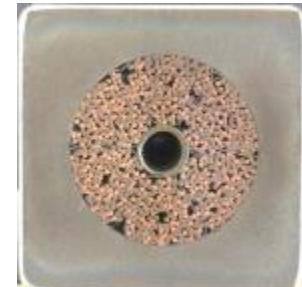
Drahtbewegung unter elektromagnetischer Belastung

Für  $Nb_3Sn$ , ungeeignet für „React & Wind“ Methode

## Die ITER Leiter



TF



CS



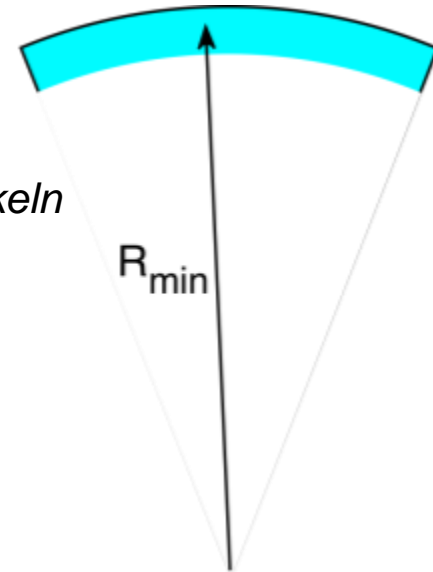
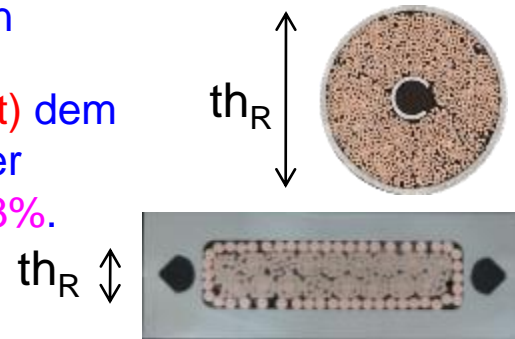
PF



MB

# Wicklungen aus Nb<sub>3</sub>Sn Drähten

- Da Nb<sub>3</sub>Sn eine spröde intermetallische Verbindung ist, die nach der Wärmebehandlung (WB) entsteht, dürfen die Drähte nicht nach der WB gebogen/verformt werden. **Verseilen** muss **vor** der WB stattfinden
- Die WB kann entweder **vor (React&Wind)** oder **nach (Wind&React)** dem **Wickeln** stattfinden, vorausgesetzt dass die Dehnung während der Bearbeitung nach der WB in elastischem Bereich bleibt,  $\epsilon_b < \pm 0.3\%$ .
- Damit React&Wind möglich wird,
  - Kabelgrösse in radialer Richtung,  $th_R$
  - Grösster Biegeradius  $\infty$
  - Kleinster Biegeradius,  $R_{min}$



Wenn bei der WB der Radius  $R_{ht} = 2R_{min}$  ist, ist die Dehnung beim Wickeln

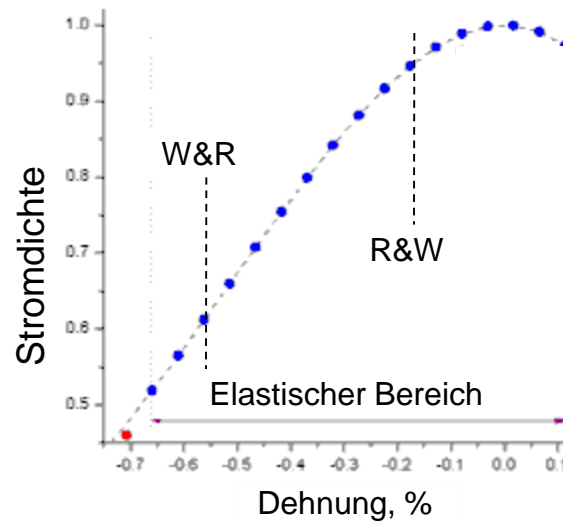
$$\epsilon_b = th_R / 2R_{ht} = th_R / 4R_{min}$$

In einem kleinen Solenoid: 1mm Draht, 50 mm Bohrung  $\rightarrow \epsilon_b = 1\% \rightarrow$

~~R&W~~

ITER TF und CS: 40mm Kabel,  $\approx 2$  m Radius  $\rightarrow \epsilon_b = 0.5\% \rightarrow$  ~~R&W~~

10 mm Flachkabel für ITER:  $\rightarrow \epsilon_b = 0.13\% \rightarrow$  **R&W möglich**



## React & Wind

## Wind & React

Umhüllung (Stahl) nach der Kabel WB

- > niedrigere thermische Dehnung
- > kleinerer  $Nb_3Sn$  Bedarf
- > **Kostenvorteile**

Einfach Wickeln: keine enge Toleranz bei WB, elektrische Isolation und Verbindungen beim Wickeln

-> **Kostenvorteile**

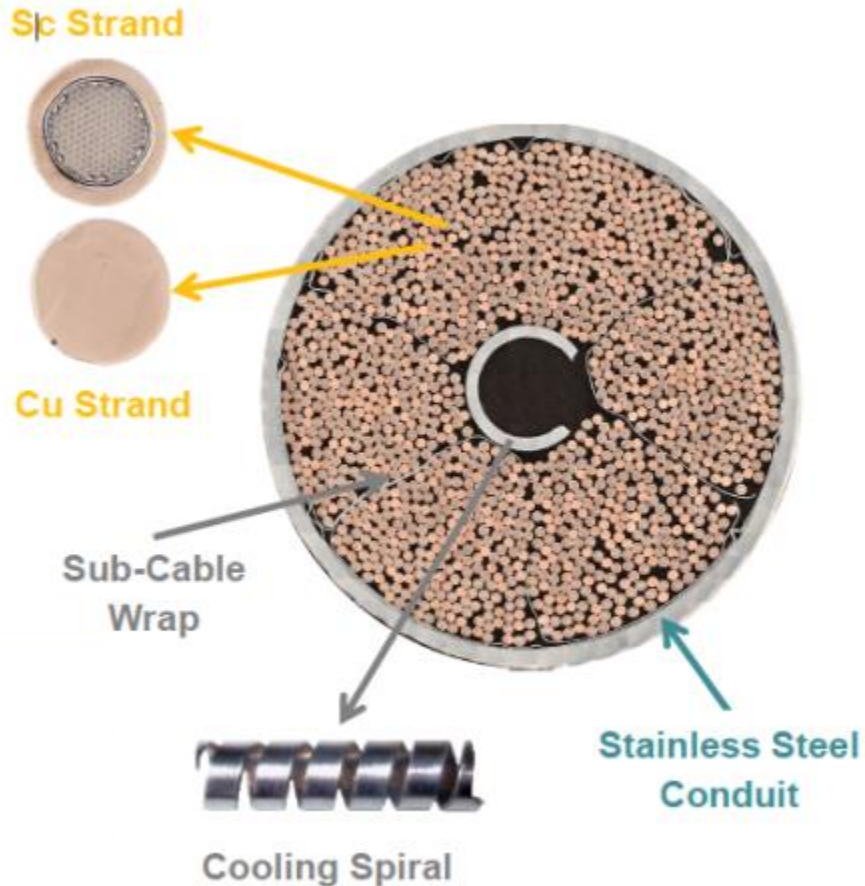
Leiterherstellung ohne WB.

Enge Toleranz während WB für die gesamte Wicklung, komplizierte Handhabung für elektrische Isolation und Verbindungen.

Erhöhte thermische Dehnung im Betrieb (niedrigere Stromdichte)

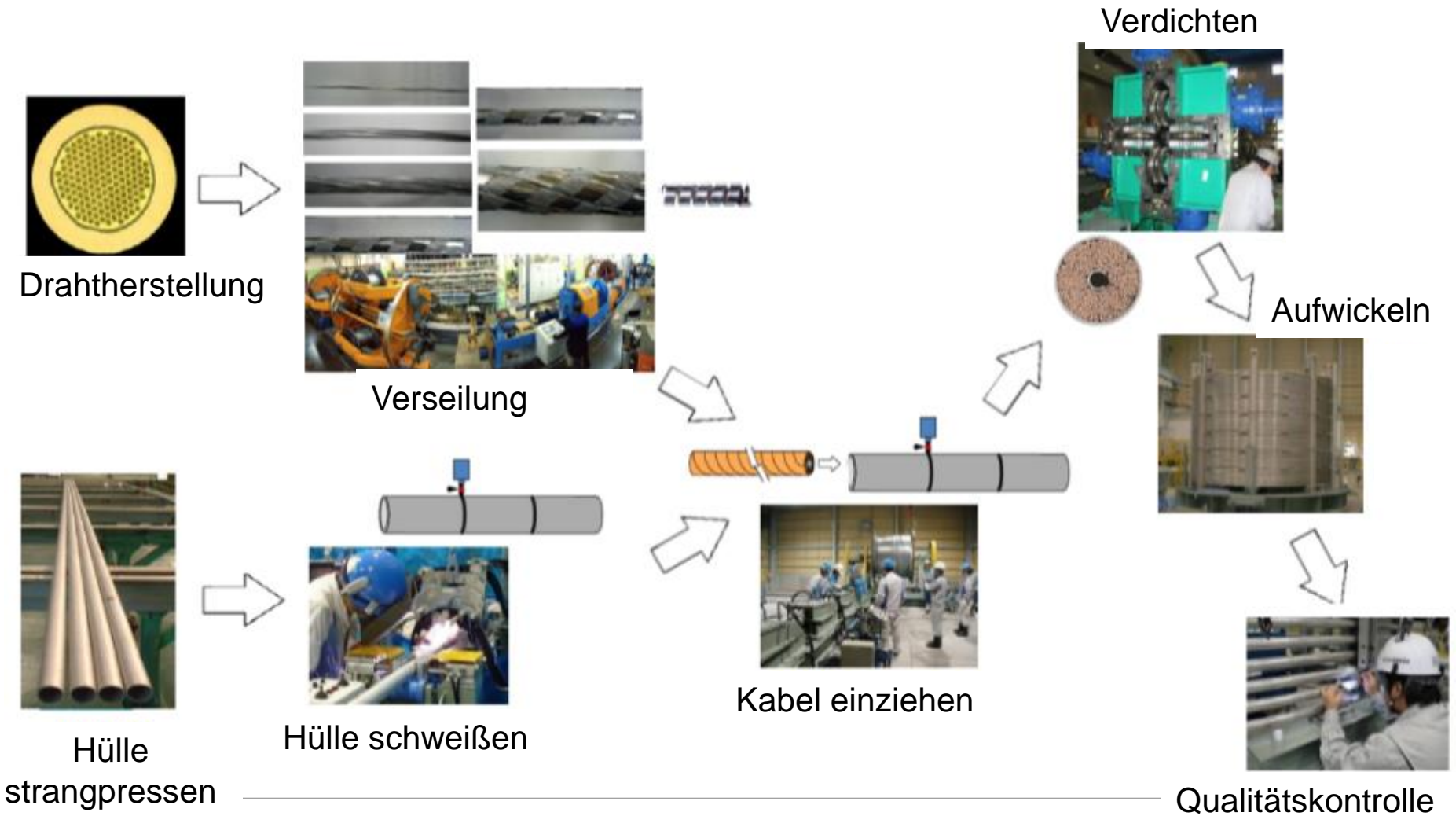
-> mehr  $Nb_3Sn$  Bedarf.

# Die ITER Leiter - Komponente



- Supraleitende  $Nb_3Sn$  oder  $NbTi$  Drähte, verseilt mit Kupferdrähten
- Mehrstufiges Seil (fünf Kabelstufen) mit Stahlbandage und Zentralspirale
- Stahlhülle (316LN) aus Stumpfgeschweißten, stranggepressten Einheiten

# Die ITER Leiter - Herstellung



# Die Variante der ITER Leiter

$Nb_3Sn$

TF



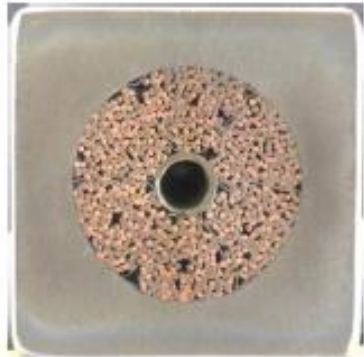
PF



Nb-Ti



CC



CS



MB



CB

- Betriebsstrom bis 68 kA
- Betriebsfeld bis 13 T
- Bis zu 60 000 Zyklen
- Einheitslänge  
760 m für TF Leiter  
918 m für CS Leiter  
894 m für TF Leiter

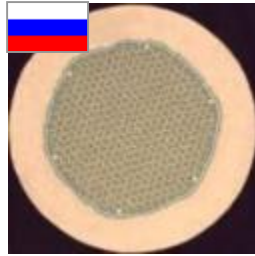
# Was, Wo und Wann hergestellt wird

Neun Lieferanten für 650 t Nb<sub>3</sub>Sn und 250 t NbTi Draht

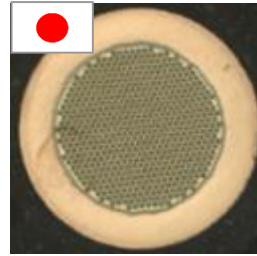
## Nb<sub>3</sub>Sn/TF Conductor



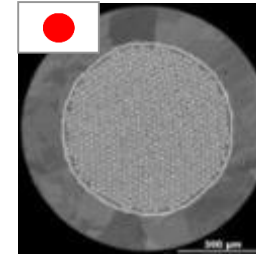
BAS (Br)



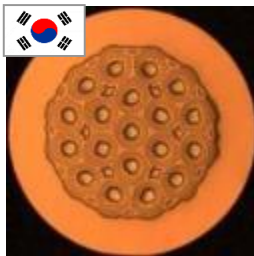
ChMP (Br)



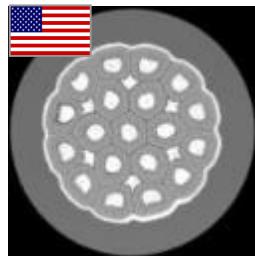
Hitachi (Br)



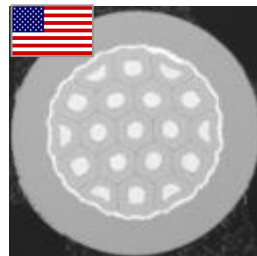
Jastec (Br)



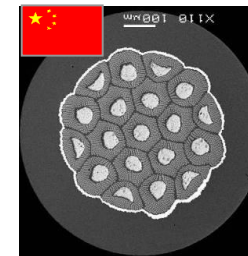
KAT (IT)



Luvata (IT)

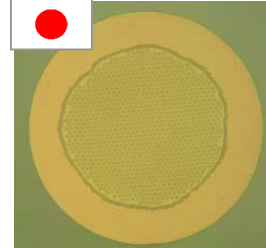
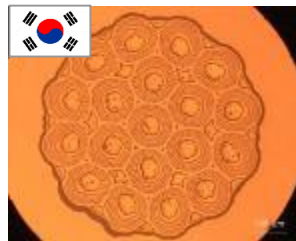
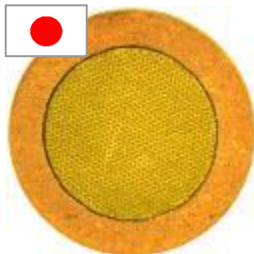


OST (IT)

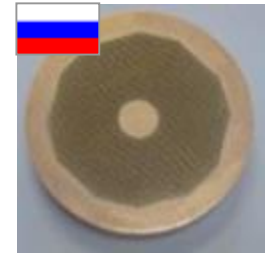


WST (IT)

## Nb<sub>3</sub>Sn/CS Conductor

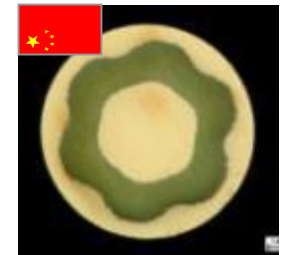


## Nb-Ti/PF1&6



Type 1: 1.6:1  
ChMP (RF)

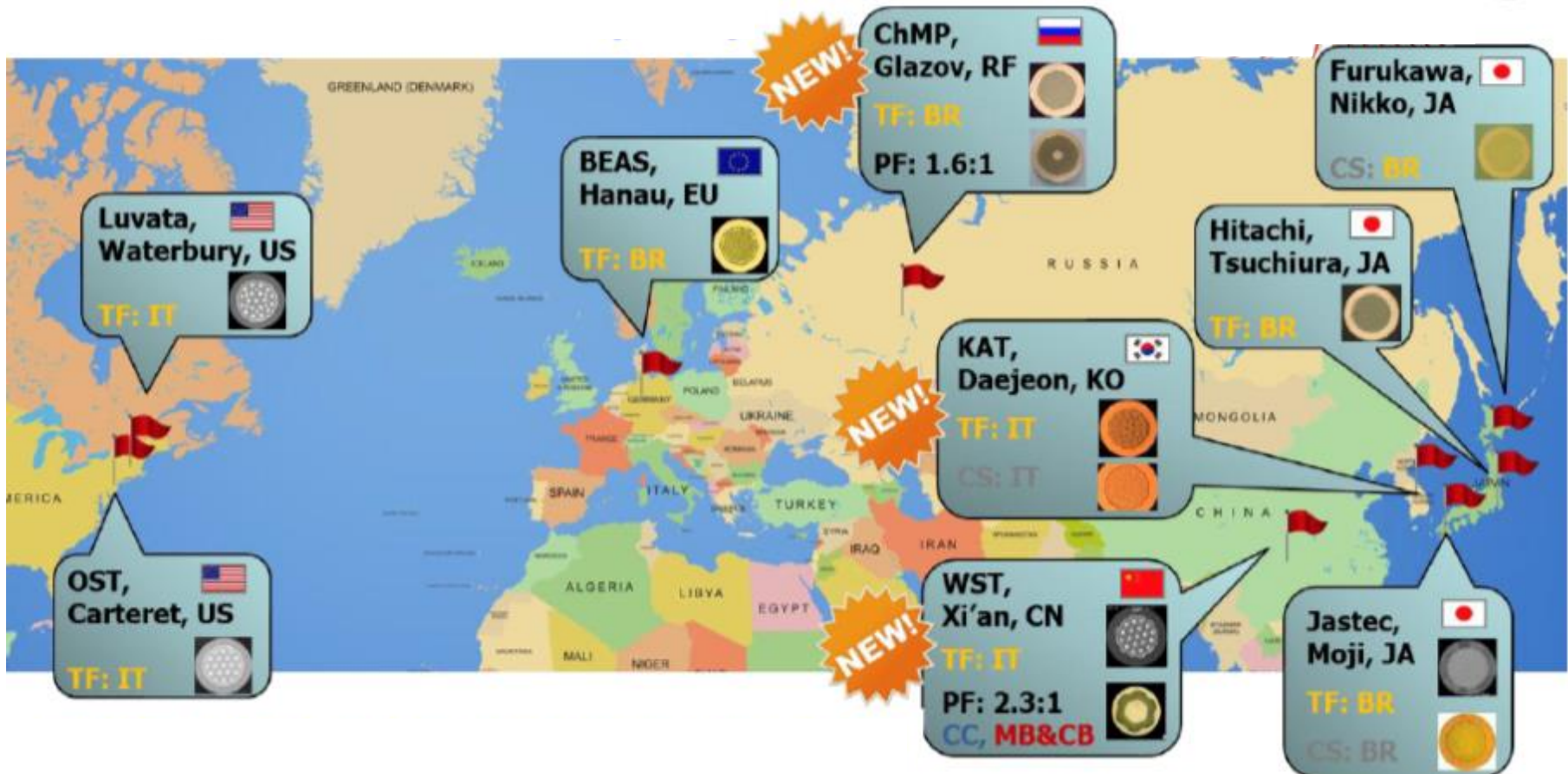
## Nb-Ti/PF2-5 CC, MB&CB



Type 2: 2.3:1  
WST (CN)

# Was, Wo und Wann hergestellt wird

Drei Drahtlieferanten sind neu auf dem Markt

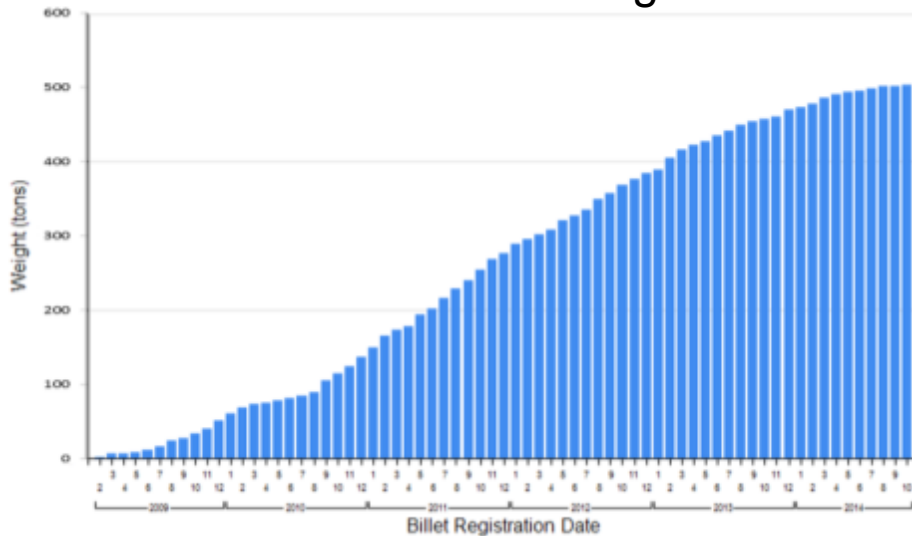




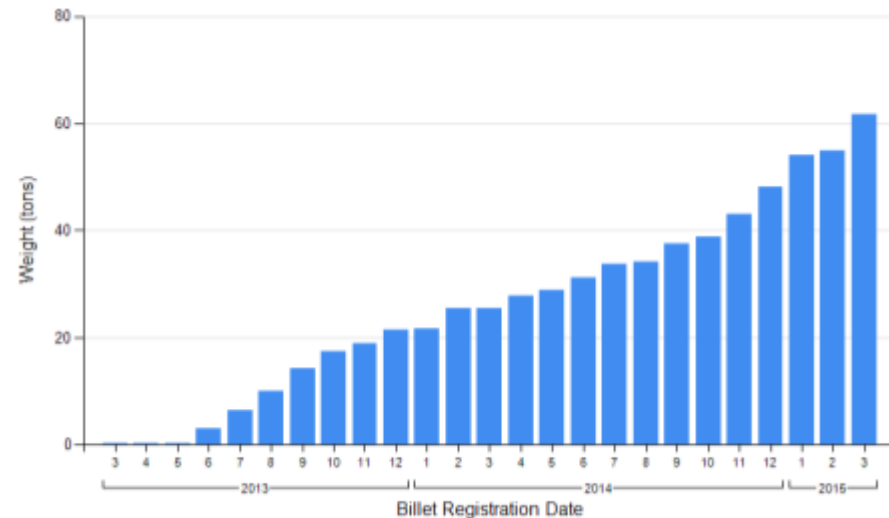
# Was, Wo und Wann hergestellt wird

Die Produktionskapazität für Nb<sub>3</sub>Sn Draht erreichte 100 t/Jahr in den letzten 5 Jahren

TF Draht 100% geliefert



CS Draht 85% geliefert



# Kabelherstellung

Elf Lieferanten – aus strategischen eher als technischen Gründen

- *EU: TRATOS Cavi, Italy (TF, PF)*
- *RF: VNIKP, Podolsk (TF, PF)*
- *KO: Nexans Korea (TF)*
- *US: New England Wire Technology, NH (TF)*
- *China: Boasheng (TF)*
- *China: Changtong (PF)*
- *China: ASIPP (CC)*
- *Japan: Hitachi Cable (TF)*
- *Japan: Mitsubishi Cable (CS)*
- *Japan: Furukawa (CS)*
- *Japan: Nexans Korea (CS)*



# Leiterumhüllung – Fünf Lieferanten Weltweit



TF & CS  
Jacketing  
**at NSE**



TF, PF, CC & Feeder  
Jacketing **at ASIPP**



TF Jacketing  
**at IHEP**



TF & PF Jacketing  
**at Criotec**



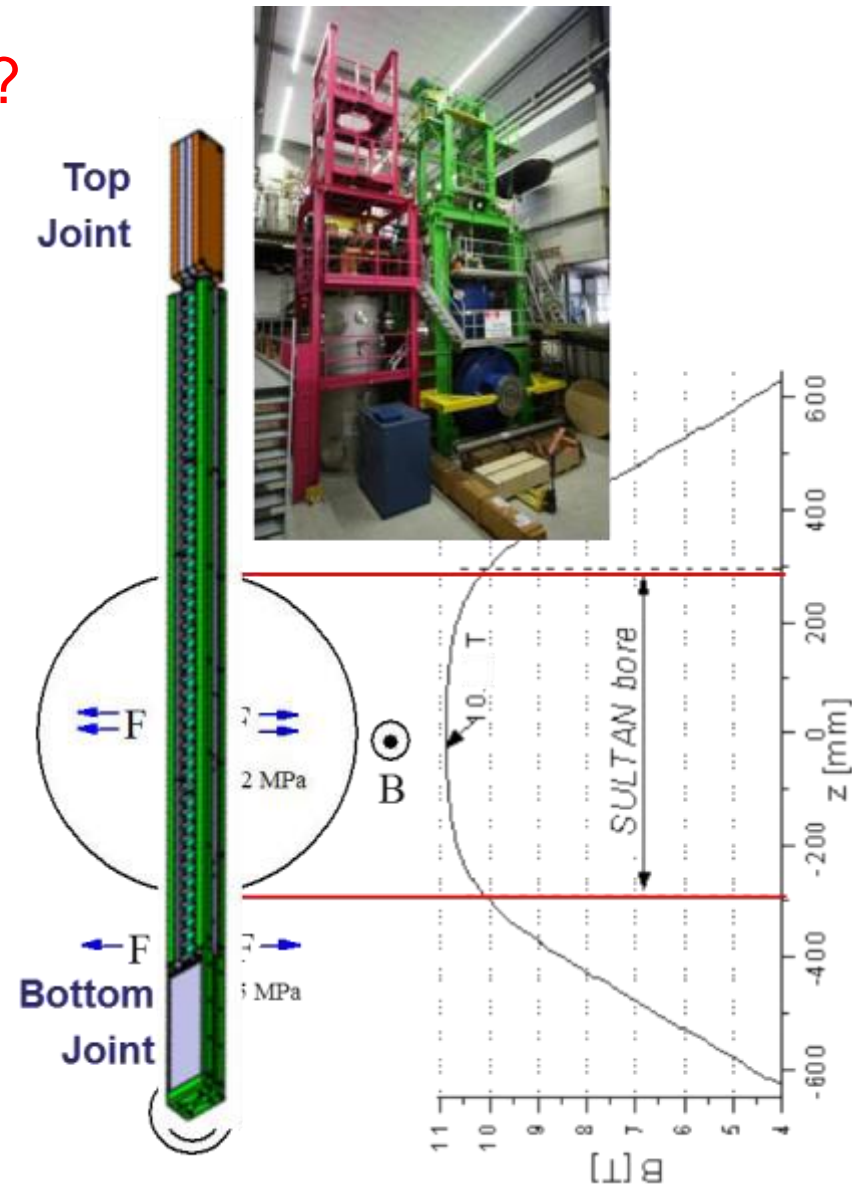
TF Jacketing  
**at HPM**

# Funktionieren die ITER Leiter?

ITER Leiterproben für Qualifikation und Qualitätskontrolle sind in der SULTAN Testanlage unter relevanten Betriebsbedingungen (Strom, Temperatur, zyklische Belastung, Feld) geprüft. Der Haupttest ist  $T_{cs}(I_{op}, B_{op})$ .

Die SULTAN Ergebnisse werden mit den aus der Auslegung erwarteten Werten verglichen.

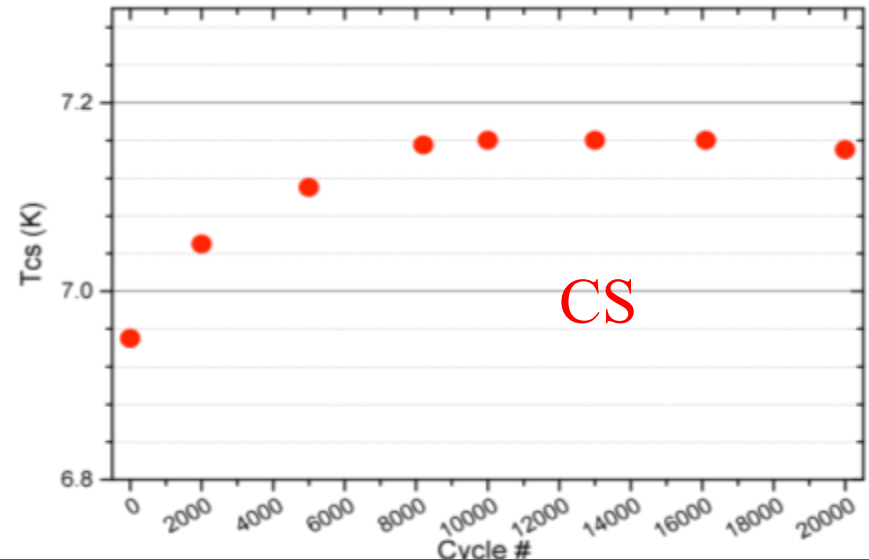
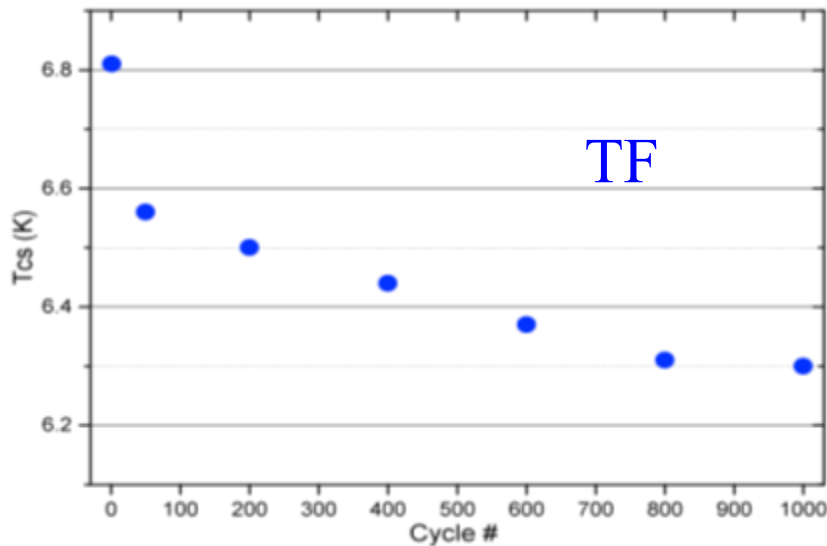
Für die NbTi Leiter, stimmen die Testergebnisse mit der Auslegung überein. Das Leiterverhalten kann zuverlässig aus den Drahtresultaten hergeleitet werden.



## ...und die Nb<sub>3</sub>Sn ITER Leiter?

In Folge der zyklischen Belastung

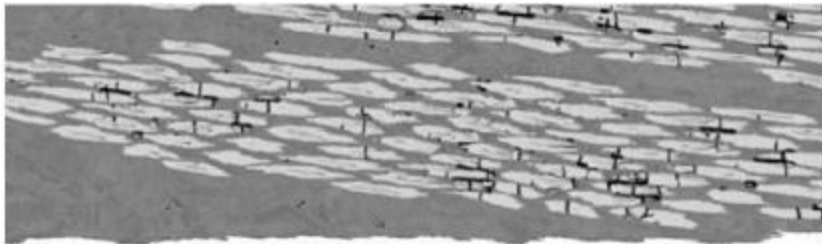
- ☺ Die durchschnittliche thermische Dehnung entspannt sich mit den kleinen Bewegungen der Drähten -  $\rightarrow T_{cs}$  steigt und stabilisiert sich.
- ☹ Filamentbrüche entstehen wegen kleiner, lokaler Biegung -  $\rightarrow T_{cs}$  nimmt stetig ab bis zur totaler Zerstörung.



In **TF Leitern**, mit **langem Drall** in der ersten Kabelstufe, überwiegen die negativen Folgen der Drahtbiegung. In **CS Leitern**, mit **kurzem Drall** in der ersten Kabelstufe, findet keine wesentliche Drahtbiegung statt.

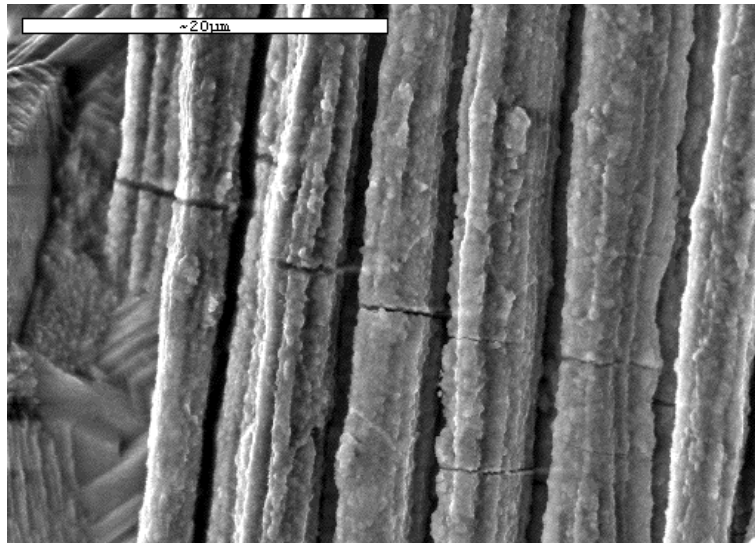
# Zusammenfassung von ITER Nb<sub>3</sub>Sn CICC

Die Degradierung mit zyklischer Belastung ist auf "*Filamentbrüche bei Querbelastung*" zurückzuführen. Ein kurzer Drall in der ersten Kabelstufe entschärft das Problem.

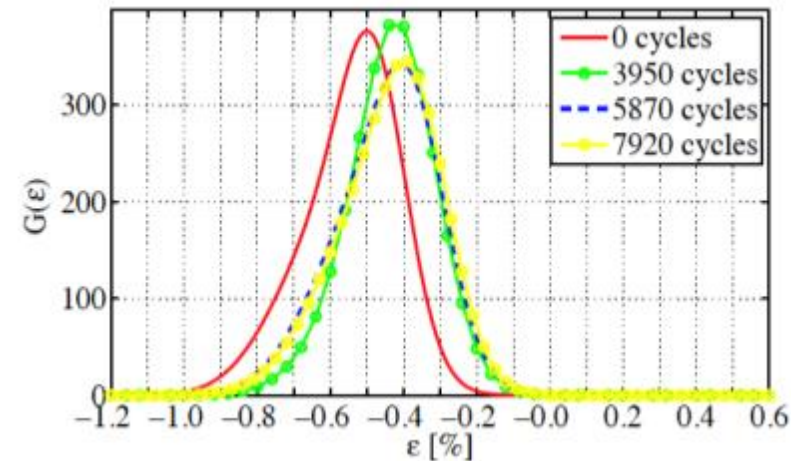


↑ *Cracks at bending, Jewell 2003*

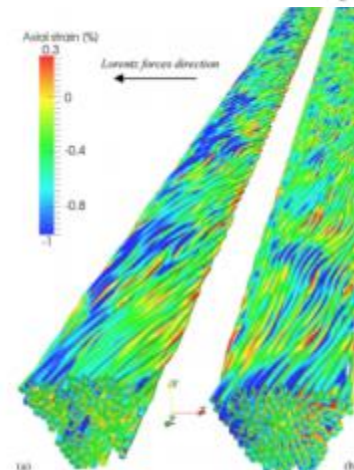
↓ *Bochvar 2002*



Die "Dehnungsverteilung" ist der Grund für Ergebnisse unter den Erwartungen: Das negative Ende der Verteilung bestimmt die gemessene Stromdichte.

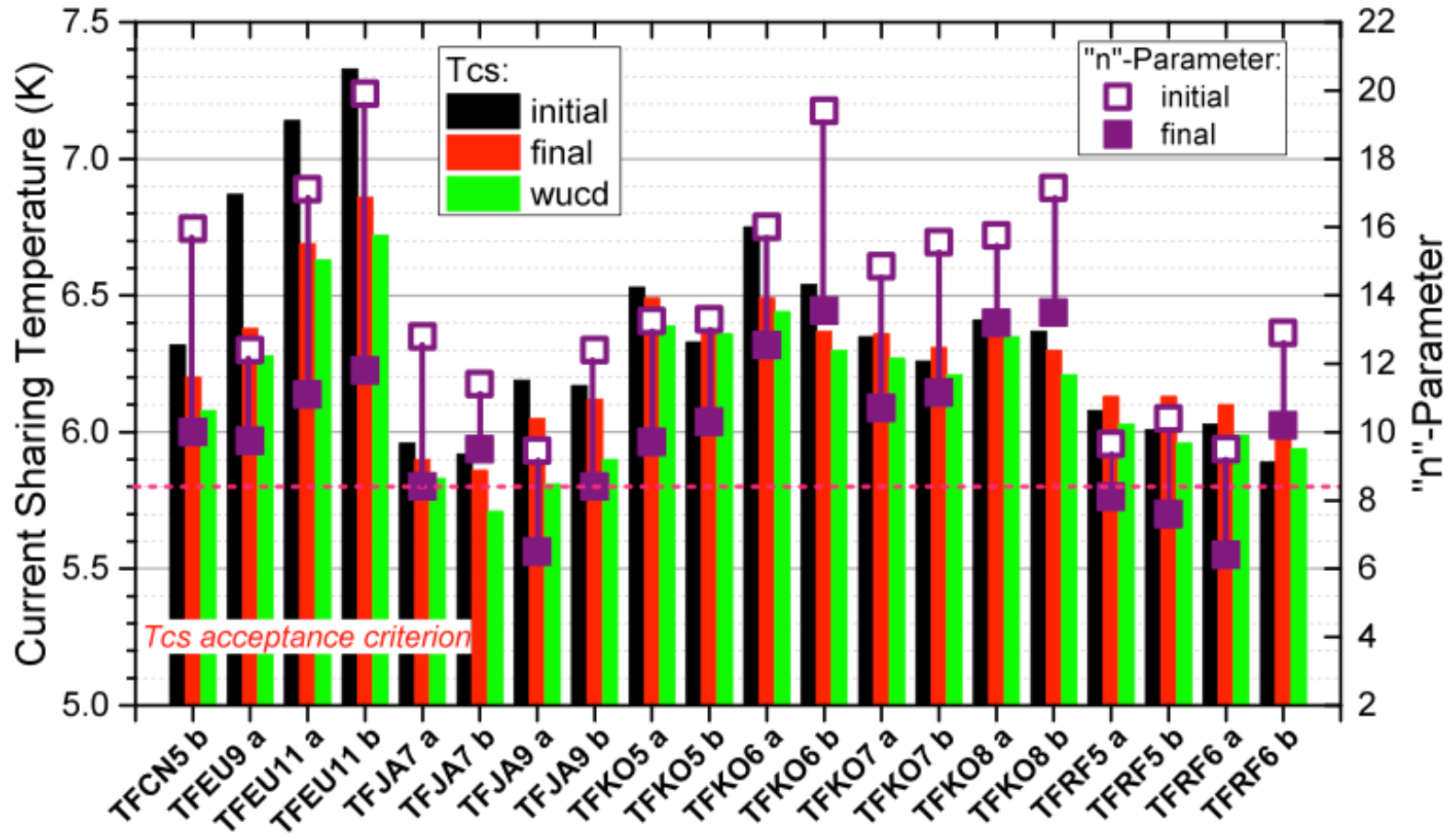


↑ *Calzolaio 2012*



← *Bajas 2011*

# Degradierung der ITER TF Leiter



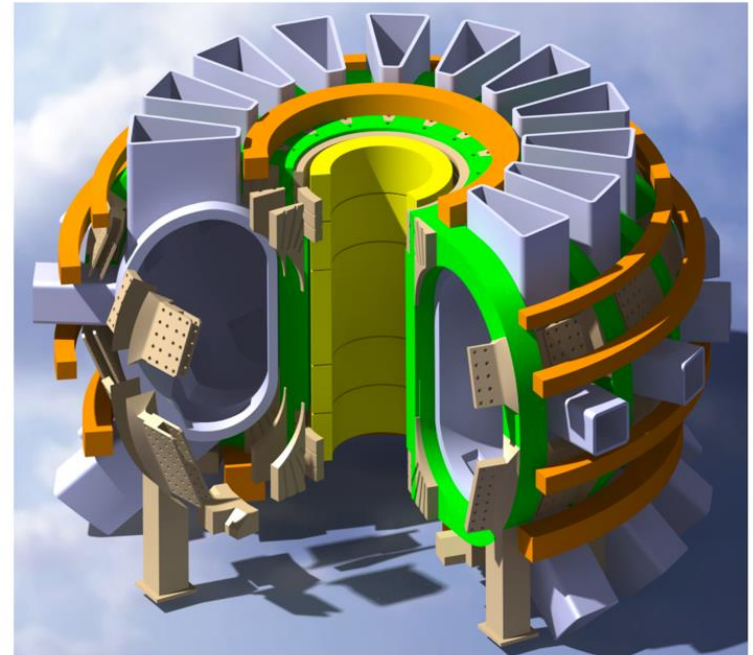
Grosse Streuung der Resultate, deutliche Abnahme durch zyklische Belastung und thermische Zyklen

## DEMO – Neue Anforderungen für die Leiter?

DEMO (Eurofusion) ist wesentlich größer als ITER. Die Spulherstellung stellt neue Herausforderungen wegen Logistik, Gewicht, Zusammenbau. Betriebsfeld und Betriebsstrom sind in ähnlichem Bereich wie bei ITER. Gibt es überhaupt neue Anforderungen für die DEMO Leiter?

**Ja - > die KOSTEN**

	DEMO	ITER
Hauptradius, m	9	6.2
Toroidalfeld am Torus, T	6.8	5.3
Plasmastrom, MA	14	15
Energie per TF Spule, GJ	9.06	2.28
Höchstes Feld an TF Spule, T	12.5	11.7
Gewicht per TF Spule, t	>1000	360
Höchstes Feld an PF Spule, T	5	5
Höchstes Feld an CS, T	?	13





# Eine grobe Schätzung

- Ein Kraftwerk wie DEMO liefert **500 MW** elektrisch.
- Davon wird  $\approx 30\%$  für Heizung und Kryogenie gebraucht. Wir verkaufen **350 MW**.
- Mit Marktpreise um **6-8 ¢/kWh**, wir erwirtschaften **200 M€/Jahr** (ohne Steuer!).
- Wir geben **50 M€/Jahr** für Betriebskosten (Saläre, Wartung, Ersatzteile) aus.
- Ein Nettoertrag  $\approx 150$  M€/Jahr sollte innerhalb 10-15 Jahre die Baukosten tilgen.

**Das ergibt eine tragbare Investition von 2-2.5 B€**

Die Kosten des Magnetsystems werden auf 30% der gesamten Kosten geschätzt.

Das heißt, dass die DEMO Spulen höchstens **750 M€** kosten sollten.

Die Kosten für das (kleinere) ITER Magnetsystem betragen mehr als 2 B€ !!!

# Kostensenkung bei DEMO Leiter

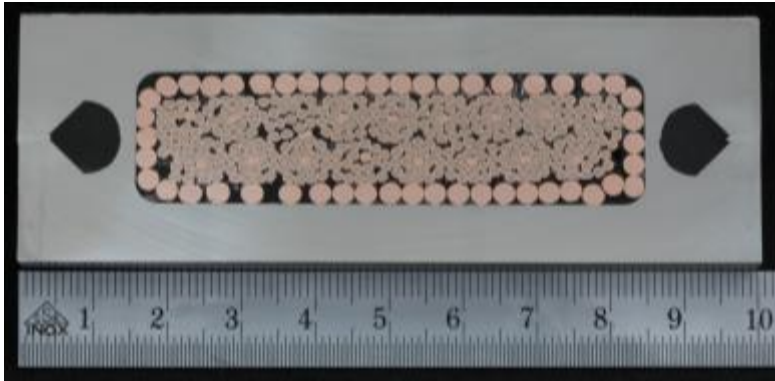
**Abgestufte Wicklungen:** Der Querschnitt der Nb<sub>3</sub>Sn Supraleiter wird der lokalen Feldstärke angepasst. Die Spule muss lagenweise gewickelt werden

**Hybride Wicklungen:** Bei Feldstärken niedriger als 6T, ersetzen “billige” NbTi Leiter die teuren Nb<sub>3</sub>Sn Leiter (nur bei lagenweise gewickelten Spulen möglich).

**React & Wind Methode:** Dank der kleinen thermische Dehnung, ist die Nb<sub>3</sub>Sn Stromdichte mit React&Wind 50% höher im Vergleich zu Wind&React. Der Supraleiter muss in einem Flachkabel verseilt werden.

Die Nb<sub>3</sub>Sn Kosten sind mit Abstand der Treiber der Kosten des Magnetsystems. Im Vergleich zu „Double Pancake / Wind & React“ (ITER) kann der Nb<sub>3</sub>Sn Bedarf mit den obenerwähnten Maßnahmen auf 1/3 reduziert werden

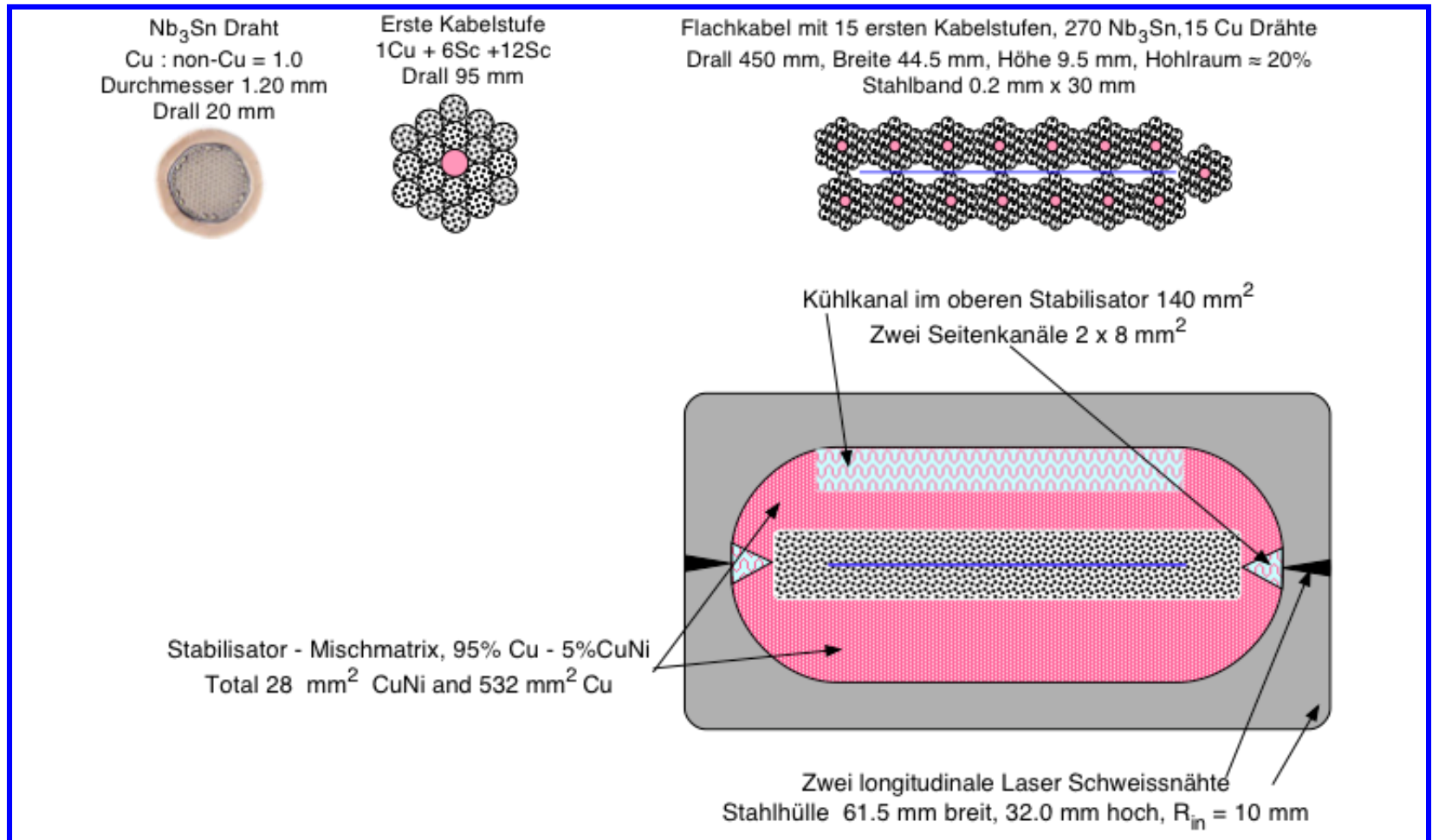
# Erster Nb<sub>3</sub>Sn Prototyp für TF DEMO Leiter – 82 kA / 13 T



Test in SULTAN in 2015

React&Wind demonstriert – Keine Degradation mit zyklischer Belastung  
Niedrige Filament Dehnung – Drahteigenschaften bleiben im Kabel erhalten

# Neue Auslegung für TF DEMO Leiter – 63 kA / 12.5 T



# Zum Abschluss

- Mit dem ITER Projekt hat die industrielle Massenproduktion von Hochstromsupraleiterkabeln, >40 kA, erstmalig stattgefunden.
- Die Nb<sub>3</sub>Sn Produktion für ITER ist größer als die gesamte Menge am Nb<sub>3</sub>Sn, die in den letzten 50 Jahren davor produziert wurden.
- Die Auslegung der ITER Magnete und Kabel ist nicht kosteneffizient und die Degradierung unter zyklischer Belastung ist ein Problem.
- Für DEMO und künftige Kernfusionkraftwerke, ist eine Kostensenkung unabdingbar, um Elektrizität auf dem Markt verkaufen zu können.
- Gescheite Auslegungen der Magneten und Leitern können zu einer deutlichen Kostensenkung für DEMO beitragen.
- Die erwartete Senkung der Preise für Nb<sub>3</sub>Sn Drähte hat nicht stattgefunden. Das Verhältnis zwischen Rohmaterialkosten und Drahtpreis bleibt sehr hoch im Vergleich zu NbTi Draht.