

JAHRESBERICHT 1997

Über die Arbeiten gemäss Auftragsnummer: 55803

Titel des Projekts: Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleiterkabel
für die Energietechnik

Zusammenfassung:

Dem Projektplan entsprechend wurde der Konzeptentscheid vorbereitet, dem Lenkungsausschuss vorgelegt und von diesem genehmigt.

Bei der Leiterentwicklung wurden bezüglich Matrixeigenschaften und Stromdichte weitere Fortschritte erzielt.

Isolationssysteme und Modellkühlkreislauf wurden experimentell untersucht. Auslegungsfragen vom Kühlkreislauf und Sicherheitsaspekte wurden studiert.

Kabelherstellungsmethoden inklusive Isolationssystem wurden erprobt.

Externe Industrieofferter für SL-Draht wurden eingeholt.

Dauer des Projekts: 1. April 1996 - 1. Mai 1999

Beitragsempfänger: CRPP - FT

Berichterstatter: Georg Vécsey

hj
3/2.57

Adresse: EPFL - CRPP
WMHA C37

5232 Villigen - PSI

Telefon: 056 / 310 3272 direkt
3259 Sekretariat

1. PROJEKTZIELE 97

- Auswahl Isolationssystem
- Konzeptentscheid für Kabelaufbau
- Aufbau und Test eines N2-Ne Kreislaufs
- Weiterentwicklung von Bi-2212 Multifilamentmeter

1. ARBEITEN UND ERGEBNISSE

2.1 Kabelkonzept

Als Ergebnis umfangreicher Feld- und Verlustoptimierungsstudien konnte dem LA ein Konzeptvorschlag für den Kabelaufbau des einphasigen Prototypen vorgelegt werden.

Die wesentliche Merkmale sind wie folgt:

- Zwei gegensinnig verselte Leiterlagen um gasführende, gasdurchlässige Stahlspirale
- Vakuumisolation, doppelwandiges Wellrohr mit eingelegter Superisolationsmatte
- Warme Hochspannungsleitung

Weitere Angaben sind im Anhang „Designkonzept“ zusammengefasst.

Das Konzept lässt die alternative Verwendung von eigenem 2212 oder industriell hergestellten 2223 Drähten offen. Der vorgeschlagene Gaskühlkonzept erlaubt eine experimentelle Optimierungsuntersuchung bei variabler Temperatur.

2.2 Isolationskonzept

Brugg-Kabel stellt auch schaumisierte Leitungen für Fernwärme her. Solche Leitungsproben wie auch Glasschaum Rohrmantel wurden bei Stickstofftemperatur auf thermische Verluste untersucht. Die Vermutung lag nahe, dass bei genügend tiefer Temperatur und geeigneter Gaskomponente durch Kondensation die Isolierqualität vom evakuiertem Schaum erreicht werden könnte. Leider konnte dies bei keinem der untersuchten Systeme beobachtet werden. Wie die Messungen zeigen, können diese Systeme bestenfalls für die Isolation von kompakten Supraleiteranwendungen wie Current Limiter oder Transformer zum Einsatz kommen.

Die nach den Optimierungsstudien erforderlichen Verlustwerte von etwa 1 W/m konnten nur bei evakuierten Flexwell-Rohren (Brugg-Kabel) mit eingelegten Superisolationslagen erreicht werden. Bei den Flexwell-Rohren wäre bei späterer Anwendung aus verlegetechnischen Gründen eine reduzierte Welligkeit in Betracht zu ziehen.

Herstellungstechnisch stellt das gewählte Isolationssystem an sich kaum ein besonderes Problem dar.

2.3 Kühlkreislauf

Da die optimale Stromdichte bei den Bi-basierten Supraleitermaterialien bei Stickstoffkühlung ohnehin nicht erreicht werden kann, wurde die Möglichkeit einer weiteren Unterkühlung durch ein Neon Gaskreislauf ins Auge gefasst.

An einem Testkreislauf kleiner Kapazität (einige Watt) konnte eindrucksvoll demonstriert werden, dass die anvisierte Unterkühlung mit einfachsten Mitteln, wie im Antrag vorgeschlagen, realisiert werden kann. Das durch flüssigen Stickstoff (77 K) vorgekühlte Neon kühlt sich bei Entspannung über ein Joule-Thompson Ventil hinter einem einfachen Gegenstrom-Wärmetauscher auf etwa 60 K ab.

In detaillierten kältetechnischen Studien wurden zunächst die strömungsbedingten Anpasskriterien des Kabels und des Kühlsystems erarbeitet. Im weiteren wurden dann verschiedene denkbare Kühlkreisläufe für eine Kabelstrecke von 6 km optimiert und im Vergleich evaluiert. Dabei wurden durchwegs konservative Annahmen sowohl betreffend Supraleitereigenschaften, als auch Kühlschema getroffen. Vor allem die in den nächsten Jahren zu erwartenden Fortschritte der Supraleitereigenschaften dürften bei einer Reoptimierung zu deutlich besseren Wirkungsgraden führen.

In folgenden zusammengefasst die wesentlichen Resultate der Studie:

- Zentraler Kabelkanal für Gaskühlung vorteilhaft
- Bei Dreiphasenkabel können zwei Phasen für Vorlauf, eine Phase für Rücklauf genutzt werden
- Geschlossen vernetzte Kabeleinheiten können doppelt so effizient gekühlt werden wie einzelne
- Lokale Stickstoffverflüssigung mit warmem Neonkompressor und JT Entspannung optimal
- Mit den heutigen Leiter kann bereits eine Verlustreduktion von 30% erwartet werden

2.4 Anschlüsse

Die Konstruktion des Kabelendverschlusses wirft eine Vielzahl von Detailproblemen auf.

Die bisher gewonnenen Ergebnisse zeigen jedoch, dass es grundsätzlich möglich ist einen Endverschluss für ein supraleitendes Kabel mit warmen Dielektrikum nach der in Abb. 2 gezeigten Prinzipskizze zu konstruieren. In einem nächsten Schritt werden die Hauptabmessungen der einzelnen Funktionsgruppen bestimmt und soweit wie möglich Prüfungen an einzelnen Komponenten vorgenommen.

Besondere Beachtung findet dabei die Anordnung zur Potentialtrennung des Kühlmittels bei tiefen Temperaturen, da hierfür eine Neukonstruktion erforderlich ist. Die Konstruktion der Hochspannungsdurchführung und der Kabelverbindung kann an bereits standardisierte Entwürfe angepasst werden. Bei der Auslegung der Stromzuführung und des Überganges vom Supraleiter zum Normalleiter kann auf Erfahrungen, die am CRPP mit Stromzuführungen zu supraleitenden Magneten gemacht wurden, zurückgegriffen werden.

2.5 Drahtentwicklung

Ersatz der AgNiMg-Matrix durch AgMg führte zu einer signifikanten Erhöhung des kritischen Stroms der Bi-2212 Drähte. Besonders bei kleinen Draht- bzw. Filamentdurchmessern ergaben sich für Drähte mit AgNiMg-Matrix relativ niedrige kritische Stromdichten. Bei Ofenabkühlung liegen die T_c -Werte von Drähten mit AgMg-Matrix zwischen den Werten für Ag und AgNiMg/Bi-2212 Multifilamentleiter. Durch Glühungen in Argon sollten sich die T_c -Werte besonders von dünnen Drähten noch deutlich verbessern lassen. Die Untersuchungen zur Langzeitstabilität der Bi-2212 Phase wurden begonnen. Ein Monat Lagerung in Luft führte zu keiner wesentlichen Änderung des kritischen Stroms von AgMg/Bi-2212 Drähten.

Aus der gemessenen Feld- und Temperaturabhängigkeit des kritischen Stroms ergibt sich für das maximale im Kabeldesign vorgesehene Feld von 18 mT bei 50 K eine etwa zehnprozentige Reduktion von I_c gegenüber Kurzprobenmessungen ohne angelegtes Magnetfeld. Bezuglich der Abnahme des kritischen Stroms durch Biegedehnungen verhalten sich die Drähte mit AgMg-Matrix ähnlich wie die AgNiMg/Bi-2212 Multifilamentleiter.

Die Reduktion des kritischen Stroms durch die Kabelherstellung, bei der maximale Biegedehnungen von 0.4 % auftreten, sollte kleiner als 10 % sein, da die $\varepsilon_{0.9}$ -Werte für AgMg/Bi-2212 Multifilamentdrähte deutlich grösser als 0.4 % sind.

2.6 Kabelherstellung

Trotz erheblichen Verbesserungen des Matrixmaterials könnten die Drähte bei der Verarbeitung auf konventionellen Maschinen spannungsbedingte mechanische Schäden erleiden. Erste Versuche mit einem neu entwickelten Drahtführungskranz wurden durchgeführt. Die neue Verkabelungsmethode garantiert eine beträchtliche Reduktion der Spannungen bei höchster Wicklungspräzision.

Bei einer späteren Serienfabrikation kann warmverpresstes Polyethylen als Dielektrikum konventionell aufgebracht werden. Da sich für den relativ kurzen Prototypen das Verfahren nicht eignet, wird zunächst ein gewickeltes Bandisolationssystem verwendet, das üblicherweise bei konventionellen Kabelverbindungen maschinell aufgebracht wird.

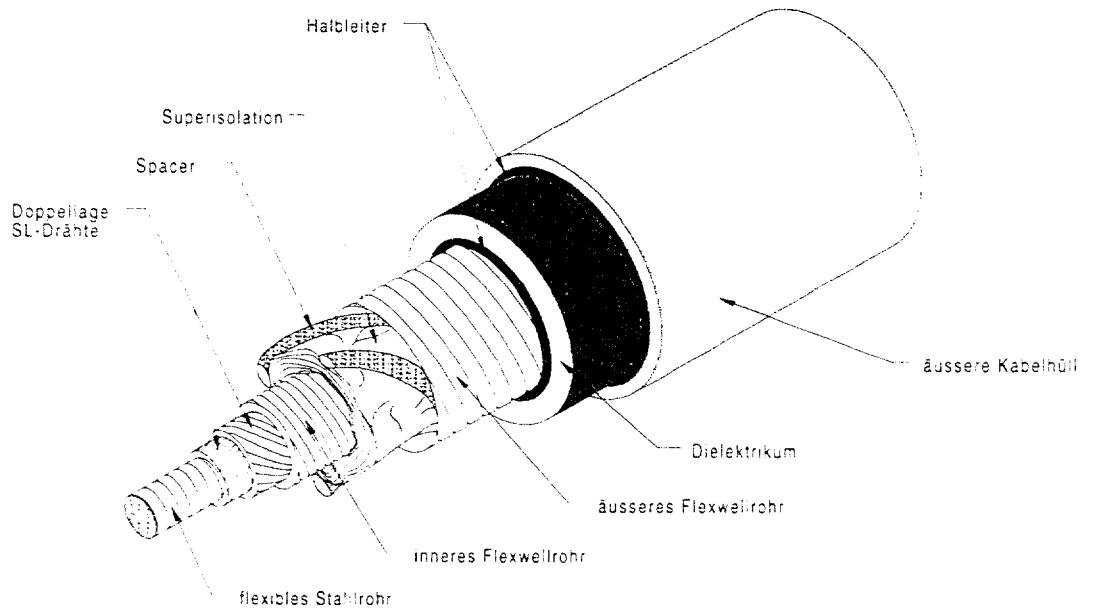
3. ZUSAMMENARBEIT

Entsprechend dem Projektfortschritt ist die Intensivierung der Mitwirkung von Brugg Kabel in den praktischen Planungsvorbereitungen für den Prototyp zu vermerken. Für die Zusammenarbeit ist ein detaillierter Arbeitsplan gemeinsam erstellt worden, der die Zuständigkeiten der Partner bei den Einzelaufgaben regelt.

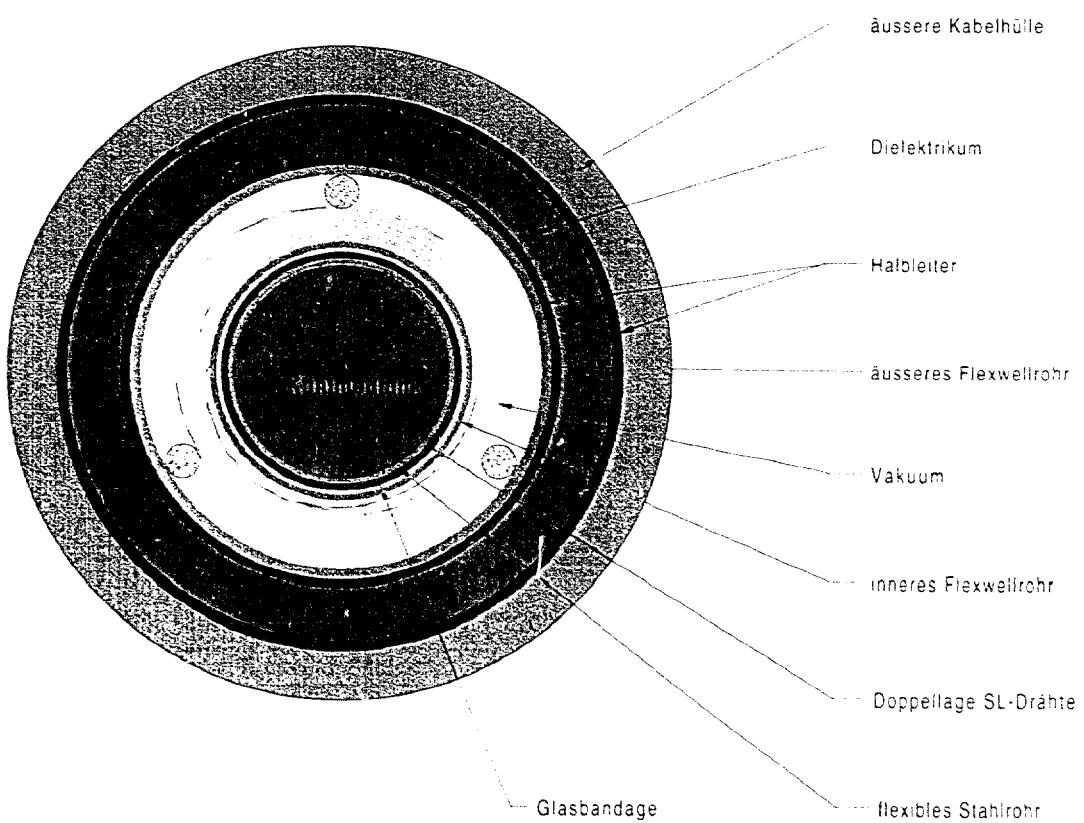
Der PL vertritt die Schweiz im Executive Committee der IEA Zusammenarbeit „Assessment of the Impact of High Temperature Superconductors bearing on the Electric Power Sector“ In diesem Rahmen wurde April 97 in CISE, Milano ein erfolgreicher Workshop mit reger Industriebeteiligung durchgeführt. Der PL wurde zur abschliessenden Paneldiskussion geladen. Die Herbstsitzung des IEA-EC wurde am CRPP in Lausanne abgehalten.

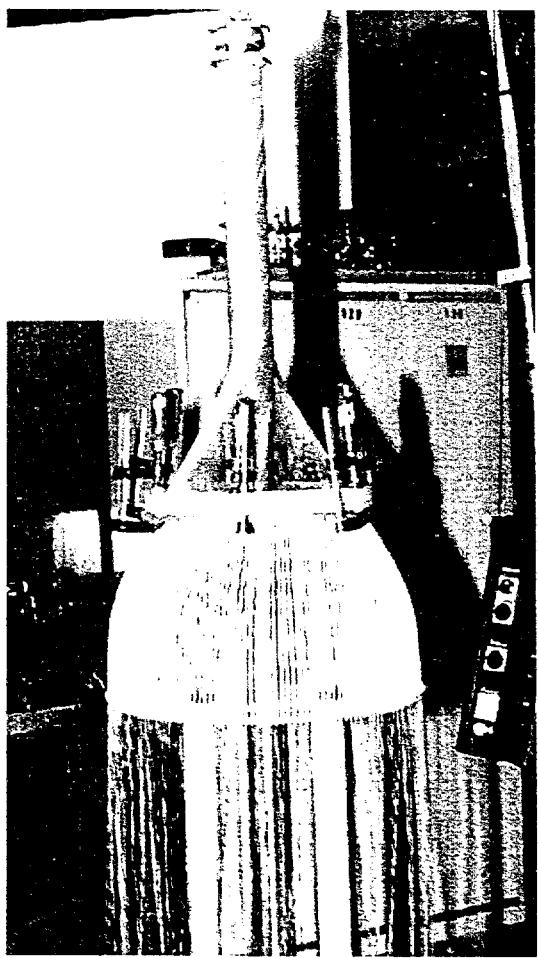
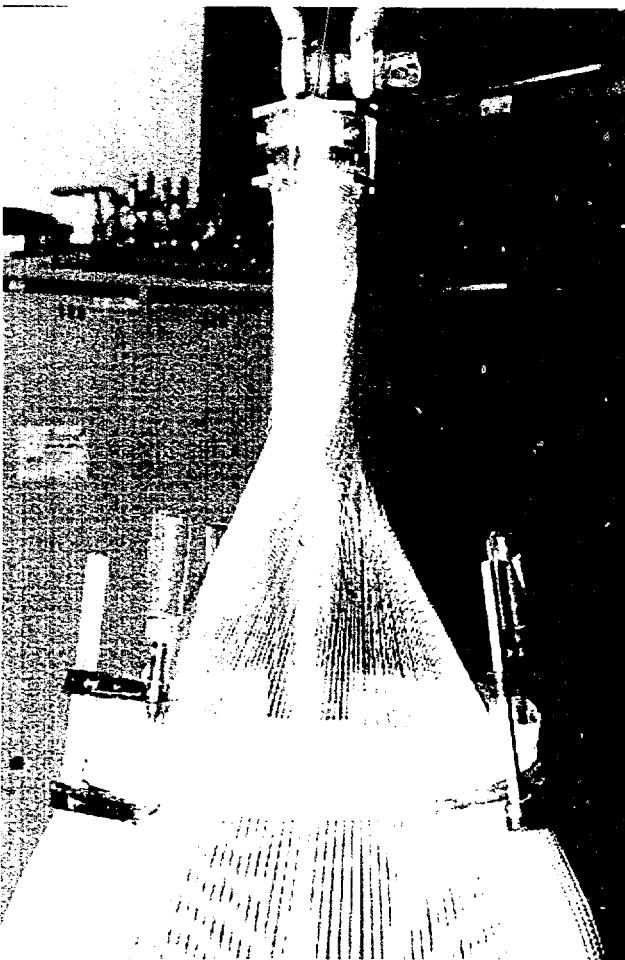
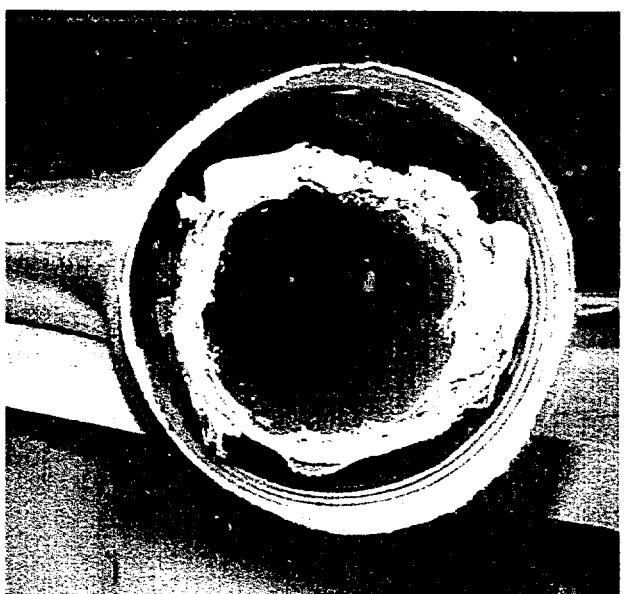
4. PERSPEKTIVEN

Das Projekt wird planmässig weitergeführt. Natürlichen Schwerpunkt bildet die Inangriffnahme der Herstellung des Prototyp-Kabels. Dementsprechend steht die wichtige Entscheidung über die Drahtherstellung bzw. Beschaffung vor der Tür. Neuerdings sind einige Firmen bereit reagiertes Material zu liefern, die Offerten sind in der Auswertung.

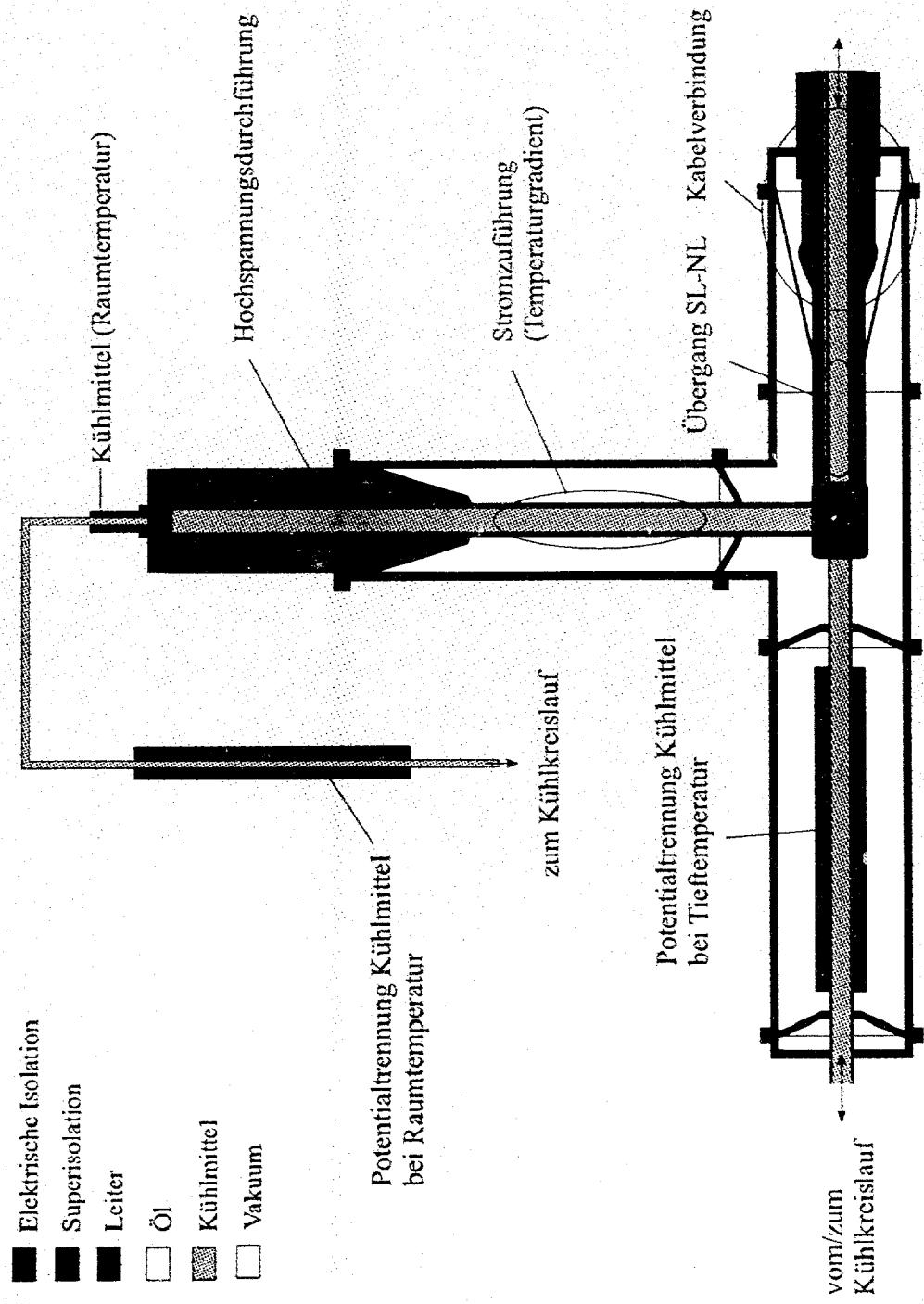


Kabelaufbau (power transmission cable) mit warmem Dielektrikum





Prinzipskizze HTSL-Kabelendverschluss



Anlage Designkonzept

Das vorgeschlagene Kabeldesign basiert auf einem Metallschlauch Typ BOA PROTEX DN 50 ($d_s = 50$ mm, $d_a = 53$ mm) als Trägerrohr für die supraleitenden Drähte. Dieser Metallschlauch ist gasdurchlässig, damit die supraleitenden Drähte direkten Kontakt zum Neongas haben. Als thermische Isolation ist vakuumisolierte Superisolation vorgesehen. Für das thermische Isolationssystem sollen Flexwellrohre 60/66 und 98/109 der Brugg Rohrsysteme verwendet werden. Beim Prototypkabel sollen gewickelte Polyethylenbänder die elektrische Isolation bilden. In Absprache mit Kabelwerke Brugg wird das maximale elektrische Feld in dieser Isolation auf 4.5 kV/mm begrenzt. Die wesentlichen Designparameter für das vorgeschlagene einphasige supraleitende Kabel können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Designwerte für ein einphasiges AgMg/Bi-2212 Kabel mit warmem Dielektrikum.

Aussenradius der Kabelhülle	97 mm
Äusserer Halbleiter (Potentialglättung)	83.9/85.9 mm
Elektrische Isolation	56.6/83.9 mm
Innerer Halbleiter (Potentialglättung)	54.6/56.6 mm
Thermische Isolation	30.2/54.6 mm
Supraleitende Lage	26.5/28.1 mm
Trägerrohr	25/26.5 mm
Nennspannung	110 kV
Höchste dauernd zulässige Spannung	123 kV
Maximale Scheitelspannung Leiter-Erde	100.4 kV ($\sqrt{2} \times 123$ kV/ $\sqrt{3}$)
Scheitelwert bei Nennspannung	89.8 kV ($\sqrt{2} \times 110$ kV/ $\sqrt{3}$)
Maximales elektrisches Feld	4.5 kV/mm (123 kV) 4.0 kV/mm (110 kV)
Dielektrikum	Gewickelte Polyethylenbänder
Durchschlagsfestigkeit	> 4.5 kV/mm
$\epsilon \tan\delta$	10^{-3}
Supraleiter	AgMg/Bi-2212
Anzahl der Drähte	2x180
$I_c(40, 45, 50\text{ K})^1$ bei $B = 18$ mT ²	10700/8200/6500 A
Scheitelwert des Betriebsstroms	2550 A
Maximales Magnetfeld	18 mT
Nennleistung	114 MW
Kühlung	Gasgekühlt
Einlass-/Auslasstemperatur	40/50 K
AC-Verluste bei 45 K	0.75 W/m
Thermische Verluste bei 45 K	0.4 W/m
Gesamtverluste bei 45 K	1.15 W/m
Dielektrische Verluste bei Raumtemperatur	0.36 W/m

¹⁾ $T_c = 81.2$ K, ²⁾ Reduktion von I_c durch Magnetfeld ist berücksichtigt

Bei einer längeren Kabelstrecke bestehen die folgenden Verbesserungsmöglichkeiten:

- 1.) Reduzierte Welligkeit der Flexwellrohre bzw. an Kabelanwendung angepasste Abmessungen
- 2.) Extrudiertes Polyethylen als Isolationsmaterial (Durchschlagsfestigkeit ≥ 10 kV/mm)
- 3.) Weiter verbesserte supraleitende Drähte
 - höheres T_c bei dünnen Bi-2212 Drähten
 - höhere kritische Stromdichten