



Supraleiter für das Mittelspannungsnetz

Ein supraleitendes Stromkabel quer durch die
Essener Innenstadt besteht zweijährigen Feldtest



Wissenschaftler testen in Essen das längste Hochtemperatur-Supraleiterkabel der Welt unter realen Bedingungen. Mit einer Länge von einem Kilometer verbindet es zwei Umspannstationen quer durch die Innenstadt. Es ersetzt eine konventionelle 110-kV-Leitung und macht eine Umspannanlage im Stadtzentrum überflüssig. In einer zweijährigen Erprobung hat es den Praxistest bestanden. Es könnte eine Blaupause für die künftige Stromversorgung in Ballungsräumen sein.

Der Strombedarf in den Ballungsgebieten wächst. Gleichzeitig wandelt sich die Struktur der Stromerzeugung in Deutschland, weg von großen Kraftwerken, hin zu einer Vielzahl dezentraler Erzeuger. Diesen Entwicklungen muss sich das Stromnetz anpassen, das ursprünglich als Einbahnstraße konzipiert wurde: Über Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze gelangt der Strom von den Kraftwerken zu den Verbrauchern. Erneuerbare Energiequellen speisen jedoch bereits seit einiger Zeit insbesondere ins Mittelspannungsnetz ein. Deshalb sind sich viele Forscher einig, dass die Energiewende in der Mittelspannung stattfindet.

Diese neuen Herausforderungen werden speziell im Ruhrgebiet überlagert von einem Strukturwandel mit einem starken Rückgang der Schwerindustrie. Die veränderten Anforderungen an Leistung und räumliche Aufteilung der Netze bieten hier besondere Chancen, neue Netzstrukturen und Technologien auszuprobieren. Im Pilotprojekt AmpaCity untersuchen Wissenschaftler der innogy SE mit ihren Projektpartnern, wie mithilfe von Hochtemperatursupraleiter-Kabeln (HTS) Umspannanlagen und Hochspannungsleitungen aus den Innenstädten verbannt werden können. Als weitere neue Komponente im Mittelspannungsnetz setzen sie einen supraleitenden Strombegrenzer ein, der das HTS-Kabel bei Kurzschlüssen schützt.

Dieses Forschungsprojekt
wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft
und Energie (BMWi)

Die Erprobung hilft, die Einsatzpotenziale solcher supraleitenden Komponenten abzuschätzen und die betriebswirtschaftlichen Aspekte besser zu bewerten.

In über zweieinhalb Jahren Praxisbetrieb hat das Supraleitersystem in der Essener City gezeigt, dass die Technik an der Schwelle zur Marktreife steht: Das Supraleiterkabel und der als Kurzschlusschutz installierte, ebenfalls supraleitende Strombegrenzer arbeiten zuverlässig. Die Technologie kann zum Beispiel in Innenstädten statt teurer Hochspannungskomponenten verwendet werden und dadurch die Verteilnetze leistungsfähiger und wirtschaftlicher machen.

Strom statt Spannung

Bei der klassischen Stromversorgung transportieren Kabel mit Kupfer- oder Aluminiumleitern den Strom bis in die Stadtzentren mit hohen Spannungen, um Übertragungsverluste gering zu halten. Erst dort reduzieren große Umspannanlagen die Spannung auf 10.000 Volt und speisen den Strom in das Verteilnetz ein. Kleinere Stationen transformieren dann die Spannung für die Versorgung der Kunden auf 400 Volt.

Mit kompakten supraleitenden Kabeln lässt sich diese Struktur vereinfachen: Dies belegt die Machbarkeitsstudie unter Federführung des Karlsruher Instituts für Technologie, die dem Pilotprojekt vorausging. Hochspannungstrecken und Umspannanlagen könnten mit den neuen Kabeln im innerstädtischen Bereich schrittweise abgebaut werden, denn die HTS-Kabel leiten bei 10.000 Volt große Strommengen über längere Strecken fast verlustfrei. Die Übertragung hoher Leistungen auf der Mittelspannungsebene wäre theoretisch auch mit Kupferkabeln möglich, jedoch wären die Energieverluste und der Trassenbedarf sehr viel höher. In Essen müssten beispielsweise statt des einen HTS-Kabels fünf Kupferkabel parallel in den Untergrund verlegt werden.

Die einzig sinnvolle Möglichkeit, innerstädtische Hochspannungskabel zu vermeiden und die ressourcen- sowie flächenintensiven Umspannstationen zurückzubauen, sind Supraleiterkabel, lautet das Fazit von Voruntersuchungen. Bezogen auf eine 40-jährige Nutzungsdauer dürfte auch die betriebswirtschaftliche Bilanz gegenüber konventionellen Hochspannungskabeln positiv ausfallen – trotz des Aufwands für die Kühlung. Zudem hat die Supraleitertechnologie das Potenzial, die Gesamtkosten, die durch künftigen Netzausbau entstehen, erheblich zu senken.

Eiskalt und schlank im Untergrund

Das Kabel, das die beiden Umspannstationen verbindet, ist konzentrisch aufgebaut und nur 15 cm stark. Ein flexibles Edelstahl-Wellrohr bildet die Mittelachse als Vorlaufleitung für den flüssigen Stickstoff, der das Kabel kühlt. Es wird umhüllt von den Supraleitern für die drei Stromphasen, die jeweils durch Isolationschichten getrennt sind. Nach einer weiteren Isolierung folgt eine Kupferschirmung als Neutraleiter. Der gesamte Aufbau wird von dem zurückströmenden Stickstoff vor Wärmeeintrag geschützt. Als äußere „Thermoskanne“ für das Supraleiterkabel dient ein doppelwandiges evakuiertes Edelstahl-Wellrohr, der sogenannte Kryostat. Im Zwischenraum reduziert eine mit Aluminium bedampfte Folie als zusätzliche Superisolation die Wärmeeinstrahlung. Das gesamte Kabel wird von einer Polyethylen-Ummantelung geschützt.



Abb. 1 Aufbau des Supraleiterkabels. Im Zentrum befindet sich der Vorlauf für den flüssigen Stickstoff. Die supraleitenden Bänder für die drei Phasen werden vom Neutraleiter aus Kupfer umhüllt. Von außen kühlt der Stickstoff-Rücklauf.



Abb. 2 Verlegung des Supraleiterkabels in der Essener Innenstadt

Obwohl das Supraleiterkabel bei gleichem Durchmesser etwa fünfmal mehr Strom als ein konventionelles 10.000-Volt-Kabel überträgt, verursacht es praktisch keine elektrischen Übertragungsverluste. Damit ist auch Bodenaustrocknung durch die Kabelverlustwärme ausgeschlossen. Da das HTS-Kabel keine magnetischen Felder verursacht, kann es problemlos in bereits bestehenden Kabelschächten verlegt und in direkter Nähe zu empfindlichen Datenkabeln betrieben werden.

In der Technikzentrale

Die Technikzentrale befindet sich in der Umspannanlage Herkules. Hier versorgt ein Kryotank das Kabel mit flüssigem Stickstoff. Ein U-Bogen am Leitungsende kompensiert die Längenänderung des Supraleiterkabels beim Herunterkühlen. Auch der Kurzschlussstrombegrenzer ist dort installiert. Er verhindert, dass sich das Kabel durch einen Kurzschluss erwärmt. Andernfalls würde es mehrere Stunden dauern, das Kabel so weit zu kühlen, dass es wieder einsatzfähig ist.

Auch der Strombegrenzer nutzt Supraleiter

Die supraleitenden Strombegrenzer-Module für die drei Phasen des Stromnetzes sind in Reihe mit dem Supraleiterkabel geschaltet. Ihre Wechselstrom-Widerstände sind im supraleitenden Normalbetrieb extrem gering, sodass sie den Stromfluss nicht beeinflussen. Überschreitet die Stromdichte jedoch einen materialabhängigen Schwellenwert, kommt es zum

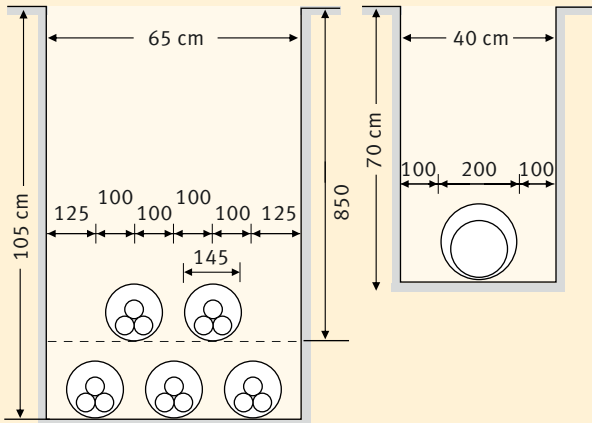


Abb. 3 Ein Supraleiterkabel benötigt im Vergleich zu herkömmlichen Kabeln gleicher Übertragungskapazität sehr viel weniger Platz.



Abb. 4 Die Strombegrenzer der drei Phasen befinden sich in separaten Kryobehältern.

Quench. Die Supraleitung bricht zusammen und es baut sich innerhalb von Millisekunden, ein elektrischer Widerstand auf. Der Kurzschlussstrom wird so automatisch begrenzt. Der Strombegrenzer arbeitet völlig selbstständig und ist eigensicher. Während bei dem Supraleiterkabel Bänder mit Material der ersten Generation (BISCCO) verwendet werden, arbeitet der Kurzschlussstrombegrenzer mit Hochtemperatursupraleitern der zweiten Generation. Sie bestehen aus einer wenige Mikrometer dünnen Schicht supraleitenden Materials (Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid, YBCO genannt), die auf Metallbänder aufgebracht ist. Die geringe Wärmekapazität der dünnen Bänder ermöglicht eine schnelle Rückkühlung. Deshalb geht der Strombegrenzer bereits nach kurzer Abkühlphase ohne weitere Wartung automatisch wieder in Betrieb. Kabel und Strombegrenzer sind für einen Betriebsstrom von 2.310 Ampere, eine Nennspannung von 10 kV und eine Nennleistung von 40 MW ausgelegt. Sie ersetzen damit ein 110-kV-Kabelsystem gleicher Kapazität.

Stickstoff unterkühlt

Die Kabelspezifikationen erfordern am Kabeleintritt eine Vorlauftemperatur des Stickstoffs von minus 206 °C. Das Flüssiggas erwärmt sich dann bis zum Kabelaustritt auf minus 201 °C. Ein Unterkühler kühlt es über einen Wärmetauscher auf die erforderliche Eintrittstemperatur zurück. Der vom Kältespezialist Messer gelieferte Unterkühler besteht aus einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Kryostat. Vakuumpumpen erzeugen da-

rin einen Unterdruck, wodurch die Verdampfungsrate steigt. Die Verdampfungskälte kühlt den Stickstoff auf minus 209 °C ab.

Erfahrungen aus dem Testbetrieb

Das Supraleitersystem wurde nach ausführlichen Tests und Messungen Ende April 2014 offiziell in Betrieb genommen.

In den ersten Betriebswochen mussten die Techniker einige Herausforderungen meistern. Eine davon war die Spannungssymmetrie, denn das Supraleiterkabel ist – im Gegensatz zu klassischen Kupferkabeln – konzentrisch aufgebaut. Aufgrund des isoliert betriebenen 10-kV-Netzes waren im Leerlauf des Kabels die Spannungen der drei Leiter zunächst unterschiedlich hoch, sodass das Kabel durch Schutzeinrichtungen vom Netz getrennt wurde. Durch die Installation von Kondensatoren ließ sich die erforderliche Spannungssymmetrie herstellen und das Kabel ins Netz integrieren.

Ein Unwetter führte am Pfingstmontag des Jahres 2014 in der Umspannanlage Herkules zu einer Kurzunterbrechung und in Folge zu einer automatischen Abschaltung der Umwälzpumpen im Kühlkreislauf. Um solche Abschaltungen in Zukunft möglichst zu vermeiden, wurde die Empfindlichkeit des Kontrollsystems herabgesetzt.

Kurz- und Erdschlussversuche

Da seit Inbetriebnahme des supraleitenden Systems bis zum Juni 2015 kein Kurzschlussereignis in diesem Netzgebiet im laufenden Betrieb aufgetreten war, hat der zuständige Netzbetreiber Westnetz im Sommer Kurzschlussversuche unter realen Bedingungen durchgeführt. Hierfür wurde das Kabel vom Netz isoliert und ohne Last betrieben. In vier Versuchen mit ein-, zwei- und dreipoligen Kurzschlüssen hat das HTS-System bewiesen, dass es praxisrelevante Kurzschlüsse schadlos beherrscht. „Das HTS-System beherrscht nicht nur sicher den ungestörten Dauerbetrieb, sondern auch relevante Betriebsituationen im gestörten Betrieb im praktischen Netzeinsatz“, zeigte sich Projektleiter Dr. Frank Merschel erfreut. Durch seine Schutzfunktion begrenzt der supraleitende Strombegrenzer die Dauer des Kurzschlusses auf maximal 150 ms. Alle geprüften Kurzschlusszenarien konnten von dem System sicher beherrscht werden. Die Schutzsysteme zeigten eine einwandfreie Reaktion und Funktion, sodass keine Schäden am HTS-System oder an weiteren Primär- bzw. Sekundärkomponenten auftraten.

Ausblick

Mittlerweile ist das Supraleiterkabel seit 34 Monaten ohne größere Probleme im Betrieb und hat bereits mehr als 200 Millionen Kilowattstunden übertragen. Das Projekt erhielt den IKU Innovationspreis 2015 für Klima und Umwelt in der Kategorie umweltfreundliche Technologien. Nicht zuletzt durch die positiven Erfahrungen in Essen stoßen supraleitende Lösungen zunehmend auf internationales Interesse, vor allem bei den Betreibern von Verteilnetzen, aber auch bei Industrienetzbetreibern.

Nach Ablauf der offiziellen zweijährigen Versuchsdauer soll das System weiter für die Fortentwicklung der Technik genutzt werden. So sind beispielsweise Optimierungen von Komponenten sowie Messungen am System vorgesehen.



Supraleiter für Netze und Industrie

Die Stromversorgung in Deutschland wandelt sich. Etliche Großkraftwerke werden durch einen Verbund vergleichsweise kleiner Erzeugungsanlagen ersetzt. Neue Hochspannungsleitungen übertragen Windstrom im großen Maßstab aus dem Norden nach Süden. Verschiedene Energiespeicher glätten das volatile Stromangebot aus erneuerbaren Energiequellen. Das Mittelspannungsnetz für den regionalen Ausgleich von Angebot und Nachfrage wird enger geknüpft. Mit den neuen Strukturen können höhere Kurzschlussleistungen in den Stromnetzen auftreten. Seit moderne Hochtemperatur-Supraleiter eine einfache und kostengünstige Kühlung erlauben, erweitern supraleitende Betriebsmittel den Baukasten für das neue Netz erheblich. Sie können den Neubau von Leitungen und Anlagen billiger oder sogar überflüssig machen. Supraleitende Kabel könnten das Mittelspannungsnetz in Ballungsräumen massiv verstärken.

Weil moderne Hochtemperatur-Supraleiter eine einfache und kostengünstige Kühlung erlauben, finden sie in der Industrie immer mehr Anwendungsgebiete. So wurde bereits vor zehn Jahren ein Induktionsheizer mit supraleitenden Komponenten in der Metallindustrie erprobt. Für die Elektrolyse von Chlor, Zink, Aluminium oder Wasserstoff entwickeln Wissenschaftler supraleitende Stromschienen. Diese können massive Hochstromschienen aus Aluminium oder Kupfer ersetzen. Dadurch entfallen die Wärmeemissionen, die starken externen Magnetfelder und die hohen Arbeitsschutzanforderungen konventioneller Hochstromschienen. Supraleitende Magnetlager laufen berührungslos mit präziser Führung und können für extreme Lasten und Drehzahlen ausgelegt werden. Mit diesen Eigenschaften eignen sie sich beispielsweise für den Bau hocheffizienter Schwungmassespeicher für stabilere Stromnetze. Motoren können mit Supraleitern kleiner, leichter und effizienter gebaut werden als konventionelle Elektromotoren. Sie erreichen als Industrieantrieb vielfach höhere Beschleunigungswerte und erlauben extrem schnelle Drehzahländerungen und höchste Drehmomente. Im Schiffsbau, bei dem Platz knapp und teuer ist, werden durch die kompakte Bauweise effizientere Raumnutzungskonzepte möglich.

Projektbeteiligte

- » **Projektleitung:** RWE Deutschland AG (heute: innogy SE), Essen, Dr. Frank Merschel, frank.merschel@innogy.com
- » **HTR-Kabel und Strombegrenzer:** Nexans Deutschland GmbH, Hannover
- » **Wissenschaftliche Begleitung:** Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Technische Physik, Eggenstein-Leopoldshafen

Links und Literatur

- » www.innogy.com
- » www.itp.kit.edu
- » www.nexans.de
- » Merschel, F.: Verbundvorhaben: Ampacity – 10 kV-Supraleiter für Hochenergietrassen. Teilvorhaben: Implementierung und technische Evaluation des Kabelsystems. Schlussbericht Teil I + II. FKZ 03ET1055A. RWE Deutschland AG (RWE), Essen (Hrsg.). Febr. 2016

Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Supraleitende Strombegrenzer im Kraftwerk. BINE-Projektinfo 12/2011
- » Hochtemperatur-Supraleiter. BINE-Projektinfo 06/2010
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter www.bine.info/Projektinfo_18_2016

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter www.bine.info/abo

Impressum

Projektorganisation
Bundesministerium
für Wirtschaft und Energie (BMWi)
11019 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Claus Börner
52425 Jülich

Förderkennzeichen
03ET1055A-D

ISSN
0937-8367

Herausgeber
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut
für Informationsinfrastruktur GmbH
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Autor
Dr. Franz Meyer

Urheberrecht
Titelbild und alle Abbildungen:
innogy SE

Eine Verwendung von Text und
Abbildungen aus dieser Publikation ist
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion
gestattet. Sprechen Sie uns an.

Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?
Wir helfen Ihnen weiter:

0228 92379-44
kontakt@bine.info

BINE Informationsdienst
Energieforschung für die Praxis
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197
53113 Bonn
www.bine.info

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages