Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 90 (1999)

Heft: 22

Artikel: Supraleitende Kabel für die Energieübertragung

Autor: Anghel, A. / Fuchs, A. M. / Pasztor, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902009

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Supraleitende Kabel für die Energieübertragung

Wegen des erheblichen Potentials von Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung in der Energietechnik sind weltweite Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Gange, die einerseits darauf abzielen, kilometerlange supraleitende Drähte mit hoher kritischer Stromdichte herstellen zu können und andererseits die technische Machbarkeit von supraleitenden Kabeln, Transformatoren und Strombegrenzern mit ersten Demonstratoren nachzuweisen. Im Rahmen eines vom Bundesamt für Energie (BFE) und des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) finanziell geförderten Projektes wurde am CRPP in Zusammenarbeit mit Brugg Kabel AG und unter Mitfinanzierung der Brugg Kabel AG und von Swissmetal Dornach ein 5 m langes, einphasiges, supraleitendes Prototypkabel ausgelegt, gebaut und getestet. Da Designstudien gezeigt haben, dass die optimale Betriebstemperatur sowohl bezüglich der Reduzierung der Verluste als auch der Investitionskosten für den Leiter und das Kühlsystem bei einem Kabel mit warmem Dielektrikum in der Nähe von 60 K liegt, wurde hier erstmals ein am CRPP entwickelter Neonkreislauf für die Kühlung benutzt. In dem vorliegenden Artikel werden die wesentlichen Ergebnisse dieses Kabelprojektes der Öffentlichkeit vorgestellt.

■ A. Anghel, A.M. Fuchs, G. Pasztor, R. Schindler, G. Vécsey und R. Wesche

Einführung

Die Entdeckung der oxidischen Hochtemperatur-Supraleiter 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 zehn Jahren konnten beachtliche Fortschritte bei der Herstellung und der kritischen Stromdichte von supraleitenden Drähten basierend auf den beiden Wismutkupraten $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (Bi-2212, $T_c \approx 90$ K) und $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Bi-2223, $T_c \approx 110$ 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

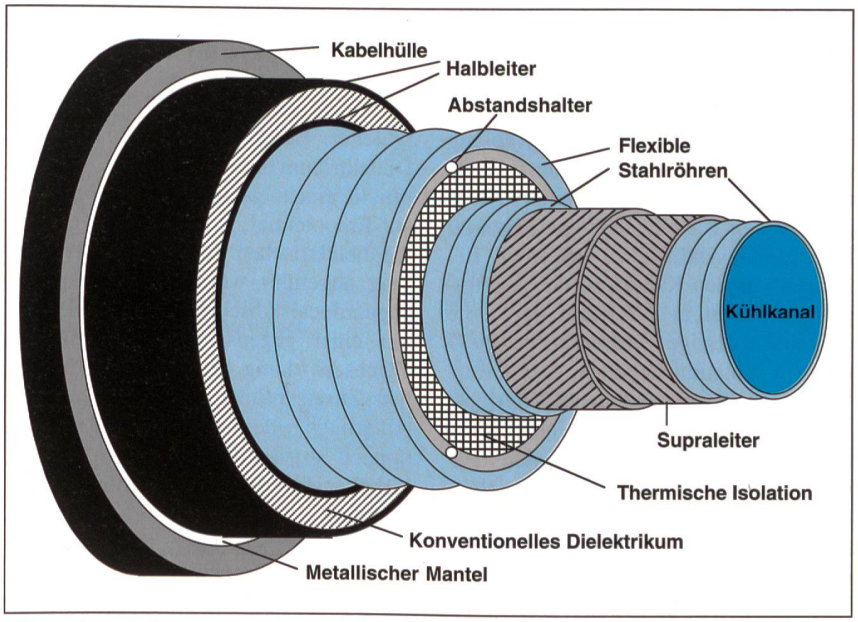

Bild 1 Schematische Darstellung einer einzelnen Phase eines supraleitenden Kabels mit warmem Dielektrikum.

Adresse der Autoren
Dr. Alexander Anghel, Dr. Albert M. Fuchs, Dr. Gabriel Pasztor, Dipl. Phys. ETH Georg Vécsey, Dr. Rainer Wesche
Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) ETH Lausanne
5232 Villigen PSI

Dipl. Ing. ETH Rudolf Schindler
Brugg Kabel AG
Kabelsysteme für die Energieübertragung
Klosterzelgstrasse 28
5201 Brugg

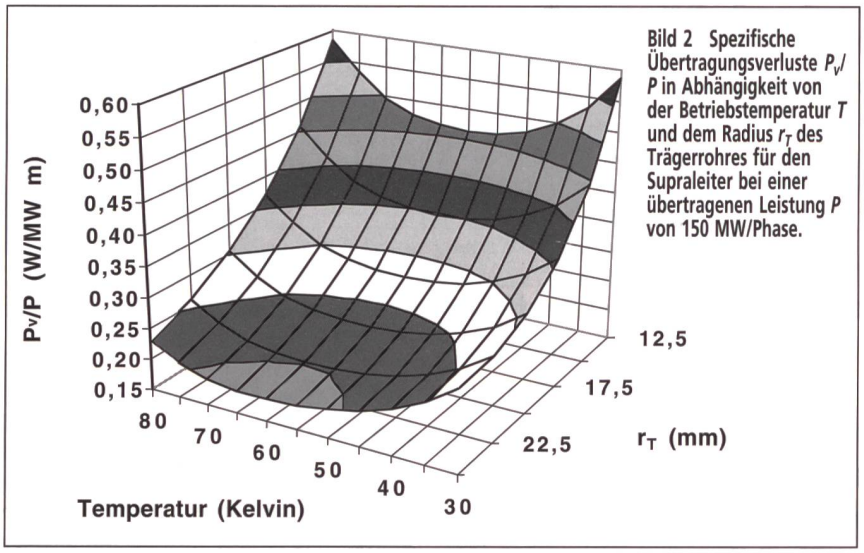

Bild 2 Spezifische Übertragungsverluste P_v/P in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur T und dem Radius r_T des Trägerrohres für den Supraleiter bei einer übertragenen Leistung P von 150 MW/Phase.

der Silbermatrix getragen werden und somit eine Überhitzung des Leiters verhindert werden. In kurzen Ag/Bi-2223-Prototypleitern konnte bei 77 K (rund –196 °C) ohne angelegtes Magnetfeld eine kritische Stromdichte von mehr als 70 000 A/cm² 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 22 000 A/cm². 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 bis 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 Hochtemperatur-Supraleitern. Selbst unter Berücksichtigung der für die Kühlung des Hochtemperatur-Supraleiters 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).

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 Bild 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 Supraleiter. Bei einem Kabel mit kaltem Dielektrikum befinden sich alle drei Phasen in einem gemeinsamen Kryostaten auf Erdpotential. In diesem Fall müssen die dielektrischen Verluste von der Kühlung abgeführt werden. Durch koaxial 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 (drei 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.

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 Dilektrikum 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. Bild 2 zeigt die Ergebnisse für eine übertragene Leistung

von 150 MW/Phase und einen kritischen Strom der Bi-2223-Bänder (3,6 × 0,25 mm²) 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/MWm. Im Vergleich hierzu betragen allein die Leiterverluste bei einem konventionellen 110-kV-Kabel der gleichen Leistung mit 2000 mm² Kupferquerschnitt 0,45 W/MWm. 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.

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/mK 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 I gegeben. Durch die Verwendung kommerziell erhältlicher Rohrsysteme ergibt sich ein relativ grosser nicht optimierter Aussendurchmesser der einzelnen Phase von 158 mm.

Für die Herstellung des Prototypkabels standen kommerziell erhältliche Bi-2223-Bänder der Firma Vacuumschmelze mit Abmessungen von 3,6 × 0,25 mm² 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 dispersionsgehärtetem Silber (AgMg) besteht. Für diesen Supraleiter liegt die maximal zulässige Biegedehnung bei 0,4%.

Bild 3 Statischer Verseilkopf mit den am oberen Ende des Trägerrohres fixierten und zwecks Stromeinspeisung am Rohrkopf verlöteten 40 Bi-2223-Bändern einer Lage.

Betriebsbedingungen		
Scheitelwert des Stroms	2500 A	
Nennspannung	110 kV	
Betriebstemperatur	60 K	
Supraleitender Phasenleiter		
Supraleiter	2 × 40 AgMg/Ag/Bi-2223-Bänder	
I_c(77 K, B = 0)	30 A	
Kabelabmessungen	**Durchmesser**	
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	
Verluste	**Designwerte**	**Testergebnisse**
Erwartete AC-Verluste bei 60 K	0,55 W/m	(0,31 ± 0,02) W/m
Erwarteter Wärmeeinfall bei 60 K	0,4 W/m	0,6 W/m
Eingangsleistung Kühlsystem	0,17 W/MW m[2)]	0,16 W/MW m[1), 2)]

Tabelle I Designwerte und Testergebnisse für das einphasige mit Neongas gekühlte Prototypkabel*.

*Beim Prototypkabel wurde auf die elektrische Isolation verzichtet, da diese vollkommen konventionell ist.
1) 20% der Carnot-Effizienz angenommen (20 W/W bei 60 K)
2) Eingangsleistung bezieht sich nicht auf den beim Experiment verwendeten Ne-Kühlkreis

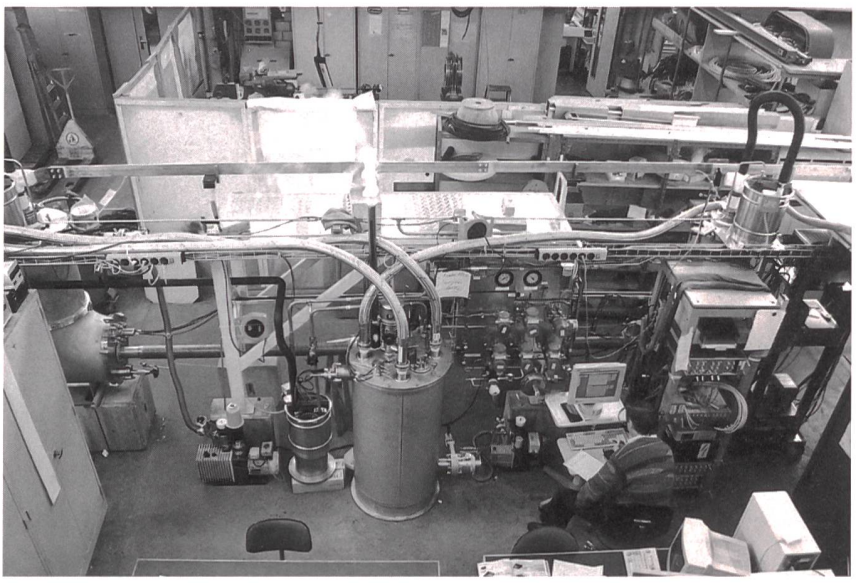

Bild 4 Gesamtansicht der Kabeltesteinrichtung.

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 Bild 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. Wie Bild 3 zeigt, wurden die Bänder der zu verseilenden Lage 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. Da bei einem supraleitenden Kabel mit warmem Dilektrikum die elektrische Isolation vollkommen konventionell ist, wurde auf diese beim Prototypkabel verzichtet.

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 (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-LN_2-Wärmetauscher als Vorkühler. Ein Joule-Thomson-Drosselventil reduziert den Druck des vorgekühlten Neongases von 200 bar auf den Arbeitsdruck von 5 bis 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.

Aufbau der Kabeltesteinrichtung

Die Untersuchung des 5 m langen, supraleitenden Prototypkabels hinsichtlich der Stromtragfähigkeit, der Wechselstromverluste und des Wärmeeinfalles 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 Isoliervakuums. 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 Spannungssonden 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 einen Eisenkreis in die Leiterschleife eingekoppelt. Die Aufzeichnung und Speicherung der Messdaten erfolgte mit einem PC-gesteuerten Datenerfassungssystem.

Bild 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.

Testergebnisse

Mit dem Neonkühlkreislauf konnte das 5 m lange Prototypkabel bei einem Massendurchfluss von 6 g/s innerhalb von drei 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.

Bild 5 zeigt die Temperaturen am Einbeziehungsweise 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 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 Schlaufen zurückzuführen. Die Folge hiervon ist, dass trotz einer noch vollkommen supraleitenden inneren Lage, der kritische Strom der äusseren Lage bereits erreicht ist und dies

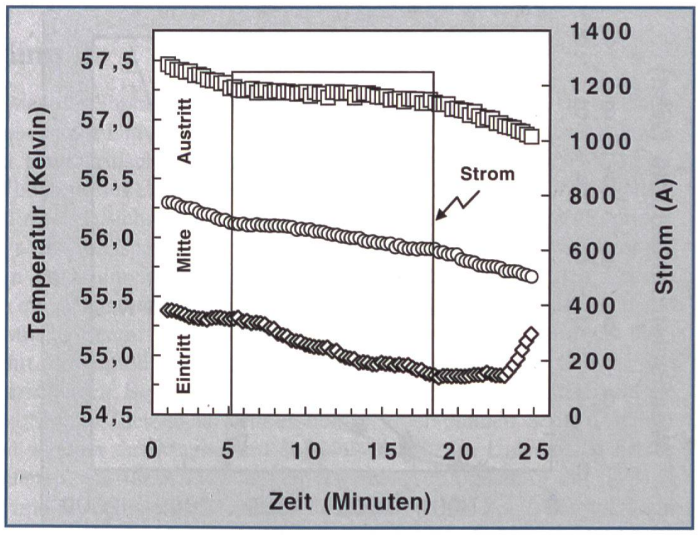

Bild 5 Temperaturverlauf am Ein- und Austritt sowie in der Mitte des Kabels während eines Dauerbetriebes mit einem Wechselstrom von 1,25 kA Effektivwert.

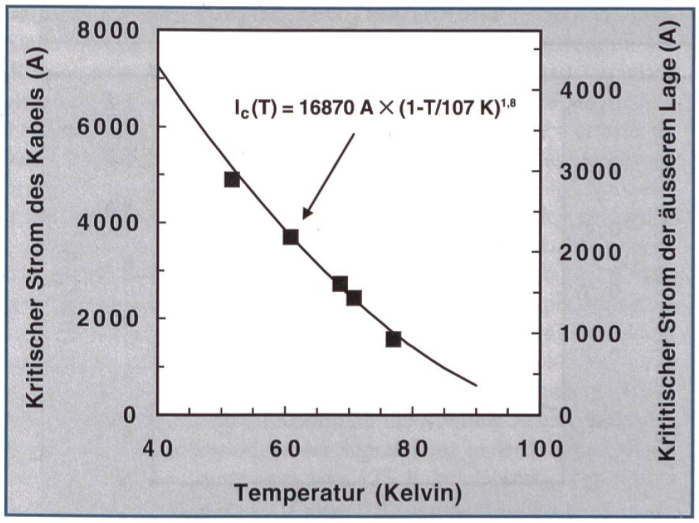

Bild 6 Abhängigkeit des kritischen Stroms des Prototypkabels von der Temperatur. Der Wert bei 77 K wurde beim 1 m langen Musterkabel gemessen.

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.

Bild 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 µV/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 verteilte 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. Mit 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

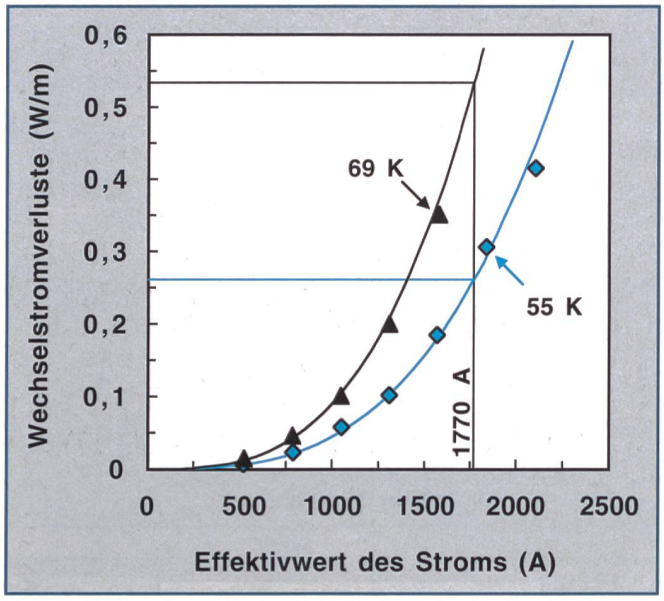

Bild 7 Abhängigkeit der 50 Hz Wechselstromverluste im Supraleiter vom Betriebsstrom des Kabels für Temperaturen von 55 und 69 K.

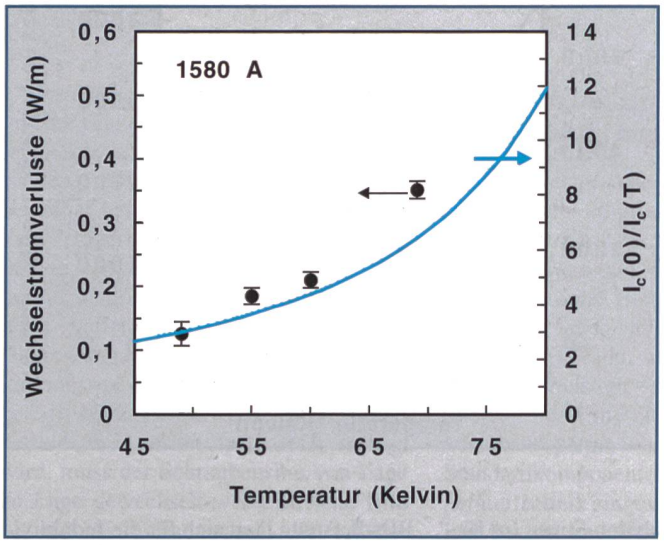

Bild 8 Temperaturabhängigkeit des Kehrwertes des kritischen Stroms des Kabels normiert auf $I_c(0)$ = 16870 A (blaue Linie) und der Verluste im Supraleiter (gefüllte Kreise) für einen Betriebsstrom von 1580 A Effektivwert. Die Wechselstromverluste sind etwa umgekehrt proportional zum kritischen Strom.

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

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 verstärktem 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 allem 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 sFr./kW h allein aufgrund der reduzierten Verlustkosten dann attraktiv werden können, wenn Bi-2223-Bänder (3,6 × 0,25 mm²) mit einem kri-

Dank

Diese Arbeiten wurden vom Bundesamt für Energie (BFE) und dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) teilweise finanziert. 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.

tischen Strom von etwa 200 A bei 60 K zur Verfügung stehen. Dies entspricht einer kritischen Stromdichte von etwa 22 000 A/cm², bezogen auf den Gesamtquerschnitt des Leiters. In kurzen Ag/Bi-2223-Vorprototypleitern 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 US-$/kA m nicht überschreiten. Im Vergleich hierzu liegen die spezifischen Kosten von Kupfer für Wechselstrom bei 9 US-$/kA m. Führende Hersteller von Hochtemperatursupraleitern erwarten, dass sich in Zukunft Herstellungskosten in der Grössenordnung von 10 US-$/kA m bei Bi-2223-Bändern erreichen lassen.

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 Neonkühlkreislaufes konnte das Prototypkabel im Temperaturbereich 50 bis 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.

Supraleitung

Das Phänomen der Supraleitung wurde bereits im Jahre 1911 von Heike Kammerlingh Onnes an der Universität von Leiden entdeckt. Beim Quecksilber beobachtete er bei einer kritischen Temperatur T_c von 4,15 K (rund –269 °C) eine sprunghafte Abnahme des elektrischen Widerstandes auf einen unmessbar kleinen Wert. Weiterhin zeigte sich, dass ein Magnetfeld aus dem Inneren eines Supraleiters verdrängt wird (Meissner Effekt). Andererseits kann der supraleitende Zustand durch Anlegen eines hinreichend starken Magnetfeldes zerstört werden. Da mit jedem Strom ein Magnetfeld verbunden ist, muss dementsprechend auch ein kritischer Strom existieren, dessen Überschreiten zu einem Übergang in die Normalleitung führt. Prinzipiell sind zwei Arten von Supraleitern, nämlich Typ I und Typ II, zu unterscheiden. Bei Supraleitern des Typs I ist das Innere feldfrei und die supraleitenden Ströme fliessen ausschliesslich in einer dünnen Schicht an der Oberfläche, in welcher das Magnetfeld auf Null abfällt. Im Unterschied hierzu können im Inneren von für Anwendungen geeigneten Supraleitern des Typs II supraleitende und normalleitende Bereiche koexistieren. Als Folge hiervon kann praktisch der gesamte Querschnitt des Supraleiters von Transportströmen erfüllt sein. In den normalleitenden Bereichen kann das Magnetfeld in Form von Flusslinien in den Supraleiter eindringen. Solange diese Flusslinien an Haftzentren wie zum Beispiel Korngrenzen, Versetzungen oder Ausscheidungen so stark verankert sind, dass sie durch die von der Wechselwirkung zwischen Strom und Magnetfeld verursachten Lorentzkraft nicht bewegt werden können, treten keine Verluste bei Gleichstrom auf. Da Wechselströme eine zeitliche Änderung der Magnetisierung des Supraleiters zur Folge haben, können diese im Gegensatz zu Gleichströmen nicht vollkommen verlustfrei übertragen werden. Daher müssen bei der Auslegung supraleitender Betriebsmittel die Wechselstromverluste stets berücksichtigt werden. Da die Kosten für die Kühlung bei einer Betriebstemperatur von 4,2 K sehr hoch sind, blieben Hochstromanwendungen der Tieftemperatur-Supraleitung im wesentlichen auf die Magnettechnologie beschränkt. Die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung durch Bednorz und Müller im Jahre 1986 könnte durch die bei 77 K und wie in der vorliegenden Arbeit diskutiert wurde, auch bei etwas tieferen Temperaturen, stark reduzierten Kosten für die Kühlung zu einer baldigen Realisierung von Hochstromanwendungen der Supraleitung in der Energietechnik führen. Die höchste kritische Temperatur von 135 K bei Normaldruck wurde bisher beim Quecksilberkuprat $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ (Hg-1223) erreicht.

Câbles supraconducteurs pour le transport d'énergie

La supraconductivité à haute température pouvant être appliquée de nombreuses manières dans la technique énergétique, des travaux de recherche et de développement sont réalisés à l'échelle mondiale. Ces travaux ont pour objectif non seulement de réussir à fabriquer des fils supraconducteurs de plusieurs kilomètres de long avec une haute densité de courant linéaire critique, mais aussi à prouver la faisabilité technique de câbles, transformateurs et limiteurs de courant supraconducteurs, avec de premières démonstrations à l'appui. Dans le cadre d'un projet soutenu financièrement par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et le Fonds pour projets et études de l'économie électrique (PSEL), un prototype de câble monophasé de 5 m de long a été conçu, fabriqué et testé au CRPP, en collaboration avec Brugg Kabel AG; cette firme et Swissmetal Dornach ont du reste eux aussi contribué au financement du projet. Des études de dimensionnement ont montré que la température d'exploitation optimale pour le conducteur et le système de refroidissement – et ceci, aussi bien en ce qui concerne la réduction des pertes que les coûts d'investissement – se situe autour de 60 K pour un câble avec un diélectrique chaud, de sorte qu'un circuit refroidissement au néon développé par le CRPP a été utilisé pour la première fois. Les principaux résultats de ce projet sont publiés dans le présent article.

BRUGG

We do it!

Brugg Kabel AG
Kabelsysteme für Energieübertragung
Klosterzelgstrasse 28
CH-5201 Brugg

Telefon 056 460 33 33
Fax 056 460 35 36
Internet: http//www.brugg.com
E-Mail: kabel@kwbrugg.ch

Sicherheit von BETONBAU

Sechzigtausendfach...

SICHERHEIT FÜR MENSCH UND UMWELT

Über 60.000 technische Gebäude haben wir erstellt. **Netzstationen, Schalthäuser, Gefahrstoffläger, Gasstationen und Schachtbauwerke**. Wir beweisen täglich, daß man sich auf unsere Kompetenz, unseren Service und unsere Kundennähe verlassen kann. Mit Sicherheit. So erfüllen wir höchste Ansprüche für Mensch und Umwelt. So gestalten wir gemeinsam mit unseren Kunden wirtschaftliche Lösungen für morgen, die heute schon überzeugen. *Eines unserer Lieferwerke ist in Ihrer Region: 68753* ***Waghäusel****, 31167* ***Bockenem****, 85051* ***Ingolstadt****, 04435* ***Schkeuditz****, 46509* ***Xanten****.* Wir arbeiten für die Zukunft: **BETONBAU**

BETONBAU GMBH

BETONBAU GmbH Schwetzinger Str. 22-26, 68753 **WAGHÄUSEL** Tel. (0 72 54) 980-410, Fax (0 72 54) 9 80-419