

## These 4

# Elektrische Energieübertragung: Freileitungen oder erdverlegte Kabel?

## Grundlagen

Die Übertragung elektrischer Energie mit grossen Leistungen auf metallischen Leitungen muss bei möglichst kleinen Strömen erfolgen, damit die Verluste gering bleiben. Letztere berechnen sich aus dem Strom im Quadrat, multipliziert mit dem Leitungswiderstand. Hohe übertragene Leistungen bei kleinen Strömen erfordern hohe Spannungen, da die elektrische Leistung proportional dem Produkt aus Spannung und Strom anwächst. Eine Reduktion des Leiterwiderstandes auf praktisch null (Supraleitung!) ist beim heutigen Stand der Technik und auch in näherer Zukunft nicht praktikabel.

Elektrische Energie kann mit Wechselstrom (*AC alternating current*, übliche Frequenzen 50, 60 [vor allem in USA] und 16 2/3 Hz [SBB]) oder mit Gleichstrom (*DC direct current*) übertragen werden. Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) ist erst zu Beginn der 60er Jahre aufgrund der Fortschritte in der Halbleitertechnik möglich geworden. Ihr Einsatz weist grosse Vorteile hinsichtlich der Vermeidung kapazitiv bedingter Leitungsverluste (Blindleistung) auf, hingegen ist der Aufwand für die Konverter (Gleichrichter- und Wechselrichterschaltungen) gross. Der Einsatz von HGÜ ist vorteilhaft bei Freileitungsstrecken über grosse Distanzen (einige 100 km bis über 1000 km) und bei langen Kabelstrecken. Im letzteren Fall benötigt man bei Wechselstromübertragung jeweils im Abstand von ca. 15 km eine Kompensation der Blindleistung, die ebenfalls aufwendig ist.

Bei Freileitungsstrecken in der Schweiz kommt der Einsatz von HGÜ wegen der kurzen Distanzen kaum in Frage. Bei längeren Kabelverbindungen kann HGÜ Vorteile gegenüber Wechselstromübertragung aufweisen (Aufwand Konverter vs. Aufwand Blindleistungskompensation). Was die Trassierung betrifft, sind die Unterschiede aber vor allem im Hinblick auf die oft umstrittenen, materiell kaum quantifizierbaren Aspekte (Umwelt, Versorgungssicherheit, kommunale Interessen) nicht erheblich, so dass im Folgenden die beiden Verfahren HGÜ und AC auf Kabel als näherungsweise gleichwertig betrachtet werden.

Aus technischer Sicht lassen sich heute grundsätzlich alle Hochspannungsverbindungen in der Erde verlegen [1]. Es stellt sich jedoch die Frage nach den Kosten für den Bau und Unterhalt unterirdischer Kabelverbindungen, die bei gleicher Übertragungsfähigkeit im Vergleich zu Freileitungen ein Vielfaches an finanziellen Mitteln erfordern.

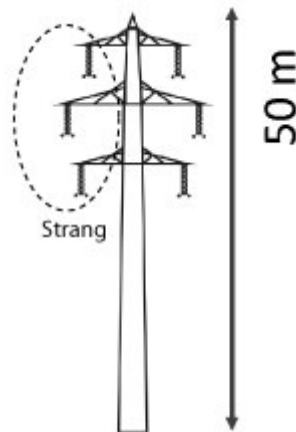
## Hochspannungs-Freileitungen und -Kabel

Mit wachsender Spannung wächst der Aufwand für die Isolation. Dies äussert sich einerseits in den minimal zulässigen Abständen zwischen den spannungsführenden Leitern sowie zwischen den letzteren und dem Erdboden und andererseits in den Abmessungen der Isolatoren bzw. der Isolationsschichten bei Kabeln.

Im Folgenden werden nur die beiden wichtigen Spannungsebenen von 400 kV und 230 kV betrachtet. Eine unterirdische Energieübertragung bei 150 kV und weniger ist bezüglich Aufwand und Kosten – abgesehen von besonderen topographischen Verhältnissen – grundsätzlich vertretbar. Höhere Betriebsspannungen als 400 kV sind in der Schweiz zurzeit nicht vorgesehen.

### a. Freileitungen

Bild 1 zeigt den Einheitsgittermast, der heute für 400/230 kV verwendet wird [6]. Er trägt normalerweise zwei Stränge zu je drei Leitern (Dreiphasen-Wechselstrom) und an der Spitze das sog. Erdseil. Bei 400 kV werden in der Regel die Leiter (Aluminiumlegierung) als doppelte und seltener als mehrfache Seile geführt. Damit erreicht man bessere Übertragungseigenschaften sowie eine Reduktion der Koronaentladungen, die vor allem akustisch störend wirken können.



*Bild 1: Einheitsgittermast (Schweiz)*

Es ist zweckmässig, für 230 kV denselben Gittermast wie für 400 kV zu verwenden, da ein späterer Ausbau auf 400 kV stets eine Option darstellt. Als grober Richtwert der thermischen Grenzleistung eines Stranges mit zwei Seilen pro Leiter zu je 550 Quadratmillimeter Querschnitt rechnet man bei 400 kV mit 1400 MW.

Die durchschnittlichen Kosten einer Freileitung mit Einheitsmasten und zwei Strängen hängen vom Gelände und der Ausführung ab (z.B. Anzahl paralleler Seile). Im Spannungsbereich 230 bis 400 kV rechnet man mit 1.5 bis 2.8 Mio CHF/km [1].

## b. Kabel

Für die Hochspannungsübertragung bis 500 kV werden Kabel mit Kupferleitern und Isolationschichten aus ölgetränktem Papier oder vernetztem Polyäthylen verwendet. Heute steht der Einsatz von Polyäthylen-isolierten Kabeln im Vordergrund [1]. Sie sind unter der Bezeichnung XPLE-Kabel bekannt und weisen einen Durchmesser von rund 15 cm auf. Als grober Richtwert der thermische Grenzleistung eines Stranges mit Kupferleitern von 1600 Quadratmillimeter Querschnitt rechnet man bei 400 kV mit 1000 MW. Kabel sind im Vergleich zu Freileitungen durch eine grosse Kapazität pro Längeneinheit gekennzeichnet. Die resultierende Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bei der AC-Übertragung über längere Strecken führt zu einer sog. Blindleistung, die zu kompensieren ist, wenn man die Leitungsverluste, bedingt durch entsprechend grössere Ströme, in tragbaren Grenzen halten will. Die Blindleistung bei einer Kabelstrecke weist einen rund viermal grösseren Wert auf als diejenige bei einer entsprechenden Freileitungsstrecke. Wie bereits früher erwähnt, muss die Kompensation in Abständen von 15 bis 20 km erfolgen. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um eine Kompensationsdrossel, die zumeist als Freiluftanlage in einem eingezäunten Feld aufgestellt wird (Flächenbedarf bis einige 10 a).

Kabel können auf verschiedene Weise und in verschiedenen geometrischen Anordnungen verlegt werden. Die einfachste Art ist eine direkte Verlegung in den Erdboden. Mehr Aufwand erfordert die Einbettung der Kabel in Gräben, die mit Kabelrohrblöcken (in Beton eingelegte Schutzrohre aus Kunststoff) ausgekleidet sind. In Frage kommen auch begehbare Tunnels, an deren Wänden die Kabel auf Pritschen befestigt werden. Solche Lösungen sind natürlich entsprechend teuer. Bezüglich Geometrie der Kabelanordnung im Boden gibt es ebenfalls viele Möglichkeiten. Bild 2 zeigt eine gängige Anordnung für eine Kabelleitung mit zwei Strängen.

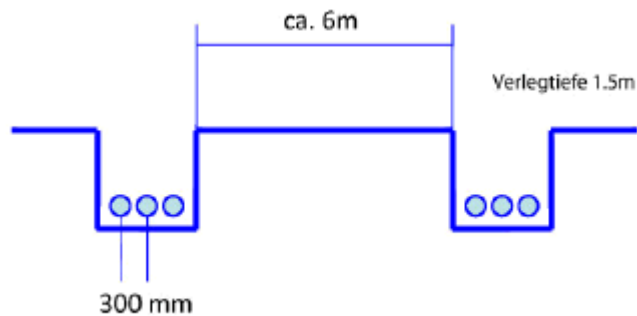


Bild 2: Erdverlegtes Hochspannungskabel (2 Stränge)

Natürlich muss bei Kabelleitungen immer dafür gesorgt werden, dass die Verlustwärme abfliessen kann. Dies hängt von den verwendeten Auskleidungsmaterialien sowie von der Beschaffenheit des Erdreiches ab (Dichte, Feuchtigkeit etc.).

Entsprechend den unterschiedlichen Geländeverhältnissen, Betriebsanforderungen und Ausführungsformen bewegen sich die Kosten erdverlegter Kabelanlagen in einem sehr grossen Bereich. Zweckmässig ist ein Kostenvergleich mit der im vorangehenden Abschnitt a. behandelten Freileitung bei 400 kV und etwa derselben übertragenen Leistung. Gemäss CIGRE (International Council on Large Electric Systems) sind Kabelverbindungen 5 bis 21 Mal teurer als Freileitungen [1]. Das BfE (Bundesamt für Energie) gibt sogar ein Verhältnis 10 bis 50 an [2]. Unter Berücksichtigung der heute zur Verfügung stehenden, modernen Kabeltechnologie und den Möglichkeiten eines effizienten Netzmanagements darf davon

ausgegangen werden, dass die Kosten eher im unteren Bereich der angegebenen Verhältnisse liegen, d.h. im Intervall CHF 5 ... 20 Mio./km.

### **c. Gasisolierte Leitungen (GIL)**

Der Vollständigkeit halber seien auch die sog. „Gasisolierten Leitungen“ erwähnt [1]. Es handelt sich dabei um die koaxiale Anordnung eines dicken Innenleiterrohres und einer metallischen Ummantelung, wobei der Zwischenraum mit einem Isoliergas gefüllt ist (80% Stickstoff, 20% Schwefelhexafluorid). GIL haben eine erheblich geringere Kapazität pro Längeneinheit als Kabel und produzieren deshalb auch weniger Blindleistung. Zudem sind die dielektrischen Verluste kleiner und vermindern damit die Erwärmung. GIL kommen aus Gründen des hohen Preises heute nur auf kurzen Strecken für hohe Leistung grösser 1 GW zum Einsatz und sollen daher im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

## **Elektromagnetische Felder**

Elektromagnetische Felder in der Umgebung von Freileitungen und Kabeln können biologische Systeme, also Menschen, Tiere und Pflanzen beeinflussen (siehe TGZ-These 2: Elektrosmog). Bei den hier vorliegenden, niederen Frequenzen von 50 Hz oder 16 2/3 Hz hat das elektrische Feld bei den praktisch auftretenden Intensitäten vernachlässigbare Auswirkungen. Wohl aber muss das magnetische Feld beachtet werden, das gemäss NIS-Verordnung der Schweizerischen Eidgenossenschaft [4] den Grenzwert der Induktion von 1  $\mu\text{T}$  in Zonen, in denen sich die Bevölkerung längere Zeit aufhalten kann, nicht überschreiten darf.

Unter einer Freileitung mit zwei Strängen, in denen je 1000 A fließen (entspricht bei 400 kV einer Leistung von rund 1400 MW) ergibt sich 1m über dem Erdboden ein Streifen von 50 bis 80m Breite (230 kV: 40 bis 55m), in dem die Grenze von 1  $\mu\text{T}$  überschritten wird. Der Maximalwert direkt unter der Leitungsachse beträgt 4.2  $\mu\text{T}$  [1],[2].

Bei erdverlegten Kabelleitungen fällt zwar das elektrische Feld nahezu vollständig weg, nicht aber das magnetische Feld, das aus dem Boden austritt. Betrachtet werde eine Kabelleitung mit zwei Strängen, in denen je 1000 A fließen und die gemäss Bild 2 verlegt worden sei. In diesem Beispiel ergibt sich wiederum 1m über dem Erdboden ein Streifen von nur noch ca. 10m Breite, in dem die Grenze von 1  $\mu\text{T}$  überschritten wird. Der Maximalwert direkt über der Leitungsachse beträgt jedoch 6.3  $\mu\text{T}$  [1]. Messungen in der Schweiz ergaben unter gleichen Verhältnissen eine höhere Induktion von 8  $\mu\text{T}$  und eine grössere Streifenbreite von 12m.

## **Bau und Unterhalt**

Die Realisierung einer Freileitung verlangt nur streng lokalisierte Bauarbeiten in grossen Abständen zur Errichtung der Gittermasten. Das Gelände dazwischen wird nicht oder nur wenig beeinträchtigt (z.B. Schneiden oder Fällen von Bäumen). Beschädigungen an Freileitungen sind relativ selten. Als Ursachen kommen extreme Vereisungen, Stürme bzw. um-

fallende Bäume, Lawinen, Steinschlag, usw. in Frage. Schäden können ohne grosse Aufwendungen behoben werden. Im Mittel ist mit Reparaturzeiten von einem Tag zu rechnen und zwar selbst dann, wenn ein Reservemast eingesetzt werden muss [1].

Die Erdverlegung einer Kabelleitung bedingt das Graben einer mehr oder weniger breiten Schneise durch die Landschaft. Dabei ist der erforderlichen Zufahrt der Baumaschinen sowie dem umweltschädlichen Betrieb der Letzteren Rechnung zu tragen. Die Schneise sollte zudem so freigehalten werden, dass nötigenfalls innerhalb nützlicher Zeit eine lokale Ausgrabung möglich ist, um einen Defekt zu beheben. Bei begehbaren Tunnels entfällt die Freihaltung, der finanzielle Aufwand ist aber entsprechend hoch. Im Vergleich zu Freileitungen erweist sich der Bau von unterirdischen Kabelleitungen als gravierender Eingriff in die Natur, der sehr wohl bedacht sein muss. Störungen bzw. Schäden an Kabelleitungen sind relativ selten. Als Fehlerquellen kommen Isolationsdefekte bei Kabeln und Muffen sowie ebenfalls äussere Einflüsse wie Beschädigungen durch Baggerarbeiten, Erdbeben, Überflutungen usw. in Frage. Es muss hier mit Reparatur- bzw. Ausfallszeiten von zwei bis vier Wochen (!) gerechnet werden, die entsprechend hohe Kosten verursachen [1], wobei erst noch die Voraussetzung erfüllt sein muss, dass Reservematerial an Lager ist.

Die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Freileitungen und erdverlegten Kabel kann als mehr oder weniger gleichwertig eingeschätzt werden. Kurzschlüsse und länger andauernde Überlastungen, die in den vergangenen Jahren zu den bekannten „Blackouts“ in den USA und in Italien geführt haben, verursachen bei Freileitungen aufgrund der Leitererwärmung einen grösseren Durchhang mit möglicherweise fatalen Folgen. Entsprechende Erwärmungen bei Kabeln schädigen die Isolation, die durch Alterungsprozesse die Lebensdauer der Kabel begrenzt. Sie beträgt unter günstigen Betriebsbedingungen mehr als 30 Jahre (XPLE), bei beschleunigter Alterung durch sogenannte Teilentladungen ist jedoch mit kürzeren Zeiten zu rechnen [7]. Bei Freileitungen wird eine Lebensdauer von 80 Jahren angesetzt, wobei im Rahmen des Unterhalts lediglich der Korrosionsschutz sicher zu stellen sowie eventuell eine Fundamentsanierung vorzusehen ist.

## Vergleich Freileitungen vs. Erdverlegte Kabel

Um einen Überblick über die Unterschiede zwischen Freileitung und Kabel zu erhalten, seien im Folgenden die in den vorangehenden Abschnitten behandelten Sachverhalte nochmals tabellarisch dargestellt [1],[2].

	Freileitung (AC)	Erdverlegte Kabel (AC)
<b>Bauarbeiten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten tief (CHF 1.5 – 2.8 Mio./km)</li> <li>• Bauzeit kurz</li> <li>• umweltfreundlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten hoch (CHF 5 – 20 Mio./km)</li> <li>• Bauzeit lang</li> <li>• gravierender Landschaftseingriff</li> </ul>
<b>Betrieb und Unterhalt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit) gut</li> <li>• Lebensdauer hoch</li> <li>• Reparaturzeit kurz (Tage)</li> <li>• Kosten tief</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit) gut</li> <li>• Lebensdauer begrenzt (Alterung der Isolation)</li> <li>• Reparaturzeit lang (Wochen)</li> <li>• Kosten hoch</li> </ul>

	Freileitung (AC)	Erdverlegte Kabel (AC)
<b>Eingriff in die Natur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Visibilität</li> <li>• nur lokal (Mastsockel)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Silhouette</li> <li>• Schneise (mind. teilweise freizuhalten)</li> <li>• Kompensatoren nach 15 – 20 km (Flächenbedarf einige 10 a)</li> </ul>
<b>„Elektrosmog“</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnetfeld (Grenzwert 1 <math>\mu</math>T): Streifenbreite 50 – 80 m</li> <li>• Elektrisches Feld: Toleranzgrenze liegt innerhalb der obigen Streifenbreite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnetfeld (Grenzwert 1 <math>\mu</math>T): Streifenbreite 10 – 12 m</li> <li>• Elektrisches Feld: praktisch verschwindende Werte</li> </ul>
<b>Besonderes</b>	—	DC bzw. HGÜ: wie oben, aber <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Kompensatoren</li> <li>• teure Konverter am Anfang und Ende der Leitung</li> </ul>

*Tabelle: Zusammenstellung der wichtigsten Fakten bezüglich Vergleich Freileitungen vs. Erdverlegte Kabel*

## Fazit

Die heute von Bürgern und Politikern oft geäusserte Forderung, dass die elektrischen Energieübertragungssysteme dank der zur Verfügung stehenden, modernen Technik grundsätzlich in den Boden zu verlegen seien, hält einer genaueren Prüfung aller Aspekte nicht stand. Vielmehr sind in jedem Fall neben der Wirtschaftlichkeit die Bereiche Umweltschonung (Beeinträchtigung von Landschaftsbild und Boden, „Elektrosmog“, Gewässerschutz etc.), Versorgungssicherheit (Verfahrensdauer, Bauzeit, Störanfälligkeit etc.) sowie die Kommunalen Interessen (Ortsbildschutz, Tourismus etc.) zu bewerten. Es darf nicht sein, dass z.B. für die Einrichtung einer erdverlegten Kabelverbindung ein Mehrfaches der Kosten einer normalen Freileitung bezahlt wird und dabei eine vielleicht unsichtbare, aber trotzdem nachhaltige Schädigung der Umwelt erfolgt.

Das Bundesamt für Energie (BfE) hat ein Schema für die Bewertung der oben erwähnten Bereiche Umweltschonung, Versorgungssicherheit und Kommunale Interessen ausgearbeitet [3],[5]. Wichtige Merkmale der Freileitungs- und Kabelführung werden dabei mit Punkten gewichtet. Die Differenz der Punktezahll kann als Mass für den Vorteil der einen oder anderen Variante dienen. Ein Punktesaldo zugunsten der Kabelführung ist den entsprechenden Mehrkosten gegenüberzustellen. Dies ändert aber nichts an der Tatsache, dass die zu erteilenden Punktezahlen durch mehr oder weniger subjektive Beurteilungen zustande kommen. Ein Ermessensspielraum zwischen Wirtschaftlichkeit und Schutz von mindestens teilweise immateriellen Gütern wird nicht zu vermeiden sein.

## Referenzen

- [1] K. Fröhlich, ETHZ: Transport elektrischer Energie: Freileitung oder Untergrund? Vortrag, Technische Gesellschaft Zürich (TGZ), 02.11.2009
- [2] Ch. Schaffner, Bundesamt für Energie (BfE): Pros and Contras of power transmission by cable or overhead line. serec-Tagung, ETHZ, 21.12.2009
- [3] BfE/bs: Freileitung oder Kabel? Uvek-Anhörung zeigt Bedarf nach Versachlichung der Diskussion. Bulletin SEV, Sonderausgabe, p. 40, 18.12.2009
- [4] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV). Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, 01.02.2000 [www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.710.de.pdf](http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.710.de.pdf)
- [5] BfE: Bericht zum Prüfungs- und Beurteilungsschema „Kabel – Freileitung“ auf der 230/380 kV-Ebene (ohne punktierte Kosten)  
[www.bfe.admin.ch/themen/00612/00617/index.html?lang=de&dossier\\_id=03742](http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/00617/index.html?lang=de&dossier_id=03742)
- [6] F. Aemmer: Probleme des Betriebes und der Wirtschaftlichkeit von Höchstspannungsleitungen . Bulletin SEV 54 (1963), Nr. 12, p. 437 – 445
- [7] R. Vogelsang, O. Sekula, H. Nyffenegger, W. Weissenberg: Long-term experiences with XPLE cable systems up to 550 kV. 9. Konferenca Slovenskih Elektroenergetikov, Kranjska Gora 2009. CIGRE SC B1