

**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:** 91 (2000)

**Heft:** 18

**Artikel:** Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Netzen

**Autor:** Schnyder, Gilbert / Rhyner, Jakob / Politano, Diego

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-855587>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

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

# Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Netzen

## Systemstudie

Die Systemstudie «Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung (HTS) in elektrischen Netzen» zeigt unter Berücksichtigung des aktuellen Wissensstandes auf, welche technischen und wirtschaftlichen Vorteile für die Stromerzeugung, -übertragung und -verteilung bei der Verwendung von HTS-Materialien in Netzkomponenten und deren Einsatz im System «elektrisches Netz» resultieren.

■ Gilbert Schnyder, Jakob Rhyner, Diego Politano und Mårten Sjöström

## Einleitung

Die von den Industrien und Hochschulen initialisierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Hochtemperatursupraleiter (HTS) konzentrieren sich bis heute insbesondere auf die Herstellung und die Anwendung einzelner HTS-Komponenten. ABB hat zum Beispiel einen 1 MVA HTS-Strombegrenzer und einen 630-kVA-HTS-Transformator im praktischen Netzbetrieb geprüft und erweitert derzeit die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Mit steigender Nennleistung der Komponenten steigen auch die Entwicklungskosten markant an. Daher ist eine Übersicht über den technischen und wirtschaftlichen Gesamtnutzen, der mit dem Einsatz der Hochtemperatur-Supraleiter in elektrischen Netzen in Aussicht gestellt werden kann, notwendig.

## Ziele

Ein Ziel der Systemstudie ist die Beantwortung der Frage, welcher Gewinn für die Stromerzeugung, -übertragung und -verteilung durch die Anwendung der HTS in den Komponenten und deren Einsatz im System resultiert. Dabei ist vordergründig der anlagen- und komponentenübergreifende Gesamtnutzen des Einsatzes von HTS im elektrischen Netz zu bestimmen. Das heisst, ausgehend von den bestehenden Leitermaterialien und deren bekanntem Verhalten in den einzelnen Komponenten werden ihre Integration in das elektrische Netz sowie die technischen und finanziellen Auswirkungen für das elektrische Netz als System beurteilt (Bild 1).

Die Definition einer Plattform für zukünftige Forschungs- und Entwicklungs-

aktivitäten im Bereich der Hochtemperatur-Supraleitung ist ein zweites Ziel der Systemstudie. Die Plattform dient für den gezielten Einsatz der beschränkt vorhandenen finanziellen Mittel von privaten Gesellschaften und öffentlichen Institutionen für breit abgestützte, technisch wie auch finanziell erfolgversprechende forschungs- und anwendungsorientierte Projekte der Technologie «Hochtemperatur-Supraleitung».

Die Systemstudie soll zudem eine Basis für eine schweizerische Nutzung der neuen Technologie für die Stromübertragung und -erzeugung schaffen, damit die Schweiz in der Entwicklung von HTS-Elementen weiterhin ein Kompetenzzentrum bleibt.

In den Projektarbeiten für die Systemstudie sind die folgenden Resultate angestrebt worden:

- Definition einer Entwicklungsbasis für neue Funktionen oder Komponenten, mit denen die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung, -übertragung und -verteilung erhöht werden kann;
- Quantifizieren möglicher Einsparungen bei Investitionen, Betrieb, Wartung und Unterhalt;
- Auffinden von Netzkonfigurationen, die dank HTS-Komponenten die höchsten Kosteneinsparungen und Nutzungseffekte ermöglichen;

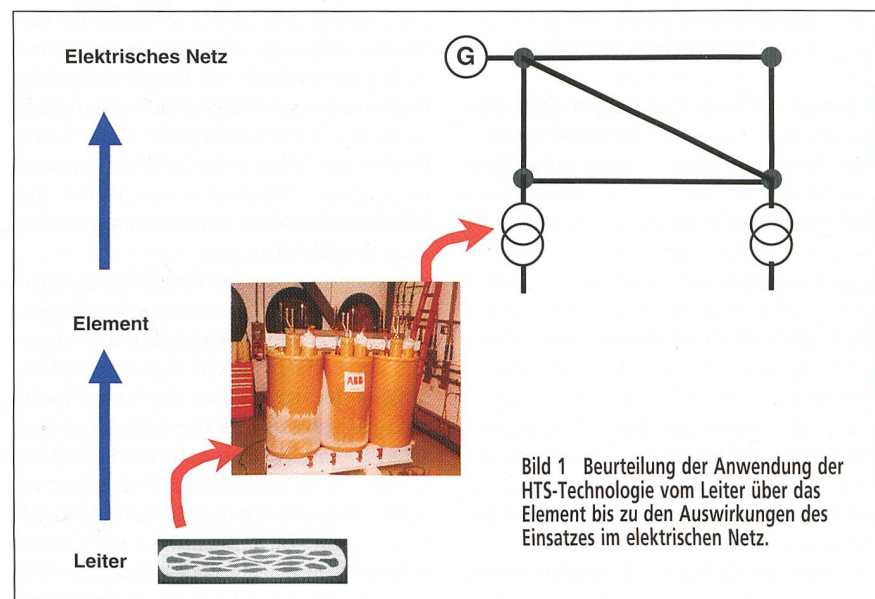


Bild 1 Beurteilung der Anwendung der HTS-Technologie vom Leiter über das Element bis zu den Auswirkungen des Einsatzes im elektrischen Netz.

### Autoren

Dr. Gilbert Schnyder, Schnyder Ingenieure AG, 8913 Ottenbach  
 Dr. Jakob Rhyner, ABB Corporate Research, 5405 Baden-Dättwil  
 Diego Politano, High Voltage Laboratory, ETH Zürich, 8092 Zürich  
 Mårten Sjöström, Chaire des Circuits et Systèmes, EPF Lausanne, 1015 Lausanne

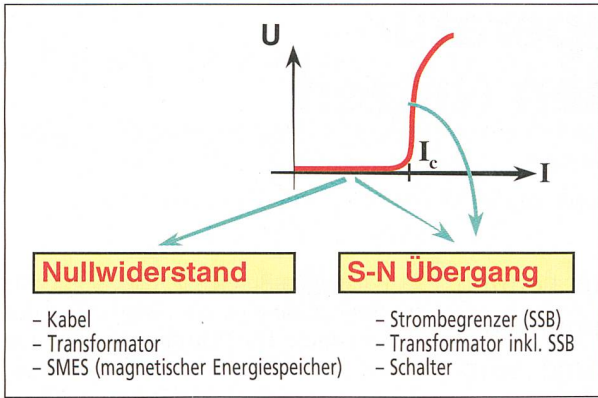


Bild 2 HTS-Elemente für das elektrische Energieübertragungsnetz<sup>2</sup>.

- Schaffen einer generellen Plattform mit der Definition von Stossrichtungen für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

### Umfeld und Rahmenbedingungen

Das elektrische Energieübertragungsnetz ist seit der Einführung der Drehstromübertragung ständig optimiert worden. Dies äussert sich heute in der hohen Verfügbarkeit, der hohen Sicherheit, der geringen Verluste und der grossen Wirtschaftlichkeit. Mit einer Verfügbarkeit von mehr als 99,9% und mit Gesamtübertragungsverlusten von nur rund 7% weist das vorwiegend aus Transformatoren, Schaltanlagen und Leitungen bestehende Netz eine sehr gute Energieeffizienz aus.

Der Einsatz neuer Technologien in elektrischen Netzen hat sich demzufolge an diesen Rahmenbedingungen zu orientieren. Ein erfolgreicher Einsatz der Supraleitertechnologie im bestehenden Netz ist somit verknüpft mit der Erhöhung der Verfügbarkeit der elektrischen Energieübertragung und mit der markanten Reduktion der Verluste unter Beachtung der erforderlichen Wirtschaftlichkeit.

Erste Systembetrachtungen über den Einsatz der Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Netzen unter dem Aspekt der reinen Verlustminimierung sind 1989 veröffentlicht worden [1]. Die in dieser Arbeit ausgeführten Abschätzungen zeigten auf, dass *nur* der reine Ersatz von Kupfer bzw. Aluminium durch HTS-Material in konventionellen Komponenten an der Wirtschaftlichkeit scheitert.

Aus den bisherigen Betrachtungen im Umfeld einer Einführung der HTS-Komponenten in das elektrische Netz sind folgende Rahmenbedingungen und Gegebenheiten zu beachten:

- Neben der reinen Verlustminimierung müssen für den wirtschaftlichen Ein-

satz in bestehenden Netzen noch andere Vorteile der HTS-Komponenten berücksichtigt werden.

- Bei bestimmten neuen betrieblichen Anforderungen oder neuen Umweltauflagen könnte der Einsatz von HTS-Komponenten die einzige Alternative darstellen, womit die reine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht mehr das einzige Kriterium eines Einsatzes darstellen dürfte.
- Überlegungen zum wirtschaftlichen Einsatz der Supraleitung müssen neben der reinen Betrachtung der Vor- und Nachteile der einzelnen Komponenten vor allem die Auswirkungen auf das System «elektrisches Netz» umfassen.
- Abgesehen von der Problematik der Kühlung führt der Einsatz der HTS-Technologie in elektrischen Netzen zu keinen grundsätzlichen Problemen.

### Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung

Der allgemein bekannte Vorteil der Supraleitertechnologie liegt in der Nutzung des Widerstandes  $\ll 0 \text{ } [\Omega]$  für das Vermindern der Übertragungsverluste, wobei die Verluste im Betrieb zwischen Drehstrom- und Gleichstrombetrieb stark variieren. Insbesondere im Betrieb mit Drehstrom fallen beträchtliche Verluste, so genannte Wechselstromverluste<sup>1</sup> an. Minimale Verluste resultieren nur im Betrieb mit Gleichstrom.

Neben den minimalen Übertragungsverlusten ist aber insbesondere die Eigenschaft der hohen Stromdichte des supraleitenden Materials ein weiteres Kriterium, das für den Einsatz der neuen Technologie günstige Rahmenbedingungen schafft. Die zulässige Stromdichte bekannter HTS-Materialien liegt mit rund 100 A/mm<sup>2</sup> um mindestens den Faktor 10 höher als die Stromdichte der konventionellen Aluminium- und Kupferleiter. Die sich im Prototyp-Stadium befindenden

HTS-Kabel weisen auf eine realisierbare Erhöhung der effektiven Stromdichte um den Faktor 3 hin.

Mit der Ausnutzung des Überganges vom supraleitenden (s) in den nichtsupraleitenden (n) Zustand, dieser erfolgt bei der kritischen Stromdichte  $I_c$ , besteht die Möglichkeit, eine weitere Elementeigenschaft der Supraleitung für den Einsatz im elektrischen Netz zu nutzen, nämlich diejenige der Strombegrenzung (Bild 2).

Der Einsatz der HTS-Technologie erfordert zwangsweise den Einsatz einer Kühlung. Die Verfügbarkeit ist daher direkt mit dem Funktionieren der Kühlung gekoppelt, das heisst mit einer zusätzlichen Komponente, was eine Verringerung der Verfügbarkeit im Vergleich zu einem konventionellen Kabel oder einer Freileitung bedeutet.

Der Einsatz der Supraleitertechnologie in das bestehende Netz unter Berücksichtigung der notwendigen Kühlung und des optimalen Einsatzes bei Gleichstromanwendungen bedeutet, dass die neue Technologie in ein bestehendes System eingeführt wird, das nicht den idealen Voraussetzungen für den optimalen Einsatz dieser Technologie entspricht. Betrachtungen über das optimale System der Energieübertragung unter Ausnutzung der besonderen Eigenschaften der Supraleitertechnologie – Nullwiderstand, hohe Stromdichten, Ausnutzung des Überganges supraleitend zu nichtsupraleitend – sind daher notwendig.

### Auswahl von Schwerpunkten

Für die in der Tabelle I aufgeführten Schwerpunkthemen sind eine Anzahl von Fallstudien durchgeführt worden. Aufgrund der Resultate dieser Fallstudien wird der technisch und wirtschaftlich sinnvolle Einsatz der Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Netzen aus dem aktuellen Wissensstand dargelegt.

Folgende Fallstudien sind untersucht worden:

Der potenzielle Nutzen des supraleitenden Strombegrenzers zeigt sich in den folgenden Punkten:

- die Vermaschung oder Ringbildung von Netzen, oder die Erhöhung einer bestehenden Vermaschung,
- die mögliche Redimensionierung von Schaltanlagenkomponenten;

<sup>1</sup> Die Wechselstromverluste in HTS-Leitern sind etwa proportional zur Frequenz.

<sup>2</sup> Der Einsatz der Supraleitung in Generatoren und Motoren als Elemente für die Energieumwandlung ist nicht Bestandteil der vorliegenden Studie.

- die Erhöhung der Verfügbarkeit der Netzelemente durch Minimierung der mechanischen Beanspruchung im Fehlerfall
- die Lastflusssteuerung mit induktiven, supraleitenden Elementen
- die Sternpunktbehandlung

Der Einsatz des *supraleitenden Transformatoren* zur Verlustminimierung und für die Beurteilung der Auswirkungen der direkten Integration des Strombegrenzers in den Transformator.

Der Ersatz bestehender Hochspannungsleitungen durch *supraleitende Kabelverbindungen* für die Ermittlung, ob und wie supraleitende Kabel bestehende Einrichtungen ersetzen können.

Der Einsatz des *supraleitenden magnetischen Energiespeichers (SMES)* im Netz zum Aufzeigen des Potenzials als Leistungs- und Energiespeicher zur Optimierung der Energieübertragung und -verteilung.

Die *Erhöhung der Übertragungskapazität von Netzen* durch den Einsatz der supraleitenden Komponenten Kabel, Transformator, Strombegrenzer in elektrischen Netzen.

Der *Ersatz von Spannungsebenen* mit dem Einsatz von hochstromführenden Kabeln.

Die Realisierung eines *supraleitenden Schalters* als Basis für die Entwicklung einer neuen Schalterkonfiguration.

Schwerpunkthemen	Eingesetzte HTS-Elemente			
	Transformator	Strombegrenzer	Kabel	SMES
Erhöhung der Übertragungskapazität des Netzes	x	x	x	
Erhöhung der Vermaschung von Netzen		x		
Erhöhung der Netzqualität und -verfügbarkeit		x		x
Redimensionierung von Netzelementen		x		
Reduktion von Verlusten	x	x	x	
Lastflusssteuerung in vermaschten Netzen		x		
Sternpunktbehandlung von elektrischen Netzen		x		
Reduktion von Umwelteinwirkungen	x		x	
Erhöhung der dynamischen Stabilität	x	x	x	x
Einbindung von Erzeugungsanlagen	x	x		
Entwicklung von neuen Schalterkonzepten		x		
Verw. von Gleichstrom bei Energieübertragung		x	x	x

Tabelle I Schwerpunkthemen der Systemstudie «HTS in elektrischen Netzen».

2- bis 5-fachen Nennstrom ab- oder zuschalten kann. Bei Hochspannungsschaltern sind die Einsparungen wesentlich kleiner, da der Kurzschlussstrom nur für die Dimensionierung des Antriebs ausschlaggebend ist. Bei verminderten Anforderungen an die Kurzschlussstromfestigkeit können bis zu 10% der Kosten eingespart werden. Generell resultieren durch den Einsatz von Strombegrenzern die in der Tabelle II für die verschiedenen Netzelemente aufgelisteten, maximalen Kosteneinsparungen:

Transformatoren	5%– 8%
Leistungsschalter	5%–15%
Sammelschienen	3%–15%
Kabel	0– 3%
Freileitungen	0%

Tabelle II Einsparung bei Neuinvestitionen unter Einbezug von Strombegrenzern.

## Ergebnisse der Fallstudien

### Supraleitender Strombegrenzer

Der Einsatz des HTS-Strombegrenzers im elektrischen Netz wurde insbesondere unter den folgenden Aspekten beurteilt:

- **Redimensionierung von Elementen in neu zu erstellenden Anlagen:** Die Redimensionierung von existierenden Elementen wie Schalter, Sammelschienen, Leitungen und Transformatoren ergeben sich durch den verminderten Betrag des Kurzschlussstromes beim Einsatz von Strombegrenzern. Diese sind in der Lage, den Kurzschlussstrom auf das 2- bis 5-fache des Nennstromes eines Elementes zu begrenzen. Die höchsten Einsparungen sind bei den Mittelspannungsschaltern erreichbar. Anstelle der teuren Leistungsschalter können wesentlich günstigere Lastschalter – bis zu 50% der Kosten eines Leistungsschalters – eingesetzt werden. Allerdings ist ein Lastschalter erforderlich, der gegenüber den existierenden Lastschaltern nicht nur den Nennstrom, sondern den

- **Erhöhung der Verfügbarkeit** bei bestehenden Anlagen bedingt durch Ringbildung in radial betriebenen Netzen oder zusätzliche Einbindung von Leitungen in bereits vermaschten Netzen.
- **Hinauszögern von Neuinvestitionen** von Elementen in bestehenden Anlagen; Verlängerung der Lebensdauer durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung im Falle von Kurzschlüssen.

Die Resultate aus den Fallstudien zeigen auf, dass durch den Einsatz von supraleitenden Strombegrenzern verschiedene technische Vorteile im elektrischen Energieübertragungsnetz realisiert werden können. Die wesentlichen Vorteile sind:

- Transformatoren, Schaltanlagen, Leistungsschalter und Kabel können redimensioniert werden.
- Die Kurzschlussimpedanz von Transformatoren kann reduziert werden, was die Kapazität der Wirkleistungsübertragung des Transformators erhöht und den Spannungsabfall über dem Transformator vermindert.
- Die Lebensdauer der Netzelemente wird durch die Reduktion der mechanischen Beanspruchung im Fehlerfall erhöht.
- Die Vermaschung im 380/220-kV-Übertragungsnetz kann erhöht werden, das heisst, die Einbindung von zusätzlichen Leitungen in den Schaltstationen wird möglich, ohne dass die Schaltanlagen aus Gründen der zu tiefen Kurzschlussfestigkeit zu ersetzen sind.
- In den mehrheitlich radial betriebenen Verteilnetzen und in Industrienetzen kann der Ringbetrieb eingeführt werden, was die Verfügbarkeit erhöht und die Verluste verringert.
- In Mittelspannungsnetzen können anstelle von Leistungsschaltern speziell dimensionierte, kostengünstigere Lastschalter eingesetzt werden.
- Überregionale Netze der Spannungsebenen 50–150 kV, die aufgrund von zu hohen Kurzschlussströmen nur in Ringen betrieben werden, können vermascht werden, was die Verfügbarkeit der Energieversorgung erhöht und die Verluste minimiert.
- Aufgrund der verminderten Kurzschlussströme können Schaltanlagen mit einem einfacheren Betriebskonzept realisiert werden.
- Zur Vermeidung von hohen Spannungsspitzen kann in Netzen mit gelöschtem Sternpunkt anstelle von Petersen-Spulen allenfalls ein Strom-

Fallstudien	Neue Anlagen		Bestehende Anlagen	
	Redimensionierung	Erhöhung der Verfügbarkeit	Auszögern von Investitionen	
Feeder:	+		++	
Schaltstation 380/220 kV	—		=	
Schaltstation 220/110 kV	—		=/+	
Industrienetze	++	+	++	
Kraftwerkseinspeisungen 1200 MW	-		+ / ++	
Kraftwerkseinspeisungen 200 MW	+		++	
Überregionale Verteilnetze (z.B. 60 kV)	++	=	=	
Regionale Verteilnetze (z.B. 16 kV)	++	++	+ / ++	
Niederspannungsnetz 400 V	+	++	++	

++ wirtschaftlich sehr interessant; + wirtschaftlich interessant  
 = ein Gewinn ist möglich  
 - keine wirtschaftliche Anwendung; — schlechte Anwendung

Tabelle III Qualitative Beurteilung des wirtschaftlichen Einsatzes von Strombegrenzern in elektrischen Netzen unter Preisannahme von sFr. 4.-/kVA des Strombegrenzers.

begrenzer parallel mit einer nicht geregelten Spule für die Sternpunktbehandlung eingesetzt werden.

- Mit dem Einsatz des supraleitenden Strombegrenzers können allenfalls neue Schalterkonzepte realisiert werden.
- Nicht geeignet sind die Strombegrenzer für den Einsatz zur Lastflusssteuerung in elektrischen Netzen.

Die Kosten für den Strombegrenzer sind derzeit noch sehr schwer abschätzbar. Es ist davon auszugehen, dass sich diese im Bereich von sFr. 1.- bis 15.-/kVA bewegen. Bei Gestehungskosten am oberen Ende dieses Intervalls zeigen Wirtschaftlichkeitsberechnungen, dass ein Einsatz der supraleitenden Strombegrenzer vor allem in Mittelspannungsnetzen lohnend ist. Bei einem postulierten Preis des Strombegrenzers von sFr. 4.-/kVA dürften wirtschaftliche Vorteile gemäss Darstellung in der Tabelle III resultieren:

### Supraleitender Transformator

Transformatoren mit supraleitenden Wicklungen weisen grundsätzlich das gleiche Betriebsverhalten wie konventionelle Transformatoren auf. Beim Einsatz des Transformators ist zudem die Integration des Strombegrenzers ein weiterer Vorteil für den Einsatz in elektrischen Netzen.

Vorteile des supraleitenden Transformators sind die niedrigeren Verluste und die Gewichts- und Volumenreduzierung. Dies bedeutet die Unterbringung von mehr Leistung auf gleichem Raum, ein geringeres Leistungsgewicht und erheblich geringere elektrische Verluste. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Umweltbeeinflussung. Durch den Wegfall des Isolierstoffes Öl entfallen die damit verbundenen Installations- und Recyclingkosten. Ein HTS-Transformator kann ohne weitere Sicherungsmassnahmen an geschützten Aufstellungsorten, zum Beispiel in Wasserschutzgebieten, betrieben werden.

Abschätzungen zeigen, dass erste wirtschaftliche Einsatzorte der supraleitenden Transformatoren in städtischen Kabelnetzen und als Blocktransformatoren bei Generatoreinspeisungen sein dürften.

### Supraleitendes Kabel

HTS-Energiekabel können einen Beitrag leisten, den steigenden Energiebedarf von Ballungszentren wirtschaftlich und beim Ersatz von Freileitungen durch Kabel auch umweltverträglich zu übertragen. Weitere denkbare Szenarien sind supraleitende Verbindungen durch die Strassen- und Bahntunnels der Alpen zwecks Reduktion der alpenquerenden Freileitungen und zur Reduktion der Übertragungsverluste und «Backbone»-Lösungen für den Energietransit durch die Schweiz.

Werden konventionelle Kupferkabelstrecken in existierenden Trassen durch HTS-Kabel ersetzt, so kann bei gleichem Platzbedarf eine höhere Leistung bei gleichzeitig geringeren elektrischen Verlusten übertragen werden. Gleichzeitig stellt sich auch die Frage nach der optimalen Übertragungsspannung, die beim Einsatz der Supraleitertechnologie möglichst tief angesetzt werden kann. Aufgrund der hohen Ströme sind die Kabel im Gegensatz zu den konventionellen Kabeln neuartig aufzubauen. Neben dem koaxialen Aufbau ist theoretisch auch ein konzentrischer Aufbau eines 3-phasigen Kabels machbar. Beide Kabeltypen weisen von den elektrischen Parametern her gesehen ähnliche Werte auf. Mit beiden Varianten können die elektromagnetischen Beeinflussungen ausserhalb des Kabels eliminiert werden, was bei den zu erwartenden Hochstromanwendungen eine Notwendigkeit wird (Bild 3).

Im Bild 4 ist aufgezeigt, dass mit supraleitenden Kabeln auf der 110-kV-Ebene eine ähnliche Transitkapazität wie

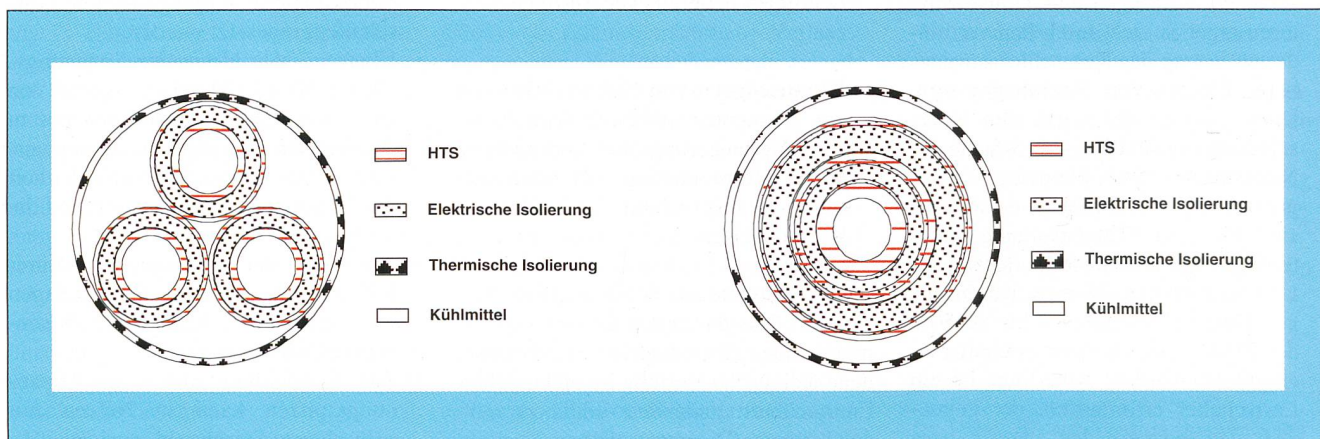


Bild 3 Koaxiale und konzentrische Anordnung der Phasen in supraleitenden Kabeln.

Leistung	höher
Spannung	gleiche oder tiefere Spannung
System	kleinere Ausführung aufgrund der Komponentenauslegung
Totale Verluste (inkl. Kühlung)	tiefer bei Raumtemperatur-dielektrikum; ausgeprägt tiefer bei gekühltem Dielektrikum
Umwelt	reduzierte elektromagnetische Felder keine Umweltbelastung kein Aufheizen der Umgebung

Tabelle IV Vorteile der supraleitenden Kabel gegenüber den konventionellen Kabel.

die einer 380-kV-Freileitung geschaffen werden kann.

Die technischen Vorteile der supraleitenden Kabel im Vergleich zu den konventionellen Kabel sind in der Tabelle IV aufgelistet:

Die am meisten Erfolg versprechenden Einsätze von supraleitenden Kabeln werden in den folgenden Anwendungen erwartet:

- Ersatz von Kabel, die ihre Lebensdauer erreicht haben;
- Ersatz von Freileitungen durch Kabel;
- Vermeidung einer zweiten parallelen Kabelverbindung durch Nutzung der höheren Übertragungsfähigkeit von supraleitenden Kabeln;
- Übertragung über lange Distanzen.

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von supraleitenden Kabeln sind Vergleichsrechnungen für die Energieübertragung über längere Distanzen und die Energieversorgung einer Stadt mit einem supraleitenden Kabel erstellt worden. Die betrachteten Szenarien sind für beide Fälle in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

Die Tabelle V zeigt den Vergleich der Kosten für verschiedene Kabelsysteme und welchen Betrag die supraleitenden Kabel aufgrund der Anpassung des Energieübertragungssystems – keine Transformation auf höhere Spannungsebenen – kosten können.

**Schlussfolgerungen**

Folgende Schlüsse lassen sich aus der Untersuchung der Fallstudie ableiten:

- Die Freileitung ist immer die günstigste Variante für die Realisierung einer Verbindung zur Energieübertragung auf der 380/220-kV-Spannungsebene.
- Sowohl für AC wie auch für DC können supraleitende Kabel oberhalb von 20 kV technisch sinnvoll realisiert werden.

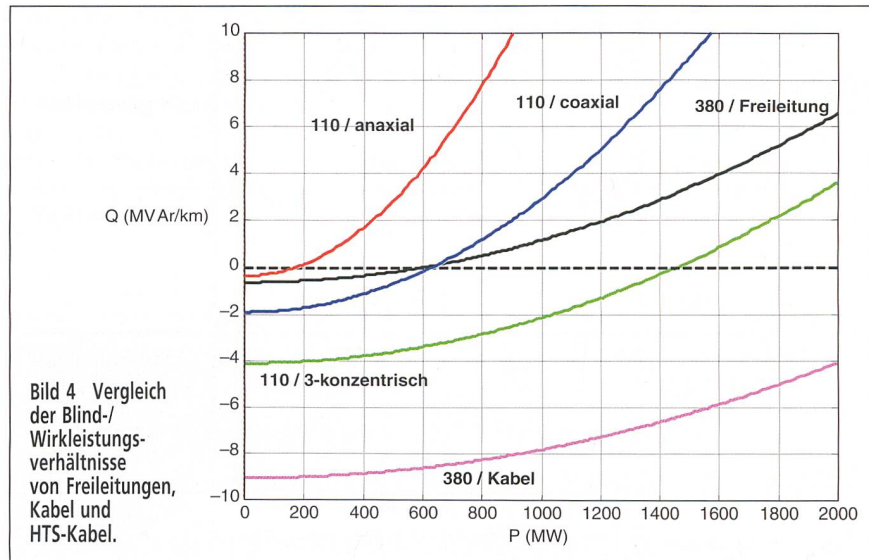


Bild 4 Vergleich der Blind-/Wirkleistungsverhältnisse von Freileitungen, Kabel und HTS-Kabel.

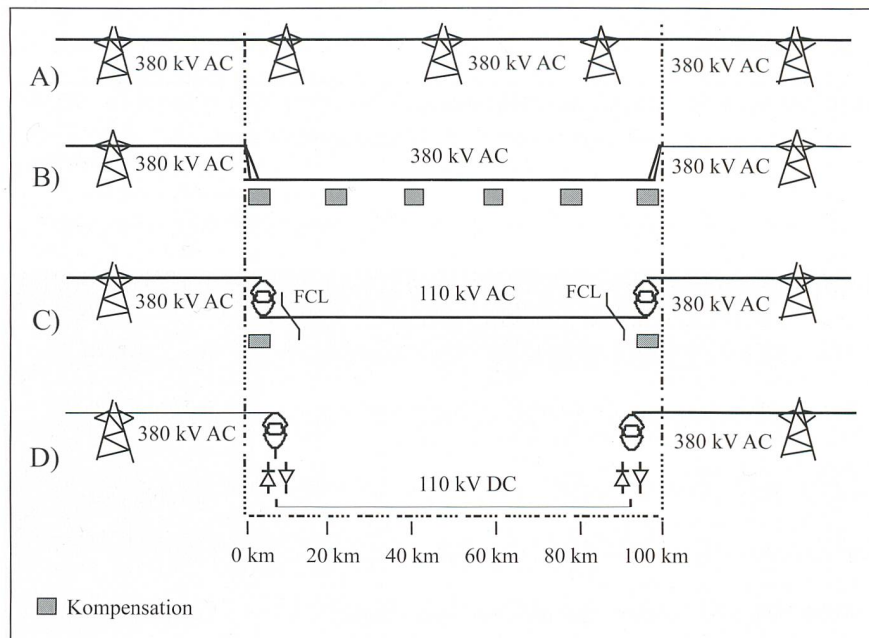


Bild 5 Varianten für eine die Alpen überquerende Leitung:

A: 380-kV-Freileitung; B: konventionelles Kabel; C: HTS-AC-Kabel; D: HTS-DC-Kabel.

Szenario	Kosten nach 30 Jahren (Mio. sFr.)	Investitionskosten pro Meter Kabel (sFr./m)
<b>Übertragung über längere Distanzen (100 km)</b>		
konventionelles Kabel (380 kV)	1432	1500 (zum Vergleich)
HTS-AC-Kabel (110 kV)	1432	2281
HTS-DC-Kabel (110 kV)	1432	2093
konventionelles Kabel in NEAT-Tunnel (380 kV)	1146	1500 (zum Vergleich)
HTS-AC-Kabel (110 kV)	1146	2974
HTS-DC-Kabel (110 kV)	1146	3012
<b>Stadtversorgung</b>		
konventionelles Kabel (220 kV)	317	1500 (zum Vergleich)
HTS-AC-Kabel (24 kV)	317	2861
HTS-DC-Kabel (24 kV)	317	6424

Tabelle V Vergleich der Kosten für verschiedene Kabelsysteme und maximaler Preis der Kabel pro Meter aufgrund der Systemänderungen.

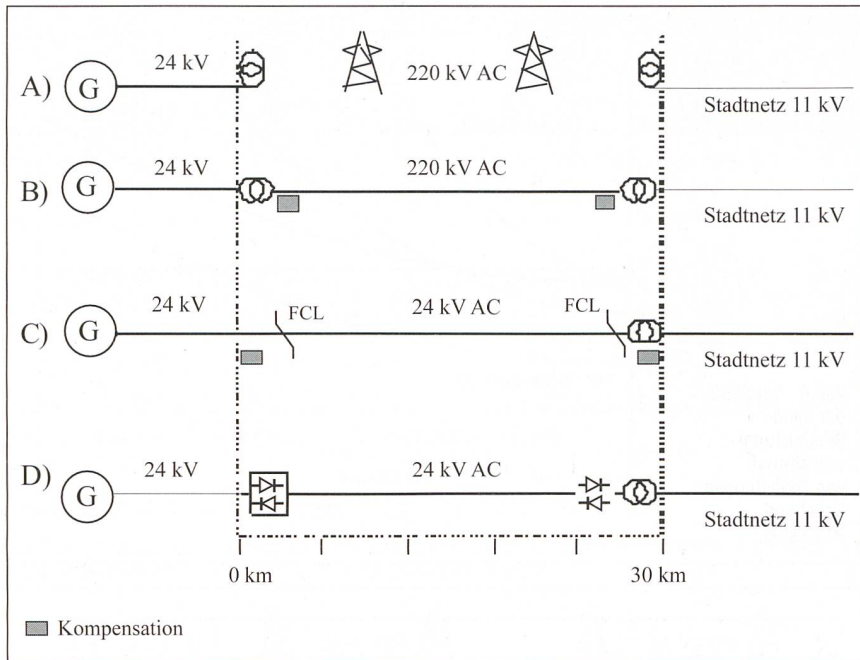


Bild 6 Versorgung einer Stadt mit einer 220-kV-Leitung:  
 A: 220-kV-Freileitung; B: konventionelles Kabel; C: HTS-AC-Kabel; D: HTS-DC-Kabel.

- Supraleitende Kabel sind gegenüber den konventionellen Kabeln unter Berücksichtigung des veränderbaren Systems «elektrisches Netz» bevorzugt, da aufgrund der höheren Übertragungskapazität Spannungsebenen wegfallen.
- Das konzentrisch aufgebaute Kabel ist gegenüber dem koaxial aufgebauten Kabel die bessere Lösung.
- Der Einsatz des HTS-DC-Kabel ist von der Wirtschaftlichkeit gesehen attraktiver als der Einsatz des HTS-AC-Kabels. Keine Leiterverluste, keine dielektrischen Verluste und das sehr kompakte Design sind die wesentlichen Vorteile.
- Es existiert bisher kein detailliertes Konzept für eine wirtschaftlich tragbare, zuverlässige Kühlung über weite Distanzen. Dieses müsste in einer gesonderten Studie erstellt werden.

**Supraleitender magnetischer Energiespeicher**

Der Einsatz des hochtemperatursupraleitenden magnetischen Energiespeichers SMES ist aufgrund der physikalischen Parameter betreffend der Energie- und Leistungsdichte unter Verwendung des heute verfügbaren HTS-Materials BiSSCO im Vergleich mit dem Schwungrad und auch mit Kondensatoren nicht sinnvoll. Ausschlaggebend ist die Tatsache, dass die Stabilität des Magnetfeldes bei BiSSCO schon in kleinen Magnetfeldern (0,3 T) stark abfällt. Mit dem zukünftig verfügbaren HTS-Materials YBCO, das bezüglich der Magnetfeldstabilität wesentlich bessere Werte aufweist, ist der Vergleich zu wiederholen. Der Einsatz des geeigneten SMES würde sich bei den folgenden Anwendungen anbieten:

- als Anlaufhilfe für Motoren mit grösserer Leistung,
- als Speicher für Regelleistung zur Glättung der Lastkurve,
- als Pufferspeicher für stochastische Energieerzeuger, wie zum Beispiel Wind und Photovoltaik.

**Erhöhung der Übertragungsfähigkeit von Netzen**

Durch den Aufbau von Netzen mit niederohmigen, koaxialen oder konzentrischen aufgebauten, supraleitenden Kabeln und Transformatoren mit reduzierten Kurzschlussimpedanzen steigt die Übertragungskapazität des Netzes generell, da die Spannungsabfälle reduziert und der Blindleistungsbedarf optimiert werden. Zugleich wird die Stabilität des Netzes verbessert. Mit Reduktion der Impedanzen steigen theoretisch die Kurz-

Systemanalysen	Element
Bestimmen der optimalen Platzierung von Strombegrenzern in elektrischen Netzen	Strombegrenzer
Ermittlung des Verhaltens von serieller Installation von Strombegrenzern bzw. Bestimmung des gegenseitigen Ansprechverhaltens	Strombegrenzer
Beeinflussung der Stabilität des Netzes durch den Einsatz von Strombegrenzern	Strombegrenzer
Konsequenzen der Eigenschaft «Nullwiderstand» auf die Stabilität des Netzes aufzeigen	Kabel
Ausbreitung von Überspannungen und deren Auswirkungen	Kabel
Definition der erforderlichen Schutzkomponenten und Schutzsysteme	Kabel
Behandlung von Fehlern (Fehlererkennung, Fehlerbereinigung, EMV-Problematik)	Kabel
Bestimmen des optimalen Spannungsniveaus	Kabel
Auswirkungen der Reduktion der Halbleiterverluste auf den wirtschaftlichen Einsatz von DC-Kabeln	Kabel
Prüfen der Möglichkeit zur Steigerung der Übertragungskapazität bestehender Netze durch den Einsatz von HTS-Komponenten	Konzepte für die Energieübertragung
Prüfen der Möglichkeit zur Elimination von Spannungsebenen bzw. zum Einsatz von hochstromführenden «Backbones» auf der Verteilebene	Konzepte für die Energieübertragung
Ein Gleichstromsystem könnte sich aus folgenden vier prinzipiellen Systemeinheiten zusammensetzen: 1. Lokale Ringe, die von Gleichstromgeneratoren gespeist werden und die Gleichstromlasten versorgen. Das Netz selber dient zugleich als Speichermedium (Netz SMES). 2. Grosse dezentrale Drehstrom- oder Gleichstromgeneratoren 3. Vermaschtes Übertragungsnetz, das die lokalen Ringe untereinander verbindet. 4. Grosse Gleichstromlasten in der Industrie	AC versus DC

Tabelle VI Zukünftige F&E-Arbeiten betreffend die Einbindung von HTS in das System «elektrisches Netz».

schlussströme, wobei mit dem Einsatz von Strombegrenzern diese Problematik eliminiert wird.

### Reduktion von Spannungsebenen

Die hohe Stromtragfähigkeit von HTS-Kabel bietet die Möglichkeit, in ausgewählten Fällen die 380-kV-Spannungsebene durch eine 110-kV-Spannungsebene zu ersetzen. Andererseits kann aber auch die 380-kV-Spannungsebene als europäisches Verbundnetz belassen werden und eine direkte Transformation auf leistungsstarke supraleitende «Backbone»-Stränge in den Verteilnetzen (8–24 kV) erfolgen. Damit könnten die 220-kV-, die 110-kV- und die 65-kV-Netzebenen eliminiert werden.

### Plattform für F&E-Arbeiten – Ausblick

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Fallstudien resultieren Stossrichtungen für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten insbesondere in den Bereichen Komponentenentwicklung und Systemanalysen. Zudem sind für die Abschätzung der Wirtschaftlich-

keit eine Anzahl von Marktanalysen durchzuführen. In der Tabelle VI werden einige Beispiele von anstehenden Systemanalysen aufgelistet. Die vollständige Auflistung des detektierten Potentials für F&E-Arbeiten ist in [2] ausführlich beschrieben.

### Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Ing. H. Lennertz: Aspekte des Einsatzes der Supraleitung in der elektrischen Energieversorgung, Hannover, VDI-Berichte Nr. 733, 1989.  
 [2] Application of high temperature superconductivity in power systems. Final report, 10th of April 2000, Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm «Elektrizität», 2000.

## Supraconductivité à haute température et réseau

L'étude système «Supraconductivité à haute température (HTSC) et réseau» montre, compte tenu des connaissances actuelles dans le domaine, quelles contributions, autant du point de vue technique qu'économique, peut apporter l'utilisation des matériaux et composants HTS dans un système tel que le réseau électrique.

Au vu des coûts d'investissement et d'entretien, l'utilisation des composants HTSC n'est pas justifiée par la seule diminution des pertes. Cependant il est clair qu'il existe des besoins dans les réseaux où l'utilisation des composants HTSC est prévisible.

L'intégration des limiteurs de courant et des transformateurs en est un bon exemple. Il y a combinaison des avantages d'avoir à la fois des pertes réduites et aussi un comportement en limiteur de courant. L'impédance du transformateur peut ainsi être réduite et par conséquent sa capacité augmentée, d'où une meilleure stabilité en tension du côté secondaire. Cette synergie conduit à une réduction des coûts d'investissement, une augmentation des capacités d'utilisation des réseaux de transport et de distribution ainsi qu'une augmentation de leur efficacité énergétique.

Les thèmes suivants ont été traités dans les études de cas: augmentation de la capacité de transport des réseaux, augmentation du maillage des réseaux, augmentation de la qualité et disponibilité du réseau, redimensionnement de certains éléments du réseau, réduction des pertes, contrôle de flux dans les réseaux maillés, contrôle de réseaux étoilés, réduction des impacts environnementaux, augmentation de la stabilité dynamique, interconnexion d'installations de production, développement de nouveaux concepts de disjoncteurs et transport d'énergie en courant continu.

Les études de cas concernant le limiteur de courant montrent qu'il a technique-ment tout son sens quels que soient la puissance nominale ou le niveau de tension. Les prix de tels appareils sont actuellement difficiles à formuler, ils devraient se situer dans une fourchette de 1 à 15 CHF/kVA. Un coût dans la partie inférieure de cet intervalle permettrait une utilisation économiquement intéressante dans les réseaux de distribution ou les réseaux d'entreprises.

Les avantages du transformateur supraconducteur sont des pertes faibles, un volume et un poids réduits et une meilleure compatibilité environnementale. Avec l'inclusion de la fonction de limitation l'aspect économique sera d'autant plus intéressant.

En raison de pertes plus faibles, les câbles supraconducteurs peuvent véhiculer plus de puissance dans un conduit existant de section donnée. En raison des courants très élevés, ces câbles devraient être construits différemment des câbles conventionnels en cuivre. Outre un montage coaxial, un montage concentrique des trois phases est faisable. Pour les deux variantes les champs externes pourraient être maintenus à un niveau très faible, ce qui pourrait être nécessaire au vu des courants très importants. Avec ces arrangements, il serait possible de donner à un câble de 110 kV aux mêmes dimensions la capacité de transport de celui d'un câble de 380 kV.

L'enjeu du câble est particulièrement intéressant pour un système à courant continu, grâce à des courants très élevés il serait possible d'éliminer un niveau de tension du réseau.

### Impressum

Die Systemstudie ist in Zusammenarbeit von drei Instituten der Schweizerischen Technischen Hochschulen, der Industrie als Entwickler und Hersteller von HTS-Komponenten sowie Vertretern von Elektrizitätswerken erarbeitet worden. Es sind diese:

- ABB Sécheron, Genf
- ABB Forschungszentrum, Baden-Dättwil
- Chaire des Circuits et Systèmes, EPF Lausanne
- Fachgruppe Hochspannungstechnologie, ETH Zürich
- Laboratoire de réseaux d'énergie électrique, EPF Lausanne
- Elektrizitätsunternehmen und Ingenieurbüros

Die Systemstudie «Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Netzen» ist durch den Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL), das Bundesamt für Energie (BFE) – Forschungsprogramm «Elektrizität», der Commission recherche, développement, prospective de la Chambre romande d'énergie électrique (RDP-CREE), der ABB Schweiz und der beiden Technischen Hochschulen ETHZ und EPFL finanziert worden.





## HAND IN HAND AN DIE SPITZE

ALSTOM IST EIN WELTWEIT FÜHRENDES UNTERNEHMEN IN

DEN BEREICHEN ENERGIETECHNIK UND

SCHIENENVERKEHR. DABEI BIETEN WIR FÜR ALLE

EINSÄTZE DIE RICHTIGE LÖSUNG AUS EINER

HAND.

DANK STETIGER INVESTITIONEN UND

KONTINUIERLICHER FORSCHUNGS- UND

ENTWICKLUNGSPROGRAMME

GARANTIEREN UNSERE TECHNOLOGIEN

PRODUKTE, AUF DIE SIE SICH VERLASSEN

KÖNNEN. ERFAHRENE PROJEKTLEITER

ÜBERNEHMEN DIE REALISIERUNG IHRER

AUFTRÄGE.

# ALSTOM

ALSTOM AG  
Carl-Sprecher-Strasse 1, CH-5036 Oberentfelden, Schweiz  
Tel. 062 737 37 37, Fax 062 737 33 44