

# Übertragung elektrischer Energie- Drehstrom/Gleichstrom, Leitungssysteme

Michael MUHR

## 1. Einleitung

Im Zuge der Energiewende und des immer stärker werdenden Ausbaus erneuerbarer Energie hat sich das Szenario der Energieerzeugung wesentlich verändert. Wurden früher Kraftwerke in der Nähe von großen Verbrauchszentren gebaut, so werden nun diese Erzeugungseinheiten in Gegenden errichtet, in der die erneuerbare Energie (Sonne, Wind) am wirkungsvollsten vorhanden ist. Dabei ist zu beachten, dass Sonne und Wind meist weiter außerhalb der Bereiche eines größeren Energiebedarfs liegen. Betrachtet man mögliche Ausbaupläne für Sonne- und Windkraftanlagen, so sieht man, dass diese entweder im Süden oder in Küstennähe liegen (Abb.1)

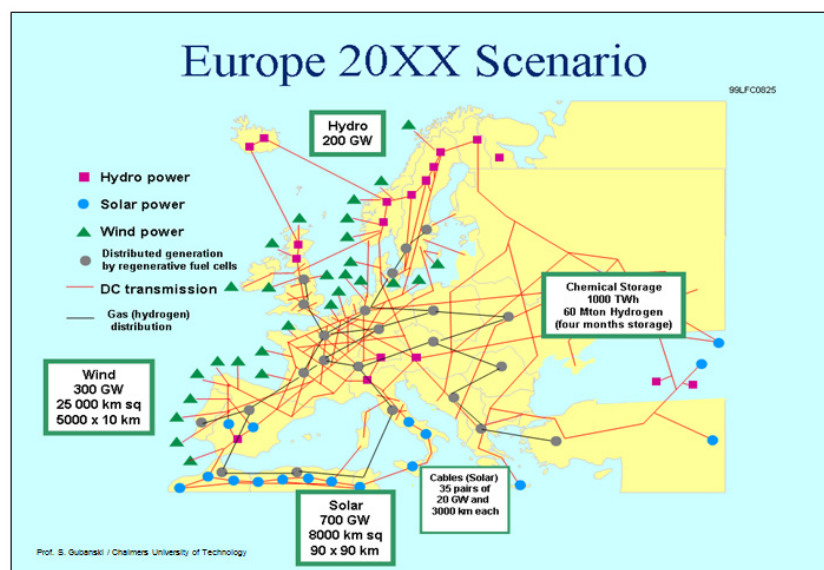


Abb.1:Europe 20XX Szenario

## 2. Übertragungssysteme

Dies alles führt zu Überlegungen, mit welchem System (Drehstrom oder Gleichstrom) eine bessere Übertragung größerer Energiemengen über weite Entfernungen möglich ist. Die Umwandlung primärer Energiequellen (Wasser, fossile Brennstoffe, Wind usw.) in elektrische Energie erfolgt durch Generatoren, die im

Drehstromsystem arbeiten. Daher ist das derzeit in Europa größtenteils verwendete System der Übertragung elektrischer Energie ein Drehstromsystem, das eine wirtschaftliche und einfache Energieübertragung ergibt. Die Übertragung elektrischer Energie wird in mehreren Ebenen durchgeführt, das ab einer Spannungsebene von 220kV geführt wird und für den überregionalen und internationalen Transport elektrischer Energie zuständig ist. Vorteile dieses Systems sind die einfache und schnelle Transformierbarkeit der Spannungsebenen sowie das leichtere Abschalten. Nachteile sind, dass Blindleistung übertragen und kompensiert werden muss, es zu Stabilitätsproblemen kommen kann und bei sehr langen Leitungen Spannungsdifferenzen auftreten. Verluste in diesem System ergeben sich durch: Leitungsverluste, Skin-Effekt, Korona-Verluste.

Eine Erhöhung der Leistung kann entweder durch eine Spannungserhöhung oder durch eine Verkleinerung des Leitungswiderstandes erfolgen. Die Veränderung des Leitungswiderstandes kann mittels neuer Technologien oder Leiter mit größerer Temperaturbelastung erfolgen, deshalb wird meist die Spannung erhöht (UHV Bereich – Spannungen bis 1200kV oder höher). Weitere Leistungserhöhungen im Drehstromsystem werden mittels Phasenschiebertransformatoren, FACTS oder durch eine Optimierung des Lastflusses mittels Leitungs-Monitoring durchgeführt.

Aufgrund von Erfahrungen in China mit der Gleichstromübertragung wird nun auch auf die Einführung dieses Systems in Europa gedacht. Dieses System eignet sich vor allem für die Übertragung hoher elektrischer Leistung über lange Entfernungen, als Seekabelverbindung und als Kupplung von Netzen unterschiedlicher Frequenz. Vorteile dabei sind vor allem: Keine kapazitiven Ladeströme, höhere Flexibilität und Regelbarkeit, keine Stabilitätsprobleme, kein induktiver Spannungsabfall und kein Skin-Effekt. Als Nachteile sind zu nennen: zusätzliche Kosten für die Konverter-Stationen und Filter, teure Leistungsschalter sowie geringe Überlastbarkeit.

Die begrenzenden Elemente dabei sind die Übertragungsleitungen sowie die Konverter-Stationen. Verluste ergeben sich durch die Leitungsverluste, durch die Verluste in den Konverter-Stationen sowie durch Korona-Verluste.

Da durch die derzeitige Entwicklung der Energieerzeugung große Mengen elektrischer Energie zu transportieren sind, werden dazu viele Überlegungen angestellt (Abb.2, Abb.3), wie man dies verwirklichen könnte.

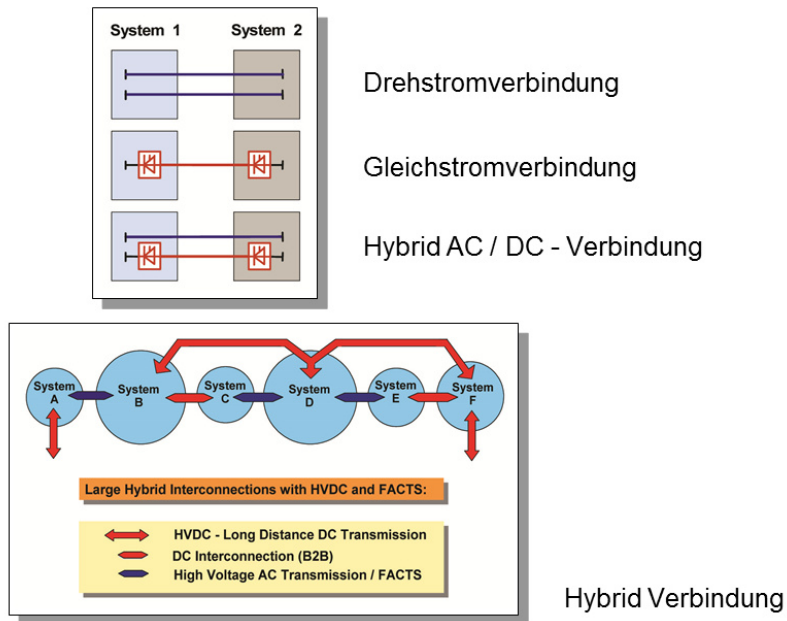


Abb.2: Möglichkeiten von Übertragungssystemen hoher Leistung

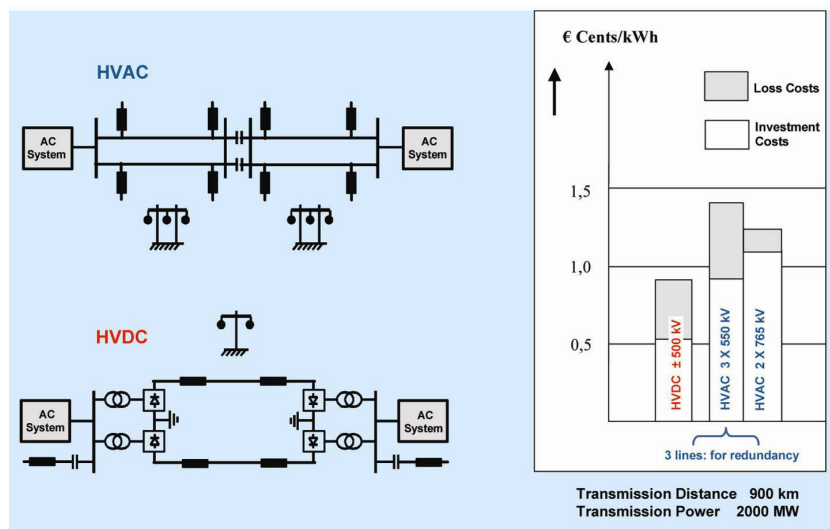


Abb.3: Zukünftige Entwicklung

Neben diesen Überlegungen ist auch eine Erhöhung des Spannungsebenen vorgesehen. So existieren in China schon Drehstromsysteme bis 1000kV und Gleichspannungssysteme bis 800kV. Die Entwicklung der Spannungsebenen ist in Abb.4 dargestellt.

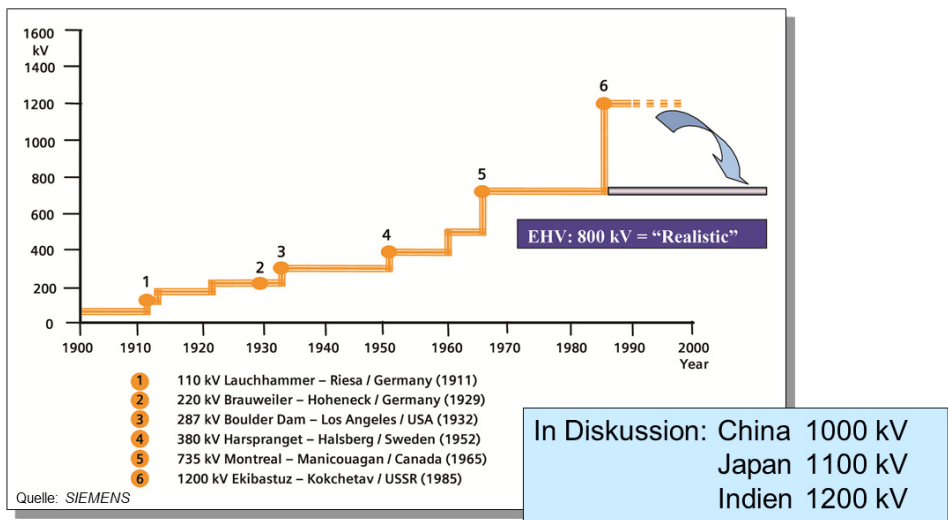


Abb.4: Entwicklung der Spannungsebenen im Drehstromsystem

Tabelle 1 gibt einen Vergleich zwischen Drehstrom- und Gleichstromsystem.

<b>Parameter</b>	<b>380 kV AC</b>	<b>1000 kV AC</b>	<b>±800 kV DC</b>
Power to be transmitted $P$ in MW		<b>7000</b>	
Length of the line $l$ in km		<b>600</b>	
Amount of necessary transmission systems $n$	<b>10</b>	2	<b>1</b>
Transmitted power per system $P_S$ in MW	<b>700</b>	3500	<b>7000</b>
Total compensation power $Q_k$ in MVar	~ -3900	~ <b>5340</b>	-
Necessary amount of stations	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
Necessary amount of transformers	<b>20</b>	24	<b>48</b>
Weight of one bundle conductor $G'$ in kg/m	<b>6,581</b>	13,271	<b>14,312</b>
Corridor utilization factor $T_\eta$ in MW/m	<b>33,33</b>	50,72	<b>129,63</b>
Total amount of towers for the entire corridor	<b>7500</b>	2400	<b>1091</b>
Total transmission losses for the entire corridor in MW	<b>367,1</b>	138,44	<b>76,94</b>
Transmission loss ratio compared to P	<b>5,24 %</b>	1,98 %	<b>1,1 %</b>
Total width of the corridor including security zone	<b>210</b>	138	<b>54</b>

Tab.1: Vergleich zwischen Drehstrom- und Gleichstromsystem

### 3. Leitungssysteme

Dies alles ist zu beachten, wenn man neue Übertragungssysteme errichten soll, um größere Mengen aus erneuerbarer Energie über weite Strecken zu transportieren. Eine weitere Frage betrifft das Leitungssystem. Derzeit gibt es für den Drehstrom drei mögliche Systeme: die Freileitung, das Erdkabel sowie die gasisolierte Leitung (GIL),

wobei alle drei Systeme ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben. Für das Drehstromsystem werden alle drei Möglichkeiten eingesetzt, wobei Freileitungen bis 1MV, Kabel bis 500kV und GIL bis 550kV betrieben werden. Für die Gleichstromübertragung werden Freileitungen bis 800kV, Öl-Papier-Kabel bis 500kV und Kunststoffkabel derzeit bis etwa 400kV eingesetzt. Für die GIL sind derzeit Untersuchungen und Entwicklungen im Gange, wie weit und ob ein Einsatz möglich ist. Zur besseren Beurteilung dieser Leitungssysteme sollen diese nun kurz beschrieben werden.

Die Freileitung ist das am längsten und am weitesten verbreitete System zur Energieübertragung. Als Isoliermittel dient Luft und durch genügend große Abstände ist auch die Beherrschung hoher Spannungen relativ einfach. Durch die mechanische Festigkeit des Leiterseiles wird die zulässige Leitertemperatur bestimmt, denn durch zu hohe Temperaturen und durch die Alterung dehnt sich das Leiterseil aus und der Durchhang wird größer, was zu Sicherheitsproblemen führen kann. Durch eine messtechnische Evaluierung sowie durch Berechnungsverfahren kann diese Aufgabe bewältigt werden. Die Vorteile der Freileitung sind die sehr lange Betriebserfahrung, der einfache Aufbau, eine lange Lebensdauer, eine relativ einfache und schnelle Reparatur, die geringste Nichtverfügbarkeit sowie die hohe Belastbarkeit. Nachteile sind die Sichtbarkeit (der größte Störfaktor), hohe Verluste, das Auftreten von Geräuschen (Korona) sowie die Beeinflussung durch die elektromagnetischen Felder. Durch größere Abstände sowie eine entsprechende Anordnung können diese Felder vermindert werden.

Im Hochspannungskabel werden als Isolierstoff entweder Kunststoff oder Papier getränkt mit einer Isolierflüssigkeit verwendet. Vorteil dieses Systems ist die hohe Belastbarkeit, die geringere Fehlerrate, der geringere Impedanz-Belag sowie die Abschirmung des elektrischen Feldes durch den äußeren Metallmantel des Kabels. In Abb.5 ist ein Hochspannungskabel dargestellt.

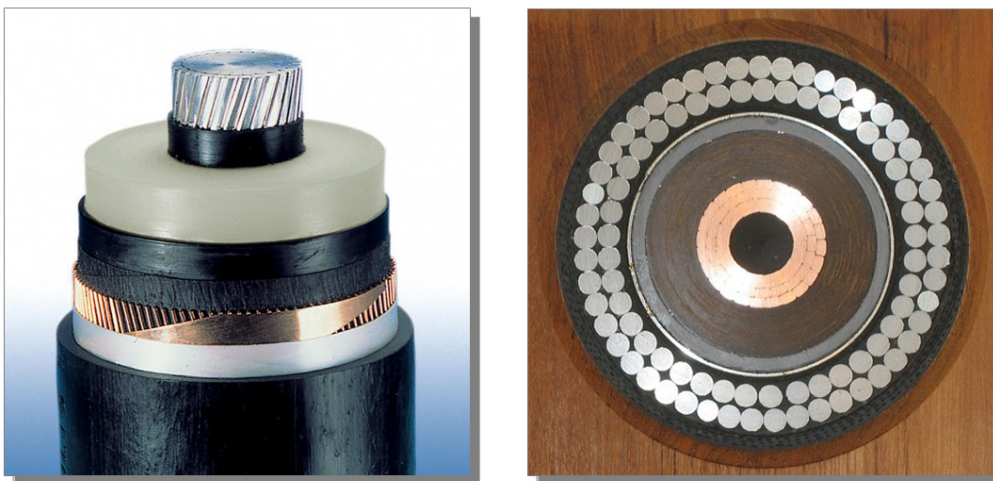


Abb.5: Hochspannungskabel

Nachteile sind die sehr hohen Anforderungen an die Kunststoffisolierung und die Wasserdichtigkeit, eine deutlich höhere Nichtverfügbarkeit sowie eine kürzere Lebensdauer. Auch haben große Überlastungen Einfluss auf die Lebensdauer der Kabel. Zudem besitzen Kabel eine höhere Kapazität, daher ist für sie mehr Kompensation (Reduktion des kapazitiven Stromes) notwendig. Die Trassennutzung ist stark eingeschränkt und die magnetische Feldstärke ist höher, wenn man nicht Vorkehrungen trifft. Auch die Verlegung von Hochspannungskabel ist aufwendig, speziell wenn man die Wärmeentwicklung in Betracht zieht (Abb.6).

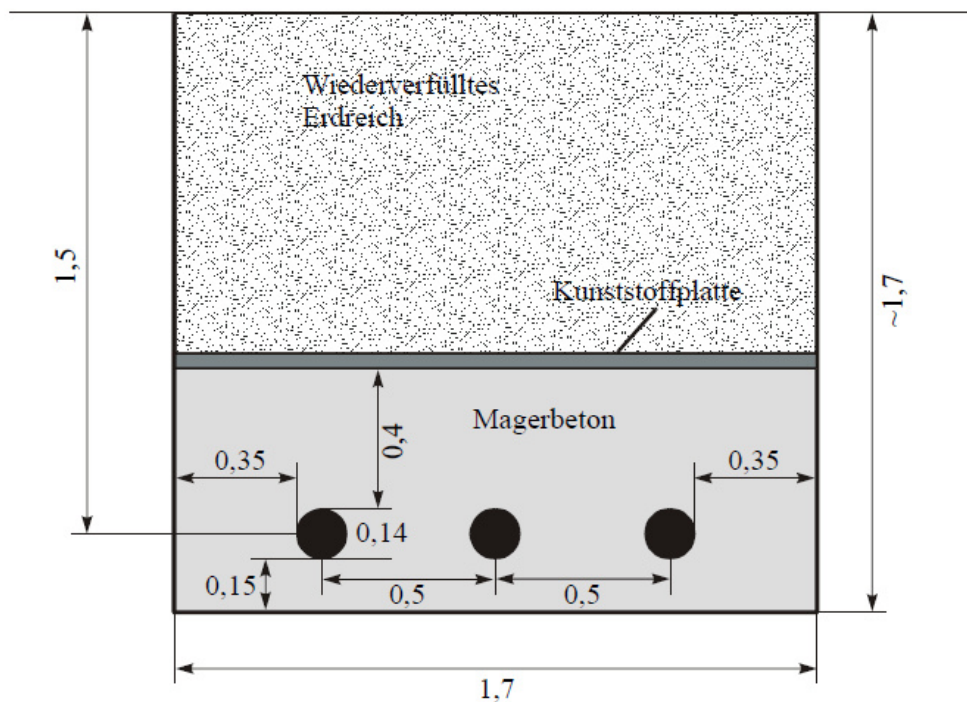


Abb.6: Kabelverlegung

Eine wesentliche Rolle bei der Kabelverlegung spielen die Kabelmuffen (Abb.7) als Verbindungselemente zwischen den einzelnen Kabellängen. Da je nach Spannungshöhe und Leistung die Kabel auf Trommeln mit einer Länge zwischen 600m und 1500m geliefert werden, müssen diese mittels Muffen verbunden werden, wobei diese bei höheren Spannungen in Bauten zu verlegen sind.

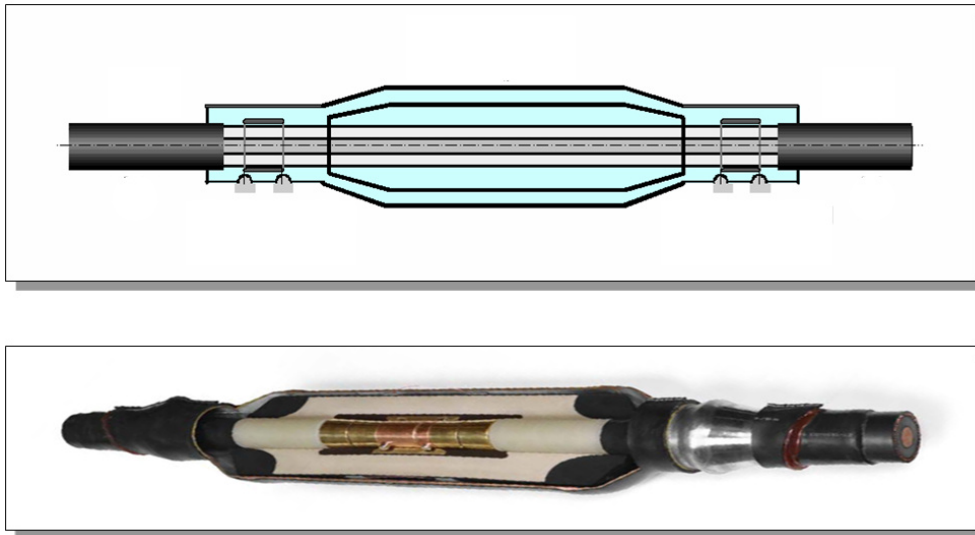


Abb.7: Kabelmuffen

Das letzte System, das bis jetzt noch am wenigsten eingesetzt wird, ist die gasisolierte Leitung (GIL). Derzeit wird eine GIL nur für kürzere Strecken in Tunnels oder in offener Bauweise eingesetzt. Die großen Vorteile der GIL sind die sehr hohe Leistungsübertragung, die große Belastbarkeit, die niedrigsten Werte für elektromagnetische Felder sowie fast keine Alterung. Der größte Nachteil bis jetzt ist das verwendete Gas ( $\text{SF}_6$ ) aufgrund seines hohen Treibhauseffektes. Weitere Nachteile sind die hohe Nichtverfügbarkeit im Schadensfall, die großen Anforderungen an die Reinheit des Gases und die Gasdichtigkeit sowie die geringe Betriebserfahrung. Zudem spielen die hohe Nichtverfügbarkeit sowie die Überwachung eine wichtige Rolle. In Abb.8 ist eine GIL im Querschnitt dargestellt.

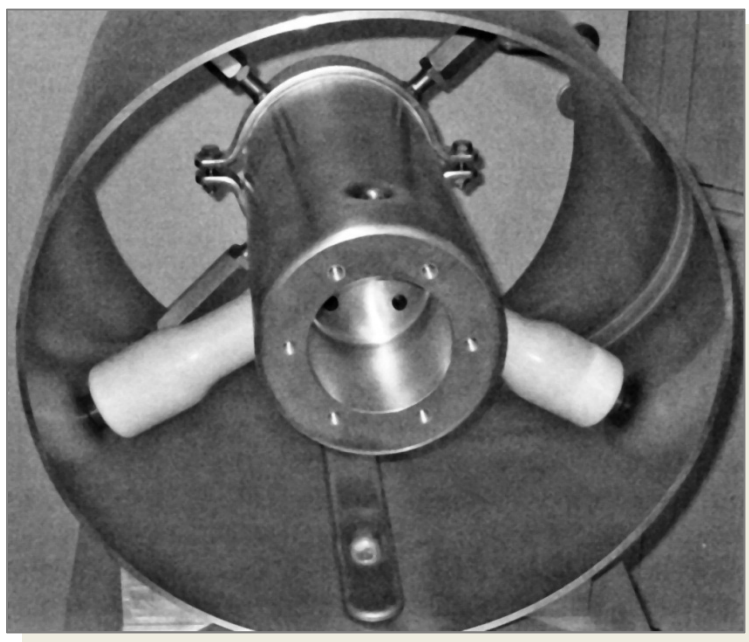


Abb.8: GIL

Die Verlegung einer GIL für längere Entfernungen sollte wie bei Kabel in der Erde sein (Abb.9).

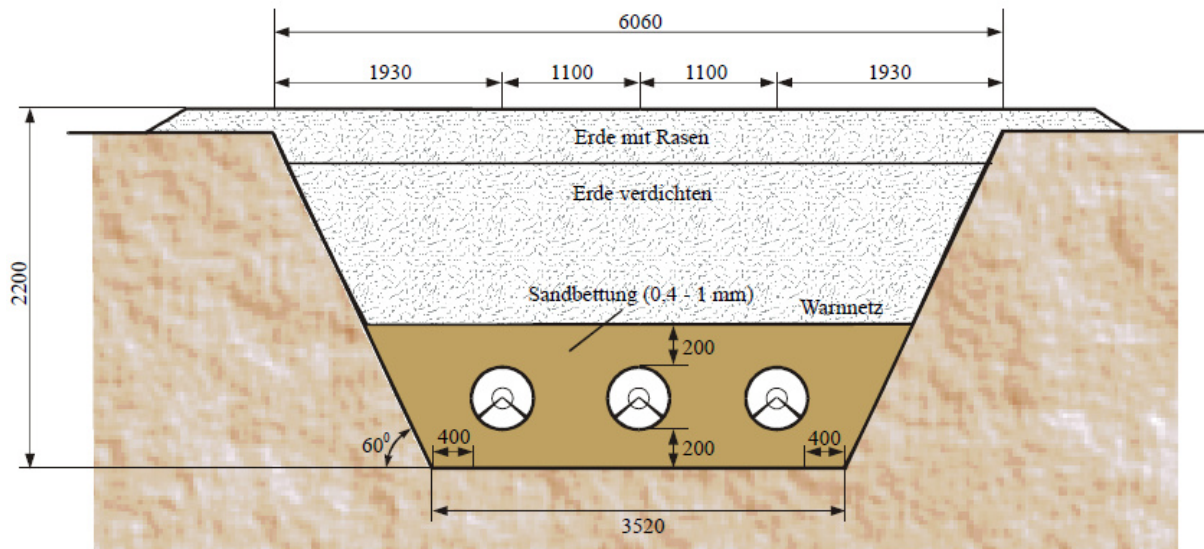


Abb.9: Erdverlegung einer GIL

#### 4. Vergleich der Leitungssysteme

In diesem Teil sind Tabellen angegeben, die einen Vergleich der verschiedenen Leitungssysteme aufzeigen, wobei grundlegende Systemeigenschaften behandelt werden.

	<b>FL</b>	<b>Kabel</b>	<b>GIL</b>
Verlegung	oberirdisch	unterirdisch (eingegraben oder in Schächten)	unterirdisch (eingegraben oder in Schächten)
Anzahl der Blindleistungs- kompensationseinrichtungen	wenig	viel	mittel
Betrieb bei Nennlast <sup>1</sup>	UNB und ÜNB	UNB	UNB
Hauptisolationsmaterial	Luft Isolatoren	Kunststoffe (VPE, etc.) oder imprägniertes Papier	Gasgemisch Isolatoren
<i>Hauptsächlich verwendetes Leitermaterial</i>	Stahl/Aluminium	Kupfer Aluminium	Aluminium
<i>Notwendige Erdbewegungen</i>	kaum	groß	groß
<i>Trassennutzungsgrad</i> <sup>2</sup>	mittel	hoch	hoch

Tab. 2: Systemvergleich 1



	<b>FL</b>	<b>Kabel</b>	<b>GIL</b>
Übertragungsleistung pro System <sup>3</sup>	AC: bis ~ 1,5 GVA DC: bis ~ 2 GVA	AC: bis ~ 1 GVA DC: bis ~ 1,5 GVA	AC: bis ~ 2 GVA DC: bis ~ 4 GVA
Einhaltung von Grenzwerten <sup>4</sup>	ununterbrochene Einhaltung nur mit großem Aufwand zu erfüllen	ununterbrochene Einhaltung nur mit großem Aufwand zu erfüllen	bei einer in Erde verlegten GIL ist die Einhaltung in der Regel gegeben
Erforderlicher Flächenbedarf	groß	gering	gering
Beeinträchtigung des Landschaftsbildes	stark	gering	gering
Akustische Wahrnehmbarkeit	durch Korona und Luftschwingungen möglich	nein	nein
Wartung	Trassenfreihaltung, IH <sup>1</sup> von Masten und Seilen	keine (eventuell Muffen und Ölanlage bei Ölkabeln)	Korrosionsschutz überprüfen, Gasdruckanlage

Tab. 3: Systemvergleich 2

	<b>FL</b>	<b>Kabel</b>	<b>GIL</b>
Lebensdauer <sup>2</sup>	lange	mittel	mittel
Sicherheitsrisiko für Mensch und Tier	Bruch, herabfallen von Komponenten bzw. Eislasten	kaum	kaum (eventuell bei Austreten großer SF <sub>6</sub> Gasmengen)
Umweltrisiko	keines	kaum (eventuell bei Brand eines Kunststoffkabels und Erwärmung des Erdreiches)	durch austretendes SF <sub>6</sub>
Mögliche Ausfallsursachen	atmosphärische Entladungen, Mast- oder Isolatorbruch, Versagen von Armaturen, Wind- und Eislasten, Verschmutzung von Isolatoren	Beschädigung durch Bauarbeiten, Brand, Versagen von Muffen, Durchschlag der Isolation, Empfindlichkeit gegenüber Erdbeben, etc.	Beschädigung durch Bauarbeiten, Versagen von Ventilen, Empfindlichkeit gegenüber Erdbeben, etc.

Tab. 4: Systemvergleich 3

	<b>FL</b>	<b>Kabel</b>	<b>GIL</b>
<i>Durchschnittliche Ausfalldauer im Fehlerfall</i>	klein	groß	keine Angabe
<i>Empfindlichkeit gegenüber atmosphärischen Umgebungsbedingungen</i>	groß (z.B. Blitzschlag, Eis- und Windlast, etc. )	gering	gering
<i>Errichtungskosten</i> <sup>3</sup>	niedrig	hoch	hoch

<sup>1</sup> ÜNB steht für übernatürlichen Betrieb und UNB für unternatürlichen Betrieb

<sup>2</sup>  $T_n$ =übertragbare Leistung/Trassenbreite

<sup>3</sup> Werte bezogen auf die bis dato als Stand der Technik geltenden maximalen Spannungsebenen für die jeweiligen Übertragungsmedien

<sup>4</sup> Als Basis wurden die internationalen Empfehlungen von ICNIRP herangezogen

Tab. 5: Systemvergleich 4

Neben diesen Vergleichen gibt es weitere Kriterien die für die Errichtung und Zustimmung zum jeweiligen Leitungssystem wichtig sind. Dies sind einmal die vieldiskutierten elektromagnetischen Felder, wobei elektrische Felder nur bei Freileitungen auftreten, da Kabel und GIL durch den äußeren Metallmantel bzw. durch das Gehäuse geschirmt sind. In Abb.10 ist ein Vergleich der magnetischen Felder ( $\mu\text{T}$ ) für Freileitung, Kabel und GIL (Kabel und GIL in 1m Tiefe verlegt aufgezeichnet). Als Grundlage dient ein Zweifachsystem mit 400 kV bei 2x1000MVA.

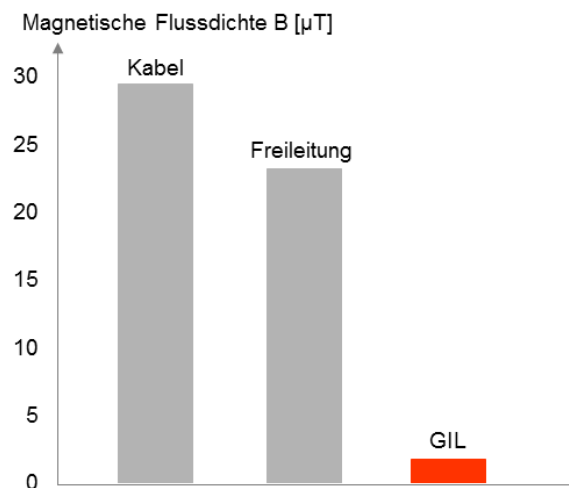


Abb.10: Vergleich des magnetischen Feldes

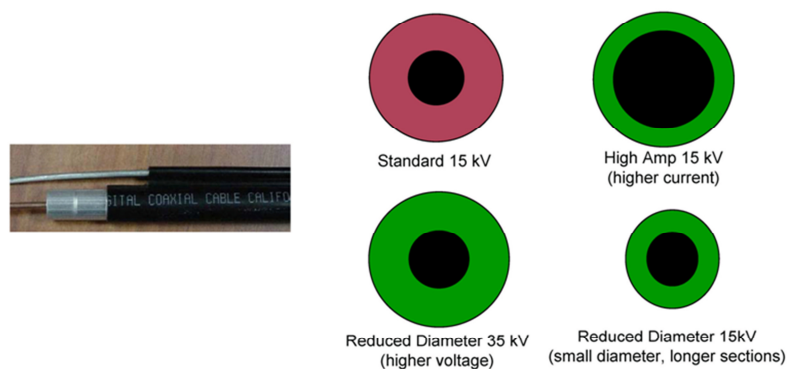
Weitere Kriterien sind etwa die Geräusche, die aber nur bei der Freileitung aufgrund von Korona-Entladungen und der Bewegung von Wasser auftreten, sowie ökologische Effekte wie Bodenaustrocknung, Flächenverbrauch, Beeinträchtigung des Landschaftsbildes sowie ein immer auftretendes Sicherheits- und Umweltrisiko.

## 5. Technische Entwicklungen

Um diese Systeme zu verbessern werden viele Untersuchungen und Entwicklungen durchgeführt. Eine interessante Technologie ist die „High Temperature Superconductivity (HTS)“, die als Kabeltechnologie im Mittelspannungsbereich zur Anwendung kommt. Vorteile sind die geringen Verluste, wenig Gewicht und die kompakte Anordnung. Die derzeitige Temperatur, bei denen diese Kabel angewendet werden liegt bei 138 K (-135 C).

Eine weitere Anwendung in der Kabeltechnik findet durch die Nanotechnologie statt. Durch das Einbringen von Nanopartikel in den Kunststoff kann man Verbesserungen des elektrischen Verhaltens der Kabel erreichen. Es werden die Raumladungen reduziert, das Teilentladungsverhalten verbessert und die Durchschlagsfeldstärke erhöht. In Abb.11 ist ein Kabel mit Nanotechnologie beschrieben.

### Nanocomposite Dielectrics *Anticipated Benefits*



XLPE + vinylsilane-treated nano silica

Abb.11: Anwendung der Nanotechnologie

Im Bereich der Freileitungen sind es Hochtemperaturseile, die eine Erhöhung der Übertragungsleistung ergeben. Die Vorteile neben der höheren Strombelastbarkeit sind, dass keine Veränderungen der mechanischen Eigenschaften und eine geringere Längenausdehnung bei erhöhter Temperatur auftreten. Abb.12 zeigt die Auslegung der Temperatur bei verschiedenen Leitungsseilen.

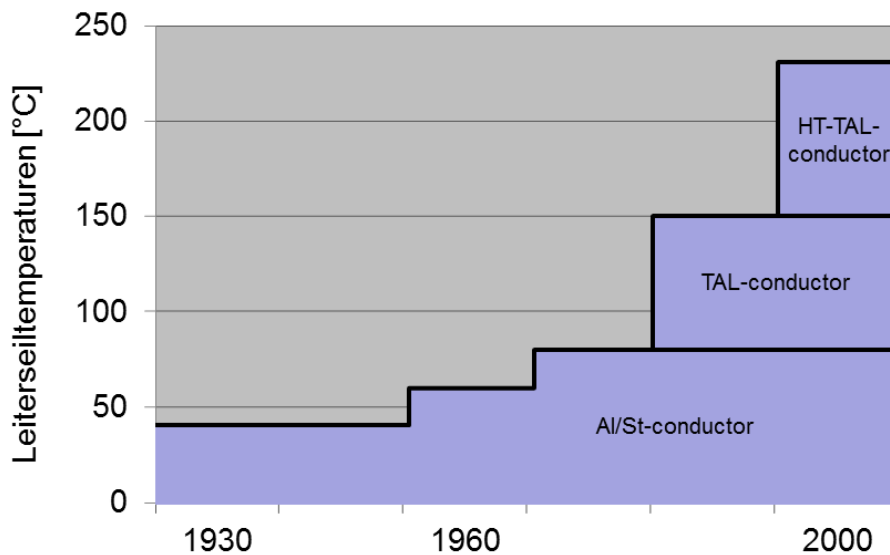


Abb.12.: Auslegung der Seiltemperaturen

Eine weitere Möglichkeit den Energiefluss zu steuern und damit auch zu erhöhen, ist die Anwendung eines Monitoring-Systems für Freileitungen. Damit kann man über die Seiltemperatur die thermische Belastbarkeit des Leiterseils und damit den Energiefluss regeln. Es gibt dazu verschiedene Monitoring-Systeme. Abb.13 zeigt ein System, das nach der Wetterparametermethode arbeitet.

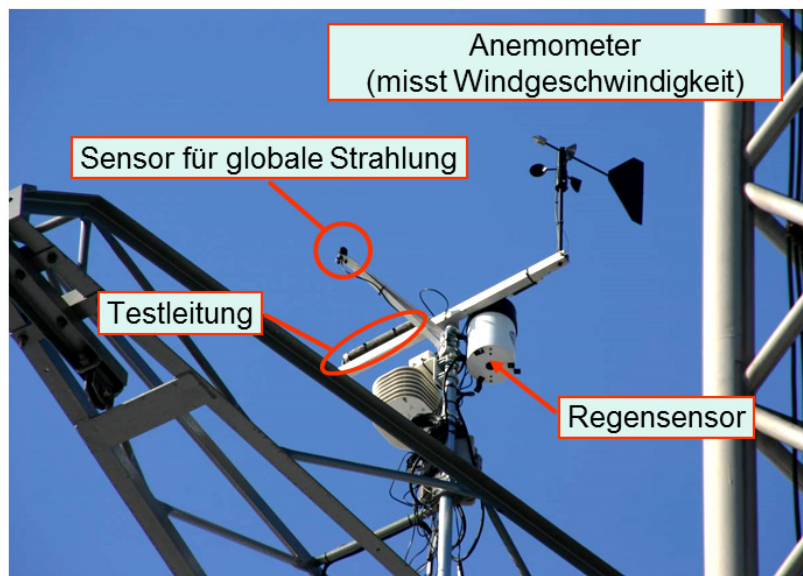


Abb.13: Monitoring-System für Freileitungen

Auch bei der GIL werden verschiedene Untersuchungen vorgenommen, wobei dies vor allem das Isoliergas betrifft. Da SF6 als Treibhausgas für größere Projekte nicht angewendet werden kann, wird eine Reduktion von SF6 durch Beimischung von N2

vorgenommen. Derzeit ist man bei einem Mischungsverhältnis von 20 % SF<sub>6</sub> und 80 % N<sub>2</sub>. Aber auch Gasgemische ohne SF<sub>6</sub> stehen in Diskussion, wie etwa N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mit Zusatzgasen (Edelgase) sowie komprimierte und trockene Luft. Wobei aber auch andere Gase und Gasgemische untersucht werden, um die GIL als echte Alternative zu Freileitung und Kabel zu erhalten.

## **6. Zusammenfassung**

Daher sind bei der Entscheidung zur Übertragung großer Mengen von elektrischer Energie all diese Überlegungen anzustellen. Zuerst einmal welche Art der Übertragung, Drehstrom oder Gleichstrom oder auch gemischte Systeme, dies bedeutet auf einem Mast beide Systeme anzubringen. Natürlich müssen Überlegungen angestellt werden, damit sich diese Systeme nicht beeinflussen.

Danach kommt die Auswahl des Leitungssystems. Einmal sind die technischen und betrieblichen Anforderungen sowie die Erfahrungswerte zu beurteilen. Dann sollte die Wartung, Ausfallwahrscheinlichkeit, Lebensdauer und Sicherheitsrisiken betrachtet werden. Ein weiterer Punkt sind der erforderliche Flächenbedarf sowie die Nutzungsmöglichkeiten dieser Flächen. Auch das Umweltrisiko (zum Beispiel Bodenaustrocknung) und die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes sind wesentliche Kriterien. Dazu kommen noch die akustischen Wahrnehmungen und die elektromagnetischen Felder. Letztlich ist aber die Kostenfrage ein entscheidender Faktor.

Dass dies nicht einfach zu lösen ist, ist aufgrund der vielen Fragen zur Beurteilung klar. Doch im Sinne einer technischen, wirtschaftlichen und umweltbewussten Entscheidung sollte eine Lösung gefunden werden, die für alle Beteiligten zufriedenstellend ausfällt.