

Was kann die Supraleitung im Energiebereich leisten ?

von Klaus-Peter Juengst
e-mail Klaus-Peter.Juengst@energie-fakten.de

Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Wird elektrischer Strom in Leitungen aus Kupfer oder anderen leitfähigen Materialien transportiert, wie es vom Kraftwerk zum Verbraucher üblich ist, so wird ein Teil der elektrischen Energie wegen des elektrischen Widerstands der Materialien in Wärme umgewandelt und geht der Nutzung verloren. Diese Nebenwirkung ist nur bei elektrischen Heizungen erwünscht, während sie bei den übrigen Stromnutzungen einen Nachteil mit erheblichen Kosten darstellt.

Jedoch 1911 entdeckte man, dass ganz bestimmte Materialien ihren elektrischen Widerstand verlieren, wenn man sie nur tief genug abkühlt. Diese Entdeckungen führten zu der Erwartung, diese so genannten Supraleiter großtechnisch einsetzen zu können. Erste technische relevante Supraleiter, wie z.B. Legierungen aus Niob und Titan, gibt es seit der Mitte der sechziger Jahre. Für ihre Abkühlung auf eine Betriebstemperatur von minus 269 °C ist eine komplexe Kühl- und Isoliertechnik erforderlich, die jedoch inzwischen

gut entwickelt ist und vor allem bei Anwendungen im Bereich der Forschung keine Schwierigkeiten verursacht. Am besten bekannt ist der Einsatz dieser Supraleiter für die weit verbreiteten Kernspintomographen in Krankenhäusern und großen Praxen.

Diese so genannten Tieftemperatur-Supraleiter werden in der Energietechnik für die supraleitenden Magneten der Kernfusions-Reaktoren eingesetzt, die sich in der Entwicklung befinden und vielfach als langfristige Lösung der Energieversorgung angesehen werden. Die Supraleitung ist hier aus Gründen der erforderlichen positiven Energiebilanz unverzichtbar. Generatoren und Transformatoren wurden wegen der möglichen Einsparungen an Gewicht und Baugröße von rund 50 % sowie einer Verbesserung des Wirkungsgrads ebenfalls mit Tieftemperatur-Supraleitern entwickelt, konnten sich jedoch aus Gründen höherer Kosten und der komplexen Helium-Kühltechnik nicht durchsetzen.

Die Entdeckungen seit dem Jahre 1986, dass es keramikartige Materialien, wie z. B. BSCCO (Wismuth-Strontium-Calcium-Kupferoxid), gibt, die bereits bei Temperaturen etwas oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs, d.h. bei minus 196 °C supraleitend betrieben werden können, hat den Arbeiten weltweit einen neuen Schub gegeben. Der flüssige Stickstoff ist etwa 10-20 mal billiger als flüssiges Helium, erfordert daher weniger Aufwand bei den Isoliergefäßen und ist weltweit verfügbar. Diese so genannten „Hochtemperatur“-Supraleiter werden derzeit vor allem für Anwendungen in Hochleistungsmotoren und -Generatoren, für Leistungskabel und für Kurzschlussstrombegrenzer entwickelt. Die Motoren und generatoren sind platzsparend und leicht. Für die Kabel spricht die höhere Leistungsdichte, so dass mehr Leistung über vorhandene Trassen geleitet werden kann. Der Strombegrenzer eröffnet den Energieversorgern bisher nicht gekannte Flexibilität im Zusammen-

schalten von Teilnetzen, ohne dass die vorhandenen Anlagen ersetzt werden müssten.

Für einen großtechnischen Einsatz dieser Supraleiter sind jedoch noch wesentliche Verbesserungen der Eigenschaften und vor allem eine Verringerung der Kosten notwendig, die Ziele der aktuellen Entwicklungsarbeiten sind.

Was kann die Supraleitung im Energiebereich leisten ?

von Klaus-Peter Juengst
e-mail Klaus-Peter.Juengst@Energie-Fakten.de

Hier die Fakten - Langfassung

Wird elektrischer Strom in Leitungen aus Kupfer oder anderen leitfähigen Materialien transportiert, wie es vom Kraftwerk zum Verbraucher üblich ist, so wird ein Teil der elektrischen Energie wegen des elektrischen Widerstands der Materialien in Wärme umgewandelt und geht der Nutzung verloren. Diese Nebenwirkung ist zwar bei elektrischen Heizungen erwünscht; bei den übrigen Stromnutzungen stellt sie einen Nachteil mit erheblichen Kosten dar.

Die Entdeckungen seit dem Jahre 1911, dass ganz bestimmte Materialien ihren elektrischen Widerstand verlieren, wenn man sie nur tief genug abkühlt, führten zu der Erwartung, diese sogenannten Supraleiter im großen Stil einsetzen zu können. Technisch relevante Supraleiter, wie z.B. Legierungen aus Niob und Titan gibt es seit der Mitte der sechziger Jahre. Sie werden mit flüssigem Helium auf etwa minus 269 °C abgekühlt und können daher nur in wärmeisolierten Behältern (Kryostate) betrieben werden.

Anwendungen der Tieftemperatur-Supraleiter

Dieser Typ von Supraleiter (Tieftemperatur-Supraleiter) wird heute in großem Maßstab vor allem im Bereich der Forschung (Elementarteilchen-Beschleuniger) und der Medizin (Kernspintomographen und Zyklotrons zur Protonentherapie) eingesetzt. Weitere Anwendungen sind Magnetscheider für die magnetische Aufbereitung von Mineralien sowie Magnete für Kristallzuchtanlagen. Hohes Interesse in Strukturbiologie, makromolekularer Chemie und Pharmaforschung haben Hochfeldsysteme mit einem Magnetfeld von mehr als 20 T (das 400 000fache des Erdmagnetfeldes) z.B. für NMR-Spektrometer, für die hochauflösende Untersuchung der Struktur von Makromolekülen wie Proteinen, gefunden.

Im Bereich der Energietechnik sind diese Supraleiter für die Magnete der Kernfusionsreaktoren mit magnetischem Plasma-Einschlusskonzept unverzichtbar, um eine positive Energiebilanz erzielen zu können. Kernfusions-

reaktoren könnten langfristig das Problem der Rohstoff-Vorräte für die Energieversorgung lösen. Dabei konkurrieren zwei verschiedene Konzepte, der Tokamak und der Stellarator, von denen sich vor allem die Tokamak-Entwicklung bereits auf dem Weg zum Reaktor befindet. Noch 2004 sollen die Entscheidungen zum Bau des ITER (lateinisch: „der Weg“) fallen, bei dem in 750 m³ Plasma die letzten Experimente und Erprobungen vor dem Bau des ersten Leistungsreaktors durchgeführt werden sollen. Supraleitende Stellaratoren gibt es in Japan (LHD = Large Helical Device) und im Aufbau in Greifswald an der Ostsee (W7-X).

Auch für den Einsatz der Tieftemperatur-Supraleitung für die verschiedenen Betriebsmittel der heutigen elektrischen Energieversorgung wurden in der Vergangenheit weltweit große Anstrengungen unternommen. So wurden beispielsweise in Japan Generatoren mit Leistungen von 70 MW entwickelt. Auch bei Leistungskabeln, Transformatoren, Magnetischen Energiespeichern

LANGFASSUNG

und Kurzschlussstrombegrenzern hat es fortgeschrittene Demonstrations-Anlagen gegeben. Vor allem wegen der für die Energieversorgung notwendigen hohen Zuverlässigkeit und der Komplexität von Flüssig-Helium-gekühlten Anlagen einerseits und z. T. zu hohen Kosten andererseits konnten sich diese Anwendungen der traditionellen Supraleiter bisher jedoch nicht großtechnisch durchsetzen.

Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleiter

Die Entdeckungen in den Jahren seit 1986, dass es keramikartige Materialien wie z.B. BSCCO (Wismuth-Strontium-Calcium-Kupferoxid), gibt, die bereits bei Temperaturen deutlich oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs (minus 196 °C) supraleitend sind, hat den Arbeiten weltweit einen neuen Schub gegeben. Der flüssige Stickstoff ist etwa 10-20mal billiger als flüssiges Helium, benötigt weniger Aufwand bei den Isoliergefäßen, verringert die Komplexität der Kühlanlagen und ist weltweit verfügbar. Diese Materialien werden „Hochtemperatur“-Supraleiter (HTS) genannt und eröffnen günstige Perspektiven für die weitere Verbreitung des Einsatzes von Supraleitung für die Energieversorgung. Optimistische Abschätzungen der möglichen Energieeinsparung bis zum Jahr 2025 sagen einen volkswirtschaftlichen Nutzen von mehreren Milliarden EURO voraus. Wenn die Energieeinsparung erreicht wird, führt sie auch zu einer Reduktion der Emission von Treibhausgasen um bis zu 16

Millionen Tonnen Kohlenstoffoxiden sowie erheblichen Mengen an Schwefel- und Stick-Oxiden. Die größten finanziellen Anstrengungen zur Entwicklung dieser Technologie werden von den USA und Japan sowie zunehmend von China und Korea geleistet.

Der Einsatz von HTS für den Rotor in supraleitenden elektrischen Maschinen (Motoren, Generatoren) führt zu einer Volumen- und Gewichtsersparnis von bis zu 65 % und zu einem Wirkungsgrad von bis zu 99,5 %. Das günstigere Betriebsverhalten der Maschinen ermöglicht neuen Kundennutzen bei der Optimierung von Inselnetzen, bei schnelllaufenden Motoren in der Prozesstechnik, beim direkten Antrieb von schnelllaufenden Generatoren an Gasturbinen ohne Getriebe und auch für Windkraftgeneratoren und für den Schiffsantrieb. Erste Motoren im Megawatt-Bereich wurden bereits entwickelt. In den USA wurde ein Programm für die Entwicklung eines 100 MVA (Megavoltampere) Generators gestartet. Spezielle hochdynamische Motoren mit Massiv-Supraleitern für Leistungen unter 500 kW, insbesondere für mobile Systeme gedacht, sind ebenfalls in der Entwicklung.

Für schnell drehende Maschinen werden supraleitende Lager entwickelt, die berührungslos arbeiten, die Lagerverluste minimieren, Geräuschentwicklung vermeiden und keine Schmiermittel benötigen. Die HTS hierfür sind Massivmaterialien. Durch Verringerung der Lagerverluste könnten weltweit langfristig

womöglich 1,5 % der sonst notwendigen Energieerzeugung vermieden werden.

Supraleitende Transformatoren lassen sich wie die Motoren und Generatoren kompakter und leichter bauen und haben im Vergleich zu den konventionellen Transformatoren im Hinblick auf die Umwelt den Vorteil, kein Öl für die Isolierung zu benötigen. Bei den speziellen Transformatoren für den mobilen Einsatz bei der Bahn ist außerdem eine erhebliche Wirkungsgradsteigerung von 92 auf 99 % möglich. Demonstrationsanlagen reichen bis in den MW (Megawatt)-Bereich hinein.

Supraleitende Leistungskabel (d. h. Kabel zur Übertragung und Verteilung von elektrischer Leistung) werden für die Wechselstrom-Netzversorgung entwickelt. Sie sind umso effektiver, je höher die erforderliche Übertragungsleistung ist. Beispielsweise kann bei einem 5 km langen Kabel für 150 MVA mehr als die Hälfte der Verluste eingespart werden. Die möglichen hohen Übertragungsleistungen sind besonders attraktiv, wenn in Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte (wie in den Weltmetropolen) störende Freileitungen ersetzt werden sollen, neue Freileitungen nicht genehmigt werden oder zu schwache Kabel in den vorhandenen Kabelkanälen gegen leistungsfähigere ausgetauscht werden müssen. Demonstrationsanlagen gibt es bereits in Längen bis etwa 500 m mit 100 MVA. Da Supraleiter nur Gleichstrom verlustfrei übertragen können, erscheint eine Anwendung für Gleichstromüber-

LANGFASSUNG

tragungs-Systeme gut geeignet, wenn z. B. große Übertragungsentfernungen überwunden werden sollen, Freileitungen nicht akzeptiert werden oder regenerative Energie von weit entfernten Erzeugerstandorten zu den Verbraucherzentren transportiert werden soll.

Ein völlig neues Betriebsmittel in der elektrischen Energieversorgung ist der supraleitende Strombegrenzer. Hier wird die besondere Eigenschaft von Supraleitern ausgenutzt, dass sie Ströme nur bis zu einem Maximalwert tragen können und darüber hinaus in den normalleitenden, Zustand, d. h. Zustand mit Widerstand, übergehen. Während im Normalbetrieb der Supraleiter den Nennstrom mit geringen Verlusten tragen kann, wird im Falle eines Kurzschlusses mit schnell ansteigendem Strom in kürzester Zeit der maximal vom Supraleiter tragbare kritische Strom überschritten und damit ein hoher Widerstand ins Netz eingebracht. Ein solches Betriebsmittel kann selbsttätig den im Kurzschlussfall im Netz entstehenden hohen Strom (10 bis 30mal so hoch wie der Nennstrom) auf das 2- bis 5fache des Nennstroms begrenzen. Damit werden alle anderen Netzelemente geschont, bzw. es wird eine unzulässige Überlastung vermieden. Bei lokal steigendem Leistungsbedarf und dem dann u. U. erforderlichen

Zusammenschalten von Teilnetzen bzw. Schließen offener Netzknotenpunkte können auf diese Weise höhere Investitionen für neue Betriebsmittel vermieden und ein Netzausbau hinausgeschoben oder ganz vermieden werden. Die Folgen der Deregulierung in der Stromversorgung und die dezentrale Energie-Einspeisung können zu Kurzschlussproblemen führen, die mit dem supraleitenden Strombegrenzer beherrschbar erscheinen. Im Frühjahr 2004 wurde erstmals ein dreiphasiger resistiver 10 MVA-Strombegrenzer im Netz des Stromversorgers RWE erfolgreich erprobt.

Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) im Energie-/Leistungsbereich bis 10 MWs (Megawattsekunden) /10 MW haben mit Tieftemperatur-Supraleitern inzwischen ein kleineres Marktsegment für Hochleistungs-USVs (unterbrechungsfreie Stromversorgung) und für Anlagen zur Stabilisierung von Teilnetzen erobert. Mit SMES-Kompensatoren wurden auch erfolgreich starke Leistungsschwankungen von industriellen Lasten so kompensiert, dass Störungen im Netz kaum nachweisbar waren. Weiter wird ein SMES-Einsatz zur Glättung von Leistungskurven regenerativer Energieerzeugung durch Sonne und Wind diskutiert. Es gibt zwar erste Ansätze zur Verwendung von HTS und

heliumfreier Kühlung von SMES, aber sie sind bei dieser speziellen Anwendung kostenmäßig noch nicht konkurrenzfähig. Hier dominiert die Eigenschaft heute technisch verfügbarer HTS-Drähte, dass hohe Magnetfelder bei den gewünschten Betriebstemperaturen von minus 196 °C noch nicht getragen werden können.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Supraleitung in den Bereichen Forschung und Medizin unentbehrlich ist. Auch die Kernfusion mit magnetischem Einschlusskonzept kann nicht auf die Supraleitung verzichten. Wegen ihrer technischen Ausgereiftheit und günstigen Kosten kommen vielfach nur Tieftemperatur-Supraleiter in Frage. Für einen großtechnischen Einsatz der Hochtemperatur-Supraleiter sind noch Verbesserungen der Eigenschaften (Herstellbarkeit, mechanische Verformbarkeit, Magnetfeldempfindlichkeit, Wechselstromverluste) und aber vor allem eine Verringerung der Kosten notwendig. Dies sind die Ziele der aktuellen Entwicklungsarbeiten. Die Perspektiven sind gut, dass supraleitende Betriebsmittel wie Strombegrenzer in der elektrischen Energieversorgung in absehbarer Zukunft Einzug finden.