

## **Forschungsprogramm *Elektrizität***



# **ENTWICKLUNG VON HOCHTEMPERATUR- SUPRALEITERKABEL FÜR DIE ENERGIETECHNIK SULEIKA**

ausgearbeitet durch

**A. Anghel, A.M. Fuchs, G. Pasztor, R. Schindler\*, G. Vécsey, R. Wesche**

**Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP)**  
**ETH Lausanne**  
**5232 Villigen PSI**

**\*Brugg Kabel AG**  
**Klosterzelgstrasse 28**  
**5201 Brugg**

im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie**  
unter Mitfinanzierung des  
**Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)**

Vertragsnummer: 55803  
Projektnummer: 16306

**Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden.  
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die  
Autoren dieses Berichts verantwortlich.**

## Zusammenfassung

Ein bezüglich der Reduktion der Übertragungsverluste optimiertes, 5 m langes, einphasiges, supraleitendes Prototypkabel wurde gebaut und getestet. Designstudien haben gezeigt, dass die bezüglich der Investitionskosten und der Verluste optimale Betriebstemperatur für ein aus Bi-2223 Bändern hergestelltes supraleitendes Kabel mit warmem Dielektrikum in der Nähe von 60 K liegt. Aufgrund dieses Ergebnisses, erscheint eine Kühlung mit Neongas vorteilhaft zu sein. Das Kabel besteht aus 2 Lagen von Bi-2223 Bändern, die mit entgegengesetztem Schraubensinn auf ein flexibles, gewelltes Stahlrohr mit 53 mm Durchmesser aufgewickelt sind, wobei die beiden Lagen durch eine Glasbandage voneinander getrennt sind. Für das Kabel wurden kommerziell erhältliche Bi-2223 Bänder mit dispersions-gehärtetem Silber als Matrix verwendet. Um einen genügend kleinen Wärmeeinfall sicherzustellen, wurde Vakuum in Verbindung mit Superisolation als thermische Isolation benutzt. Das Verhalten des Prototypkabels, welches auf einen Betriebsstrom von 1.77 kA Effektivwert bei 60 K ausgelegt ist, wurde sowohl bei Betrieb mit Gleich- als auch Wechselstrom in einer eigens für diesen Zweck gebauten Testanlage untersucht. Variable Betriebstemperaturen wurden durch einen Joule-Thomson Kühlkreislauf ermöglicht, bei dem das Neongas mit flüssigem Stickstoff vorgekühlt wurde. Die für beide Lagen separat gemessenen Strom-Spannungs-Charakteristiken zeigen, dass der kritische Strom der Bi-2223 Bänder bei der Kabelherstellung nicht wesentlich reduziert wird. Der Betrieb des Kabels bei Temperaturen von weniger als 77 K erlaubt es, deutlich höhere kritische Ströme zu erreichen und als Konsequenz hiervon auch die 50 Hz Wechselstromverluste im Supraleiter zu reduzieren. Zum Beispiel ist der kritische Strom des Kabels bei 52 K bereits mehr als dreimal so hoch wie bei 77 K, wobei eine gleich starke Abnahme der Wechselstromverluste resultiert. Bei den nominellen Betriebsbedingungen wurden Wechselstromverluste von 0.31 W/m gemessen. Dieser Wert ist etwa 40 % niedriger als die mit dem Monoblockmodell berechneten Verluste.

## Abstract

A 5 m long, single-phase HTS prototype cable for power transmission has been designed, manufactured and tested. Investment cost and loss optimization studies, have led to optimum operating temperatures around 60 K for Bi-2223 based cables, suggesting that neon gas cooling may be suitable. The cable consists of two oppositely wound helical layers on a 53-mm-diameter corrugated steel pipe with glass fiber tape separating the layers. Bi-2223 commercial tapes with high strength silver alloy matrix were employed. Evacuated superinsulant was used as thermal insulation in order to ensure a sufficiently low heat leak. The performances of the prototype cable, designed to carry 1770 A<sub>rms</sub> at 60 K, have been evaluated with both DC and AC currents in a test set-up designed and built for this purpose. Cooling at variable temperature is provided by a neon refrigeration system based on LN<sub>2</sub> pre-cooled Joule-Thomson cycle. The DC voltage-current characteristics, measured for each layer, indicate that the cable manufacturing doesn't significantly affect the critical current. Due to operation below 77 K, the critical current of the cable increases, causing a significant reduction of the 50 Hz AC losses. For example, at 52 K the cable critical current is more than 3 times the value at 77 K, yielding to a decrease of AC losses by the same factor. At the cable operating conditions, the AC losses are 0.31 W/m, about 40% below the theoretically predicted loss value.

## Résumé

Une solution pour réduire les pertes dans les lignes de transport d'énergie est l'utilisation de supraconducteurs à haute température. Dans ce but, un prototype de câble monophasé de 5 mètres de longueur destiné au transport d'énergie a été conçu, fabriqué et testé. Des études concernant les coûts d'investissement et l'optimisation des pertes ont montré que l'emploi d'un câble basé sur le matériau Bi-2223 utilisé autour de 60°K et refroidi au gaz néon était adéquat. Le câble concerné est composé de deux couches de bandes enroulées hélicoïdalement en sens opposé autour d'un tube d'acier ondulé de 53 mm de diamètre, les deux couches étant séparées par une bande de fibre de verre. Un conducteur Bi-2223 commercial, disponible en bandes et utilisant comme matrice un alliage d'argent à haute résistance mécanique, a été employé. De manière à assurer de faibles pertes thermiques, l'isolation thermique choisie est un superisolant évacué. Les performances du câble prototype conçu pour conduire 1770 A<sub>RMS</sub> à 60°K ont été mesurées en courant continu et alternatif sur une plate-forme de test spécialement construite dans ce but. Le refroidissement à température variable est assuré par un système basé sur un cycle Joule-Thomson avec circuit de pré-refroidissement LN<sub>2</sub>. Les caractéristiques DC tension-courant mesurées pour chaque couche, ont indiqué que le processus de fabrication du câble n'affectait pas significativement la valeur du courant critique. En utilisant le câble en dessous de 77K, le courant critique augmente, ce qui implique une réduction des pertes AC à 50 Hz. A titre d'exemple, à 52°K, le courant critique est plus de 3 fois supérieur à celui correspondant à 77°K, ce qui correspond à une décroissance proportionnelle des pertes AC. Aux conditions d'utilisation prévues du câble, les pertes AC s'élèvent à 0.31 W/m, à savoir environ 40 % en dessous des valeurs théoriques prévues.

Forschungsprogramm <i>Elektrizität</i> .....	1
1. Einführung.....	2
2. Designkonzepte .....	2
3. Designstudien .....	3
4. Kabelherstellung .....	5
5. Entwicklung und Bau eines Neon-Kühlkreislaufes .....	7
6. Aufbau der Kabeltesteinrichtung .....	7
7. Testergebnisse.....	8
8. Wirtschaftliche Perspektiven .....	12
9. Schlussfolgerungen und Ausblick .....	13
10. Dank.....	13
11. Symbolverzeichnis .....	14

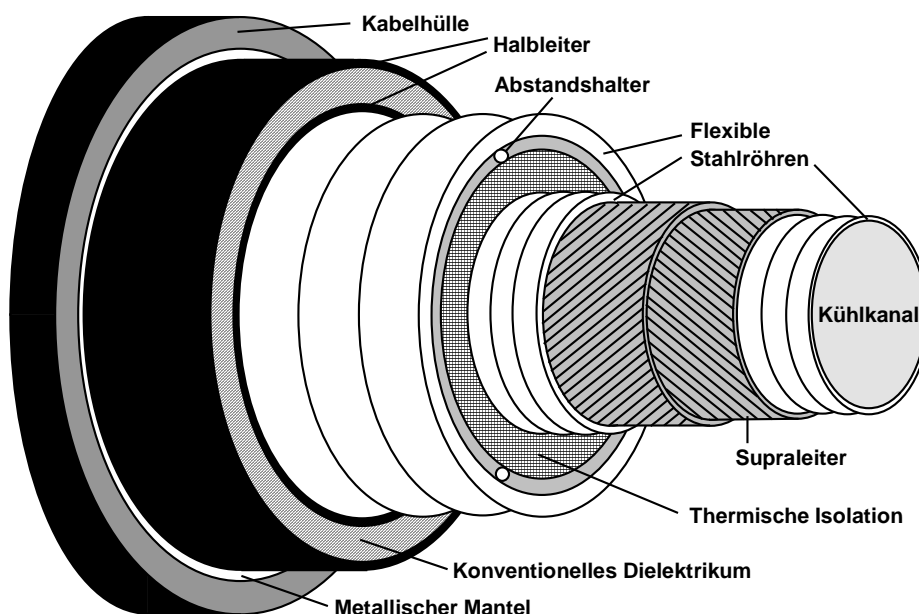
## 1. Einführung

Die Entdeckung der oxidischen Hochtemperatursupraleiter durch Bednorz und Müller im Jahre 1986 hat das Interesse an energietechnischen Anwendungen der Supraleitung neu belebt. Für Hochstromanwendungen ist es wichtig, dass sich kilometerlange supraleitende Drähte mit einer hinreichend grossen kritischen Stromdichte herstellen lassen. In den letzten 10 Jahren konnten beachtliche Fortschritte bei der Herstellung und der kritischen Stromdichte von supraleitenden Drähten basierend auf den beiden Wismutkupraten  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  (Bi-2212,  $T_c \cong 90$  K) und  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  (Bi-2223,  $T_c \cong 110$  K) erzielt werden. Da es sich um spröde Keramiken handelt, müssen die supraleitenden Bi-2212 bzw. Bi-2223 Filamente in Silber oder eine Silberlegierung eingebettet werden, damit eine hinreichend grosse Flexibilität des Leiters erreicht werden kann. Daneben kann im Falle des Auftretens von Normalleitung der Strom kurzfristig von der Silbermatrix getragen werden und somit eine Überhitzung des Leiters verhindert werden. In kurzen Ag/Bi-2223 Prototypeleitern konnte bei 77 K (ca.  $-196^\circ\text{C}$ ) ohne angelegtes Magnetfeld eine kritische Stromdichte von mehr als  $70000 \text{ A/cm}^2$  erzielt werden. Da nur etwa 31 % des Querschnitts auf den Supraleiter entfallen, beträgt somit die auf die gesamte Querschnittsfläche des Bandes bezogene Stromdichte nur etwas mehr als  $22000 \text{ A/cm}^2$ . Ein Problem bei den Ag/Bi-2223 Bändern ist die selbst bei kleinen angelegten Magnetfeldern sehr ausgeprägte Abnahme des kritischen Stroms bei 77 K. Als Folge hiervon können mit diesen Supraleitern Anwendungen mit Magnetfeldern von mehr als 5 T nur bei Temperaturen von 20-30 K realisiert werden.

Da bei Kabeln für die Energieübertragung nur relativ kleine Magnetfelder am Leiter auftreten, ist diese Anwendung besonders günstig für den Einsatz von Hochtemperatursupraleitern. Selbst unter Berücksichtigung der für die Kühlung des Hochtemperatursupraleiters benötigten Leistung sind im Vergleich zu konventionellen Kabeln deutlich reduzierte Übertragungsverluste zu erwarten. Bei konventionellen Kabeln ist die Übertragungskapazität in der Regel durch die maximal zulässige Temperatur der elektrischen Isolation begrenzt. Der Grund hierfür ist die mit zunehmender Betriebstemperatur exponentiell abnehmende Lebensdauer von festen Kabelisolationen. Da bei supraleitenden Kabeln keine ohmschen Verluste auftreten, würde diese Begrenzung der übertragenen Leistung dann entfallen. Ausserdem erlaubt die im Vergleich zu Normalleitern bedeutend höhere Stromtragfähigkeit von Supraleitern eine Reduktion des Kabelquerschnittes. Somit kann bei bestehenden Kabelkanälen mittels des Ersatzes konventioneller durch supraleitende Kabel eine Leistungserhöhung erreicht werden ohne dass kostspielige Erdarbeiten erforderlich sind (Retrofitting).

## 2. Designkonzepte

Für supraleitende Kabel wurden die Designkonzepte eines warmen bzw. kalten Dielektrikums vorgeschlagen. Beim Konzept des warmen Dielektrikums wird für jede Phase ein eigener Kryostat benötigt, der sich auf Hochspannung befindet. Eine schematische Darstellung einer einzelnen Phase eines solchen Kabels zeigt Abb. 1. Das elektrische Isolationssystem befindet sich bei Raumtemperatur und ist daher vollkommen konventionell. Allerdings führen die gegenseitige magnetische Beeinflussung der Phasen bei einem Kabel mit warmem Dielektrikum zu erhöhten Wechselstromverlusten im



**Abb. 1:** Schematische Darstellung einer einzelnen Phase eines supraleitenden Kabels mit warmem Dielektrikum.

Supraleiter. Bei einem Kabel mit kaltem Dielektrikum befinden sich alle 3 Phasen in einem gemeinsamen Kryostaten auf Erdpotential. In diesem Fall müssen die dielektrischen Verluste von der Kühlung abgeführt werden. Durch coaxial angeordnete Abschirmleiter können die mit einer gegenseitigen magnetischen Wechselwirkung der Phasen verbundenen Zusatzverluste vermieden werden. Allerdings bedeutet dies auch, dass etwa doppelt so viel Supraleiter wie für ein Kabel mit warmem Dielektrikum benötigt wird.

Bei einem Vergleich der beiden Kabelvarianten für eine übertragene Leistung von 500 MW (3 Phasen) zeigt sich, dass beim Konzept des kalten Dielektrikums etwas höhere Anforderungen an die kritische Stromdichte des Supraleiters zu stellen sind. Des weiteren können Kabel mit kaltem Dielektrikum von den Versorgungsunternehmen erst dann eingesetzt werden, wenn der Nachweis der Funktionsfähigkeit des elektrischen Isolationssystems über eine Zeitdauer von mehreren Jahren erbracht worden ist. Aus den vorgenannten Gründen konzentrierte man sich beim gemeinsamen Kabelprojekt von CRPP und Brugg Kabel AG auf das Konzept des warmen Dielektrikums.

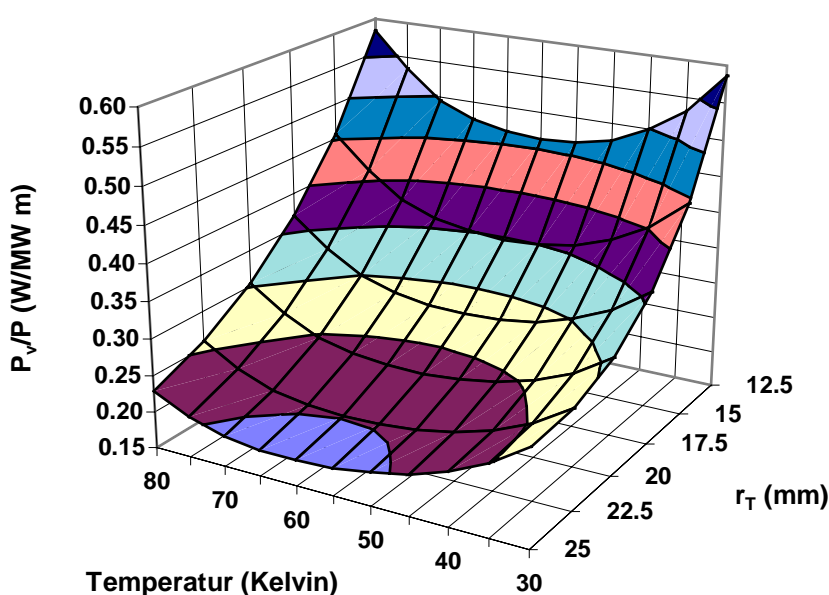
### 3. Designstudien

Ziel der am CRPP durchgeführten Designstudien war es, ein bezüglich der Verluste optimal ausgelegtes supraleitendes Prototypkabel zu bauen. Die wesentlichen Verlustquellen bei einem supraleitenden Kabel mit warmem Dielektrikum sind der Wärmeeinfall durch die thermische Isolation und die Wechselstromverluste im Supraleiter. Da diese Verluste von der Kühlung abgeführt werden müssen, muss hier noch die Effizienz der Kühlung in Betracht gezogen werden. Grosse Kühlsysteme erreichen üblicherweise etwa 20 % der Carnot-Effizienz, so dass eine Eingangsleistung von 14.5 bzw. 25 W benötigt wird, um Verluste von 1 W bei 77 bzw. 50 K abführen zu können. Im

Vergleich hierzu würde zum Abführen der gleichen Verluste bei 4.2 K eine elektrische Eingangsleistung von mehr als 350 W benötigt werden. Eine konservative Abschätzung der Wechselstromverluste im Supraleiter liefert das Monoblockmodell, bei dem die supraleitenden Lagen des Kabels als Kontinuum betrachtet werden. Im Rahmen dieses Modells sind die Wechselstromverluste im Supraleiter proportional zur dritten Potenz des Magnetfeldes und umgekehrt proportional zur kritischen Stromdichte.

Die Designstudie zeigt, dass bei Nennspannungen von 60 kV und weniger relativ grosse spezifische Verluste zu erwarten sind. Andererseits resultieren für konventionelle Kabel bei einer Nennspannung von 380 kV nur sehr geringe Verluste. Somit scheint eine Nennspannung von 110 kV für ein supraleitendes Kabel mit warmem Dielektrikum vernünftig zu sein. Bei dieser Nennspannung ist der Beitrag der dielektrischen Verluste zu den Gesamtverlusten vergleichsweise gering.

Bei den am CRPP durchgeführten Designstudien wurde erstmals der Effekt der Betriebstemperatur auf die spezifischen Verluste näher betrachtet. Abb. 2 zeigt die Ergebnisse für eine übertragene Leistung von 150 MW/Phase und einen kritischen Strom der Bi-2223 Bänder ( $3.6 \times 0.25 \text{ mm}^2$ ) von 50 A bei 77 K. Bei den Modellrechnungen wurde stets mit einem Aussenradius der elektrischen Isolation von 58 mm gerechnet. Bei einem Radius des Trägerrohres von 25 mm und einer Betriebstemperatur von 60 K resultieren die geringsten spezifischen Verluste von 0.185 W/MW m. Im Vergleich hierzu betragen



**Abb. 2:** Spezifische Übertragungsverluste  $P_v/P$  in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur  $T$  und dem Radius  $r_T$  des Trägerrohres für den Supraleiter bei einer übertragene Leistung  $P$  von 150 MW/Phase.

allein die Leiterverluste bei einem konventionellen 110 kV Kabel der gleichen Leistung mit  $2000 \text{ mm}^2$  Kupferquerschnitt 0.45 W/MW m. Das Auftreten eines Minimums der spezifischen Verluste bezüglich der Betriebstemperatur ist eine Folge des mit



abnehmender Temperatur stark ansteigenden kritischen Stroms der Bi-2223 Supraleiter, die zu einer Abnahme der Wechselstromverluste führt. Unterhalb von 55 K dominiert allerdings die Abnahme der Effizienz der Kühlung und die spezifischen Übertragungsverluste steigen trotz weiter zunehmender kritischer Stromdichten wieder an.

## 4. Kabelherstellung

Die Auslegung des Prototypkabels berücksichtigt einerseits die Ergebnisse der Designstudien und basiert zum anderen auf den Abmessungen von kommerziell erhältlichen flexiblen Rohrsystemen. Durch dieses Vorgehen können kostspielige Sonderanfertigungen vermieden werden. Als Trägerrohr für den Supraleiter wurde ein Metallschlauch BOA PROTEX mit einem Aussendurchmesser von 53 mm ausgewählt. Um einen hinreichend kleinen Wärmeeinfall von deutlich weniger als 1 W/m erreichen zu können, darf die Wärmeleitfähigkeit der thermischen Isolation nicht wesentlich grösser als  $10^{-4}$  W/m K sein. Diese hohen Anforderungen an das Isolationssystem können nur von vakuumisolierter Superisolation erfüllt werden. Für das thermische Isolationssystem wurden FLEXWELL-Rohre CNW 60/66 bzw. CNW 98/109 der Brugg Rohrsystem AG vorgesehen. Die wesentlichen Designwerte für das Prototypkabel sind in Tabelle 1 gegeben. Durch die Verwendung kommerziell erhältlicher Rohrsysteme ergibt sich ein relativ grosser nicht optimierter Aussendurchmesser der einzelnen Phase von 158 mm.

**Tabelle 1:** Designwerte und Testergebnisse für das einphasige mit Neongas gekühlte Prototypkabel\*.

<b>Betriebsbedingungen</b>		
Scheitelpunkt des Stroms	2500 A	
Nennspannung	110 kV	
Betriebstemperatur	60 K	
<b>Supraleitender Phasenleiter</b>		
Supraleiter	2 × 40 AgMg/Ag/Bi-2223 Bänder	
$I_c(77\text{ K}, B = 0)$	30 A	
<b>Kabelabmessungen</b>		<b>Durchmesser</b>
Trägerrohr	50.0/53.0 mm	
FLEXWELL-Rohr CNW 60/66	60.4/66.0 mm	
FLEXWELL-Rohr CNW 98/109	98.0/109.2 mm	
Kabeldurchmesser	158 mm	
<b>Verluste</b>	<b>Designwerte</b>	<b>Testergebnisse</b>
Erwartete AC Verluste bei 60 K	0.55 W/m	$(0.31 \pm 0.02)$ W/m
Erwarteter Wärmeeinfall bei 60 K	0.4 W/m	0.6 W/m
Eingangsleistung Kühlturbine	0.17 W/MW m <sup>2</sup> )	0.16 W/MW m <sup>1), 2)</sup>

\*Beim Prototypkabel wurde auf die elektrische Isolation verzichtet, da diese vollkommen konventionell ist.

<sup>1)</sup>20 % der Carnot Effizienz angenommen (20 W/W bei 60 K)

<sup>2)</sup>Eingangsleistung bezieht sich nicht auf den beim Experiment verwendeten Ne-Kühlkreis

Für die Herstellung des Prototypkabels standen kommerziell erhältliche Bi-2223 Bänder der Firma Vacuumschmelze mit Abmessungen von  $3.6 \times 0.25 \text{ mm}^2$  zur Verfügung. Der kritische Strom dieser Bänder erreichte bei 77 K ohne angelegtes Magnetfeld knapp 30 A. Bei diesem Leiter sind die supraleitenden Filamente von Reinsilber umgeben, während die Matrix ansonsten aus dispersions-gehärtetem Silber (AgMg) besteht. Für diesen Supraleiter liegt die maximal zulässige Biegedehnung bei 0.4 %.

Um die Fertigungstechnik zu erproben und die Eignung des vorhandenen Supraleiters für den Einsatz in Kabeln nachzuweisen, wurde zuerst ein 1 m langes Musterkabel hergestellt. Dieses besteht aus dem Trägerrohr mit dem spiralförmig aufgewickelten Supraleiter und dem Vakuumisolationssystem. Durch den modularen Aufbau lassen sich diese beiden Hauptkomponenten getrennt anfertigen und müssen erst am Schluss zusammengefügt werden. Damit kein axiales Magnetfeld im Zentrum des Kabels erzeugt wird, muss der Schraubensinn von Lage zu Lage gewechselt werden (siehe Abb. 1) und die Gesamtanzahl der auf das Trägerrohr aufgewickelten Lagen muss geradzahlig sein. In unserem Fall besteht die Wicklung nur aus zwei Lagen mit jeweils 40 Bi-2223 Bändern. Die Verseilvorrichtung für die Fertigung des Muster- sowie des 5 m langen Prototypkabels besteht im wesentlichen aus einem statischen Verseilkopf und einer Vorschub bzw. Torsionseinheit. Beim Verseilen wurde eine maximale Biegedehnung von 0.28 % nicht überschritten. Die Bänder der zu verseilenden Lage wurden zuerst am oberen Ende des Trägerrohres fixiert. Bei Beginn und Ende der Verseiloperation wurden die Bänder lagenweise am Rohrkopf zwecks Stromeinspeisung verlötet. Durch sequentielle Änderung der Drehrichtung des Trägerrohres können mit dieser Vorrichtung mehrlagige Kabel gewickelt werden. Abb. 3 zeigt die Verseiloperation. Da bei einem supraleitenden Kabel mit warmem Dilektrikum die elektrische Isolation vollkommen konventionell ist, wurde auf diese beim Prototypkabel verzichtet.



**Abb. 3:** Statischer Verseilkopf mit den 40 Bi-2223 Bändern einer Lage während der Verseiloperation

## 5. Entwicklung und Bau eines Neon-Kühlkreislaufes

Die Ergebnisse der Designstudien zeigen, dass die optimale Betriebstemperatur für ein supraleitendes Kabel mit warmem Dielektrikum bei etwa 60 K liegt. Da eine solche Betriebstemperatur mit flüssigem Stickstoff ( $\text{LN}_2$ ) nicht realisiert werden kann, wurde am CRPP ein Neonkühlkreislauf entwickelt, gebaut und getestet. Um Zeit und Entwicklungskosten zu sparen, wurden ausschliesslich Standardkomponenten aus der Tieftemperaturtechnik eingesetzt. Der Kühlkreislauf besteht hauptsächlich aus zwei Ne-Ne und einem Ne- $\text{LN}_2$  Wärmetauscher als Vorkühler. Ein Joule-Thomson Drosselventil reduziert den Druck des vorgekühlten Neongases von 200 bar auf den Arbeitsdruck von 5-10 bar und kühlt es damit auf Temperaturen von bis zu 32 K ab. Der erforderliche Hochdruck wurde mit einem luftgekühlten, ölfreien 200 bar Kompressor der Firma Sulzer-Burckhardt realisiert. Für Experimente in dem oberen Temperaturbereich kann die Kühlmitteltemperatur mit Hilfe von Heizungen und/oder Änderung des Massenstromes erhöht werden. Das Kühlgas wird mit Hilfe von zwei Kaltventilen aufgeteilt in das Zentralrohr, den Kabelraum und die jeweilige Stromzuführung. Die mit Neongas gekühlten Stromzuführungen wurden auf einen maximal zulässigen Gleichstrom von 6 kA ausgelegt.

Im Zusammenhang mit der Neongaskühlung wurden auch verschiedene Designkonzepte für die Endverschlüsse analysiert. Da das Kühlmittel nur bei Erdpotential in den Kühlkreislauf ein- oder austreten darf, werden bei einem supraleitenden Kabel mit warmen Dielektrikum Potentialtrenner benötigt, die bei tiefer Temperatur arbeiten. Als wichtige Vorstufe für deren Auslegung wurde ein Potentialtrenner für Raumtemperatur gebaut und bei Brugg Kabel AG getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass Neongas im Druckbereich von 5 bis 15 bar einer Wechselspannung von 160 kV und einer Blitzstoss-Spannung von 550 kV standhält.

## 6. Aufbau der Kabeltesteinrichtung

Die Untersuchung des 5 m langen, supraleitenden Prototypkabels hinsichtlich der Stromtragfähigkeit, der Wechselstromverluste und des Wärmeeinfall es erforderte den Aufbau einer geeigneten Testeinrichtung. Der Aufbau erfolgte in mehreren Stufen. Zuerst wurden die zwei Endverschlüsse aufgebaut und in Position gebracht. Diese dienen gleichzeitig der Stromeinspeisung, der Kühlgaszuführung und dem Aufrechterhalten des Isoliervakuum s. Das Zusammenfügen der Stromzuführungen und das Anbringen von Sensoren wurde ausserhalb der Endverschlüsse vorgenommen. Das Isolationssystem bestehend aus dem FLEXWELL-Doppelrohr wurde zwischen den Endverschlüssen montiert und anschliessend das mit einer grossen Anzahl von Spannungs- und Temperaturfühlern versehene supraleitende Kabel eingeschoben. Erst jetzt wurden die Stromzuführungen in die Endverschlüsse eingesetzt und die Stromverbindungen zum Kabel montiert. Zuletzt folgten die Verrohrungen für die Kühlung und die elektrischen Verdrahtungen innerhalb der Endverschlüsse.

Zur Versorgung mit Gleichstrom stand ein steuerbares und geregeltes Netzgerät mit Ausgangsströmen bis zu 8 kA zur Verfügung. Für die Untersuchung der Kabeleigenschaften bei Betrieb mit Wechselstrom werden die beiden Stromzuführungen durch eine Kupferschiene miteinander verbunden. Der Wechselstrom wird induktiv über



**Abb. 4:** Gesamtansicht der Kabeltesteinrichtung.

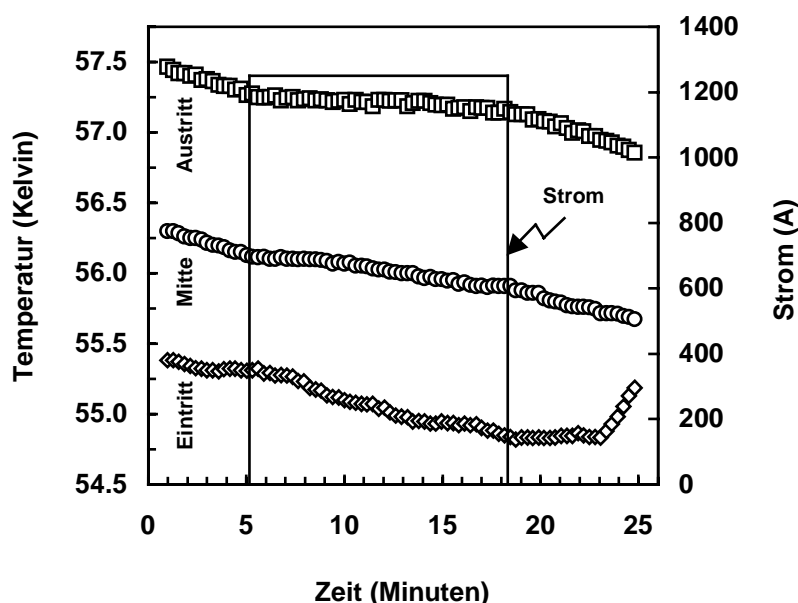
einen Eisenkreis in die Leiterschleife eingekoppelt. Die Aufzeichnung und Speicherung der Messdaten erfolgte mit einem PC gesteuerten Datenerfassungssystem.

Abb. 4 zeigt eine Gesamtansicht der Kabeltesteinrichtung. Im Vordergrund in der Mitte ist der Kryostat für den Neonkreislauf mit den beiden Joule-Thomson-Ventilen zu sehen. Dieser ist durch Transferleitungen mit den beiden Enden des Kabels und einem Vorratsbehälter für flüssigen Stickstoff verbunden. Rechts daneben befindet sich das Bedienungsfeld für den Kühlkreislauf sowie das Datenerfassungssystem. Am linken Rand sind das Prototypkabel und einer der beiden Endverschlüsse zu erkennen.

## 7. Testergebnisse

Mit dem Neonkühlkreislauf konnte das 5 m lange Prototypkabel bei einem Massendurchfluss von 6 g/s innerhalb von etwa 3 Stunden auf eine gewünschte Temperatur zwischen 50 und 70 K abgekühlt werden. Die verfügbare Kühlleistung war ausreichend, um selbst Eintrittstemperaturen des Neongases von 32 K zu erreichen. Der mittlere von einer Stromzuführung verursachte Wärmeeinfall betrug etwa 8.5 W. Im Vergleich hierzu wurde für den Wärmeeinfall durch die Superisolation des Kabels ein Wert von 0.6 W/m gefunden.

Abb. 5 zeigt die Temperaturen am Ein- beziehungsweise Austritt sowie in der Mitte des Kabels bei Dauerbetrieb mit einem Wechselstrom von 1.25 kA Effektivwert. Vor dem Hochfahren des Stroms nehmen die Temperaturen an allen drei Positionen leicht ab, da das Kabel dann leicht unterkühlt wird. Während des Betriebes mit Wechselstrom vergrößert sich der von den Stromzuführungen verursachte Wärmeeinfall und es treten zusätzliche Wechselstromverluste im Supraleiter auf. Als Folge hiervon stellt sich jetzt eine annähernd konstante Austrittstemperatur ein. Im Unterschied hierzu nehmen die

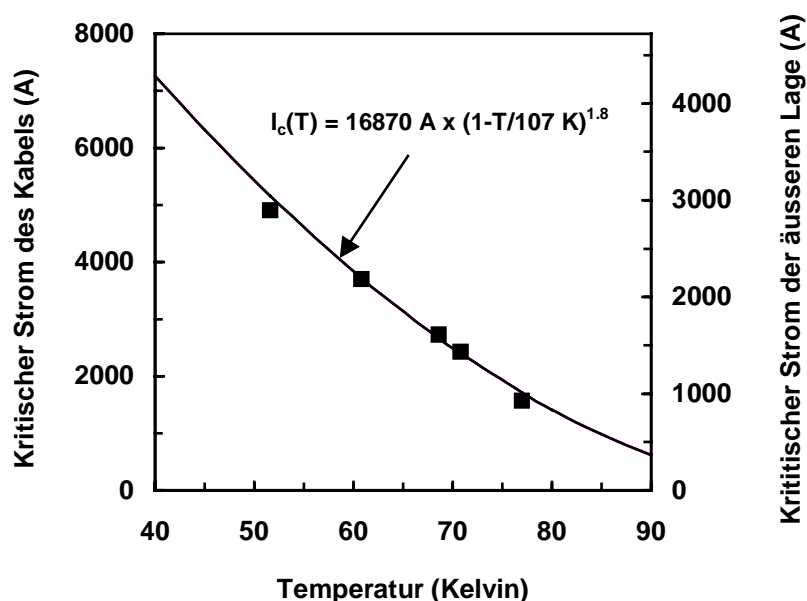


**Abb. 5:** Temperaturverlauf am Ein- und Austritt sowie in der Mitte des Kabels während eines Dauerbetriebes mit einem Wechselstrom von 1.25 kA Effektivwert.

Temperaturen beim Eintritt und in der Mitte des Kabels weiterhin geringfügig ab. In der Mitte des Kabels beträgt diese Temperaturdrift etwas weniger als 1 K pro Stunde. Der Unterschied zwischen Ein- und Austrittstemperatur beträgt im gezeigten Beispiel etwas mehr als 2 K.

Als nächstes sollen die Ergebnisse der Tests des supraleitenden Prototypkabels mit Gleichströmen von bis zu 5 kA kurz beschrieben werden. Mittels von drei Rogowski-Spulen wurden der Gesamtstrom und die Ströme in den beiden supraleitenden Lagen des Prototypkabels getrennt gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass 59 % des Stroms in der äusseren aber nur 41 % in der inneren supraleitenden Lage des Kabels fliessen. Diese ungleichmässige Stromverteilung ist sehr wahrscheinlich auf verschieden grosse Widerstände der Kontakte in den beiden Schleifen zurückzuführen. Die Folge hiervon ist, dass trotz einer noch vollkommen supraleitenden inneren Lage, der kritische Strom der äusseren Lage bereits erreicht ist und dies den maximal erreichbaren Strom im Kabel begrenzt. Ausgehend von den bei 77 K an Einzelbändern und der äusseren Lage des Kabels gemessenen Werten des kritischen Stroms kann auf eine Reduktion der Stromtragfähigkeit der Bi-2223 Bänder durch die Kabelherstellung von lediglich 14 % geschlossen werden. Abb. 6 zeigt die Temperaturabhängigkeit des kritischen Stroms des Kabels. Wenn die Betriebstemperatur von 77 auf 50 K gesenkt wird, so steigt der kritische Strom, definiert durch ein elektrisches Feld von  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$  am Leiter, von 1570 auf 4900 A an. Somit führt diese Reduktion der Betriebstemperatur zu einer Erhöhung des kritischen Stroms um mehr als einen Faktor 3.

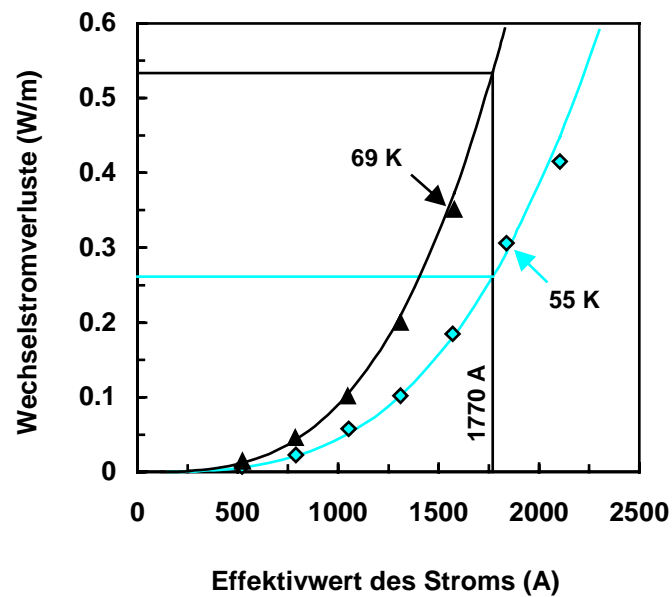
Das supraleitende Prototypkabel konnte mit Wechselströmen von bis zu 2.4 kA Effektivwert problemlos betrieben werden. Bei Betrieb des Kabels mit Wechselstrom



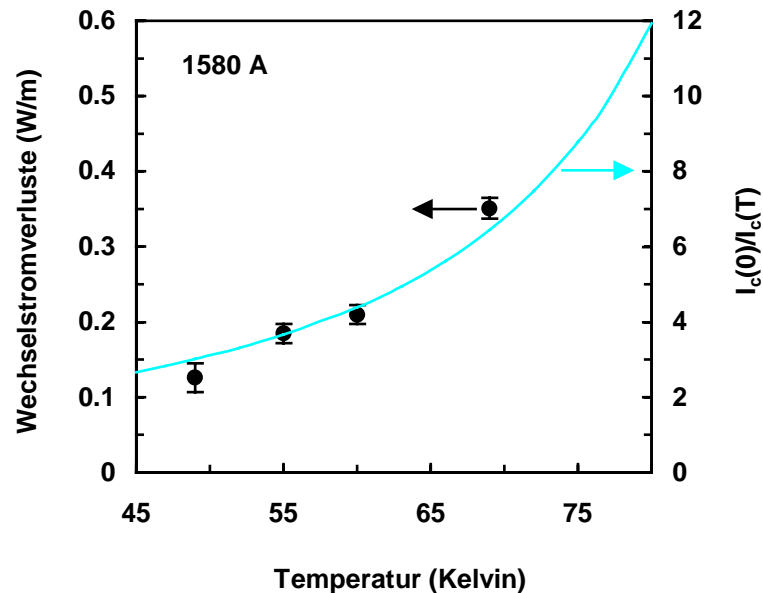
**Abb. 6:** Abhängigkeit des kritischen Stroms des Prototypkabels von der Temperatur. Der Wert bei 77 K wurde beim 1 m langen Musterkabel gemessen.

verteilt sich der Strom im Verhältnis 52:48 auf die äussere und die innere supraleitende Lage des Kabels. Aus der über die Kontakte gemessenen Blindleistung lässt sich für die Induktivität des 5 m langen Prototypkabels ein Wert von etwa 75 nH bestimmen.

Ein wesentliches Ziel des Projektes war die Messung der Wechselstromverluste des supraleitenden Kabels bei verschiedenen Temperaturen. Die Wechselstromverluste im Supraleiter stellen einen zusätzlichen Beitrag zur Wirkleistung dar. Um diese zu bestimmen, muss die Spannungskomponente in Phase mit dem Strom gemessen werden. Mittels von zwei Lock-in Verstärkern können sowohl die Beträge der Spannungen über das Kabel und an der Rogowski-Spule für den Gesamtstrom als auch deren Phasenverschiebungen gegenüber einem gemeinsamen Referenzsignal gemessen werden. Die Spannung wurde an den gemeinsamen Kontakten abgegriffen, bei denen die beiden supraleitenden Lagen des Kabels miteinander verbunden sind. Daher beinhaltet die gemessene Wirkleistung zum einen die ohmschen Verluste in den Kontakten und zum anderen die Wechselstromverluste im Supraleiter. Da die ohmschen Verluste proportional zum Quadrat des Stromes sind und die Wechselstromverluste im Supraleiter etwa mit der dritten Potenz des Stromes anwachsen, lassen sich die beiden Verlustanteile voneinander trennen. Abb. 7 zeigt die Wechselstromverluste des Kabels für Betriebstemperaturen von 55 und 69 K. Wie ursprünglich angenommen, steigen die Verluste im Supraleiter etwa mit der dritten Potenz des Stromes an. Beim Designwert des Stroms von 1.77 kA (Effektivwert) betragen die Wechselstromverluste 0.53 W/m bei einer Betriebstemperatur von 69 K während sie bei 55 K mit 0.26 W/m nur noch halb so gross sind. Abb. 8 zeigt für einen Strom von 1.58 kA die Wechselstromverluste im Supraleiter (gefüllte Kreise) bei ausgewählten Temperaturen. Die gemäss einer Fehlerbetrachtung zu erwartenden Messfehler sind durch Fehlerbalken gegeben. Ausserdem ist der Kehrwert des kritischen



**Abb. 7:** Abhängigkeit der 50 Hz Wechselstromverluste im Supraleiter vom Betriebsstrom des Kabels für Temperaturen von 55 und 69 K.



**Abb. 8:** Temperaturabhängigkeit des Kehrwertes des kritischen Stroms des Kabels normiert auf  $I_c(0) = 16870$  A (blaue Linie) und der Verluste im Supraleiter (gefüllte Kreise) für einen Betriebsstrom von 1580 A Effektivwert. Die Wechselstromverluste sind etwa umgekehrt proportional zum kritischen Strom.



Stroms des Kabels durch die durchgezogene Linie gegeben. Abb. 8 lässt erkennen, dass die Wechselstromverluste im Supraleiter umgekehrt proportional zur kritischen Stromdichte sind, wie auch bei den Designstudien angenommen worden ist. In Tabelle 1 werden die gemessenen Verluste mit den Designwerten verglichen.

## 8. Wirtschaftliche Perspektiven

Bei den Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit supraleitender Kabel wurden ausschliesslich kurzfristig realisierbare Einsatzmöglichkeiten im bestehenden Netz betrachtet. Im heutigen Verbundnetz stellen die Freileitungen einen wesentlichen Faktor dar, weil diese im Prinzip die kleinsten Investitionskosten verursachen. Andererseits können diese nur in ländlichen Gebieten eingesetzt werden, während in städtischen Agglomerationen ausschliesslich Kabel für die Energieübertragung benutzt werden. Um den Belangen des Umweltschutzes mehr Rechnung zu tragen, werden in Zukunft sicher auch ausserhalb städtischer Zentren in verstärkter Masse Kabel eingesetzt werden müssen.

Günstige Perspektiven für den Einsatz supraleitender Kabel bietet das sogenannte Retrofitting. Bei diesem wird ein in einem Kabelkanal verlegtes konventionelles Kabel durch ein supraleitendes Kabel mit gleichem Querschnitt aber höherer Leistung ersetzt. Die Wirtschaftlichkeit beruht in diesem Fall vor allen Dingen darauf, dass eine Leistungserhöhung ohne kostspielige Erdarbeiten möglich ist. Da sich durch den Einsatz supraleitender Kabel die Übertragungsverluste deutlich reduzieren lassen, stellt sich die Frage, unter welchen Voraussetzungen supraleitende Kabel allein aufgrund der reduzierten Verlustkosten wirtschaftlich werden können. Bei den hier durchgeführten Studien wurde die Wirtschaftlichkeit konventioneller und supraleitender Kabel mit der Barwertmethode miteinander verglichen. Es wurden in beiden Fällen dreiphasige 110 kV Kabel von 6 km Länge mit einer übertragenen Leistung von 450 MW betrachtet. Ausgehend von den bekannten Investitions- und Verlustkosten für die konventionelle Kabelstrecke und unter Berücksichtigung der für ein supraleitendes Kabel zu erwartenden Verluste, können die für diese Variante maximal zulässigen Investitionskosten berechnet werden. Bei den Studien wurde mit einer Lebensdauer der Kabel von 40 Jahren und einem Belastungsgrad von 0.8 gerechnet. Die Ergebnisse dieser Studien deuten darauf hin, dass supraleitende Kabel bei Arbeitspreisen von 0.06 CHF/kW h allein aufgrund der reduzierten Verlustkosten dann attraktiv werden können, wenn Bi-2223 Bänder ( $3.6 \times 0.25 \text{ mm}^2$ ) mit einem kritischen Strom von etwa 200 A bei 60 K zur Verfügung stehen. Dies entspricht einer kritischen Stromdichte von etwa  $22000 \text{ A/cm}^2$  bezogen auf den Gesamtquerschnitt des Leiters. In kurzen Ag/Bi-2223 Vorprototypenleitern konnte selbst bei 77 K bereits eine so hohe kritische Stromdichte erreicht werden (siehe Einführung). Allerdings sind diese Bi-2223 Bänder extrem dünn und für Anwendungen noch nicht geeignet. Ausserdem sollten die spezifischen Kosten für den Supraleiter, bezogen auf eine Betriebstemperatur von 60 K, 20 \$/kA m nicht überschreiten. Im Vergleich hierzu liegen die spezifischen Kosten von Kupfer für Wechselstrom bei 9 \$/kA m. Führende Hersteller von Hochtemperatursupraleitern erwarten, dass sich in Zukunft Herstellungskosten in der Grössenordnung von 10 \$/kA m bei Bi-2223 Bändern erreichen lassen.



## 9. Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der Herstellung und dem erfolgreichen Test eines 5 m langen, supraleitenden Prototypkabels mit Neongaskühlung, wurden einige bedeutsame technologische Akzente gesetzt. Basierend auf den Ergebnissen von Modellrechnungen, die den Einfluss der Kabelabmessungen und der Betriebsbedingungen auf die Verluste erhellen, wurden Auslegungs- und Fertigungsprinzipien erarbeitet. Durch den erfolgreichen Einsatz des am CRPP entwickelten Neonkühlkreislaufer konnte das Prototypkabel im Temperaturbereich 50-70 K getestet werden. Dabei konnten die Vorteile einer unter 77 K reduzierten Betriebstemperatur nachgewiesen werden. Bei Reduktion der Temperatur von 77 auf 50 K nimmt der kritische Strom um den Faktor 3 zu und als Folge nehmen die Wechselstromverluste in gleichem Masse ab.

Mittelfristig könnten supraleitende Kabel wirtschaftlich werden, da dann aller Wahrscheinlichkeit nach Supraleiter zu hinreichend tiefen Preisen mit genügend grosser Stromtragfähigkeit zur Verfügung stehen werden. Wirtschaftlich besonders interessant sollten supraleitende Kabel für die Übertragung von Gleichstrom (z. B. Unterseekabel) sein, weil in diesem Fall die Wechselstromverluste im Supraleiter entfallen.

Mit dem bei diesem Projekt aufgebauten Kabelteststand steht nun eine leistungsfähige Experimentiereinrichtung am CRPP zur Verfügung. Bei zukünftigen Aktivitäten sollten detaillierte Betrachtungen zur Hochspannungsproblematik bei den Endverschlüssen und das Verhalten von dreiphasigen Kabeln in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Längerfristiges Ziel sollte dabei der Aufbau und Test einer supraleitenden Kabelstrecke unter realistischen Betriebsbedingungen bei einem Netzbetreiber sein.

## 10. Dank

Das Supraleitermaterial wurde von Swissmetal Dornach beschafft und für das Prototypkabel zur Verfügung gestellt. Viele wertvolle Hinweise zur Wirtschaftlichkeit von Kabelanlagen verdanken wir den Nordostschweizerischen Kraftwerken in Baden. Die Arbeiten zur Hochspannungsproblematik bei Kühlung mit Neongas wurden von Herrn Dr. M. Noe durchgeführt. Herr Ing. B. Jakob hat wesentlich zum Herstellungskonzept für das Kabel beigetragen.

## 11. Symbolverzeichnis

Symbol	Grösse	Einheit
$I_c$	Kritischer Strom	A
$I_c(0)$	Kritischer Strom bei $T = 0$	A
$P$	Übertragene Leistung	MW
$P_v$	Übertragungsverluste	W/MW m
$r_T$	Radius des Trägerrohres	mm
$T$	Temperatur	K
$T_c$	Kritische Temperatur	K