



Vergleich Investitionskosten HGÜ-Erdkabel versus Supraleiter auf Autobahn-Mittelstreifen

München, den 8.10.2022



Resumee

Nach dem 12 km langen Supraleiter-Wechselstromkabel in München namens SuperLink, dessen Planung schon weit fortgeschritten ist, sollte als nächstes ein 60 bis 100 km langes weiteres Pilotprojekt realisiert werden. Neben der Frage der Ausfallsicherheit stellt sich auch die Frage der Kosten und hier insbesondere der Investitionskosten. Das vorliegende Papier geht dieser Frage für Gleichstromleitungen im Vergleich zu klassischen HGÜ-Erdkabeln nach.

Bei den Kosten für Stromleitungen lassen sich drei Kostenblöcke unterscheiden:

- (1) die Kosten des reinen Kabels ohne Verlegung, bei der Supraleitung incl. der Kühltechnik
- (2) die Kosten für die Trassierung des Kabels (dazu gehören auch Grunderwerb bzw. Rechte an Grundstücken, Erdarbeiten, Tunnels unter Straßen und Flüssen usw.)
- (3) die Kosten für die technischen Anlagen am Anfang und am Ende des Kabels, insbes. die teuren Gleichstrom-Konverter.

Beim vorliegenden Kostenvergleich wurden drei Leistungsstufen 1 Gigawatt (GW), 2 GW und 4 GW betrachtet sowie eine 100 km lange Gleichstromleitung ohne Konverter (z. B. als Teilsegment einer bestehenden bzw. geplanten Gleichstromleitung) und eine 500 km lange Leitung mit Konverter am Anfang und am Ende.

Bei einer Übertragungsleistung von 1 GW ergibt sich ein leichter Kostenvorteil bei den Investitionskosten in Höhe von 14%. Das klassische Kupfer-Erdkabel ist zwar deutlich billiger, erfordert jedoch aufwendige Trassierungsarbeiten. Ein Supraleiterkabel ist wesentlich teurer als die Kupfer-Erdkabel, doch ist es so platzsparend, dass es kostengünstig auf dem Autobahn-Mittelstreifen verlegt werden kann und dadurch die Mehrkosten mehr als kompensiert werden.

Bei zunehmender Übertragungsleistung verschiebt sich der Kostenvorteil weiter zugunsten der Supraleitung: Bei 2 GW ergibt sich ein Preisvorteil von 20% und bei 4 GW von 27%. Die Kabelkosten bei klassischen Erdkabeln steigen linear an und auch die Breite der Trasse nimmt zu wegen den aufgrund der Wärmeentwicklung erforderlichen Abständen der Kabel. Dagegen steigen die Kosten beim Supraleiterkabel mit zunehmender Übertragungsleistung nur moderat an, weil sich Kabelquerschnitt und Kühlaufwand mit zunehmender Übertragungsleistung nur geringfügig erhöht.



Das Münchner Projekt, das von den Stadtwerken München finanziert wird, rechnet sich ebenfalls über die Einsparung von Trassierungskosten, denn in diesem Fall wäre sogar der Bau eines neuen Tunnels in der Stadt erforderlich, während das kleine Supraleiterkabel durch bestehende Kabelschächte verlegt werden kann.

Auch wenn kein Autobahn-Mittelstreifen zur Verfügung steht, besteht zumindest bei großen Leistungsstufen (4 GW) ein Kostenvorteil, wobei die Modellrechnung davon ausgeht, dass durch die platzsparende und nicht mehr Abwärme produzierende Supraleitung die Hälfte der Trassierungskosten eingespart werden können. Bei geringeren Leistungsstufen werden sich leichte Mehrkosten von ca. 10% ergeben, wobei die Mehrkosten durch die höhere Akzeptanz und somit geringeren Genehmigungszeiten trotzdem gerechtfertigt sein können.

Wenn bei der Supraleitung keine großen Trassierungskosten auftreten, wie dies auf dem Autobahn-Mittelstreifen der Fall ist, dominieren zu 80% die Produktionskosten des Kabels. Auch die Materialkosten sind nicht dominant, weil die teuren Materialien in sehr dünnen Schichten nur im Mikro- bis Nanometerbereich verwendet werden. Mit größerer Stückzahl werden deshalb die Produktionskosten fallen. Auf lange Sicht mit einigen 1.000 km oder im europäischen Maßstab mit einigen 10.000 km ist es sogar denkbar, dass man mit den Investitionskosten bei der Supraleitung in die Größenordnung der Kosten von Freileitungen gelangt und somit letztlich das Thema Stromtransport über große Entfernungen sowohl hinsichtlich der Durchsetzbarkeit als auch hinsichtlich der Kosten gelöst wird.



Zweck des vorliegenden Papiers

Nachdem nun in München mit dem "SuperLink" Projekt ein 12 km langes supraleitendes 110 kV-Wechselstromkabel in konkreter Planung ist - ein kurzes Testkabel soll schon in einigen Monaten in Betrieb genommen werden -, stellt sich die Frage, wo die nächsten Anwendungstrecken realisiert werden könnten. Wie schon bei herkömmlichen Freileitungen und Erdkabeln gibt es ab einer bestimmten Länge eines Kabels einen technischen und wirtschaftlichen Vorteil durch die Verwendung von Gleichstrom, da hier weniger Leitungswiderstände entstehen und keine Blindleistung auftritt. Auch bei der Supraleitung ergeben sich kostenseitig Vorteile durch die Umstellung auf Gleichstrom ein, vor allem durch einen geringeren Bedarf an Kühlleistung.

Es ist nun sinnvoll, eine Anwendungstrecke für die Supraleitungstechnik über eine größere Distanz von 60 bis 100 km zu suchen und planerisch in Angriff zu nehmen. Da eine Wechselstromleitung schon in Planung ist, wäre insbesondere eine Gleichstromleitung als weiteres Pilotprojekt interessant. Da es sich um sehr beträchtliche Investitionen handelt, stellen sich neben den für die Netzbetreiber wichtigen Fragen nach Sicherheit und Zuverlässigkeit auch die Frage nach den Kosten, die im vorliegenden Schriftstück betrachtet werden sollen.

Eine pauschale Aussage, die eine Bauweise sei grundsätzlich billiger als die andere, kann nicht getroffen werden. Das Kostenverhältnis hängt stark von bestimmten Parametern ab wie zu übertragende Leistung und Länge sowie den konkreten Bedingungen der Trassierung vor Ort. Im folgenden Text sollen deshalb diese Zusammenhänge erläutert werden, so dass konkrete Aussagen unter bestimmten Annahmen getroffen werden können. Betriebskosten werden hier nicht betrachtet, sondern nur Investitionskosten.

Funktionsprinzip der Supraleitung und Wesensunterschiede zu klassischen HGÜ-Erdkabeln

Supraleitungen haben den den Vorteil, dass sie durch den selben Leitungsquerschnitt mehr als 200 mal so viel Strom transportieren können als ein Kupferdraht, doch sie haben den Nachteil, dass sie gekühlt werden müssen. In diesem Schriftstück wird nur der "Hochtemperatur-Supraleiter" (HTS) betrachtet. Für die Kühlung reicht der in der Industrie sehr gängige flüssige Stickstoff mit Kühlanlagen "von der Stange", wie sie häufig in der Industrie oder z. B. in Krankenhäusern zum Einsatz kommen. Flüssiger Stickstoff ist quasi ein Abfallprodukt, das bei der Herstellung von flüssigem Sauerstoff durch Luftzerlegung zwangsläufig anfällt. Als Kühlmittel ist er preisgünstig, einfach zu handhaben und umweltfreundlich, da 79% unserer Atemluft aus



Stickstoff besteht und somit Leckagen keine schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt verursachen.

Der Vorteil der Supraleitung liegt darin, durch die Kühlung der Leitungswiderstand bei Wechselstrom sehr gering und bei Gleichstrom sogar bei Null liegt, so dass der Querschnitt des Leiters sehr klein und die übertragene Leistung sehr groß sein kann. Der sog. HTS-Bandleiter, der um das Stickstoffrohr gewickelt wird und in dem der Strom fließt, besteht aus einem dünnen, ungefähr 1/10 Millimeter dicken metallischem Trägermaterial. Auf dieses Trägermaterial wird der eigentliche Supraleiter, eine keramische Verbindung, aufgedampft, mit einer Dicke im Mikrometerbereich, d.h. von ein paar Tausendstel Millimeter. Der Rest des Kabels besteht aus Materialien, wie sie auch in herkömmlichen Kabeln Anwendung finden. Insgesamt ist der Materialeinsatz und sind somit auch die Materialkosten für ein HTS-Kabel sehr viel geringer als für ein konventionelles Kabel. Die größten Herausforderungen entstehen durch die hohe Präzision bei der Verarbeitung und die erforderliche Elastizität des keramischen Materials. Die Kosten eines Supraleiterkabels bestehen somit überwiegend aus Produktions- und weniger aus Materialkosten. Beim klassischen Erdkabel macht dagegen allein der Rohstoffpreis für Kupfer über ein Drittel bis die Hälfte der Gesamtkosten des reinen Kabels aus.

Kostenentwicklung bei größeren Längen und bei Zunahme der Leistung

Materialaufwand und Kosten steigen beim klassischen Erdkabel sowohl bei Zunahme der Länge als auch der Leistung im Prinzip linear an. Bei Übergang in die nächsthöhere Spannungsebene kommt es sogar zu sprunghaften Anstiegen. Wegen der Abwärme bei klassischen Erdkabeln (es können Temperaturen von 80 bis 90 Grad Celsius an der Kabeloberfläche erreicht werden) müssen mit zunehmender Leistung die Trassen auch breiter werden. Andernfalls würde sich der Boden zu stark erwärmen und austrocknen. Auch die Übertragungsleistung würde durch gegenseitige Erwärmung der benachbarten Leiter abnehmen.

Bei der Supraleitung geht man laut VESC von jeweils 40% Mehrkosten bei einer Verdoppelung von 1 GW auf 2 GW sowie bei einer weiteren Verdoppelung auf 4 GW aus.

Da momentan aufgrund der geringen Stückzahlen die Fertigungskosten noch recht hoch, andererseits die Materialkosten gering sind, wird sich ein stark degressiver Effekt mit der Massenproduktion von Supraleiterkabeln ergeben. Wenn nach erfolgreicher Umsetzung einer weiteren Pilotstrecke die Kabel in größeren Stückzahl produziert werden würden, wäre deshalb mit einer signi-



fikanten Kostenreduktion zu rechnen. Die hier dargestellten Kostenansätze unterstellen ein Pilotprojekt mit einer Länge von ca. 60 bis 100 km.

Drei Kostenbestandteile: Kabel, Trassierung, Anfangs/Endpunkte

Für einen Vergleich klassischer HGÜ-Erdkabel mit Hochtemperatur-Supraleiterkabeln (HTS) sind drei Kostenbestandteile zu unterscheiden:

(1) Kabel

Bei HGÜ-Erdkabeln hat man bisher pro Kilometer mit rund 1,4 Mio EUR pro Gigawatt und Kilometer gerechnet. Wegen den steigenden Kupferpreisen (von ca. 4 auf jetzt 7 EUR/kg) dürfte man inzwischen bei 1,6 Mio EUR pro GW und km liegen.

Bei der Supraleitung rechnet man laut VESC (Dr. Reiser) mit 3 bis 5 Mio EUR für eine Übertragungsleistung von 1 GW, und entsprechend der oben erwähnten Steigerungsraten dann, ausgehend von 4,5 Mio EUR, mit 6,3 Mio EUR / km für 2 GW und mit 8,8 Mio EUR/km für 4 GW. Diese Werte enthalten schon die Kühlstationen, die bei Gleichstromleitungen alle 20 bis 100 km (100 km für Seekabel) erforderlich sind und einen eigenen Mittelspannungsanschluss für die Schwarzstartfähigkeit benötigen.

(2) Trassierung

Der eigentliche Vorteil der Supraleitung ist der geringe Platzbedarf. Dies betrifft zum einen die Anzahl der Kabel: Ein einziges Supraleiterkabel (mit ca. 16 bis 20 cm Durchmesser) ersetzt je nach Übertragungsleistung 4 bis 8 herkömmliche HGÜ-Erdkabel. Im Falle der HTS-Kabel können der Plus- und Minuspol durch eine Leitung mit einer gemeinsamen Kühlung verlegt werden. Zum anderen sind, wenn mehrere Kabel verlegt werden, keine Abstände wegen Wärmeentwicklung einzuhalten, denn es findet überhaupt keine Wärmeabstrahlung statt. Diese Eigenschaften eröffnen die von VIEREGG-RÖSSLER (VR) diskutierte Option der Führung auf dem Autobahn-Mittelstreifen.

Ein Supraleiterkabel lässt sich selbstverständlich wie ein HGÜ-Erdkabel auch frei trassieren. Die Trassenbreite kann hierbei von ca. 25 auf ca. 5 m reduziert werden, incl. einem Fahrweg für die Erreichbarkeit. Nicht nur wegen der Durchgängigkeit des Autobahn-Mittelstreifens, sondern auch wegen der Zugänglichkeit bietet sich der Autobahn-Mittelstreifen an, denn die Autobahn stellt einen durchgängigen Begleit- bzw. Zugangsweg dar.



Wie schon bei der klassischen Erdverkabelung mit Kupferkabeln kann auch bei der Supraleitung ein LKW eine Kabelrolle mit einem ca. 1 km langen Kabelstück transportieren. Während bei der klassischen Erdverkabelung die Trassierung mit 2 bis 9 Mio EUR/km mehr als die Hälfte der Gesamtkosten ausmacht, kann die Supraleitung entlang des Autobahn-Mittelstreifens mit vielleicht einem Zehntel dieser Kosten auskommen. Dies ist der eigentliche Kostenvorteil der Supraleitung gegenüber der klassischen HGÜ-Erdverkabelung. Für das Verlegen entlang des Autobahn-Mittelstreifens ist, die inzwischen dominierende Bauweise mit Betonschutzwänden vorausgesetzt (siehe VR Chartsammlung), lediglich ein Verlegefahrzeug erforderlich, das in einer Wanderbaustelle von der linken Autobahnfahrspur aus das Kabel in die Erde zwischen den zwei Betonschutzwänden einpflügt. Für diese Verlegekosten werden pauschal 0,3 Mio EUR/km angesetzt (1/10 gegenüber einfacherer herkömmlicher Erdverkabelung).

Bei der klassischen HGÜ-Erdverkabelung nehmen mit der höheren Leistung auch die Kosten für die Trassierung zu, weil die Trasse umso breiter sein muss, je mehr Leistung übertragen wird, jedoch steigen die Kosten bei weitem nicht linear mit der Leistung an. Im folgenden Rechenmodell wird von Trassierungskosten in Höhe von 4 Mio EUR für 1 GW, 5 Mio für 2 GW und 6 Mio EUR für 4 GW ausgegangen. (Diese Werte sind nicht empirisch ermittelt, sondern nur sehr grob abgeschätzt.)

(3) Anfangs- und Endstellen des Kabels: Gleichstrom-Konverter

Bei Gleichstromübertragung entstehen sowohl bei der HGÜ-Erdverkabelung als auch beim Supraleiterkabel hohe Kosten für die Umwandlung des Stroms von Gleichstrom in Wechselstrom. Hier sind sog. Konverterstationen erforderlich, die nach den Unterlagen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035 und auch nach anderen Quellen mit 0,3 Mio EUR pro Megawatt zu Buche schlagen. Diese längen-unabhängigen Kosten sind auch der eigentliche Grund, warum bis auf die weiter unten aufgeführten Ausnahmen eine Gleichstromübertragung nur auf größeren Distanzen sinnvoll ist. Bei einem 2 GW Kabel entstehen somit am Anfang und am Ende zusammengenommen längenunabhängige Fixkosten von 1,2 Mrd EUR, bei einem 4 GW Kabel von 2,4 Mrd EUR. Bei einem HTS-Kabel sind diese Kosten rund 10% niedriger, weil keine Höchstspannung erforderlich ist. Vor allem aber ergeben sich Vorteile bei der Akzeptanz vor Ort, weil die Konverterhallen nicht mehr rund 20 m, sondern nur noch rund 6 bis 10 m (50 bis 110 kV) hoch sein müssen.

Bei einer Supraleitung ist es nicht erforderlich, auf Höchstspannung (525 kV) zu transformieren. Technisch sind Supraleiter für derart hohe Spannungen machbar, da jedoch der Widerstand gleich Null ist, hat die Höchstspannung keinen Vorteil gegenüber z. B. 110 kV und verursacht lediglich



Mehrkosten für die dann erforderlichen dickeren Isolierungen. Planungs- und Zertifizierungsvorhaben sind bei Höchstspannung sehr viel aufwendiger und erfordern sehr viel mehr Zeit. Hier können HTS-Kabel sehr viel schlankere Prozesse ermöglichen.

Die Konverter sind grundsätzlich nur bei Gleichstromleitungen, nicht jedoch bei Wechselstromleitungen erforderlich.

Kosten für Konverter entfallen, wenn ein HTS-Kabel als Ersatz eines Teilschnitts einer klassischen HGÜ-Erdkabelleitung dient. In diesem Fall müsste dann das HTS-Kabel ebenfalls für 525 kV Höchstspannung ausgelegt werden.

Die Konverterstationen erfüllen allerdings noch eine weitere Funktion im künftigen Stromnetz: Man benötigt "Taktgeber" für die Netzfrequenz von 50 Hertz. Dies machen bislang vor allem die Generatoren von großen Wärmekraftwerken mit ihren großen Schwungmassen. Mit überwiegend erneuerbarem Strom aus Wind und Sonne stehen diese nicht mehr zur Verfügung, es bleiben nur noch die Generatoren der Wasserkraft und ggfs. der Biomasse sowie der Gas- bzw. Wasserstoffgas-Kraftwerke, die jedoch nur bedarfsweise ans Netz gehen sollen. Die Konverter können in diese Lücke springen, weil die Wechselstromfrequenz elektronisch erzeugt und die genaue Form der Welle präzise beeinflusst werden kann. Dies funktioniert sogar besser als mit den mechanisch wirkenden Schwungmassen. Konverter werden somit langfristig die neuen "Taktgeber" des Stromnetzes sein.

Direkter Kostenvergleich unter konkreten Randbedingungen

Bei einer Länge von 100 km macht eine Gleichstromleitung als Bindeglied zwischen zwei Wechselstromnetzen wegen der hohen Kosten der Konverter am Anfang und am Ende des Kabels nur dann einen Sinn, wenn es auch noch andere Gründe dafür gibt (Netzfrequenz-Entkoppelung, Lastflusssteuerung usw.). Deshalb wird einmal eine Gleichstromleitung mit 100 km Länge ohne bzw. mit ohnehin erforderlichem Konverter (z. B. als Verlängerung einer bestehenden Gleichstromleitung) und einmal eine Gleichstromleitung über 500 km Länge mit Konverter ausgewiesen.



Kosten in Mio EUR für 100 km:

	1 GW	2 GW	4 GW
Klassisches HGÜ-Erdkabel, 100 km			
(1) Kabel	160	320	640
(2) Trasse	400	500	600
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Summe ohne Konverter	560	820	1240

Kosten in Mio EUR für 500 km:

Klassisches HGÜ-Erdkabel, 500 km			
(1 + 2) ohne Konverter	2800	4100	6200
(3) Konverter	600	1200	2400
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Summe mit Konverter	3400	5300	8600

DC-Supraleiter auf BAB, 100 km

(1) Kabel	450	630	880
(2) Trasse	30	30	30
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Summe ohne Konverter	480	660	910

Kosten in Mio EUR für 500 km:

DC-Supraleiter auf BAB, 500 km			
(1 + 2) ohne Konverter	2400	3300	4550
(3) Konverter	540	1080	2160
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Summe mit Konverter	2940	4380	6710

Ergebnis des Kostenvergleichs

Die Konverter sind bei der Supraleitung etwas günstiger, doch kann dieser Effekt in der hier nur sehr pauschalen Betrachtung vernachlässigt werden.



Grundsätzlich ergibt sich der Zusammenhang, dass die Supraleiterkabel an sich zwar deutlich teurer sind als entsprechende herkömmliche HGÜ-Kupferkabel, jedoch durch die Trassierung auf dem Autobahn-Mittelstreifen sich wiederum ein großer Kostenvorteil ergibt, denn die Trassierungskosten sind bei herkömmlichen Kupfer-Erdkabeln der Hauptkostenblock.

Bei einer 1 GW Leitung ist das supraleitende Kabel deutlich teurer als ein klassisches Kupferkabel. Durch die Einsparungen bei der Trassierung liegt das auf dem Autobahn-Mittelstreifen verlegte Supraleiterkabel hinsichtlich Kabelkosten plus Trassierung um 14% geringfügig unter den Kosten für die klassische frei trassierte Erdverkabelung.

Bei einer 2 GW Leitung verschiebt sich der Kostenvorteil weiter zugunsten der Supraleitung: Während vor allem die Kabelkosten bei der klassischen Erdverkabelung linear ansteigen, entstehen bei der Supraleitung nur geringe Mehrkosten für die zusätzliche Leistung und gar keine Mehrkosten bei der Trassierung. Die Kosten für Kabel plus Trassierung liegen dann 20% niedriger als bei der klassischen Erdverkabelung.

Noch größer wird der Unterschied bei einem 4 GW Kabel. Hier beträgt der Kostenvorteil der Supraleitung 27%.

Unterstellt man eine Führung des Kabels nicht entlang der Autobahn, sondern wie bei den klassischen Erdkabeln in freier Trassierung, so wäre die Annahme einer Halbierung der Trassierungskosten wahrscheinlich realistisch. Bei einer 1 GW Leitung ergeben sich dann Mehrkosten für die Supraleitung in Höhe von 16% bei 1 GW und von 7% bei 2 GW. Bei 4 GW gibt es auch für frei trassierte Supraleiterkabel einen leichten Kostenvorteil von 5 Prozent.

Es gilt jedoch zu bedenken, dass die Akzeptanz eines Supraleiterkabels deutlich höher sein sollte und somit deutlich kürzere Genehmigungszeiten zu erwarten sind.

Bei dieser Betrachtung noch nicht berücksichtigt ist, dass bei künftigen Folgeprojekten für die Supraleiterkabel ein Effekt der Kostendegression bei der Kabelherstellung absehbar sein wird. Wenn man später ein 500 km Projekt oder gar einige 1000 km Supraleiterkabel realisieren wird, dann könnten die Kosten pro Kilometer signifikant sinken: Die Kosten der Supraleitungs-Stromtrassen entlang von Autobahn-Mittelstreifen bestehen zu 80% aus den derzeit noch hohen Produktionskosten der Kabel. Da die Materialkosten wegen des geringen Materialeinsatzes für die HTS-Kabel vergleichsweise niedrig sind, und man bei einer Verzehnfachung der Produktionsmenge von einer Halbierung der Produktionskosten ausgehen kann, ist eine Kostenersparnis von 50% beim stark dominierenden Punkt (1) reali-

stisch. Ein Kabel mit 4 GW Leistung könnte dann näher an den Kosten einer Freileitung als an den Kosten einer bisherigen klassischen Erdleitung liegen. Bei einem Weltmarkt mit mehreren 10.000 km Leitungen wären langfristig sogar die günstigen Kosten von Freileitungen erreichbar.

Der Kostenvorteil der Supraleiter ist bei der Konzeption der Verlegung auf Autobahn-Mittelstreifen besonders ausgeprägt. Das Münchner Projekt, das von den Stadtwerken München ohne staatliche Zuschüsse finanziert wird, rechnet sich ebenfalls über die Einsparung von Trassierungskosten, denn in diesem Fall wäre der Bau eines neuen Tunnels in der Stadt erforderlich, während das kompakte Supraleiterkabel durch bestehende Kabelschächte verlegt werden kann.