

# Die Aspekte supraleitender Transformatoren

A. Demarmels VDI, Genève/CH



## 1. Einleitung

Leistungstransformatoren moderner Bauart weisen einen Wirkungsgrad von 99.8 % auf. Die geringen Verluste von 0.2 %, aufgeteilt in Leerlauf- und Lastverluste bzw. Eisen- und Kupferverluste, sind in absoluten Werten über die Betriebsdauer von 30 Jahren betrachtet so bedeutend, dass sie die Anschaffungskosten des Transformators erreichen oder gar übersteigen.

Obwohl der Transformatorbau im Prinzip seit dem Beginn der Elektrotechnik vor 100 Jahren unverändert ist, haben Fortschritte in der Produktionstechnik und in der Materialentwicklung grosse Verbesserungen ermöglicht. Fig. 1 zeigt die Reduktion der Verluste in den vergangenen 40 Jahren für den Bereich bis 1000 kVA, in dem der Wirkungsgrad etwas niedriger ist als im Leistungsbereich grösser 10 MVA.

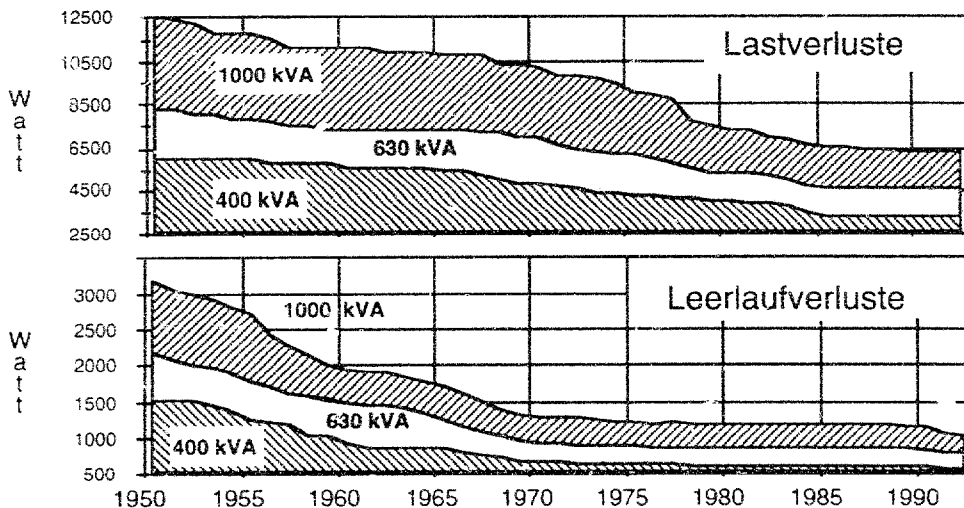


Fig. 1: Verlustentwicklung in den vergangenen 40 Jahren

- 1955 Erstmalsiger Einsatz von kornorientiertem Magnetblech
- 1960 Einführung des Lackdrahtes für die Oberspannungswicklung
- 1968 Reduktion der Magnetblechdicke auf 0.27 mm
- 1985 Reduktion auf 0.23 mm und Einführung der Laserbestrahlung
- 1989 Einführung der "Step Lap" Kernblechstapelung

Der Einsatz von Supraleitern anstelle von Kupferleitern verspricht eine deutliche Reduktion der Lastverluste. Seit den sechziger Jahren wurden in mehreren Studien die Machbarkeit von Niedertemperatur-Supraleiter (NTSL) Transformatoren diskutiert /1, 2/ und anhand eines 330 kVA Einphasen-Transformators jüngst nachgewiesen /3/.

Die kommerzielle Anwendung der NTSL in Transformatoren ist unwahrscheinlich, da wegen der tiefen Betriebstemperatur von 4.2 K schon der zugehörige Kühlaufwand die Verlustminderung grossenteils wettmacht. Die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) ermöglicht die Anhebung der Betriebstemperatur auf das Niveau von Flüssigstickstoff LN<sub>2</sub>, d.h. auf 77 K.

Der damit verbundene geringe Kühlaufwand eröffnet neue Perspektiven /4, 5/. Den folgenden Ueberlegungen liegt ein HTSL Transformator in konventioneller Kernbauweise zu Grunde, bei der die Leerlaufverluste bestehen bleiben. Erst ein Uebergang zu kernlosen HTSL Transformatoren /6/ würde diese Verluste eliminieren.

## 2. Hochtemperatur Supraleiter

Von den technisch interessanten Supraleitermaterialien in Tab. 1 sind zur Zeit die Wismutkuprate am vielversprechendsten, da Drähte mit mehreren hundert Meter Länge hergestellt werden können. Für Anwendungen bei 77 K, der Temperatur von Flüssigstickstoff, weisen Drähte aus Bi2223 die höchsten Stromdichten auf (Tab. 2).

Substanz	Kurzbez.	Chemische Zusammensetzung	T <sub>krit</sub> [K]
Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid	Y (123)	YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub>	92
Wismut-Strontium-Kalzium-	Bi (2212)	Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>10-x</sub>	92
Wismut-Strontium-Kalzium-	Bi (2223)	Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>12-x</sub>	110
Thallium-Barium-Kalzium-	Tl (2223)	Tl <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>12-x</sub>	125
Quecksilber-Barium-Kalzium-	Hg (1223)	HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10-x</sub>	133

Tab. 1: Kuprat-Supraleiter mit Potential für technische Anwendungen

Aus produktionstechnischen Gründen - die Silbermatrix mit den Supraleiterfilamenten wird vor dem Sintern gewalzt - ist der Drahtquerschnitt rechteckig. Die

Höhe der Bänder kann zwischen 0.16 und 0.26 mm eingestellt werden, wobei das Verhältnis Breite zu Höhe etwa 10 beträgt. Trotz der Einbettung in die Silbermatrix schränkt die spröde Keramikstruktur des Supraleiters die Handhabung der Leiter stark ein. Ein Verröbeln oder gar nur Verdrillen der Bänder ist daher ausgeschlossen.

Länge [m]	$J_c$ [A/cm <sup>2</sup> ]	$J_e$ [A/cm <sup>2</sup> ]
0.01	32'600	9'100
10	22'600	6'300
70	22'000	6'100
400	17'000	4'100
1'100	12'700	3'000

Tab. 2: Kritische Stromdichten von Bi2223 Drähten (Daten von /7/, T = 77 K, kein äusseres Magnetfeld,  $J_c$  bezogen auf den Querschnitt der Supraleiterfilamente,  $J_e$  bezogen auf den Drahtdurchmesser, Werte nach dem Kriterium 1  $\mu$ V/cm)

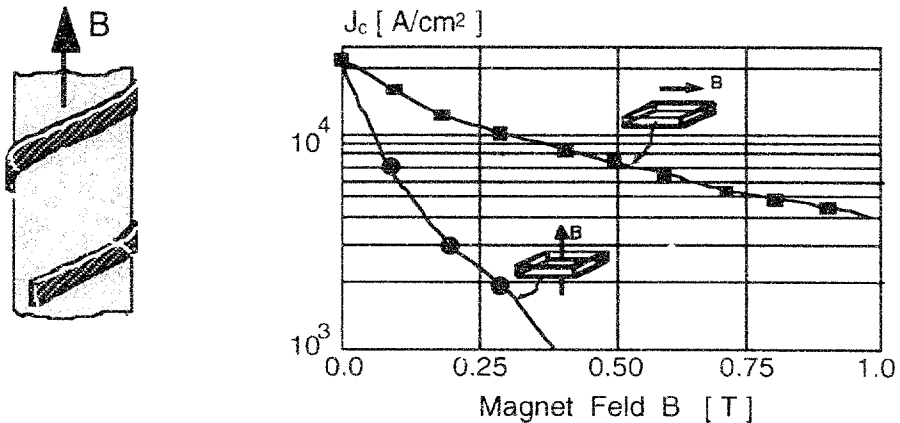


Fig. 2: Anisotropie der Stromtragfähigkeit in Bi2223 Bändern /8/

Die Stromtragfähigkeit der Supraleiter nimmt ganz allgemein mit zunehmendem äusseren Magnetfeld ab. Für Bi2223 Bänder gilt zudem, dass die Abnahme viel stärker ist, wenn das Magnetfeld senkrecht zum Band (und zur Kristallebene des Supraleiters) angelegt wird, als wenn es in paralleler Richtung einwirkt. Diese Anisotropie der Stromtragfähigkeit ist beim Wickeln von Spulen zu berücksichtigen. Glücklicherweise liegt aus geometrischen Gründen die

Hauptkomponente des Spulenfeldes in der "guten" Richtung parallel zum Band, wie die Skizze in Fig. 2 zeigt.

Die heutigen Bänder wurden im Hinblick auf grosse Längen und hohe Stromtragfähigkeit entwickelt. Die Supraleiterfilamente koppeln elektrisch direkt an die Silbermatrix an. Bei Anwendungen im el. Wechselfeld weisen sie daher relativ hohe spezifische Verluste auf in derselben Höhe wie Kupfer bei tiefen Temperaturen. Im Vergleich dazu sind die Wechselstromverluste des klassischen NTSL Niob-Titan um zwei Grössenordnungen niedriger (Tab. 3). Die spezifischen Anforderungen nach geringen Verlusten im Wechselfeld rücken jetzt ins Zentrum des Interesses der Materialhersteller /9/, sodass in Zukunft niedrigere Werte zu erwarten sind.

		T [K]	$J_e$ [A/cm <sup>2</sup> ]*	P [mW/Am]	
NTSL	NbTi	4.2	100'000	0.02	100 mT, verdrillte Leiter
HTSL 1994	Bi2223	77	6'000	7.0	30 mT, nicht verdrillt
Kupfer	(10A, 5mm <sup>2</sup> )	4.2	400	0.8	
		77	400	8.0	
		360	400	80.0	

Tab. 3: Spezifische Wechselstromverluste und kritische Stromdichten  
\* ohne äusseres Magnetfeld

### 3. Verluste in einem Supraleiter-Transformator

Ein Supraleiter-Transformator in klassischer Kernbauform unterscheidet sich wenig von einem herkömmlichen Transformator. Der Eisenkern befindet sich auf Umgebungstemperatur und wird in konventioneller Weise gekühlt. Die supraleitenden Wicklungen einer Phase werden in zylindrischen Kryostaten untergebracht und gekühlt. Flüssigstickstoff LN<sub>2</sub> ist nicht nur ein überall erhältliches, kostengünstiges Kühlmittel, sondern auch ein Flüssigisolator mit Eigenschaften vergleichbar denen von Transformeröl. Daher bietet die Isolation keine grossen Probleme, solange die lokale Blasenbildung unterdrückt wird.

Neben den Leiterverlusten, die aus oben erwähnten Gründen heute noch zu hoch liegen, treten bei einem Supraleiter-Transformator Kühlverluste auf. Diese

entsprechen der Kühlleistung, um die Betriebstemperatur von 77 K aufrecht zu erhalten.

Mit einer Vakuumisolation (Superisolation) im Kryostat können die Strahlungs- und Wärmeleitungsverluste auf einen Wert von  $2 \text{ W/m}^2$  minimiert werden.

Besondere Konstruktionen verlangen die Kalt-Warm-Uebergänge. Elektrische Leiter sind immer auch gute Wärmeleiter, so dass die Stromdurchführungen den grössten Wärmeeinfall in den kalten Teil bewirken. Lässt man sie vom Kühlmittelabfluss umgeben und dadurch kühlen, muss mit einem minimalen spezifischen Wärmeeintrag von  $17 \text{ mW/A}$  gerechnet werden; ohne Kühlung beträgt der Eintrag mindestens  $43 \text{ mW/A} / 10/$ .

In Tab. 4 sind die erwähnten Kennwerte zur Stickstoffkühlung zusammengefasst. Die von den drei Quellen - Wicklung, Kryostat, Stromdurchführung - eingebrachten Wärmeverluste fallen bei 77 K an und werden durch Verdampfen weggekühlt. Der zugehörige Kühlaufwand bei Umgebungstemperatur ist um einem Faktor 15 bis 40 höher, je nach Kühltechnik, Volumen und Kühlleistung.

Carnot Wirkungsgrad		3
Realer Wirkungsgrad	100 W	$\approx 40$
	1'000 W	$\approx 15$
Stromdurchführungen /10/		
ungekühlt	$Q_{\min} =$	$43 \text{ mW/A}$
gekühlt	$Q_{\min} =$	$17 \text{ mW/A}$
Verdampfungsrate	1 Watt $\approx$	$22.5 \text{ cm}^3 \text{ LN2 / Std}$
	45 Watt $\approx$	$1 \text{ lt LN2 / Std}$

Tab. 4: Kennwerte für Flüssigstickstoff-Kühlung bei 77 K

#### 4. Wirtschaftlichkeit

Ein Drei-Phasen Transformator mit konzentrischer OS- und US-Wicklung ohne Stufenwählerschalter und Regelwicklung bildet die Basis für den Vergleich. Bei der Auslegung des Supraleiter-Transformators wurden folgende, zum Teil optimistische Annahmen getroffen:

Supraleiter:	Stromdichte Je	10'000 A/cm <sup>2</sup>
	Spez. Wechselstromverluste	0.25 mW/Am = 25 kW/m <sup>3</sup>
	Kosten	0.54 DM/Am = 6'800 DM/kg
	Kosten (Zukunft)	0.10 DM/Am = 1'250 DM/kg
Isolation:	LN2 zulässige Feldstärke	2 kV/mm
Kapitalisation:	Last- & Leerlauf Verluste	5'000 DM / kW

In den Figuren 3 - 5 werden Volumen, kapitalisierte Verluste und die Gesamtkosten verglichen, wobei die 100 MVA Grösse als Referenz dient. Ein Supraleiter-Transformator zwischen 40 MVA und 100 MVA wird demnach halb so schwer, weist noch einen Viertel der Verluste auf und ist um etwa einen Achtel niedriger in den Totalkosten. Bei 200 MVA werden die Vorteile noch grösser. Falls die Supraleiterkosten hingegen 6'800 kg/DM betragen, werden die Gesamtkosten im gesamten betrachteten Leistungsbereich nicht konkurrenzfähig sein.

Es sei jedoch mit Hinweis auf den Abschnitt 2 betont, dass die angenommenen Eigenschaften bezüglich Supraleiter heute noch nicht erfüllt sind. Wegen der zwangsläufig vereinfachten Auslegung der Transformatoren sind die Einzelwerte mit Vorsicht zu interpretieren, die angeführten Trends hingegen sind zutreffend.

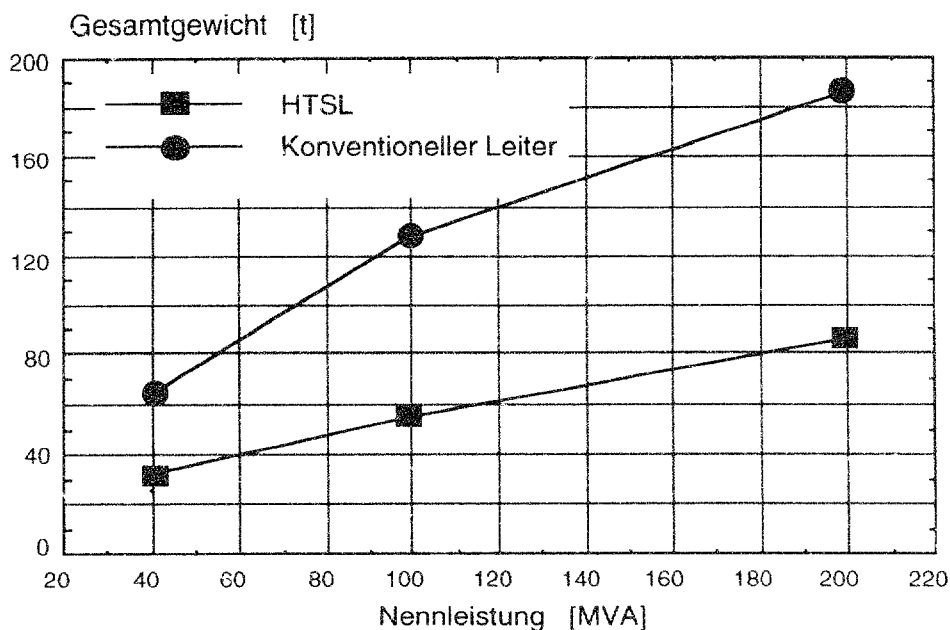


Fig. 3: Gesamtgewicht von HTSL und konventionellen Transformatoren im Vergleich

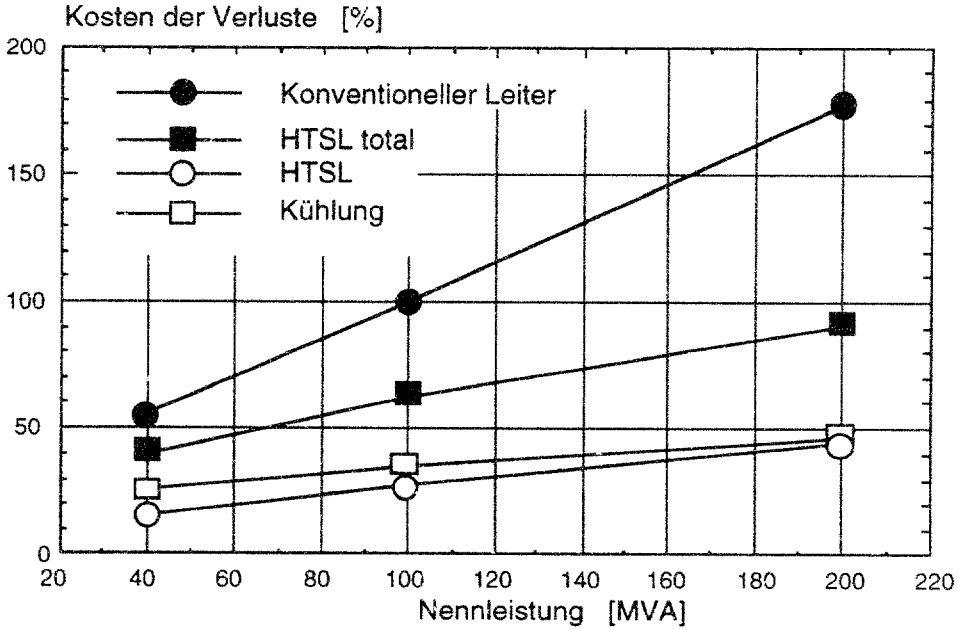


Fig. 4: Relative Kosten der Verluste im Vergleich zu einem konventionellen Transformator von 100 MVA.

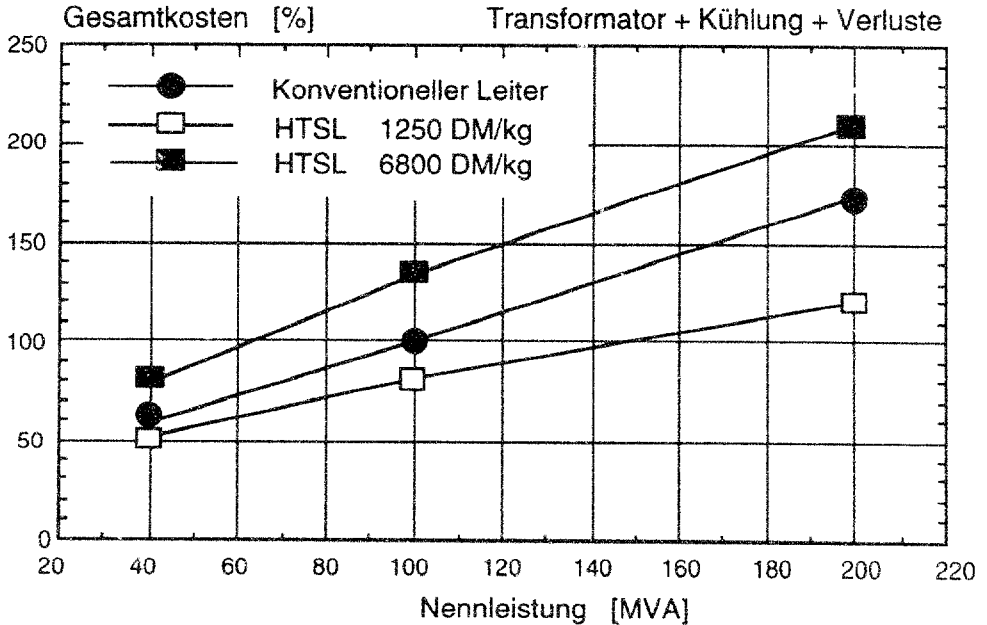


Fig. 5: Gesamtkosten in Relation zu einem konventionellen Transformator von 100 MVA.

Im Bezug auf das Umwelt- und Risikoverhalten ist ohne Einschränkung festzuhalten, dass Flüssigstickstoff als Isoliermedium dem Transformatorenöl überlegen ist. Ein weiterer Vorteil ist der potentiell deutlich geringere Materialverbrauch beim Bau von Supraleiter-Transformatoren.

Rechenbeispiel: Gesamtheit aller Transformatoren ( $\geq 10$  MVA) in der Schweiz.

In der Schweiz beträgt in diesem Bereich die installierte Transformatoren-Leistung 100'000 MVA. Im Durchschnitt seien die Transformatoren zu 50% belastet, so dass die Betriebsverluste 280'000 kW betragen. Eine vollkommene Erneuerung dieser Anlagen mit modernen konventionellen Transformatoren würde die Verluste auf 225'000 kW mindern.

Der Ersatz mit HTSL-Transformatoren würde die Verluste auf 55'000 kW reduzieren, was einem Leistungsgewinn von 170'000 kW entspricht. Finanziell resultiert eine Einsparung von  $170'000 \times 8'760 \text{ h} \times 0.1 \text{ DM/kW-h} = 149 \text{ MDM}$  pro Jahr.

Dauert die Erneuerung des Transformatoren-parks 40 Jahre, so entspricht dies einer Installation von 2'500 MVA pro Jahr. Unter der Annahme, dass die Wirkungsgraderhöhung zu niedrigeren kapitalisierten Kosten von 0.5 MDM pro 100 MVA führt, würde eine jährliche Einsparung von 12.5 MDM realisiert.

## 5. Ausblick

Die Hochtemperatur-Supraleitung eröffnet im Transformatorenbau neue technische Möglichkeiten und verspricht interessante ökonomische und ökologische Vorteile. Der Zeithorizont für deren Nutzung ist von der Materialentwicklung abhängig, da verlustarme Wechselstromleiter noch nicht zur Verfügung stehen. Nichtsdestotrotz lohnt sich bereits jetzt, die technischen Probleme und Systemfragen eines HTSL Transformators in der Praxis anzugehen.

Leistung	kVA	630
Nennspannung, OS/US	kV	18.72 / 0.42
Nennstrom, OS/US	A	11.2 / 866
Frequenz	Hz	50
Kurzschlussimpedanz	%	4.6

Tab. 5: Kenndaten des HTSL-Transformators

In Zusammenarbeit mit EDF (Electricité de France), SIG (Elektrizitätswerk der Stadt Genf) und EPFL (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne) realisiert ABB einen Prototyp Transformator basierend auf Supraleitermaterial von ASC (American Superconductor Corporation). Aus Kostengründen wird ein Verteiltransformator gebaut (Tab. 5), der während eines Jahres am Netz betrieben wird. Das Projekt in Genf wird vom Bundesamt für Energiewirtschaft und vom Studienfonds der Schweizer Elektrizitätswirtschaft finanziell unterstützt.

## 6. Literatur

- /1/ Mc Fee, R.; "Superconducting Power Transformers - a Feasibility Study"; Electrical Engineering 80, 1961, 754-760
- /2/ Riemersma, H.R. et al.; "Application of Low Temperature Technology to Power Transformers"; US Department of Energy DOE/ET/29324-1, 1982
- /3/ Hörnfeldt, S. et al; "Superconducting Transformers"; ABB Review 1/1994, 13 - 19
- /4/ Mumford, F.J.; "A Techno-Economic Study of High  $T_c$  Superconducting Power Transformers"; Int. Conf. on Electrical Machines ICEM Paris, 1994, 630-635
- /5/ Le Roy, G. et al.; "Application des supraconducteurs aux transformateurs"; CIGRE Konferenz "Impact de la technologie des supraconducteurs sur celles des futurs réseaux électriques", Sektion 1.1 (CE 12), Paris 1990
- /6/ Müller, W.; "Probleme eines Transformators mit Hochtemperatur-Supraleitern"; ETG Fachbericht 29, 1989, 149-158
- /7/ Malozemoff, A. P.; "Critical Currents and Critical State in BSCCO Wires"; Applied Superconductivity Conference, Boston, 1994
- /8/ Grasso, G. et al.; "Pressed and Cold-rolled Ag-sheated Bi(2223) Tapes: A Comparison"; Physica C217, 1993, 335
- /9/ Christopherson, C.J. et al.; "The Development of Twisted High-Temperature Superconductor Composite Conductors"; eingereicht bei Applied Physics Letters
- /10/ Buyanov, Yu. L. et al.; "A Review of Current Leads for Cryogenic Devices"; Cryogenics, April 1975, 193-201

