

Informationsveranstaltung zum Ausbau des Hoch- und Höchstspannungsnetzes

Veranstalter: Niedersächsischer Landkreistag

Ort: Groß Dungen, Landkreis Hildesheim

Datum: 20. September 2007

Kabel oder Freileitung?

Eine kontroverse Diskussion

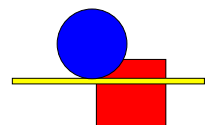
Prof. Dr.-Ing. Hans-Ulrich Paul

Tuchmachersteig 54

45239 Essen

T 0201 407336

E ulrich@iupaul.de



**Informationsveranstaltung des Niedersächsischen Landkreistages am
20.09.2007 in Groß Dungen, Landkreis Hildesheim**

Kabel oder Freileitung? - Eine kontroverse Diskussion

Prof. Dr.-Ing. Hans-Ulrich Paul, Essen

1. Überblick

Die Übertragungs- und Verteilungsnetze mit ihren Umspann- und Schaltanlagen sind die Bindeglieder zwischen Erzeugung und Verbrauch. Dabei sind Leitungen - Freileitungen, Kabel - wesentliche Elemente der elektrischen Übertragungs- und Verteilnetze.

Freileitungen dienen vorzugsweise für die Übertragung und Kabel für die Verteilung der elektrischen Energie. Gasisolierte Leitungen (GIL) werden nur in besonderen Anwendungsfällen mit verhältnismäßig kleinen Längen, z.B. für den Anschluss von Generatoren in Kavernenkraftwerken oder allgemein bei beengten Platzverhältnissen in Kraftwerken eingesetzt.

Den einzelnen Netzen sind folgende Spannungsebenen zugeordnet.

Übertragungsnetze

Höchstspannung 380.000 Volt (380 kV)
 220.000 Volt (220 kV) wird zurückgebaut

Verteilnetze

Hochspannung 110.000 Volt (110 kV)
Mittelspannung 10.000 - 30.000 Volt (10-30 kV)
Niederspannung 230 Volt / 400 Volt

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über den Einsatz von Kabeln und Freileitungen in den verschiedenen Spannungsebenen der Netze (Quelle Verband der Netzbetreiber - VDN, Berlin).

Gesamtlänge der Stromkreise in Kilometern		Kabelanteil in Prozent
Höchst- und Hochspannung	110 700	4
Mittelspannung	494 000	70
Niederspannung	1 070 000	85
Gesamt	1 674 000	75

Tabelle 1: Länge der Stromkreise von Freileitungen und Kabeln in Deutschland im Jahr 2005

Dabei beträgt der Anteil der 110-kV-Kabel etwa 4 600 km, der Anteil der 220- und 380-kV-Kabel liegt unter 100 km.

Die Übertragungsnetze sind die Netze, die die weiträumige Übertragung elektrischer Energie innerhalb Deutschlands und zum benachbarten Ausland übernehmen, um jederzeit innerhalb des westeuropäischen Verbundnetzes eine ausreichende und zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie zu ermöglichen.

Die hiermit verbundenen Aufgaben werden von der **Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE)** wahrgenommen. Die UCTE ist für die Koordinierung des Betriebes und die Erweiterung des europäischen Netzverbundes zuständig, mit dem insgesamt über 400 Millionen Kunde versorgt werden. Mitglieder sind 34 Netzbetreiber aus 22 Ländern. Neben dem Betrieb der Netze ist die UCTE mit der Weiterentwicklung von Regeln zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes der Netze und der Kraftwerke, der Planung und Abstimmung von Erweiterungen und Verbesserung befasst. Die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), sind in dieses System einbezogen, sie könne also nicht isoliert planen und agieren.

Bild 1 zeigt schematisch die Struktur und das Zusammenwirken der verschiedenen elektrischen Netze der öffentlichen Stromversorgung in Deutschland, die in allen europäischen Staaten gleich bzw. sehr ähnlich ist.

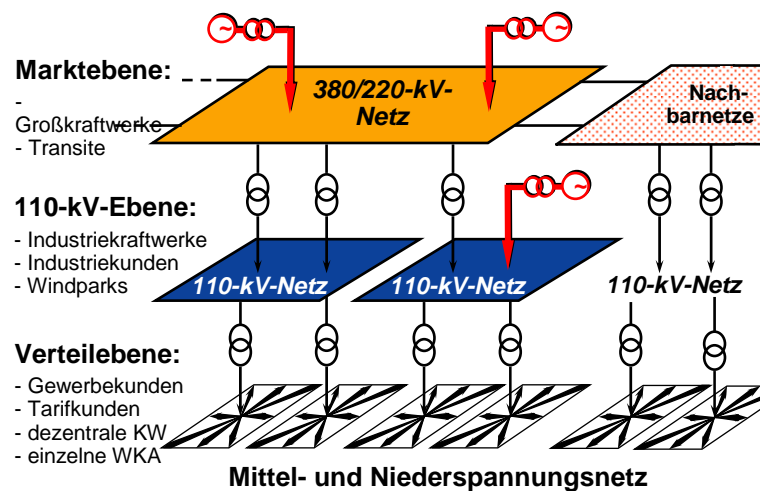


Bild 1: Netzstruktur und Spannungsebenen (Quelle: RWE Transportnetz Strom)

2. Die Notwendigkeit von Netzausbauten

In Deutschland besteht ein ganz erheblicher Bedarf für den Neubau von Leitungen in der 380-kV-Übertragungsebene und auch in den 110-kV-Verteilnetzen. Dieser Bedarf hat folgende Ursachen.

2.1 Liberalisierung des Strommarktes

Mit der Liberalisierung des Strommarktes, die zur Schaffung von mehr Wettbewerb in diesem Bereich mit der Neufassung des Energiewirtschaftsgesetzes 1998 einsetzte, kam es in den Folgejahren zu einer Aufteilung der

Elektrizitätsversorgungsunternehmen in rechtlich eigenständige und voneinander unabhängige Gesellschaften für die Stromerzeugung, die Stromübertragung und die Stromverteilung. Die jeweiligen Netze sind dabei den unterschiedlichsten Stromerzeugern oder Stromlieferanten diskriminierungsfrei zur Verfügung zu stellen, soweit dies z.B. entsprechend den UCTE-Regeln möglich ist. Als Folge hierzu werden von unterschiedlichsten Gesellschaften Kraftwerke an den Stellen geplant, die mindestens folgende Voraussetzungen erfüllen:

- räumliche Nähe zum Übertragungsnetz für den Netzanschluss
- räumliche Nähe zu einer schiffbaren Wasserstrasse zur Anlieferung von Importkohle oder
- räumliche Nähe zu einer Gaspipeline.

Die hieraus resultierenden Netzanschlussbegehren sind vom Netzbetreiber nicht zu beeinflussen, sofern der Netzanschluss technisch möglich ist.

Allein bei der RWE Transportnetz Strom GmbH in Dortmund wurden in der Zeit vom 01.07.05 bis 31.03.06 für neun Kraftwerksstandorte im Raum Köln - Düsseldorf - Ruhrgebiet Einspeisebegehren mit einer Gesamtleistung von mindestens 7.000 Megawatt (MW) gestellt. Diese führen ohne entsprechende Netzausbaumaßnahmen im Übertragungsnetz zu Engpässen und damit zu einer Einschränkung des Wettbewerbes.

2.2 Erneuerbare - Energien - Gesetz (EEG)

Ziel des Gesetzes entsprechend §1 ist:

Vorrang für erneuerbare Energien zur Stromversorgung im Hinblick auf Klimaschutz, Umweltschutz, nachhaltige Entwicklung; Erhöhung des Beitrags erneuerbarer Energien an der Stromversorgung, um ihren Anteil bis 2010 mindestens zu verdoppeln.

Das Gesetz findet Anwendung auf:

- Windkraft
- Solarstrahlung
- Biomasse
- Geothermie
- Grubengas

Die Abnahme- und Vergütungspflicht sind im §3 geregelt:

Der nächstgelegene Betreiber eines geeigneten Netzes ist zur Aufnahme und Vergütung des erneuerbar erzeugten Stromes verpflichtet. Dies schließt auch die wirtschaftlich zumutbare Netzverstärkung ein. Wenn ein Netz technisch nicht in der Lage ist, den Strom aufzunehmen, trifft die Pflicht den Betreiber des nächstgelegenen Netzes einer höheren Spannungsebene. Der jeweils vorgelagerte bzw. nächstgelegene Übertragungsnetzbetreiber

(Höchstspannungsnetz) ist wiederum zur Abnahme und Vergütung dieses aufgenommenen Stromes verpflichtet.

Hieraus ergeben sich allein für die Aufnahme von Windenergie entsprechend einer Studie der Deutschen Energieagentur (Dena-Studie), notwendige Netzausbauten allein in den Übertragungsnetzen bis 2015 von 850 Kilometern 380-kV-Leitungen als Nord-Süd- aber auch als Ost-West-Leitungsverbindungen.

2.4 Netzneubau und Netzumstrukturierungen

Mit Blick auf die Standzeit einiger Hochspannungsleitungen und auch im Zusammenhang mit Netzneustrukturierungen sind Leitungsneubauten häufig in alten Trassen als Ersatzneubau bzw. Sanierung mit in der Regel höherer Übertragungskapazität notwendig.

Darüber hinaus müssen zu den europäischen Nachbarn zusätzliche Leitungen errichtet werden, um im Sinne der EU - Kommission eine höhere europäische Zuverlässigkeit der Stromversorgung zu gewährleisten. Dies ist auch im Zusammenhang mit der Zunahme der Mitgliedsländer in der EU zu sehen.

3. Freileitung oder Kabel

Bezüglich der Leitungen stellt sich bei einem geplanten Leitungsneubau im Hoch- oder Höchstspannungsnetz in Bezug auf die Lösungsmöglichkeiten häufig die Frage: "Freileitung oder Kabel".

Bei der Beantwortung dieser Frage sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, die einen Kabeleinsatz in den einzelnen Hochspannungsnetzen mit ihren unterschiedlichen Aufgaben "Übertragung" und "Verteilung" begrenzen

In den Übertragungsnetzen sind über Entfernungen von 100 km und mehr Leistungstransporte von 1000 MW (entspricht in etwa der Leistung eines Kernkraftwerkes) und auch mehr üblich, die nur mit Freileitungen sicher bewerkstelligt werden können. Bei Kraftwerksausleitungen (Kavernenkraftwerke) oder auch in Großstädten (Berlin) sind auch 380-kV- Kabelverbindungen von einigen 100 Metern bis zu etlichen Kilometern im Einsatz.

In den Verteilnetzen wird insbesondere im Nieder- und Mittelspannungsbereich die Verkabelung auch in den ländlichen Bereichen vorangetrieben, sie ist im städtischen Bereich sowie bei der Erschließung neuer Wohn- und Gewerbegebiete seit Jahrzehnten Stand der Technik. Dieser Standard ist auch weltweit betrachtet nicht selbstverständlich, sondern eher als selten einzustufen. In den Hochspannungsnetzen werden vorwiegend in der 110-kV-Ebene Kabel für Verteilungsaufgaben in Städten und Ballungsgebieten eingesetzt.

Neben den unterschiedlichen energiewirtschaftlichen Aufgaben der Übertragungs- und der Verteilnetze sind für die Leitungen die technisch-physikalischen Eigenschaften, die Wirtschaftlichkeit sowie die gesellschaftspolitischen Aspekte zu berücksichtigen.

Hieraus lassen sich folgende Forderungen ableiten:

Sicherheit	keine Gefährdung von Personen und Sachgütern
Verfügbarkeit	Versorgung aller Kunden ohne zeitliche und örtliche Einschränkung
Qualität	Spannung und Frequenz innerhalb festgelegter Grenzen (UCTE-Regeln)
Wirtschaftlichkeit	minimale Kosten des Netzbetriebes
Umweltverträglich	minimale Umweltbeeinträchtigung

Alle diese Forderungen nehmen einen hohen objektiven Bewertungsmaßstab für sich in Anspruch, dem die Netzbetreiber mit hoher Zuverlässigkeit nachkommen müssen. Gesellschaftspolitisch existieren jedoch unterschiedliche Wahrnehmungsschwellen und damit auch unterschiedliche Bewertungsansätze in der öffentlichen Diskussion zum Thema Energieversorgung und insbesondere zum Leitungsbau.

Allgemein ist die Forderung "Umweltverträglichkeit" in weiten Bereichen eine Ermessensfrage sowie eine Frage des jeweiligen gesellschaftspolitischen Status der handelnden bzw. der betroffenen Gesellschaft. Lange Zeit waren Hochspannungsfreileitungen von ihrer Anzahl und Größe die einzigen technischen Bauwerke, die mit ihren sichtbaren Masten und Seilen weiträumige Bereiche als Folge einer ubiquitären elektrischen Energieversorgung miteinander verbunden und einen visuellen Eindruck in Natur und Landschaft hinterlassen haben. Hinzugekommen sind gerade in den vergangenen Jahren auf Grund der Liberalisierung des Telekommunikationsmarktes Antennenmasten für diverse Mobilfunkdienstleister. Weiterhin ist es mit staatlicher Unterstützung - Privilegierung der Windkraft, Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) - zur Errichtung einer Vielzahl von Windkraftanlagen (WKA) mit einer Verteilung über weite Landschaftsbereiche in der Bundesrepublik Deutschland gekommen.

Der Grad der visuellen Beeinträchtigung einer Landschaft z.B. durch diese technischen Einrichtungen wird von den Betrachtern bzw. von den Betroffenen oft sehr unterschiedlich bewertet. In Bezug auf die öffentliche Stromversorgung stellt sich die Sichtweise häufig so dar, dass die Gesellschaft zwar elektrische Energie unbedingt braucht und auch haben will, nicht jedoch die notwendigen Erzeugungs- und Transporteinrichtungen, insbesondere keine weithin sichtbaren Anlagen. Hieraus resultiert auch die zunehmende Forderung nach einer generellen Verkabelung aller Netze sowohl aus Teilen der allgemeinen Bevölkerung als auch aus Teilen der Politik, weil in Teilbereichen zu einigen Leitungsvorhaben eine Brisanzeskalation im Wesentlichen aus unzureichender Kommunikation seitens der Projektträger entstanden ist und dadurch politischer Handlungsbedarf hervorgerufen wurde.

Zu berücksichtigen ist bei der Forderung "Umweltverträglichkeit" insbesondere, dass jede Tätigkeit von Menschen letzten Endes zu einer Veränderung der Umwelt führt. Die Diskussion über den Umweltschutz hat zu dem allgemein anerkannten

Grundsatz geführt, dass Ausmaß und Folgen aller menschlichen Tätigkeiten auf die Umwelt und die darin lebenden Menschen, Pflanzen und Tiere so klein wie irgend möglich zu halten sind. Dabei müssen in allen Fällen der für die Allgemeinheit erzielbare Nutzen, Interessen einzelner Personen oder Gruppen und die eigentliche Belastung der Natur sachlich und objektiv gegeneinander abgewogen werden. Bei der Lösung dieser Aufgabe ergeben sich allerdings Forderungen, die teilweise im Widerspruch zueinander stehen.

In den folgenden Betrachtungen sollen zur Beurteilung der Frage Freileitung oder Kabel die elektrischen Eigenschaften dieser Betriebsmittel, ihre wirtschaftlichen Aspekte sowie ihre gesellschaftspolitischen Gesichtspunkte miteinander verglichen bzw. näher betrachtet werden.

4. Technologien von Freileitungen und Kabeln

Freileitungen und Kabel sind Übertragungssysteme für elektrische Energie mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften. Bestimmend für diese Eigenschaften sind in erster Linie das Isoliermedium, die Höhe der jeweiligen Betriebsspannung und damit die Abstände zwischen unter Spannung stehenden und geerdeten Teilen der Leitung und der Umgebung.

4.1 Freileitungen

Eine Freileitung ist ein relativ einfaches System, das aus Masten mit den Fundamenten, den Isolatoren aus Glas, Porzellan oder Kunststoff, den Armaturen sowie der Beseilung besteht. Als Isoliermedium wirkt die umgebende Luft, die den Vorteil hat, dass sie sich ständig erneuert - auch nach Fehlern - und damit keiner Alterung unterliegt. Darüber hinaus führt die Umgebungsluft die in den Strom führenden Leitern entstehende Verlustwärme gut ab, so dass kein Wärmestau entstehen kann. Die Leitungsverluste (Stromwärme) einer 380-kV-Freileitung können wegen der geringeren spezifischen Leitfähigkeit der gebräuchlichen Stahl-Aluminium-Seile gegenüber einem 380-kV-Kabel mit Kupferleitern und mit einem wesentlich größerem Querschnitt der Leiter um den Faktor 2 bis 3 größer sein; dies ist bei einem Vergleich im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu berücksichtigen ist. Eine Freileitung ist vorübergehend ohne weitere Nachteile überlastbar. Die elektrischen Spannungen werden durch relativ große Abstände und durch ausreichend lange Isolatoren beherrscht, hierdurch bedingt führen Freileitungen zu größeren sichtbaren Bauwerken.

4.2 Kabel

Ein Kabel ist ein hochkomplexes System, bei dem auf kleinsten Distanzen hohe Potentialunterschiede sicher beherrscht werden müssen. Als Isoliermaterialien werden in der Regel organische Öle und Harze (Massekabel), Öl (Ölkabel) oder Kunststoffe (Kunststoffkabel) verwendet. Die Kabelisolation stellt nicht nur eine elektrische Isolation, sondern leider auch eine gute Wärmeisolation dar, dadurch kann die im Kabel entstehende Wärme weniger gut an die Umgebung abgegeben werden als bei einem Leiter in Luft, d. h. bei einer Freileitung. Die ständige Wärmezufuhr von einem Kabel in den umgebenden Erdboden führt zu einer

Verdrängung der Feuchtigkeit, der Boden trocknet aus, so dass dadurch ein Kabel thermisch überlastet und beschädigt werden kann und längere Zeit ausfällt. Tabelle 2 enthält die Isolationsabmessungen für Freileitungen und Kabel im Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz.

	Mittelspannung 20 kV	Hochspannung 110 kV	Höchstspannung 380 kV
Kabel	6 mm	18 mm	30 mm
Freileitung	180 mm	2000 mm	5000 mm

Tabelle 2: Vergleich der Isolationsabstände Kabel / Freileitung

Bild 2 zeigt ein 400-kV-VPE-Kunststoffkabel mit einem gewellten Aluminiummantel



Bild 2: Einadriges VPE-Kabel für 400 kV (Quelle VDEW Kabelhandbuch)

- | | |
|--|---|
| 1 mehrdrähtiger Segmentleiter aus Kupfer | 6 schwachleitendes Polstervlies |
| 2, 3 innere Leitschicht aus Bebänderung (2) und extrudierter Leitschicht (3) | 7 Gewebband mit eingewebten Kupferdrähten |
| 4 VPE-Isolierung | 8 gewellter Aluminiummantel |
| 5 äußere Leitschicht (extrudiert) | 9 Haftvermittler |
| | 10 Korrosionsschutz |
| | 11 PE-Mantel |

Aufgrund der bei 380-kV-Kabeln auch aus thermischen Gründen erforderlichen geringen Isolierwanddicke und der damit verbundenen großen Leiter-Erd-Kapazität (Faktor 20 gegenüber einer Freileitung) fließt ständig ein unvermeidbarer Strom (kapazitiver Ladestrom eines Kabels) über die Isolation zum geerdeten Kabelschirm bzw. zur Erde ab, schränkt die Übertragungsfähigkeit eines Kabels ein und bringt zusätzliche elektrische Verluste mit sich. Dieser Vorgang tritt im Übrigen immer

zwischen Teilen unterschiedlicher Wechsellspannungspotentiale auf. Bei Kabeln steigt der kapazitive Strom proportional mit der Kabellänge und mit der Übertragungsspannung an. Für eine Übertragung von 80% der Grenzübertragungsleistung eines 380-kV-Kunststoffkabels (VPE-Kabel) ergibt sich eine natürliche Längenbegrenzung des Kabels, die zwischen 25 und 35 km liegt. Größere Kabellängen sind nur mit zusätzlichen technischen Einrichtungen, Kompensationsspulen, möglich.

Derartige Einrichtungen, die in Bezug auf Ihre Größe mit Höchstspannungstransformatoren vergleichbar sind, müssen alle 25 bis 35 km an die Kabelanlage angeschlossen werden. Je nach der notwendigen Ausführung der Kabelanlage - als ausreichendes Übertragungsäquivalent für eine Freileitung - ergibt sich ein Flächenbedarf für die Kompensationsspulen sowie für die erforderlichen Zusatzeinrichtungen (z.B. Endverschlüsse, Überspannungsableiter) von einigen 1.000 m². Dies entspricht dem Flächenbedarf einer mittelgroßen 380-kV-Anlage. Bild 3 zeigt den Übergang von zwei 380-kV-Kabelsystemen auf eine 380-kV-Freileitungen einer Freiluftanlage im Bereich des Madrider Flughafens.



**Bild 3: Übergang von zwei 380-kV-VPE-Kabeln auf eine Freileitung;
Kabelendverschlüsse und Überspannungsableiter; Flughafen Madrid**

Außer VPE-Kunststoffkabeln gibt es auch ölpapierisolierte Kabel. Beim Einsatz derartiger Kabel sind die möglichen Übertragungstrecken deutlich kürzer als bei VPE-Kunststoffkabeln. Außerdem werden sie unter Umweltschutzgesichtspunkten für Neuanlagen nicht mehr eingesetzt (Grundwassergefährdung).

Kurze Kabelverbindungen von einigen 100 m Länge können sich aufgrund der jeweils vorliegenden Struktur des Gebietes oder auch aus Auflagen des Genehmigungsverfahrens ergeben.

Folgende Übergänge sind möglich:

Zwischenverkabelung: Freileitung / Kabel / Freileitung

Endverkabelung: Freileitung/ Kabel

Bei derartigen Mischanordnungen ergeben sich für die Kabel erhöhte Gefährdungen durch Überspannungen aufgrund nicht auszuschließender Blitzeinschläge bei einem Gewitter in den Freileitungsteil.

Um die Übertragungsfähigkeit einer 380-kV-Freileitung mit zwei Stromkreisen durch eine Zwischen- oder Endverkabelung zu gewährleisten, können pro Freileitungsstromkreis bis zu zwei parallele 380-kV-Kabelsysteme erforderlich sein. D.h. gegebenenfalls werden vier 380-kV-Kabelsysteme bestehend aus insgesamt zwölf Einleiterkabeln erforderlich.

An den Übergängen Freileitung / Kabel bzw. Kabel / Freileitung sind Übergangseinrichtungen - Endverschlüsse und Überspannungsableiter, zu installieren, die eine eingezäunte Freiluftanlage mit zusätzlicher Flächeninanspruchnahme und optischen Auswirkungen erforderlich machen.

3. Einsatzmöglichkeiten von Höchstspannungskabeln

Beim Einsatz von VPE-Kabeln mit einem Leiterquerschnitt von 2500 mm² Kupfer und direkter Erdverlegung mit thermisch stabiler Rückfüllung (Bettungsmaterial mit vergleichsweise niedrigem spezifischen Wärmewiderstand) wird diesen hier ein Übertragungsvermögen von 1000 MVA ohne zusätzlich Kühlung zugeordnet. Im Vergleich hierzu hat ein Freileitungsstromkreis mit einem Vierer-Bündel aus Aluminium-Stahl-Seilen 4 x 265/35 Al/St (Leiterquerschnitt 1060 mm² Aluminium) und einem gegenüber Kupfer geringeren Leitwert ein Übertragungsvermögen von 1800 MVA, also ein um 180 Prozent höheres Übertragsvermögen gegenüber dem oben genannten Kabel. Der Grund hierfür liegt in dem angesprochenen unterschiedlichen physikalischen Verhalten von Freileitungen und Kabeln, insbesondere in der wesentlich größeren Leiter-Erd-Kapazität eines Kabels, die die Übertragungsfähigkeit eines Kabels deutlich einschränkt. Tabelle 3 zeigt im Vergleich übersichtsmäßig Anhaltswerte das Übertragungsvermögen von 380-kV-Freileitungs- und Kabelstromkreisen (ohne besondere Kühlungstechnik).

maximales Übertragungsvermögen		
Anzahl der Stromkreise	380-kV-Freileitung 1060 mm ² Alu.	380-kV-VPE- Kabel 2500 mm ² Kupfer
1	1800 MVA	1000 MVA
2	3600 MVA	2000 MVA

Tabelle 3: Anhaltswerte für das maximale Übertragungsvermögen von 380-kV-Freileitungs- und 380-kV-VPE-Kabelstromkreisen, ohne besondere Kühlungstechnik

In Deutschland sind nur wenige Kilometer 380-kV-Kabel in Betrieb. Der Hauptanteil mit 15,7 km Ölkabel und 12,9 km VPE-Kabel entfällt dabei auf Berlin. Hinzu kommen noch einige 100 Meter im Bereich von Kavernenausleitungen bei Wasserkraftwerken. Darunter befindet sich auch das Schluchseewerk im Schwarzwald, das schon seit über 30 Jahren mit einer einige 100 m langen gasisolierten 380-kV-Rohrleiteranlage in Tunnelverlegung betrieben wird.

Weltweit sind einige 10 km 380-kV-Kabel als Öl- oder VPE-Kabel im Einsatz:, z.B.

Kopenhagen: 22 km und 14 km

Aalborg-Aarhus: drei Zwischenverkabelungen - 2,5 km, 4,5 km, 7 km -
im Zuge einer 140 km langen Verbindung

Tokio: zwei mal 40 km zur Querung Tokios, Verlegung in
Tunnelanlagen und auf Brückenbauwerken

Madrid: eine 380-kV-Freileitung, die am Rand des Madrider Flughafens
verlief, musste bei Erweiterungen durch zwei parallele 12,1 km
lange VPE-Kabel in Tunnelbauweise ersetzt werden

Bild 4 zeigt die entsprechende Tunnelanlage.



Bild 4: Tunnelanlage mit zwei 380-kV-VPE-Kabeln, Leiterquerschnitt: 2500 mm² Kupfer, im Bereich des Madrider Flughafens, Länge des Tunnels 12,1 km

London: zweimal 20 km in Tunnelbauweise vom Zentrum Londons in die Vorstadt

Middelsbrough - York (UK): Zwischenverkabelung auf einer Länge von 5,7 km im Zuge einer 70 km langen Verbindung

Bild 5 zeigt ein 380-kV-Kabel in Querschnittsansicht.

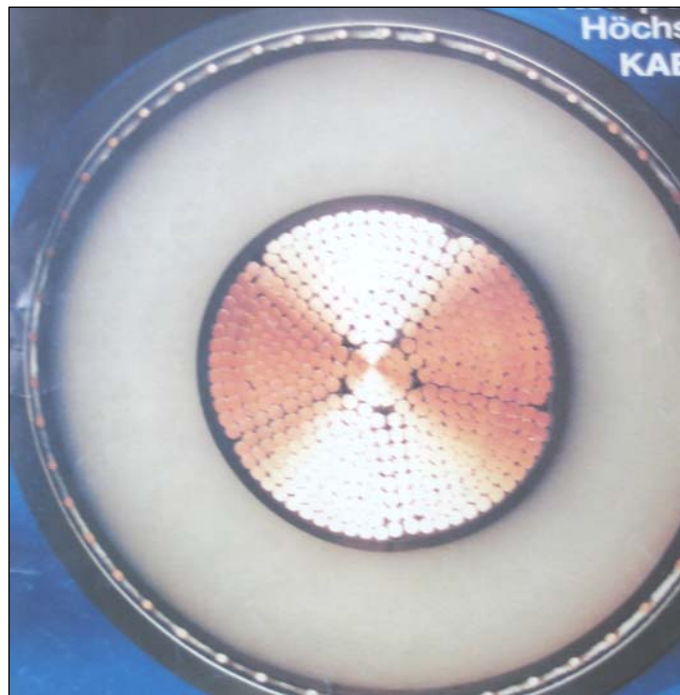


Bild 5: Querschnittsansicht eines 380-kV- VPE-Kabels (Quelle ABB)

4. Ausführungen und Trassen

Höchstspannungskabel können, je nach Leiterquerschnitt, nur in kurzen Längen von 600 bis 1000 m aufgewickelt auf Spezialspulen (Kabeltrommeln) mit Tiefladern transportiert werden. Das Gewicht eines derartigen Transportes liegt bei ca. 40 t oder auch mehr. Für z. B. 10 km Kabelstromkreislänge sind 30 km Einleiterkabel erforderlich, das würde 30 Schwertransporte vom Kabelwerk zu der jeweiligen 10 km langen Baustelle erforderlich machen.

4.1 Legung der Kabel im Erdboden

Sofern eine Legung von Kabeln außerhalb von städtischen Bereichen vorgesehen ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Kabel nicht nur in öffentlichen Strassen oder Wegen gelegt werden können, sondern überwiegend im Naturraum, vergleichbar mit der Legung einer Pipeline. Je nach Anzahl der erforderlichen

Kabelsysteme können dabei Trassenbreiten von 10 bis 15 Metern oder auch mehr mit einer Tiefe von 2 Metern erforderlich werden.

Derartige Trassen müssen dauerhaft frei von jeglicher Bebauung bleiben und von tiefwurzelnden Gehölzen freigehalten werden. Durch die Trasse sich ergebende Auswirkungen, also der Eingriff in Natur und Landschaft mit seinen Auswirkungen auf Flora, Fauna, Hydrologie und Bodenstruktur sind zu berücksichtigen.

In Abständen entsprechend den transportierbaren Einzellängen der Einleiterkabel (600m bis 1000m) müssen die Einleiterkabel mit Verbindungselementen (Muffen) verbunden werden, Bild 6.

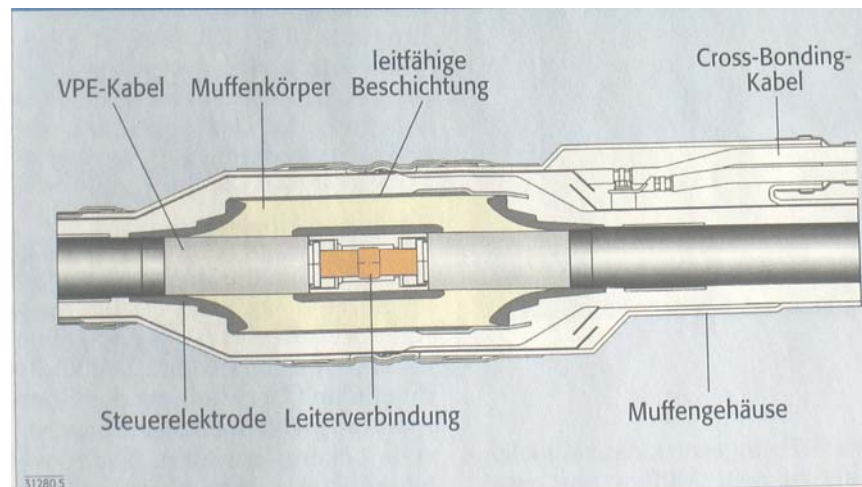


Bild 6: Aufschiebemuffe aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien Kautschuk) für 380 kV (Quelle Bewag Sonderdruck ew Nr.4981)

Die Muffen sind zur Vermeidung von mechanischen Beanspruchungen durch Dehnungen oder Stauchungen der Kabel aufgrund thermischer Effekte mechanisch zu fixieren. Hierzu sind je Kabelsystem Muffenbauwerke aus Beton, die etwa 10m lang, 3m breit und 1m tief sind, als Unterflurbauwerke in den Boden einzubringen. Nach jeweils 2 bis 3 Muffenabständen ist zur Verringerung von Kabelverlusten eine Verschaltung der metallenen Kabelmäntel (Cross-Bonding) in oberirdischen Schaltschranken, die Kontrollzwecken dienen, vorzusehen.

Der Eingriff in Grund und Boden ist gegenüber dem Eingriff durch eine Freileitung ganz erheblich und nachhaltig.

4.2 Legung der Kabel in Tunnelanlagen

Bei der Legung von 380-kV-Kabeln in Großstädten kann aus verschiedenen Gründen eine Tunnelbauweise vorteilhafter sein als eine offene Grabenbauweise. Dies war z. B. in Berlin der Fall, hier wurden für zwei 380-kV-Kabelsysteme zwei Tunnelverbindungen mit entsprechenden Schachtbauwerken in Tiefen von 35 m bis 16 m realisiert. Die Tunnel wurden im bergmännischen Vortrieb mit

Vollschnittmaschinen realisiert. Der Tunnel hat einen Außendurchmesser von 3,60m und einen Innendurchmesser von 3,00 m.

Für Die Tunnelanlage in Madrid ist ein Rechteckprofil gewählt worden, siehe Bild 4. Hier wurde der Tunnel weitgehend in offener Bauweise errichtet, da die Trasse vorwiegend durch unbebautes Gebiet im Randbereich des Madrider Flughafens verläuft. Bild 7 zeigt die Tunnelanlage in offener Bauweise.



Bild 7: 380-kV-Tunnelanlage in offener Bauweise; Flughafen Madrid

In Bild 8 ist eine Muffe in dem Tunnelbauwerk dargestellt.



Bild 8: 380-kV- Tunnelbauwerk mit Kabelmuffe; Flughafen Madrid

5. Betriebsverhalten und Lebensdauer

Bei den heute überwiegend eingesetzten 380-kV-VPE-Kabeln ist der Isolierstoff hohen Beanspruchungen - thermisch, mechanisch und elektrisch - ausgesetzt. Derartige Beanspruchungen führen zur Alterung des Isolierstoffes und damit zur Begrenzung der Lebensdauer des Kabels. Mit zunehmender Länge einer Kabelanlage steigt auch die Anzahl der Muffen und da diese als Schwachstelle innerhalb einer Kabelstrecke einzustufen sind, steigt auch hierdurch noch das Ausfallrisiko.

Weltweit sind keine statistisch belastbaren Unterlagen über das Betriebsverhalten von 380-kV-Kunststoffkabeln verfügbar, ebenso liegen keine ausreichenden Erfahrungen zur Lebensdauer vor. Man geht daher wie bei 110-kV-VPE-Kabeln auch für 380-kV-VPE-Kabel von einer Lebensdauer von 40 Jahren aus.

Freileitungen erreichen eine Lebensdauer von 80 Jahren oder auch mehr. Außerdem können bei Freileitungen im Gegensatz zum Kabel ohne großen Aufwand Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer durchgeführt werden.

6. Gasisolierte Leitungen (GIL)

Gasisolierte Leitungen weisen ein ähnliches Übertragungsvermögen wie Freileitungen auf. Eine GIL besteht aus starren Aluminiumrohren, die vor Ort zusammengeschweißt werden. Die Hauptleiter werden in den Aluminiumrohren auf isolierenden Abstandshaltern geführt. Als Isoliermedium wird eine Gasmischung aus Schwefelhexafluorid und Stickstoff bei einem Betriebsdruck von 7 bar verwendet.

Die einzelnen Rohrabschnitte werden über spezielle GIL-Bausteine miteinander verbunden und können nur mit sehr großen Biegeradien für Richtungs- und Höhenänderungen gelegt werden. In Abständen von ca. 1.000 m müssen GIL zur Trennung der Gasräume geschottet werden.

Hierzu sind Unterflurbauwerke (12,00 m x 4,00 m x 2,50 m) mit Einstiegsschacht erforderlich. Der Außendurchmesser von einpoligen Rohrleitern ist mit rd. 0,50 m ca. 3 bis 4 mal größer als der von VPE-Kabeln.

Die Trassenbreite eines GIL-Systems beträgt bei Erdverlegung ca. 10 m bei einer Tiefe zwischen 2,00 m bis 3,00 m. Die GIL-Technik ist bisher nur für kurze Strecken und vorwiegend in Tunnelanlagen bzw. aufgeständert eingesetzt worden. Betriebserfahrungen mit erdverlegten Anlagen liegen weltweit nicht vor.

Für die Lebensdauer einer GIL wird von mehr als 40 Jahren ausgegangen.

7. Kosten

Die Kosten für Freileitungen, Kabel und GIL werden durch die Rohstoffpreise und den Fertigungsaufwand bestimmt. Der Fertigungsaufwand für Freileitungen ist um Größenordnungen geringer als bei Kabeln und GIL.

Für die Errichtung und den Betrieb einer Anlage ergeben sich verschiedene Kostenblöcke: Investitionskosten, Finanzierungskosten, Verlustkosten der Energieübertragung sowie Unterhaltungskosten. Erst die Bewertung dieser Kosten in ihrer Gesamtheit ermöglicht unter Berücksichtigung der jeweiligen Lebensdauer eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit.

Die Investitionskosten sowohl einer Freileitung als auch einer GIL- oder Kabelanlage hängen stark von den technischen Randbedingungen und den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten ab, z. B.

- Leitungslänge
- zu übertragende Leistung und Netzsicherheit
- einzusetzende Technologie
- Geländestruktur
- Grundwassersituation
- Dükerung oder Tunnelbauten
- Kreuzungen

Die nachstehende Tabelle 4 enthält nur Richtwerte der Investitionskosten für die Kostenrelation Freileitung/Kabel sowie Freileitung/GIL, die auf internationalen und nationalen Erkenntnissen basieren.

Anzahl der Stromkreise			Kostenrelation	
Freileitung	Kabel	GIL	Freileitung/ Kabel	Freileitung/ GIL
2	2	2	1:4 bis 1:7	ca. 1:12
2	3		1:6 bis 1:10	
2	4		1:8 bis 1:13	

Tabelle 4: Richtwerte der Investitionskosten einer 380-kV-Freileitung im Vergleich zu einer 380-kV-Kabel- bzw. 380-kV-GIL-Anlage

Für die Errichtung einer 380-kV-Freileitung mit zwei Stromkreisen in 4er Bündelbeseilung ist im Normalfall von 700 bis 800 T € **Investitionskosten** je Kilometer Leitungslänge auszugehen.

Die **Finanzierungskosten** beinhalten als wesentlichen Bestandteil die für die Investition einzusetzenden Zinsen für die Eigen- und Fremdkapitalgeber.

Die **Verlustkosten** entstehen durch den Betrieb der jeweiligen Leitung, sie sind spannungs- und stromabhängig. Die spannungsabhängigen Verluste fallen ständig an, die stromabhängigen Verluste werden durch die zu übertragende Menge an elektrischer Energie bestimmt. Die Verlustkosten von Kabeln sind im Vergleich zu Freileitungen aufgrund der in der Regel günstigeren Leiterquerschnitte wesentlich geringer (Faktor 2 bis 3)

Die höheren Verlustkosten einer Freileitung führen im Betrachtungszeitraum (hier 40 Jahre) gegenüber einem Kabel bzw. einem gasisolierten Leiter zu einem relativ stärkeren Anstieg der Gesamtkosten einer Freileitung. Hierdurch verschiebt sich während des Betrachtungszeitraumes auch die Kostenrelation Freileitung/Kabel zu Gunsten eines Kabels (z.B. Faktor 1:2 oder einer GIL (z.B. Faktor 1:5) am Ende der Betrachtungsdauer.

Unterhaltungskosten sind im Vergleich zu den anderen Kostenfaktoren vernachlässigbar.

Die absolute Kostendifferenz Freileitung/Kabel oder GIL vergrößert sich allerdings vom Beginn des Betrachtungszeitraumes. Diese Kostendifferenz ist jedoch letztendlich für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Investition maßgebend. Bild 9 zeigt an einem Beispiel für eine 10 km lange Leitung im Vergleich die Kostensituation für einen Zeitraum von 40 Jahren.

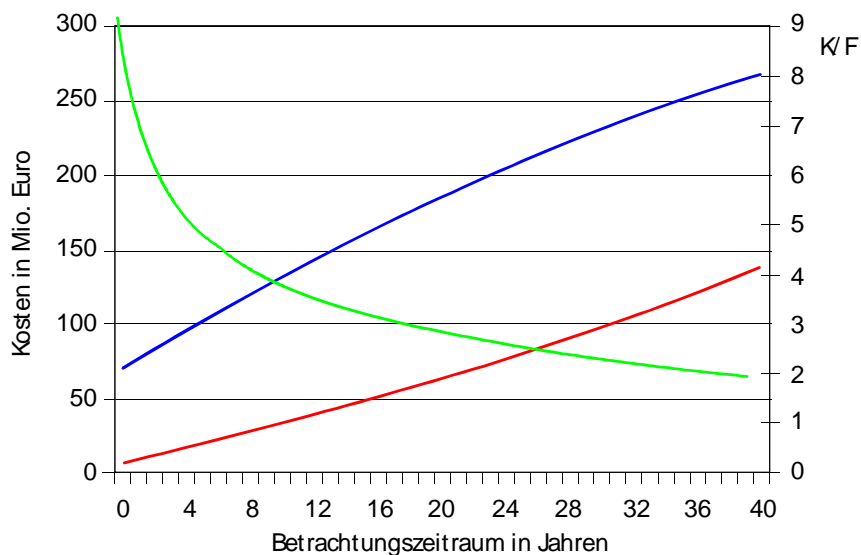


Bild 9: Beispiel Kostenvergleich einer 10 km langen zweisystemigen 380-kV-Freileitung mit einer dreisystemigen 380-kV-VPE-Kabelanlage

- Kostenrelation Kabel / Freileitung
- kumulierte Kosten Kabel — kumulierte Kosten Freileitung

8. Zusammenfassung, Resümee und Ausblick

Die Notwendigkeit von erheblichen Netzausbauten insbesondere in den 380-kV-Übertragungsnetzen ist im wesentlichen auf die Liberalisierung des Strommarktes, den forcierten Ausbau der Windenergieanlagen und die damit einhergehende Abnahmepflicht von erneuerbar erzeugten Strom zurückzuführen. Hinzu kommen Forderungen nach zusätzlichen Leitungen zur Verdichtung des europäischen Verbundnetzes, dies immer dann, wenn Netzstörungen mit europaweiter Auswirkung aufgetreten sind wie z.B. bei der Ausfahrt eines Kreuzfahrtschiffes von der Meyer Werft auf der Ems zur Nordsee vor ca. einem Jahr.

Für den Einsatz von Kabeln müssen sehr deutlich differenzierte Betrachtungen für die einzelnen Spannungsebenen in Bezug auf Machbarkeit, Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit angestellt werden.

Mit zunehmender Spannungshöhe ausgehend von Niederspannung mit 230 Volt bis hin zur Höchstspannung mit 380.000 Volt steigen die physikalischen und technischen Probleme für einen Einsatz von Kabeln insbesondere wegen der technologisch bedingten vergleichsweise dünnen Stärke der Isolationsschichten der Hoch-Höchstspannungskabel überproportional an. Dies spiegelt sich auch in den Kabelanteilen der jeweiligen Netze wieder

- Hoch- und Höchstspannung rd. 4% Kabelanteil
- Mittel- und Niederspannung rd. 80% Kabelanteil.

Der Forderung nach Verkabelung auch im Höchstspannungsbereich hat ihre Ursache häufig in einer unzureichenden und verspäteten Projektkommunikation gegenüber kommunalen Gremien der betroffenen Kommunen und der allgemeinen Öffentlichkeit und hier insbesondere gegenüber den betroffenen Grundeigentümern.

Der Einsatz von Kabelverbindungen im ländlichen Raum macht einen durchgängigen und flächigen Eingriff in den Boden erforderlich. Die Trasse ist dauerhaft freizuhalten - keine Bebauung, keine tiefwurzelnden Pflanzen. Eine Vielzahl von Kabelmuffen in speziellen Muffenbauwerken aus Beton ist in der Trasse einzubringen. Muffen stellen einen deutlichen Schwachpunkt für eine Kabelverbindung dar. Tabelle 5 zeigt eine vergleichende Gegenüberstellung der wesentlichen in diesem Beitrag angesprochenen Gesichtspunkte einer Freileitungs- und einer VPE-Kabelverbindung.

Kriterium	Freileitung	Kabel
Einfachheit des Systems	+	-
Isolation, elektrische Festigkeit	+	-
Belastbarkeit (Überlast)	+	-
Verluste	-	+
Eingriff in den Boden	+	-
Eingriff in das Landschaftsbild	-	+
Lebensdauer	+	-
Betriebserfahrung	+	-
Verfügbarkeit	+	+
Ausfalldauer	+	-
Investitionskosten	+	-
Gesamtwirtschaftlichkeit	+	-

Tabelle 5: Gegenüberstellung wichtiger Merkmale von 380-kV-Kabeln und 380-kV-Freileitungen

+ Vorteil - Nachteil

Die Gegenüberstellung in Tabelle 5 zeigt, dass bei einer Freileitungslösung zwei Nachteile zum Tragen kommen, nämlich höhere Verluste sowie Eingriff in das

Landschaftsbild. Dabei ist letzteres, also die Sichtbarkeit einer Freileitung, der größere und häufig emotional sehr viel höher belegte Aspekt.

Demgegenüber ist der visuelle Eingriff durch eine Kabeltrasse in das Landschaftsbild gering, wenn von der von Bebauung und von tiefwurzelndem Bewuchs (Bäume und Sträucher) frei zu haltenden Trasse abgesehen wird.

Wie hierzu schon in Kapitel 3 ausgeführt wird der Grad der visuellen Beeinträchtigung einer Landschaft durch eine technische Einrichtung von den Betrachtern und insbesondere von den Betroffenen oft sehr unterschiedlich bewertet.

Die aufkommenden Diskussionen zu Großprojekten gleich welcher Art sind häufig wegen mangelhafter Projektkommunikation sehr stark emotionalisiert. Zur Versachlichung der Diskussion und zur Vermeidung einer Eskalation ist bei Großvorhaben unbedingt eine Strategie der Projektkommunikation mit folgenden Merkmalen erforderlich.

Die Information zum Projekt muss

- frühzeitig, offen und nach vorn gerichtet erfolgen
- Vertrauen in die Kompetenz des Projektträgers schaffen
- zielgruppengerecht zur Verfügung stehen
- Basis für eine möglichst emotionsfreie Diskussion sein

Offene und ehrliche Kommunikation ist der Strategie "keine schlafenden Hunde wecken" deutlich überlegen.

Kommunikative Offenheit bedeutet ...

- aufeinander zugehen, Verständnis und Verstehen zeigen
- die Sprache des jeweils anderen sprechen
- Systemzwänge des jeweils anderen kennen und anerkennen

... und muss an die Umfeldveränderungen angepasst werden

- veränderte rechtliche Rahmenbedingungen
- allgemein kritische Haltung gegenüber Projekten und damit insbesondere Schwierigkeiten bei Großprojekten
- erhöhtes Informationsbedürfnis der Bevölkerung
- verändertes Medienumfeld (z.B. Medienvielfalt, Schnelligkeit → Internet)