

Fixierung und Kühlung

sl Spulen / Magnetgestaltung:

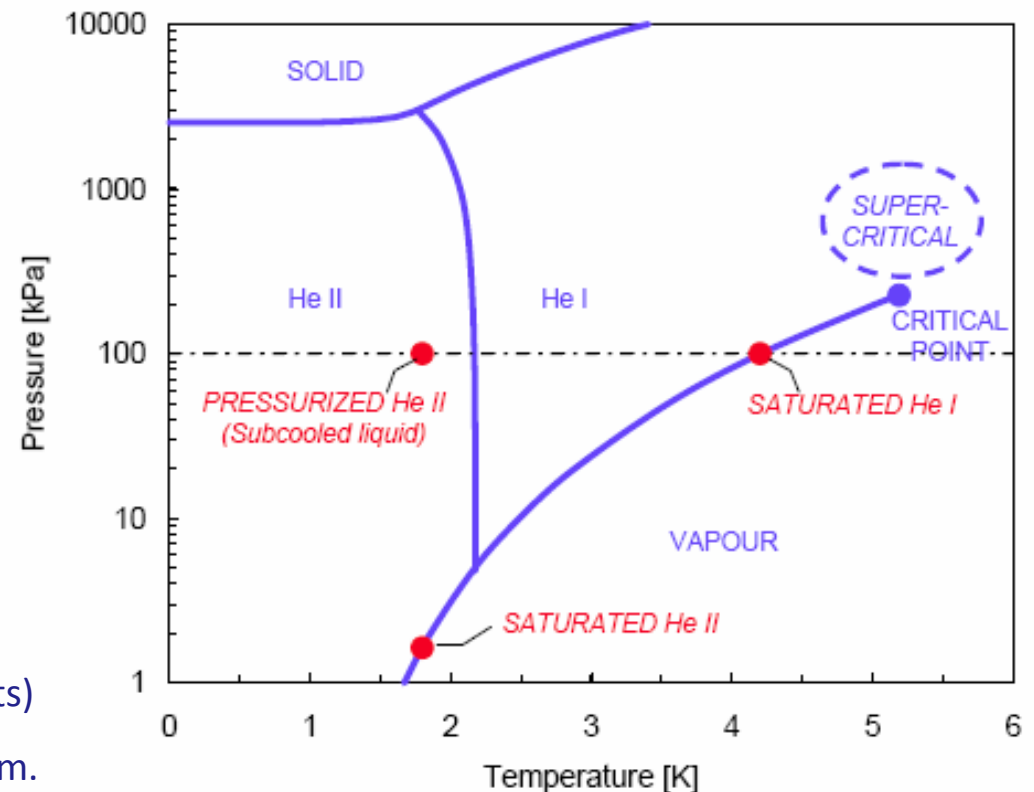
- Drähte perfekt zu fixieren (Lorentz-Kräfte bis zu 3000 N/cm^2 , nahe Dehngrenze)
 - ⇒ Vergießen in Epoxidharz, V2A-Mantelrohr, mechan. Vorspannung
- starke Abstützungen zw. Spule und Kryostat nötig (Magnetkräfte: ... kN)

Kühlung:

- Flüssighelium (4,2 K / 1 bar)
- Helium suprafluid abgepumpt / unterkühlt (1,8 K / 16 mbar bzw. 1,8 K / 1 bar)
- Helium überkritisch (5 K / 5 bar)

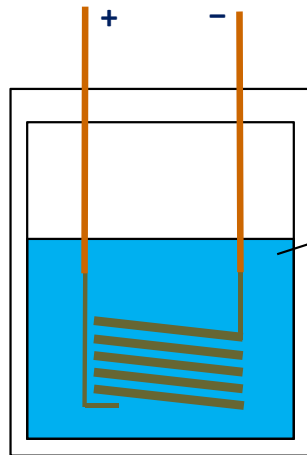
Realisierung Magnetkühlung:

- a) Badkühlung, transparente Spule
- b) Spule vergossen, Kühlung an Außenflächen
- c) Innenkühlung (Kühlkanal innerhalb des sl Drahts)
- d) Leitungskühlung ("trockene Kühlung", z.B. therm. Verbindung mit Cryocooler)



Quelle: CERN

Techn. SL, Kühltechnik



Realisierung Magnetkühlung:

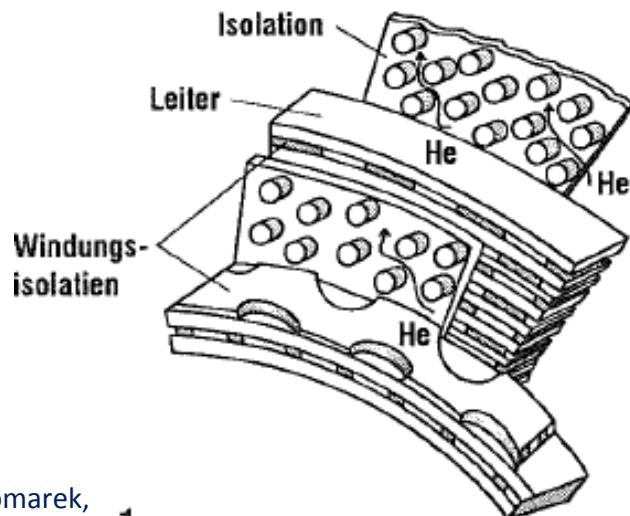
a) Badkühlung, transparente Spule

LHe @ 4,2 K bzw.
He suprafluid @ 1,8 K

Bauart für erste sl Magnete

Wicklungen "heliumtransparent", Abstandshalter
für Zwischenräume

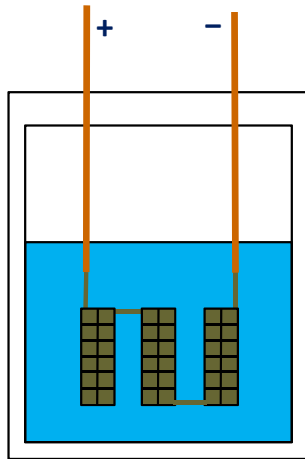
Spule als Ganzes in LHe-Kühlbad eingetaucht



P. Komarek,
Hochstromanwendung
der Supraleitung, 1995

- + Einzelwindungen idealer Kontakt zu LHe-Kühlbad
- + hohe Betriebssicherheit ("kryogene Stabilisierung")
- große Abmessungen Gesamtpule
- großes LHe-Inventar
- Draht-Fixierung (gegen Lorentz-Kräfte) und Abstützungen schwer zu realisieren

Techn. SL, Kühltechnik



Realisierung Magnetskühlung:

b) Spule blockförmig vergossen, Kühlung über Außenflächen

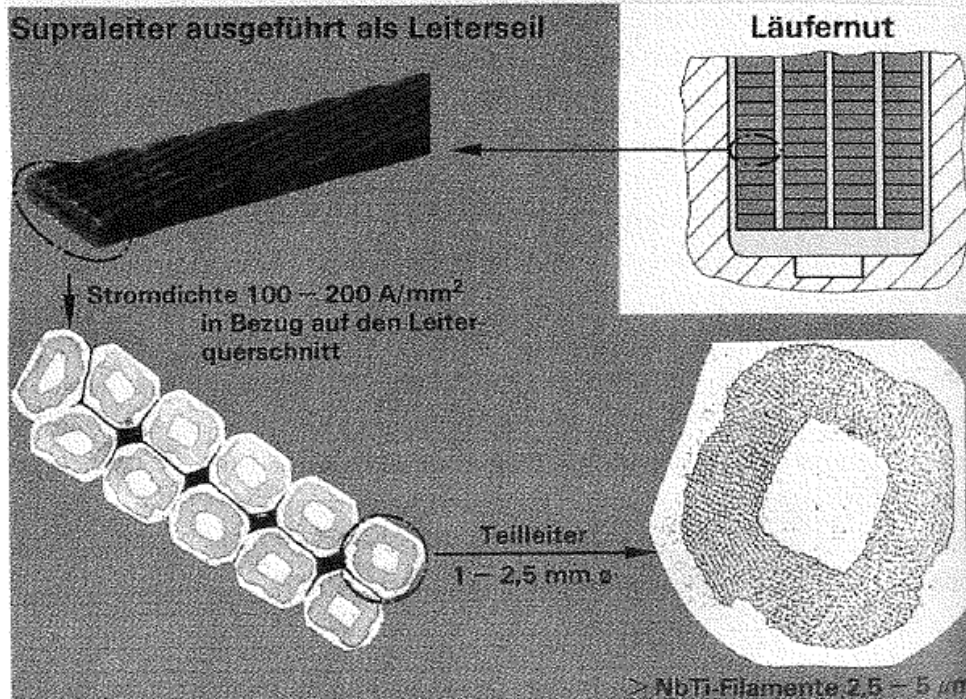
Magnetspule (eng) gewickelt: sl Kabel + dünne Isolationsschicht (Kapton, Oxid, Glasfasergewebe)

dann Vergießen + Aushärten, lagenweise oder anschließend als Gesamtblock (Epoxidharz, früher z.T. Wachs)

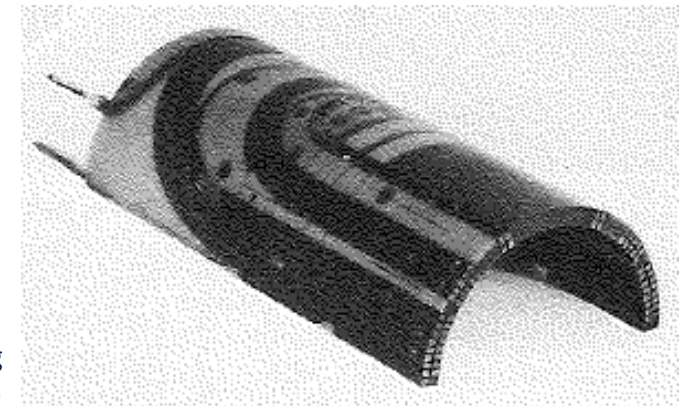
+ kompakt, höchste Gesamtstromdichte, geringstes Volumen / Gewicht

+ perfekte Fixierung Einzeldrähte

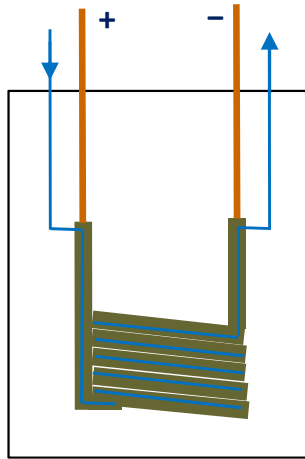
- Kühlung nur über Außenflächen des Blocks



P. Komarek,
Hochstromanwendung
der Supraleitung, 1995



Techn. SL, Kühltechnik



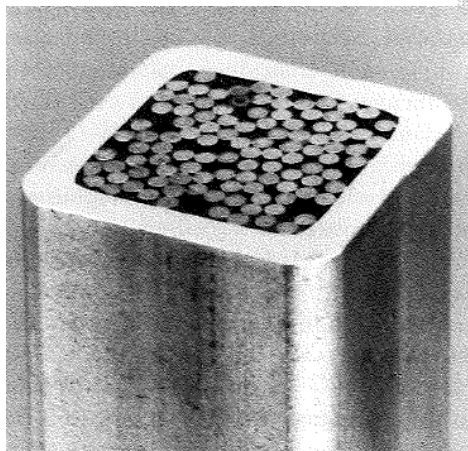
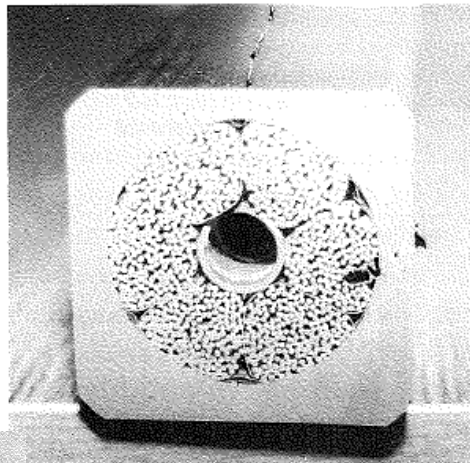
Realisierung Magnetkühlung:

c) Innenkühlung (Kühlkanal innerhalb des SL Drahts)

sl Draht mit Strömungskanal versehen bzw. Strömung zwischen Einzeldrähten entlang gesamter Leiterlänge

(LHe zweiphasig / He überkritisch @ 5 K / 5 bar)

bzw. Kombination: He-Strömung in Kanal + He-Wärmeübertragung zw. Einzeldrähten

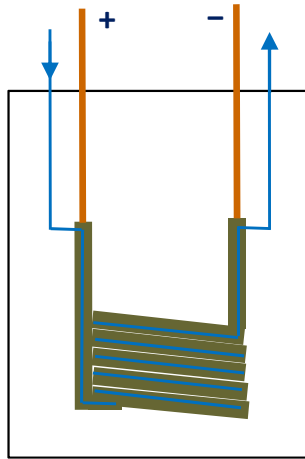


P. Komarek,
Hochstromanwendung
der Supraleitung, 1995

NbTi/Cu – Einzeldrähte
in 16 x 16 mm² Austenit-
Stahlhülle 2 mm

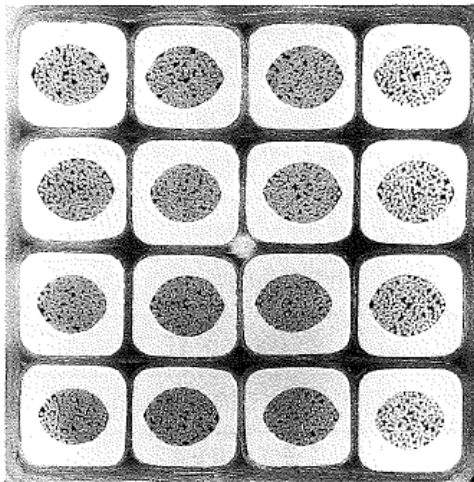
- + kein LHe-Innenbehälter mehr nötig, geringes He-Inventar
- + guter therm. Kontakt zu Einzeldrähten; sehr gute, direkte Kühlung (= gute Stabilisierung)
- + stabiler Außenmantel (V₂A-Halbschalen längsgeschweißt), kraftschlüssige, kompakte Wicklung
- wegen Druckverlust alle 250 ... 1000 m He-Neueinspeisung erforderlich
- zahlreiche Ein-/Auslassstellen, komplexe Leiterverbindungen, Anschlüsse

Techn. SL, Kühltechnik

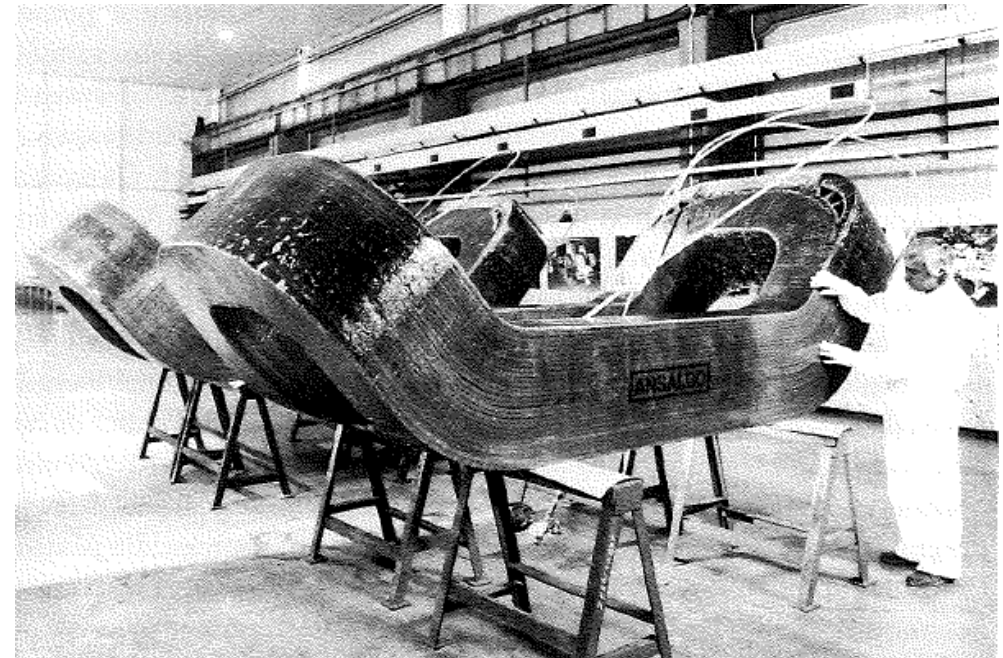


Realisierung Magnetkühlung:

c) Innenkühlung (Kühlkanal innerhalb des SL Drahts)



P. Komarek,
Hochstromanwendung
der Supraleitung, 1995



**Dipol-Magnetspulen aus innengekühlten Leitern
und Anschlüssen** (Fa. Ansaldo, Genua)
NbTi/Cu – Einzeldrähte (9 kA, 5 T)

Wickelpaket Magnetspule W7-X Stellerator Greifswald

innengekühltes Kabel, duktiler Al 6060 – Außenmantel $16 \times 16 \text{ mm}^2$, gewickelt + anschließend Verguss mit Epoxidharz (@ 150°C),
dadurch Warmhärtung Al 6060, Festigkeitszunahme bei 4 K ($P_{R 0,2} = 120 \rightarrow 280 \rightarrow 350 \text{ MPa}$)

innen 256 NbTi/Cu – Einzeldrähte $\varnothing 0,57 \text{ mm}$, 38 % „Leervolumen“ bzw. Kühlkanäle f. Helium überkritisch ($\dot{m} = 0,6 \text{ g/s}$, $l = 200 \text{ m}$)

Cu : SL – Verhältnis $\alpha = 2,7$; $I_{\text{nenn}} = 15 \text{ kA @ } 6 \text{ T}$; $I_{\text{krit.}} = 21 \text{ kA @ } 6 \text{ T}$)

Techn. SL, Kühltechnik

unzureichende Fixierung Einzeldrähte:

bei zunehmender Stromstärke / Lorentzkraft

Verrutschen innerhalb der Spule → Reibung → lokale Erwärmung → **Quench**

typ.: Mikrobewegungen Drähte (μm -Bereich); Bildung Mikrorisse Harzverguss

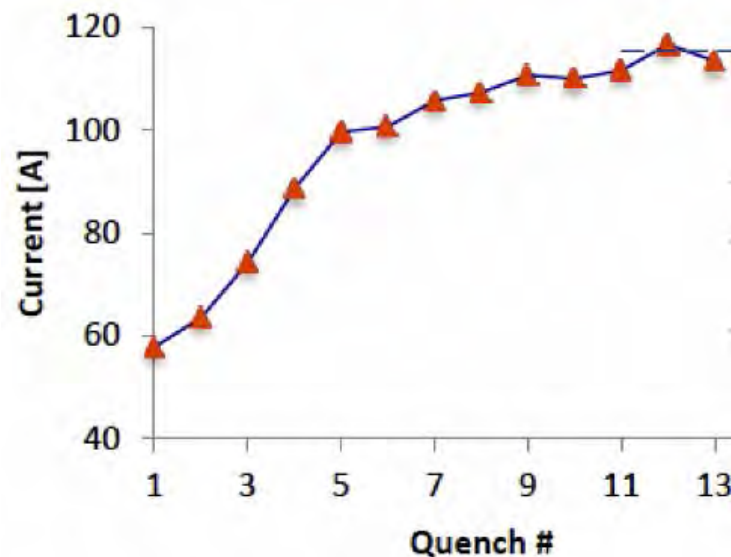
“Training” sl Magnete

mehrfaches langsames Hochfahren bis Quenchauslösung (inkl. Heliumverlust !)

⇒ plastische Verformung / Anpassung, Beseitigung Rest-Freiheitsgrade

gute Fixierung: Nennfeld nach wenigen Zyklen erreicht

schlechte Fixierung: bis zu 100 Trainingszyklen bzw. dauerhaft $B < B_{\text{nenn}}$



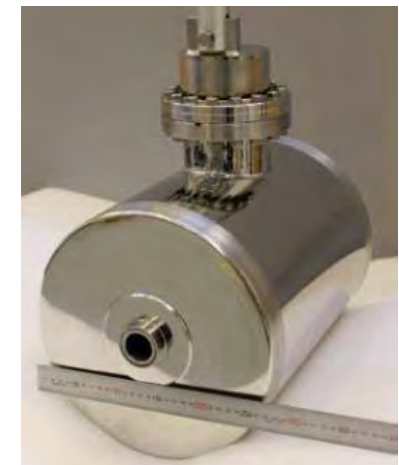
ISOLDE-Solenoid CERN

8 T - NbTi-Spule mit LHe-Badkühlung zur Strahlfokussierung (Fa. Danfysik, DK)

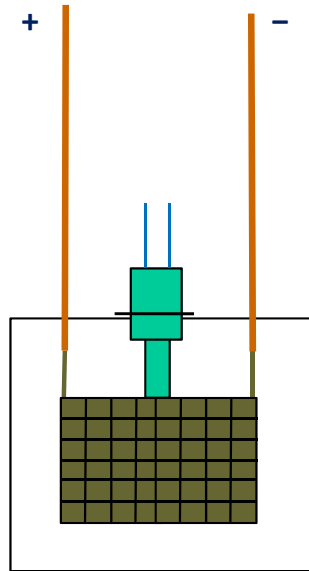
⇐ Ergebnisse Magnet - „Training“



Quench sl Magnet mit Abblasen Helium-Inventar



Techn. SL, Kühltechnik



Realisierung Magnetkühlung:

d) Leitungskühlung (“trockene Kühlung”)

Kühlung über punktuelle Ankopplung Cryocooler

(G-M-Kühler / Pulsetube, 2. Stufe 3 ... 20 K f. sl Block

+ 1. Stufe 50 ... 80 K f. Schildkühlung, Stromzuführungen)



Probencryostat mit sl Magnet (7 T)
und GM-Cryocooler 2-stufig
cool-down: 40 h

(Oxford Instruments)

- + kein Innenbehälter nötig, kein (externes) Helium, keine Heliuminfrastruktur nötig
- + kompakte sl Labormagnete realisierbar
- + Betrieb in jedem Neigungswinkel möglich
- große Antriebsleistung (typ. 7 kW)
- keine “Kühlreserve”
- nicht isotherm, hohe Wärmeleitung innerhalb des Spulenblocks erforderlich