



Foto der supraleitenden Stromleitung, die von April 2014 bis März 2021 in der Innenstadt von Essen (D) genutzt wurde. Während den sieben Jahren erfolgte der Stromtransport fast ohne Unterbruch und annähernd störungsfrei, ein wirtschaftlicher Betrieb wurde während des Praxistests allerdings nicht erzielt.

Bild: Foto: Westenergie AG

**A**uf dem Weg vom Kraftwerk zum Konsumenten legt der Strom oft Hunderte von Kilometern zurück. «Durch Übertragungsverluste gehen auf dem Weg bis zu zehn Prozent der transportierten Strommenge «verloren», werden also in thermische Energie umgesetzt, was sich als Erwärmung der Stromleitungen bemerkbar macht», sagt Walter Sattinger, Netzexperte bei der nationalen Netzgesellschaft Swissgrid. Um die Verluste zu minimieren, wird Strom wenn immer möglich bei hohen Spannungen transportiert. So kann die gleiche Energiemenge bei geringerer Stromstärke übertragen werden. Das senkt die Verluste, denn diese wachsen quadratisch mit der Stromstärke. Der «Trick» zahlt sich aus: In der Schweiz gehen nur knapp ein Fünftel der Übertragungsverluste auf das Hoch- und Höchstspannungsnetz (220 kV, 380 kV). Absolut betrachtet fallen aber auch diese Verluste ins Gewicht: Auf einer 100 Kilometer langen 380 Kilovolt-Leitung beispielsweise kann die Verlustleistung bei hoher Belas-

tung gegen 10 Megawatt (MW) betragen. Das entspricht der Leistung von zwei grossen Windkraftwerken.

**Supraleitung lässt Verluste verschwinden**

Um Übertragungsverluste zu vermindern, wird seit längerem der Einsatz von supraleitenden Stromkabeln diskutiert und in Testeinrichtungen erprobt. Supraleiter haben die Eigenschaft, dass sie Strom ohne merkliche elektrische Verluste leiten.

Damit in Leitern der elektrische Widerstand schwindet, müssen sie stark abgekühlt werden. Für kommerzielle Anwendungen steht die Hochtemperatur-Supraleitung (HTS) im Vordergrund, die sich in den letzten 10, 15 Jahren stark fortentwickelt hat. Sie beruht auf keramischen Materialien, die supraleitende Eigenschaften bereits bei relativ hohen Temperaturen von 77 Kelvin (-196 °C) annehmen. 77 Kelvin ist die Siedetemperatur von Stickstoff (bei Normaldruck). Da sich Stickstoff einfach verflüssigen lässt und überdies un-

Roadmap zu supraleitenden Komponenten für das Stromnetz

# Wenn Strom ohne Widerstand fliesst

In den 1980er Jahren wurden Hochtemperatur-Supraleiter entdeckt. Seither diskutieren Fachleute, wie sich deren Eigenschaften in der Stromversorgung kommerziell nutzen lassen. Unterdessen zeichnen sich konkrete Anwendungsfelder ab, in denen widerstandslose Stromkabel und weitere supraleitende Netzkomponenten ihre Vorzüge ausspielen können. Eine Roadmap eines internationalen Programms zeigt nun die kurz-, mittel- und langfristigen Einsatzgebiete der Technologie auf.

Von Benedikt Vogel

	Technologie-Reifegrad: <span style="color:red">■</span> tief <span style="color:blue">■</span> mittel <span style="color:green">■</span> hoch					
	heute	2025	2030	2035	2040	2045
<b>Energiebereitstellung (Netz)</b>						
❖ Übertragung (HS > 66 kV)						
➢ Höhere Kapazität für Hochspannungsleitungen (AC, DC)	HS-Kabel (AC)		HS-Kabel (AC)			
➢ Transport grosser Leistungen über lange Distanzen	HS-Kabel (DC)				HS-Kabel (DC)	
➢ Fehlerstrombegrenzung Hochspannungs-Netz	Fehlerstrom-Begrenzer HS					
❖ Unterstation						
➢ Verbindung von Unterstation (auf Seite Mittelspannung)	MS-Kabel (AC)		MS-Kabel (AC)			
➢ Fehlerstrombegrenzung Mittelspannungs-Netz	Fehlerstrom-Begrenzer MS					
➢ Ersatz herkömmlicher Transformatoren	Transformator	Transformator		Transformator		
❖ Verteilung (MS < 66 kV)						
➢ Versorgung von Städten mit hoher Leistung	MS-Kabel (AC)					
➢ Retrofit bestehender Kabelkanäle	MS-Kabel (AC)		MS-Kabel (AC)		MS-Kabel (AC)	

Die «Application Readiness Map» für Hochtemperatur-Supraleiter im Stromnetz: Ein hoher Technologie-Reifegrad (grün) bedeutet, eine Anwendung ist als Prototyp vorhanden oder bereits in der operativen Anwendung. Bei einem mittleren Technologie-Reifegrad (blau) wurde die Technologie im Labor oder auf dem Feld demonstriert. Bei einem tiefen Technologie-Reifegrad (rot) liegt bestenfalls ein Proof of Concept vor.

Bild: Illustration: IEA HTSCP





Bild vom Projekt eines HTS-Kabels in Chicago im US-Bundesstaat Illinois.

gefährlich ist, stellt dieser ein ideales Material zur Kühlung von Supraleitern bereit.

Leistungsfähige Stromleitungen transportieren heute bei den in Europa eingesetzten Spannungen bis zu 3 Gigawatt (GW). Mit Supraleitern könnte es künftig das Zehnfache sein. Bei solch grossen Strommengen spart das Eliminieren von Übertragungsverlusten mehr Strom als für die Kühlung der Supraleiter aufgewendet werden muss. «Anwendungen mit gut wär-

meisolierten Supraleitern belegen, dass trotz der erforderlichen Kühlung Effizienzgewinne möglich sind», sagt Dr. Bertrand Dutoit, Leiter der Gruppe für Angewandte Supraleitung an der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Als Beispiel verweist der Forscher auf die 1 Kilometer lange Mittelspannungsleitung, die von 2014 bis 2021 in der deutschen Stadt Essen vom Energieunternehmen Westenergie betrieben wurde. Dank ihr konnte der

Strom bei niedrigerer Spannung (10 statt 110 kV) ins Stadtzentrum gebracht werden. Mit dem Kabel des Projekts AmpaCity wurden jährlich 39000 Megawattstunden Strom transportiert. Die Kühlung benötigte im gleichen Zeitraum 45 Megawattstunden Energie.

### Anwendungen mit hohem Technologie-Reifegrad

Ein Gremium aus Expertinnen und Experten, das unter dem Dach der Internationalen Energieagentur arbeitet und an dem die Schweiz beteiligt ist (siehe Box), hat nun den Entwicklungsstand von HTS-Anwendungen für das Stromnetz abgeschätzt und in einer «Application Readiness Map» (ARM) zusammengestellt. Das Dokument gibt einen Überblick über den Technologie-Reifegrad verschiedener HTS-Anwendungen (siehe Grafik auf Seite 25).

Die beteiligten Expertinnen und Experten aus Industrie und Forschung benennen drei Gebiete, in denen die HTS-Technologie bereits einen hohen Reifegrad aufweist: Dazu gehören leistungsfähige Mittelspannungs-Kabel zur Versorgung von Stadtzentren, so wie sie in Essen im Einsatz waren, aber auch in Südkorea, China und Japan getestet werden. «Supraleiter können bis zu fünfmal mehr Strom transportieren als herkömmliche Kabel gleicher Grösse, das macht sie zu einer vergleichsweise günstigen Lösung zur Versorgung urbaner Gebiete mit ihrem ständig wachsenden Strombedarf», sagt Prof. Carmine Senatore (Universität Genf), der die Schweiz im IEA-Expertengremium vertritt.

Ebenfalls bereit für die kommerzielle Anwendung sind Geräte zur Begrenzung von Kurzschluss-Strömen im Mittel- und Hochspannungsnetz. Diese Fehlerstrom-Begrenzer bremsen hohe Ströme, wie sie für Kurzschlüsse typisch sind, ohne den Stromfluss aber zu unterbrechen. Wird ein supraleitender Fehlerstrom-Begrenzer von einem hohen Strom durchflossen, verliert er bei Überschreiten einer definierten maximalen Strommenge seine Widerstandslosigkeit. Erste Schutzgeräte dieser Art für Hochspannung sind in Thailand und seit Ende 2019 in der Nähe von Moskau im kommerziellen Einsatz. Schon verbreiteter sind die Geräte auf Mittelspannungsebene. Weltweit sind über 20 Anwendungen bekannt. Fehlerstrom-Begrenzer werden auch zum Retrofit älterer Stromnetze eingesetzt, indem sie diese vor Überlastung schützen.

### Anbindung von Offshore-Windkraftwerken

Gemäss Einschätzung der Experten gibt es drei Anwendungsbereiche für supraleitende Kabel, die zurzeit einen mittleren Technologie-Reifegrad aufweisen: Dazu gehören Hochspannungsleitungen für den Transport von Wechselstrom, welche die heutigen Überlandleitungen ersetzen könnten, aber auch neuartige Hochspannungsleitungen für den Transport von Gleichstrom über weite Strecken. Unterirdisch verlegte Testinstallationen von einigen Hundert Metern entstanden im letzten Jahrzehnt in China, Korea und Japan. Ein 2,5 Kilometer langes 20 kV-Kabel sollte zudem Ende 2021 in St. Petersburg fertiggestellt werden. Der Bau langer supraleitender Leitungen ist technisch anspruchsvoll. Im flachen Gelände müssen sie alle 10 bis 25 Kilometer mit einer Kühlstation ausgerüstet werden.

### Ein «massives Veränderungspotenzial»

Jochen Kreusel ist nicht Partner des IEA-Programms, aber er hat als Stromnetzexperte von Hitachi Energy – einem Joint Venture der Konzerne Hitachi und ABB, das im Wesentlichen aus der früheren ABB-Stromnetzsparte besteht – grosse Erfahrung bei der Ausrüstung von Stromnetzen. «Die Faszination der Supraleitung ist nicht neu», sagt Kreusel, «heute aber sind wir in einer Situation, wo diese Technologie tatsächlich zum Durchbruch kommen könnte.» Er verweist auf die Ausbaupläne für Windparks in der Nordsee bis zu einer Gesamtleistung von 450 GW. «So grosse Strommengen ans Land zu bringen, stellt uns vor neue Herausforderungen. Zwar ist dies auch mit heutiger Kabeltechnologie möglich, wenn sie genug grosse Kabel einsetzen, aber leistungsstarke Supraleitungskabel hätten hier ein ideales Einsatzgebiet», sagt der Industrieexperte.

Die Experten haben weitere Gebiete ausgemacht, in denen die HTS-Technologie mittel- oder langfristig zum Einsatz kommen könnte: So die Verbindung mehrerer Mittelspannungsnetze zur Erhöhung der Versorgungssicherheit, der Einsatz von Mittelspannungskabeln zum Retrofit bestehender Erdkabel, ebenso beim Bau neuartiger Transformatoren.

Bis supraleitende Kabel und Komponenten für den breiten, kommerziellen Einsatz in Stromnetzen bereitstehen, sind noch technische, ökonomische und regulatori-



Endpunkt eines supraleitenden Gleichstrom-Kabels mit 80 Kilovolt-Spannung in Südkorea.

sche Hürden zu nehmen. Trotzdem trifft die Roadmap einen Nerv der Zeit, davon ist Jochen Kreusel von Hitachi Energy überzeugt: «Die Supraleitung ist unterwegs in Richtung grosstechnischer Anwendung. Als Industrieunternehmen, das Schaltanlagen und Transformatoren herstellt, beob-

achten wir diese Entwicklung sehr sorgfältig, denn wenn sich die Supraleitungstechnologie durchsetzt, hat sie ein massives Veränderungspotenzial für die ganze elektrische Energieversorgung.» ■

Die «Application Readiness Map» ist in englischer Sprache abrufbar unter: <https://ieahts.org/publications/>.

## Schweiz engagiert sich in der Hochtemperatursupraleitung

Hinter dem Kürzel IEA HTS TCP verbirgt sich eine international zusammengesetzte Expertengruppe, die unter dem Dach der Internationalen Energieagentur (IEA) arbeitet. Die IEA unterhält rund 40 «Technology Collaboration Programs» (TCP), darunter das Programm 'High Temperature Superconductivity' (HTS). In der Expertengruppe sind neben der Schweiz acht weitere Staaten vertreten, darunter die USA, Japan und Deutschland. Die Gruppe hat sich nach eigener Darstellung der Aufgabe verschrieben,

«den Status und die Aussichten für die künftige Nutzung von HTS im Elektrizitätssektor der Industrie- und Entwicklungsländer zu bewerten und diese Ergebnisse an Entscheidungsträger in den Regierungen, im Privatsektor und in der Community zu Forschungs- und Entwicklung (F&E) weiterzugeben. Schweizer Vertreter im IEA HTS TCP sind Prof. Carmine Senatore (Universität Genf) und Roland Brüniger (R. Brüniger AG – Engineering & Consulting).

Weitere Informationen unter <https://ieahts.org>.