

IASS FACT SHEET 2/2015

Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)

Potsdam, November 2015

Supraleitung für Stromtransport

Alexander Chervyakov, Michele Ferrari, Adela Marian, Stefan Stückrad, Heiko Thomas

Um künftige Anforderungen an Stromnetze zu erfüllen, auch bedingt durch wachsende Anteile erneuerbarer Energien, müssen die derzeitigen Stromnetze modernisiert und erweitert werden, um dadurch ihre Flexibilität zu erhöhen. Das erfordert neue Fernleitungen und lokale Verteilnetze. Da der herkömmlichen Übertragungstechnik Grenzen gesetzt sind, wurden Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Stromtransports mittels supraleitender Materialien vorangetrieben. Obwohl Supraleiter noch in den Kinderschuhen stecken, stellen sie eine vielversprechende Option in puncto Effizienz, Umweltfolgen und Akzeptanz dar.



Quelle: RTE – Frédéric Lesur

Foto eines Supraleiters, bestehend aus 24 MgB₂-Drähten und einem Kupferkern, mit einem Durchmesser von nur 11 mm. Solche Kabel können Ströme von 10 kA und mehr transportieren.

Was ist Supraleitfähigkeit

Supraleitfähigkeit, oder absolut perfekte Leitfähigkeit, kommt bei Materialien vor, die unterhalb einer charakteristischen Temperatur keinen Widerstand zeigen. Im Unterschied zu normalen Stromleitungen heißt dies, dass Strom ohne Widerstandsverlust durch Supraleiter fließt, die Übertragung wird also effizienter. Dieser Effekt wird durch extrem niedrige Temperaturen ausgelöst, die sich, je nach Material, zwischen fast 0 und 130 Grad Kelvin (-273 bis -143 Grad Celsius) bewegen.

Das Phänomen wurde 1911 entdeckt, als sich zeigte, dass Quecksilber bei 4,2 Grad Kelvin supraleitfähig ist. Seither wurden weitere supraleitende Materialien erforscht und zahlreiche technische Anwendungen entwickelt. Heute spielt Supraleitfähigkeit etwa in der medizinischen Bildgebung (MRI), in Generatoren und Teilchenbeschleunigern eine Rolle.

Was sind Supraleiter?

In den letzten 20 Jahren konzentrierte sich die Forschung auf die Anwendung der Supraleitfähigkeit für den Transport großer Strommengen. Die Entwicklung wurde seit 1986 durch die Entdeckung von „Hochtemperatursupraleitern“ vorangetrieben; das sind Materialien mit relativ hohen Übertragungstemperaturen (70 Grad Kelvin und darüber). So wird es einfacher und billiger, in den supraleitenden Zustand zu gelangen, zum Beispiel durch den Einsatz von Flüssigstickstoff als Kühlmittel.

In der Praxis bestehen Supraleiter aus einem supraleitenden Stromkabel, das von einem Kälterregler umhüllt wird, also einer Kühlvorrichtung, und ähnlich wie ein konventionelles Erdkabel unterirdisch verlegt wird. Für Fernleitungen müssten, je nach Konstruktion im Abstand von Dutzenden oder sogar nur hundert Kilometern, Kälterreglerstationen eingerichtet werden. Einen vergleichbaren Abstand haben Verdichterstationen in Erdgasleitungen.

Supraleiter bieten gegenüber traditionellen Stromleitungen einige Vorteile, etwa höhere Effizienz, weil Widerstandsverluste wegfallen. Auch im Hinblick auf Platzbedarf, Umweltfolgen und öffentliche Akzeptanz dürften sie besser abschneiden. Verschiedene Pilotprojekte laufen bereits, viele weitere sind in Planung (siehe letzten Abschnitt).

Die Energiewende und die Rolle des Stromnetzes

In den kommenden Jahrzehnten wird der Einsatz erneuerbarer Energien wie Wind und Sonne erheblich dazu beitragen, uns von fossilen Brennstoffen unabhängig und unser Energiesystem nachhaltiger zu machen. Um das Potenzial der Erneuerbaren zu erschließen, muss jedoch das bestehende Stromnetz modernisiert und erweitert werden. Insbesondere sollte ein Netzaus- bzw. -umbau mit Blick auf die Einspeisung wachsender Anteile naturgemäß schwankender erneuerbarer Energien die Flexibilität des Systems erhöhen. In Europa gilt der Bau neuer, grenzüberschreitender Leitungen als strategisches Ziel, das Marktintegration und Systembalance fördern kann. Überdies sind Orte, an denen Erneuerbare verfügbar sind oder effizient erzeugt werden können, oft weit von dicht bevölkerten oder industrialisierten Gebieten entfernt, die Energie benötigen. Der Bedarf für neue Fernleitungen ist also vorhanden.

Zurzeit sind die wichtigsten technischen Optionen Hochspannungsgleichstrom-Freileitungen (HGÜ) und, in einigen Fällen, HGÜ-Erdkabel. Beide haben diverse Nachteile: Freileitungen benötigen massive, störende Strommasten und eignen sich deshalb nicht für dicht bevölkerte Gebiete. Erdkabel hingegen sind extrem teuer. Zudem basieren diese beiden konventionellen Optionen auf Normalleitern, es gibt also Widerstandsverluste, die mit der Kabellänge zunehmen.

In Deutschland werden bis 2024 voraussichtlich 3800 Kilometer neue Stromleitungen gebaut, darunter 2400 Kilometer HGÜ-Nord-Süd-„Stromautobahnen“ mit einer Gesamtkapazität von 12 Gigawatt (laut *Netzentwicklungsplan*). Letztere würden eine Ausweitung des bestehenden Höchstspannungsnetzes um sechs Prozent bedeuten. Diese Zahlen sind zwar noch unsicher (und umstritten), aber ein Netzausbau ist offenbar unvermeidlich. Die Pläne für neue Stromleitungen stoßen jedoch in den betroffenen Kommunen oft auf heftigen Widerstand: Zu den Bedenken zählen die Folgen für Umwelt und Landschaftsbild, fallende Immobilienpreise und Gesundheitsrisiken durch Magnetfelder.

Welche Eigenschaften und Vorteile haben Supraleiter?

Ein Hauptvorteil von Supraleitern ist das erwähnte Fehlen von Widerstandsverlusten, die bei konventionellen Techniken zwischen zwei und fünf Prozent betragen und bei Erdkabeln bis zu acht Prozent (pro 1000 Kilometer im Vollastbetrieb) erreichen. Geringere Verluste würden erhöhte Rentabilität und weniger Energieverschwendung bedeuten.

Im Vergleich zu Überlandleitungen haben Erdkabel (sowohl Normalleiter als auch Supraleiter) diverse Vorteile:

- Minimierte Auswirkungen auf das Landschaftsbild wegen unterirdischer Verlegung
- Geringere Belastung der Umgebung durch elektromagnetische Strahlung
- Kleinerer ökologischer Fußabdruck (mit Ausnahme von Feuchtgebieten)
- Weniger Landverbrauch mit geringeren Folgen für den Grundstückswert
- Keine Beeinträchtigung durch Sturm, Nebel, Schnee oder Eis
- Keine Lärmemissionen

Überdies bieten Supraleiter Vorteile, die herkömmliche HGÜ-Erdkabel nicht aufweisen. Zunächst haben Supraleiter eine sehr viel höhere Stromdichte, das heißt, für eine bestimmte Übertragungskapazität kann der Gesamtdurchmesser des Kabels geringer sein als bei herkömmlichen HGÜ-Kabeln. Letztere erzeugen zudem erhebliche Hitze, was ihre maximale Strombelastbarkeit begrenzt und zusätzliche Kabel erforderlich macht, womit die Gesamtgröße der Konstruktion zunimmt. Im Gegensatz dazu werden Supraleiter nicht durch Wärmeabgabe beeinträchtigt.

Kurz gesagt, können über Supraleiter mit einem sehr geringen Gesamtdurchmesser, einschließlich Kälteregler, große Strommengen transportiert werden. Die Folge ist, dass die gesamte Installation eines Supraleiters sehr viel kompakter ausfällt als bei einem konventionellen Erdkabel derselben Kapazität. Daher sind die Umweltschäden durch Supraleiter weitaus geringer.

Die Vorteile von Supraleitern gegenüber konventionellen HGÜ-Kabeln:

- Keine Wärmeabgabe an den Boden der Umgebung, derzeit ein Argument gegen den flächendeckenden Einsatz von konventionellen Erdkabeln
- Eine geringere Gesamtgröße bei gleicher Übertragungskapazität und damit:
 - Geringere Beeinträchtigung des Bodens
 - Die Möglichkeit, vorhandene Korridore zu nutzen
 - Geringere Beeinträchtigung von Wäldern und Naturschutzgebieten (da ein schmalerer Korridor genügt)
- Supraleiter können hohe Ströme übertragen, ihr flexibles Spannungsniveau kann für eine optimale Leistung zugeschnitten werden. Niedrigere Spannungen bedeuten zudem eine weniger aufwändige Isolierung, was wiederum heißt weniger Umspannwerke zur Anpassung an die Spannung der angrenzenden Netze.

Allerdings steht die Weiterentwicklung von Supraleitern vor einigen besonderen Herausforderungen. Vor allem bringt die Kombination von zwei Technologien – Stromtransport und Kühltechnik – eine neue Komplexität ins System. Bestimmte Fragen sind noch ungelöst, wie etwa die Auswahl geeigneter Kühlmittel unter 70 Grad Kelvin und die Kosten für Hochtemperatur-Supraleiterkabel. Das könnte die Einführung von Supraleitern beeinträchtigen.

Wie ist der Forschungsstand bei Supraleitern?

In den letzten 15 Jahren sind mehrere Projekte zur Supraleitfähigkeit in Gang gekommen, die insbesondere durch Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) angestoßen wurden. Hier einige wegweisende Beispiele:

AmpaCity-Projekt, Essen, Deutschland

Anfang 2014 wurde im Stadtzentrum von Essen unterirdisch ein 1000 Meter langes Wechselstrom-Supraleiterkabel verlegt. Es ersetzt mehrere ältere konventionelle Hochspannungsleitungen und ist Europas erster – und längster – in das Stromnetz integrierter Supraleiter. Das Kabel ist für eine Übertragungsleistung von 40 Megawatt (MW) ausgelegt (fünfmal mehr als ein Kupferkabel derselben Größe)

Supraleitung für Stromtransport

und wird bei Mittelspannung betrieben (10 kV statt 110 kV), sodass auf Umspannwerke verzichtet werden kann. Insgesamt kann die Installation solcher Supraleiter in Städten wertvollen Raum frei machen und zu größerer Effizienz sowie geringeren Betriebskosten führen. Das *AmpaCity*-Kabel besteht aus Keramik-Hochtemperatur-Supraleitermaterialien und wird mit Flüssigstickstoff gekühlt.

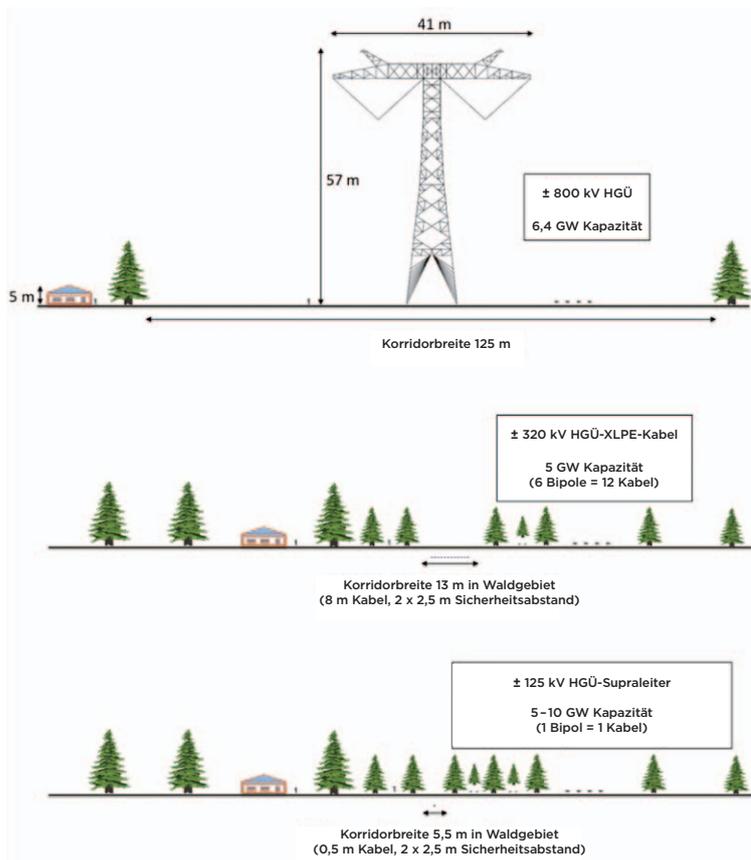
Long Island Power Authority (LIPA), New York, USA
2008 wurde ein 600 Meter langes Supraleiter-Erdkabel mit einer Kapazität von 574 MW installiert, das ein Umspannwerk mit dem Freileitungsnetz verbindet. Basierend auf Hochtemperatur-Supraleitermaterialien war das LIPA-Kabel in den folgenden sechs Jahren der längste in das Stromnetz integrierte Supraleiter der Welt. Derzeit läuft die zweite Phase des Projekts, die auf technische Verbesserungen zielt.

Andere Kabel unterschiedlicher Länge und Kapazität kommen in Südostasien (etwa in Japan, Korea und China) sowie neuerdings in Russland zum Einsatz.

Magnesiumdiborid-Supraleiter

In den vergangenen Jahren richteten sich die Forschungsanstrengungen auf das Potenzial von Supraleitern auf Basis des supraleitenden Materials Magnesiumdiborid (MgB_2). Nach der Entdeckung seiner Supraleitfähigkeit im Jahr 2001 wurde gezeigt, dass MgB_2 viele Charakteristika besitzt, die den Einsatz für den Stromtransport nahelegen:

- Es handelt sich um eine einfache binäre Verbindung, deren Bestandteile in der Natur häufig vorkommen.
- Die Herstellung ist unkompliziert und günstig.
- Die kommerzielle Fertigung von Drähten ist machbar.
- Es ist billiger als jeder andere bekannte HTS.



Größenvergleich unterschiedlicher technischer Optionen für den Stromtransport.

**Quelle: IASS/
Heiko Thomas**

Hochtemperatur-Supraleiter könnten zwar in höheren Temperaturbereichen eingesetzt werden als Magnesiumdiborid (damit sinken die Kosten für die tiefkalte Isolierung), aber sie sind teurer in der Herstellung und können nicht zu flexiblen Drähten verarbeitet werden – bei Stromleitungen ein wichtiger Aspekt.

Die Europäische Organisation für Kernforschung (CERN) führt seit 2012 in Zusammenarbeit mit dem IASS eine Reihe von Experimenten mit MgB_2 -Drähten und -Kabeln durch. Als erfolgreich erwiesen sich Tests mit einer Konfiguration bestehend aus zwei sehr dünnen, 20 Meter langen MgB_2 -Kabeln, die in Reihe für Gleichstromübertragung verschaltet und in einen mit Heliumgas gefüllten semiflexiblen Kälteregele eingebettet wurden. Es war weltweit das erste Experiment dieser Art. Der Kabelaufbau, mit einem Außendurchmesser von insgesamt nur 16 Zentimetern, konnte einen Strom von 20.000 Ampere übertragen – für Supraleiter ein Weltrekord. Diese Ergebnisse stellen einen Durchbruch dar und zeigen, dass MgB_2 -Supraleiter eine vielversprechende Option für das Stromnetz der Zukunft bieten können.

Unlängst haben sich fast 40 führende europäische Organisationen aus Wissenschaft und Industrie mit Versorgungsunternehmen und Netzbetreibern im Kontext eines großen EU-finanzierten Forschungsprojekts zur Energieübertragung zusammengetan. In einem der fünf Demonstrationsbereiche des Projekts wird in Hannover ein Prototyp- MgB_2 -Kabel gebaut und getestet. Die ersten Komponenten werden Anfang 2016 montiert, erste Tests werden 2017 anlaufen. Das Kabel soll den empfohlenen Industrienormen entsprechen und wird Messungen auf sehr viel höheren Spannungsebenen unterzogen als bei früheren Laborexperimenten.

Anhand von Berechnungen, basierend auf dem Prototypkabel, den Materialkosten usw., wurden vom IASS erste Kostenschätzungen erstellt. Sie zeigen, dass MgB_2 -Kabel um ein Mehrfaches billiger als herkömmliche HGÜ-Kabel und gegenüber Freileitungen konkurrenzfähig sein könnten. Einschätzungen zum wirtschaftlichen Aspekt werden genauer ausfallen, sobald eine industrielle Erprobung die Labortests ablöst.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

■ Für viele Länder ist der Netzausbau eine strategische Herausforderung, vor allem durch die Energiewende und die nötige Integration der Erneuerbaren.

■ Herkömmliche Technologieoptionen weisen mehrere Nachteile auf, etwa Widerstandsverluste, visuelle und Umweltauswirkungen (z. B. Strommasten), Größe und Kosten (für herkömmliche Erdkabel).

■ Supraleiter stellen eine Alternative dar, um große Strommengen ohne Verlust zu transportieren. Sie können für Kurz-, Mittel- und Fernleitungen eingesetzt und unterirdisch verlegt werden.

■ Supraleiter dürften wegen ihrer erheblich geringeren Größe effizien-

ter sein und beeinträchtigen die Umwelt deutlich geringer. Damit steigen die Chancen für die öffentliche Akzeptanz.

■ Die Forschung auf diesem Gebiet nahm im vergangenen Jahrzehnt stark zu; die Funktionsfähigkeit von Supraleitern wurde durch mehrere kleine bis mittlere Projekte in verschiedenen Ländern nachgewiesen.

■ Allerdings sind noch erhebliche Anstrengungen nötig, wenn diese Technologie in größerem Maßstab eingeführt werden soll. Nächste Schritte bei der Entwicklung von Supraleitern sind umfangreichere stromnetzintegrierte Projekte sowie die Forschung an Herausforderungen im Bereich Kühlsysteme und Kühlstationen.

Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam (IASS) e. V.

Das 2009 in Potsdam gegründete Institut für Nachhaltigkeitsstudien ist zugleich eine international vernetzte Forschungseinrichtung und ein transdisziplinär arbeitender Thinktank. Ziel des mit öffentlichen Mitteln geförderten Instituts ist es, mit seiner Spitzenforschung Entwicklungspfade für die globale Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft aufzuweisen und interaktiv den Dialog zwischen Wissenschaft, Politik und Gesellschaft zu fördern. Forschungsgebiete sind die globale Nachhaltigkeitspolitik, innovative Technologien für die Energieversorgung der Zukunft, die nachhaltige Nutzung von Ressourcen wie Ozeane, Böden oder Rohstoffe sowie die Herausforderungen für unser Erdsystem durch Klimawandel und Luftverschmutzung.

Ansprechpartner:

Adela Marian (Project Scientist)
adela.marian@iass-potsdam.de
Heiko Thomas (Project Scientist)
heiko.thomas@iass-potsdam.de

Redaktion/Übersetzung:

Corina Weber/Sonja Schuhmacher

Adresse:

Berliner Straße 130
14467 Potsdam
Deutschland
Telefon: 0049 331-28822-340
E-Mail: media@iass-potsdam.de
www.iass-potsdam.de

DOI: 10.2312/iass.2015.032

