

Übertragung elektrischer Energie

Drehstrom / Gleichstrom

Leitungssysteme

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c.

Hans Michael Muhr

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

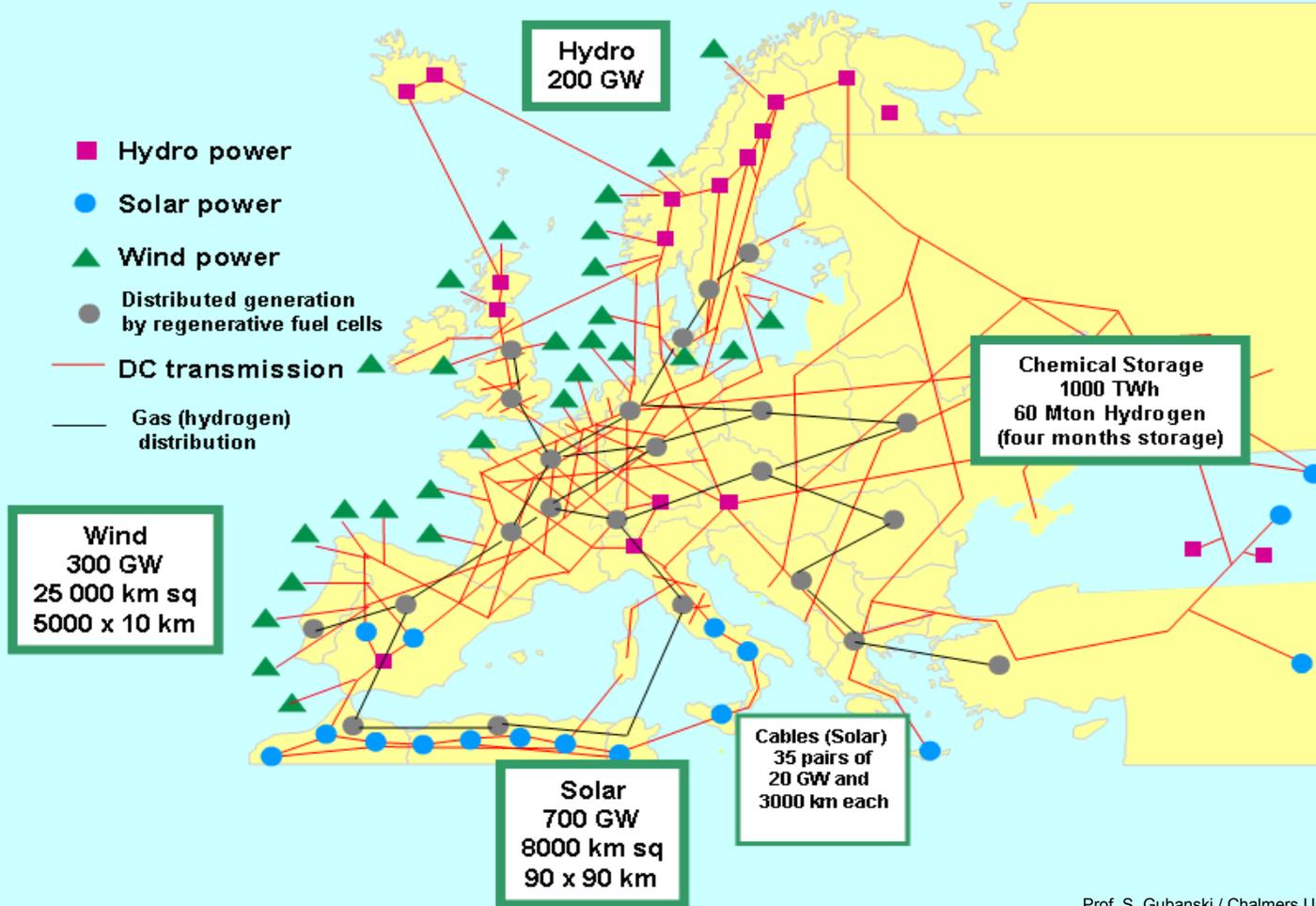
Inhalt

- Übertragungssysteme
 - Drehstrom
 - Gleichstrom
 - Entwicklung

- Leitungssysteme
 - Freileitung
 - Kabel
 - Gasisolierte Leitung
 - Systemvergleich
 - Entwicklungen

Europe 20XX Scenario

99LFC0825



Prof. S. Gubanski / Chalmers University of Technology

Drehstromübertragung (HDÜ)

- Wirtschaftliche, verlustarme und umweltfreundliche Energieübertragung nur durch Einsatz hoher Spannung
- Spannungsebenen für Drehstromübertragungssysteme in Österreich und zum großen Teil in Europa 110 kV, 220 kV, 380 kV
- Vorteil dieses Systems ist die einfache und schnelle Transformierbarkeit der Spannungsebenen
- Weitere Vorteile: lässt sich leichter abschalten; für viele Anwendungen (z.B. Motoren) geeignet
- Nachteile sind, dass Blindleistung übertragen und kompensiert werden muss, dass die Wirkleistungsübertragung zu Stabilitätsproblemen führen kann, sowie bei sehr langen Freileitungen wegen der frequenzbedingten großen Spannungsdifferenzen und Leistungswinkel

Übertragung von elektrischer Energie

- Übertragungsleistung bei hoher WS:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot \frac{U^2}{Z} \cdot \cos(\varphi)$$

- Übertragungsverluste (Joul'sche Verluste):

$$P_V = 3 \cdot I^2 \cdot R$$

oder

$$P_V = P^2 \cdot \frac{R}{U^2 \cdot \cos(\varphi)^2}$$

Technische Aspekte der Drehstromübertragung

- Verluste
 - Leitungsverluste
 - Skin Effekt
 - Koronaverluste
 - Dielektrische Verluste

- Leistungserhöhung
 - Phasenschiebertransformatoren
 - FACTS
 - Leitungsmonitoring (Optimierung des Lastflusses)

Gleichstromübertragung (HGÜ)

- Übertragung hoher Leistung über lange Leitungen
- Seekabelverbindungen
- Keine Kompensation notwendig
- Kupplung von Netzen unterschiedlicher Frequenz
- Asynchroner Betrieb

Technische Aspekte der Gleichstromübertragung

- Übertragungsleistung:

$$P_{DC} = U_D \cdot I_{DC} = \frac{U_{D1} + U_{D2}}{2} \cdot \frac{U_{D1} - U_{D2}}{R} = \frac{U_{D1}^2 - U_{D2}^2}{2R}$$

- Begrenzte Elemente
 - Übertragungsleitungen
 - Konverterstationen
- Verluste
 - Leitungsverluste
 - Verluste in Konverterstationen
 - Koronaverluste

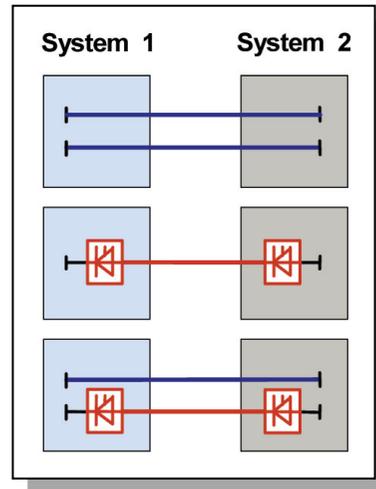
Vorteile der HGÜ

- Keine kapazitiven Ladeströme
- Netzkopplung (ohne Erhöhung des Kurzschlussstromes)
- Keine Stabilitätsprobleme
- Höhere Leistungsübertragung
- Kein induktiver Spannungsabfall
- Kein Skineneffekt
- Höhere Flexibilität und Regelbarkeit

Nachteile der HGÜ

- Zusätzliche Kosten für Stromrichterstationen und Filter
- Oberschwingungen
- Blindleistungsbedarf
- Teure Leistungsschalter
- Geringere Überlastbarkeit

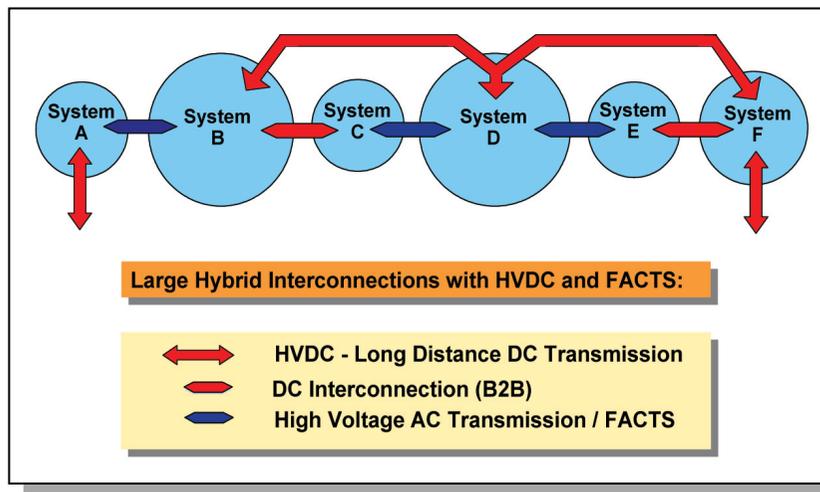
Möglichkeiten von Übertragungssystemen hoher Leistung



Drehstromverbindung

Gleichstromverbindung

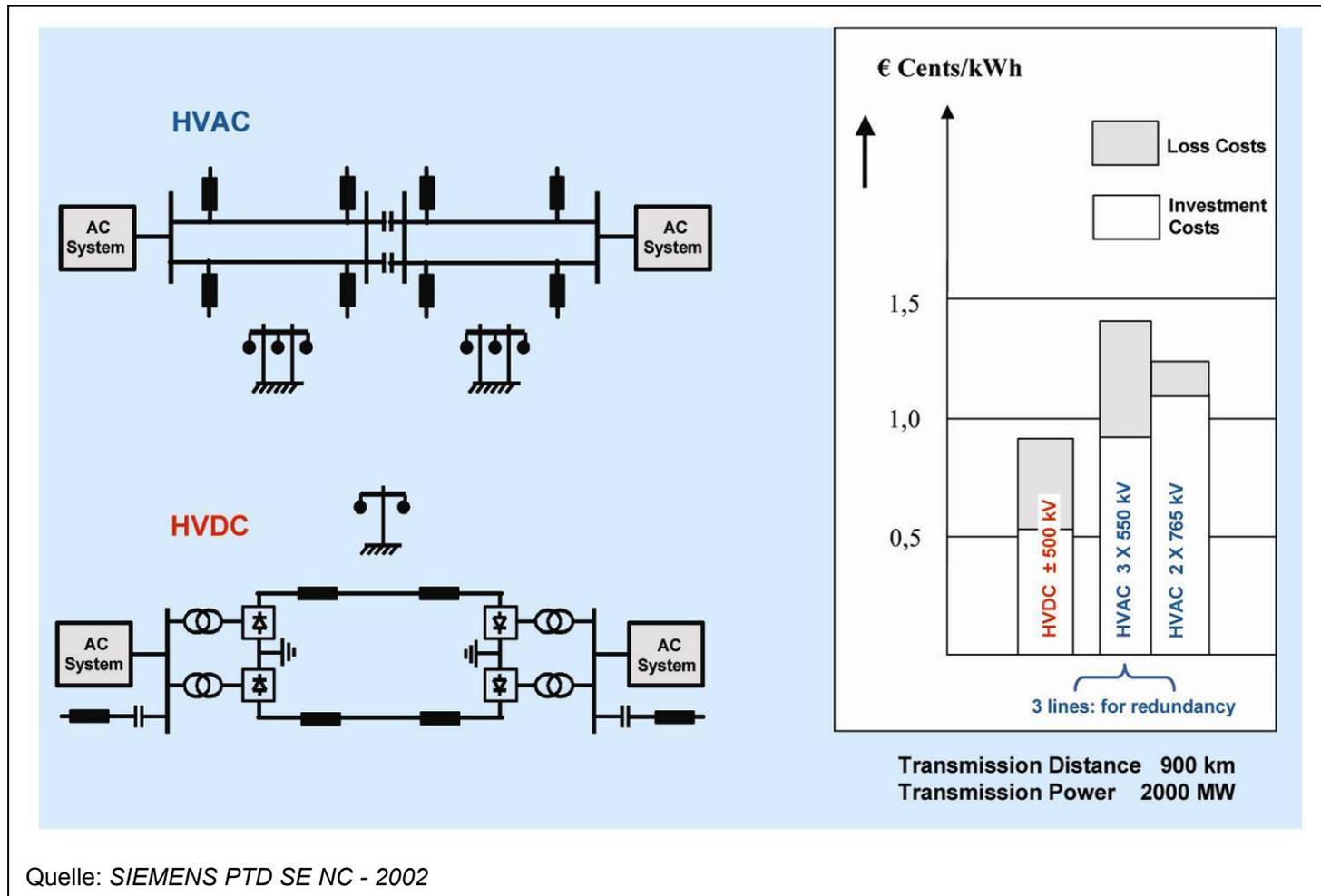
Hybrid AC / DC - Verbindung



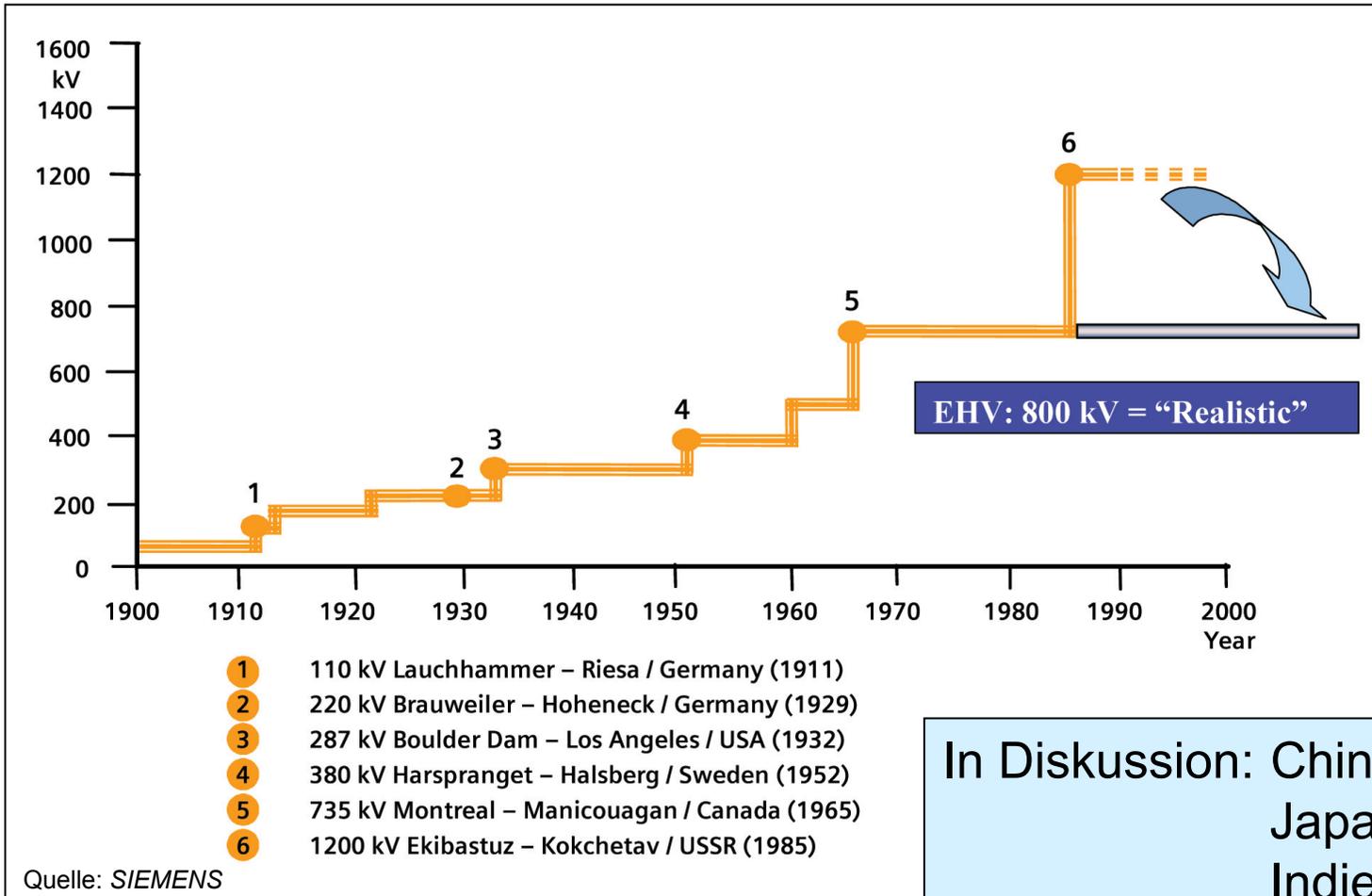
Hybrid Verbindung

Quelle: SIEMENS

Zukünftige Entwicklung



Kosten einer Hochspannungsübertragung



Entwicklung der Spannungsebenen für Hochspannungsdrehstromsysteme

Erweiterung der Energieübertragung in den UHV-Bereich

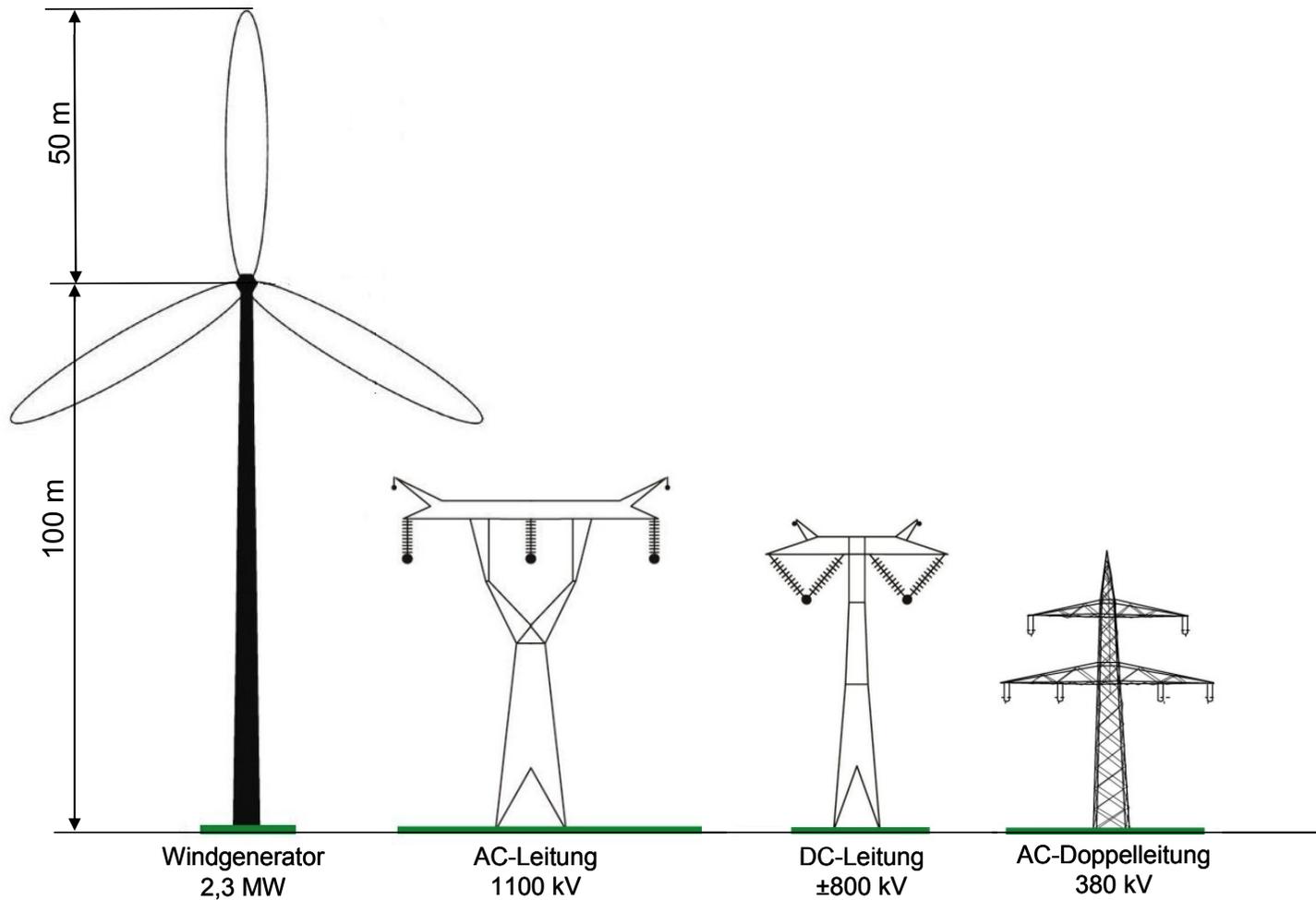
- Übertragung elektrischer Energie in Hochspannungsnetzen mit etablierter Technik
 - Drehstromsysteme bis 800 kV (AC)
 - Gleichstromsysteme bis 600 kV (DC)
- Steigender Bedarf durch sehr große Energiemengen über sehr weite Entfernungen zwischen Erzeuger und Verbraucher
- Einführung höherer Betriebsspannungen \Rightarrow „Ultra Hochspannung“ UHV
- UHV-Systeme (Ultra High Voltage Systems)
 - AC: Höchste Spannung für Betriebsmittel 1100 kV und 1200 kV
 - DC: Bipolare Übertragung mit $\geq \pm 800$ kV (1000 kV)
- Aktueller Bedarf in China und Indien
 - China: Erste Übertragungsstrecken in Betrieb, AC 1100 kV und DC 800 kV
 - Indien: Planungen für Netzausbau mit AC 1200 kV und DC 800 kV
- Historie:
 - Studien und Projekte in USA, Italien, UdSSR, Japan
 - Führten zu keinem langfristigen Netzbetrieb im UHV-Bereich

Quelle: *Isolationskoordination und Hochspannungstechnik in den UHV-Technologien (KYNAST)*

Übertragungsleitungen

	AC	DC
Maximum voltage in operation [kV]	800	+/- 600
Maximum voltage under development [kV]	1000	+/- 800
Maximum power per line in operation [MW]	2000	3150
Maximum power per line under development [MW]	4000	6400

Größenvergleich von Windkraftanlage zu Hochspannungsmasten



Quelle: *Isolationskoordination und Hochspannungstechnik in den UHV-Technologien (KYNAST)*

Vergleich Wechselstrom- zu Gleichstromübertragung

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

Übertragungssysteme

- Für Drehstromsysteme sind prinzipiell Freileitung, Kabel und GIL möglich
- Kabel und GIL werden derzeit nur bei begrenzten Längen verwendet und zwar meist als spezielle Lösungen wie etwa Stadtbereich, Tunnel, Unterführungen; daher liegen weder Betriebserfahrungen noch die tatsächlichen Kosten für lange Leitungen vor
- Gesamtwirtschaftlich betrachtet derzeit stellt die Freileitung das günstigste System dar (Kabel 2-3 facher Kapitalwert, GIL 4-6 facher Kapitalwert)

Drehstromübertragung

- Alle 3 Systeme möglich
- Freileitung bis 1500 kV (große Bündelleiter)
- Kabel derzeit bis 500 kV
- GIL derzeit bis 550 kV, aber auch höhere Werte möglich

Gleichstromübertragung

- Freileitung bis 1000 kV möglich
- Öl-Papier-Kabel bis 500 kV
- Kunststoffkabel derzeit bis etwa 200 kV (Raumladungen), mit Nanotechnik höhere Werte erreichbar
- GIL wird derzeit untersucht

Freileitung

- Luft als Isoliermittel, durch genügend große Abstände bzw. genügende Länge der Isolatoren ist die Beherrschung der Spannung relativ einfach
- Zulässige Leitertemperatur durch mechanische Festigkeit des Leiterseiles bestimmt
- Freileitungen werden nach ihrer natürlichen Leistung P_{nat} bestimmt
- Thermische Leistung beträgt ein Mehrfaches von P_{nat}

Freileitung

Vorteile

- Einfacher Aufbau
- Relativ einfach, schnell zu errichten und zu reparieren
- Gutes Betriebsverhalten
- Lange Lebensdauer
- Hohe Belastbarkeit und Überlastbarkeit
- Geringste kapazitive Blindleistung
- Längste Betriebserfahrung
- Geringste Nichtverfügbarkeit
- Geringste Investitionskosten

Nachteile

- Höhere Fehlerrate (die meisten Fehler sind Lichtbogenfehler ohne Folgen)
- Landschaftsbeeinträchtigung durch Sichtbarkeit
- Kleine Werte von elektromagnetischen Feldern nur durch Abstand und Anordnung zu erreichen
- Höchste Verluste
- Höchste Betriebskosten durch stromabhängige Verluste

Kabel

- Isoliermittel sind Kunststoffe (VPE, XLPE), Öl-Papier sowie Kunststoff-Folien-Papier-Laminate (PPLP)

PPLP-Kabel haben eine deutlich kleinere Verlustleistung und eine höhere elektrische Festigkeit als Öl-Papier-Kabel. Am umweltfreundlichsten sind Kunststoffkabel, wobei die Isolierung aber Alterungsprozessen unterliegt. Kunststoffkabel derzeit bis zu einer Spannungsebene von 500 kV in der Praxis eingesetzt

- Durch hohe Kapazität des Kabels ein großer kapazitiver Leiterstrom, daher längenbegrenzende Wirkung für die Energieübertragung \Rightarrow Kompensation

- Übertragene Leistung durch die zulässige thermische Grenze des Dielektrikums, die hohen thermischen Widerstände der Kabelaufbauelemente und die Bodenverhältnisse bestimmt. Für Dauerbetrieb daher thermische Leistung S_{therm} entscheidend

Bei Hochspannungskabeln ist P_{nat} erheblich größer als S_{therm} ($\sim 2...6$)

Hochspannungskabel



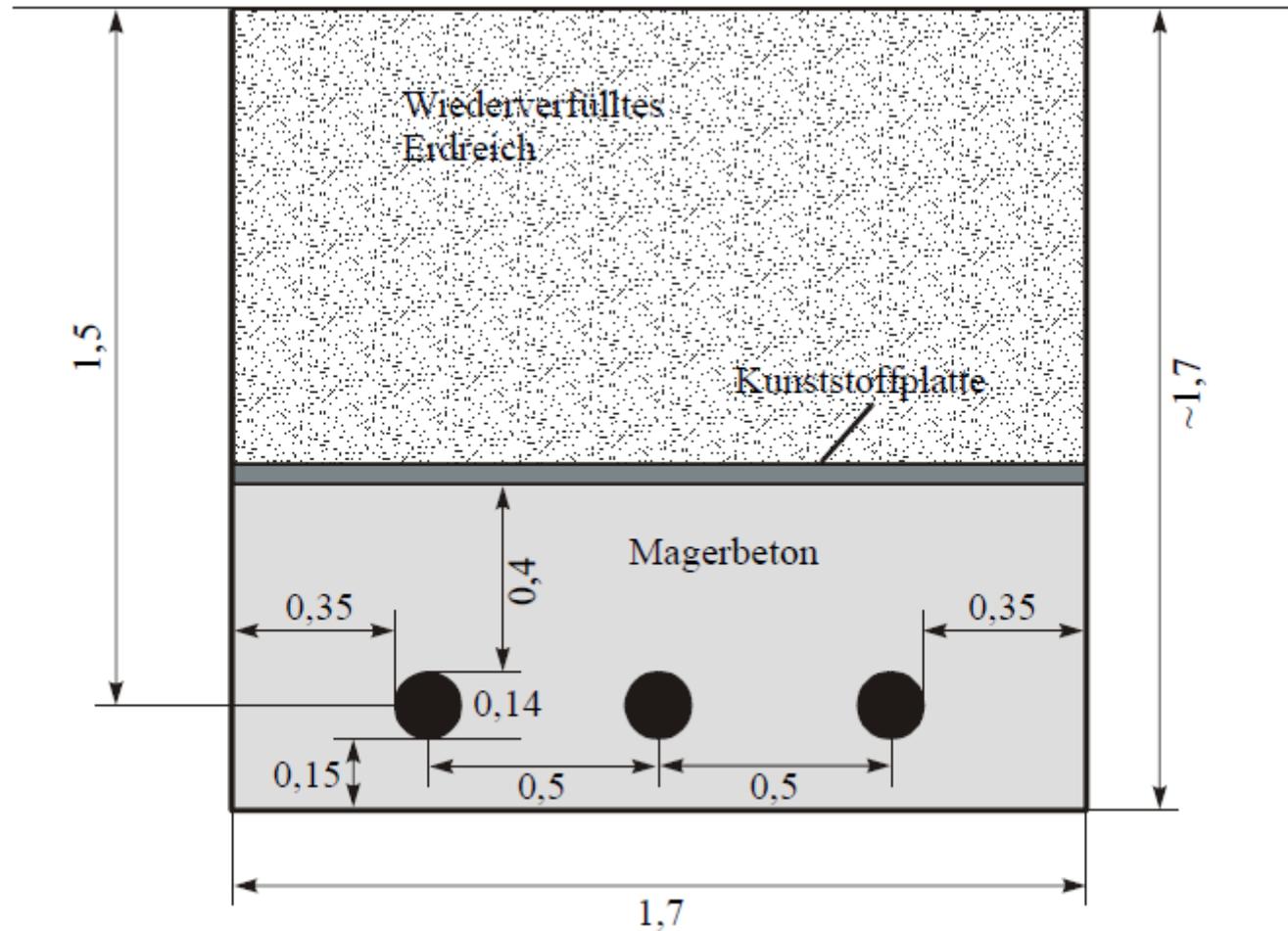
Kabel

Vorteile

- Hohe Belastbarkeit durch thermische Bettung und Cross-Bonding
- Geringerer Impedanzbelag als Freileitung
- Geringere Fehlerrate als Freileitung
- Kein äußeres elektrisches Feld
- Halb so große Verluste wie Freileitung
- Betriebskosten inklusive Verluste etwa halb so groß wie Freileitung

Nachteile

- Höchste Anforderung an Reinheit der Kunststoffisolierung und Wasserdichtigkeit
- Nur kurzzeitige Überlastbarkeit \Rightarrow Einfluß auf Lebensdauer der Isolierung
- Hohe kapazitive Blindleistung, Kompensation erforderlich
- Teilentladungsüberwachung bei den Muffen, Temperaturmonitoring
- Deutlich höhere Nichtverfügbarkeit als Freileitung aufgrund des Reparaturaufwandes
- Lebensdauer mit 30 bis 40 Jahren angenommen
- Erheblicher Flächenbedarf, Bodenaustrocknung, stark eingeschränkte Trassennutzung
- Magnetische Feld von 100 μT kann überschritten werden
- 3-6 fache Investitionskosten gegenüber Freileitung

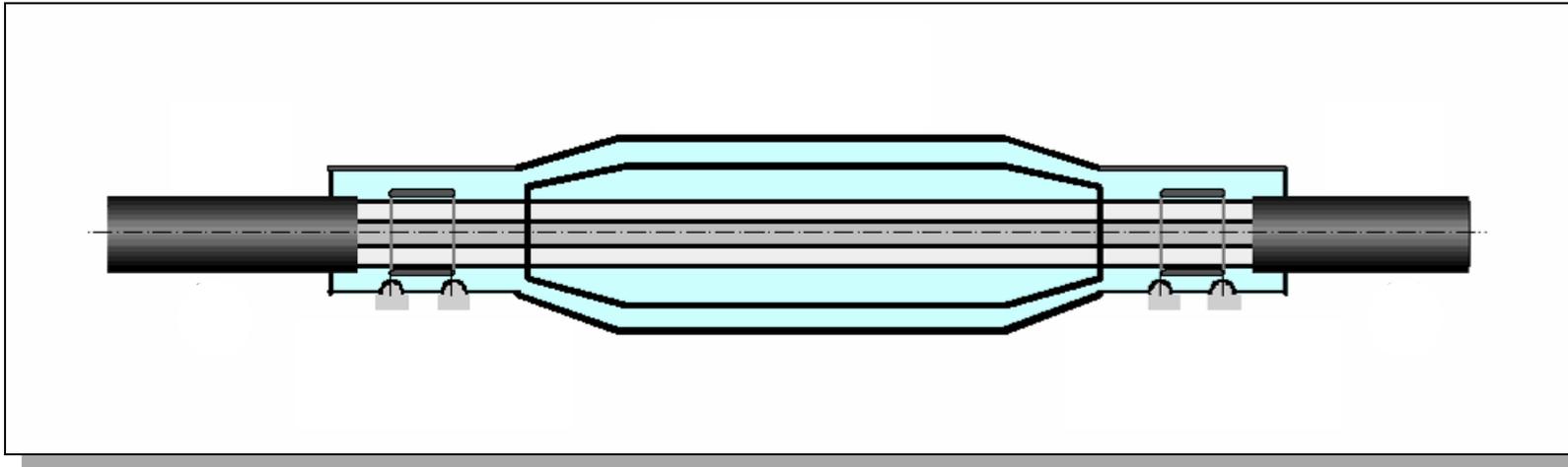


Kabelverlegung

Quelle: Chakir & Koch, 2002

Kabelmuffen

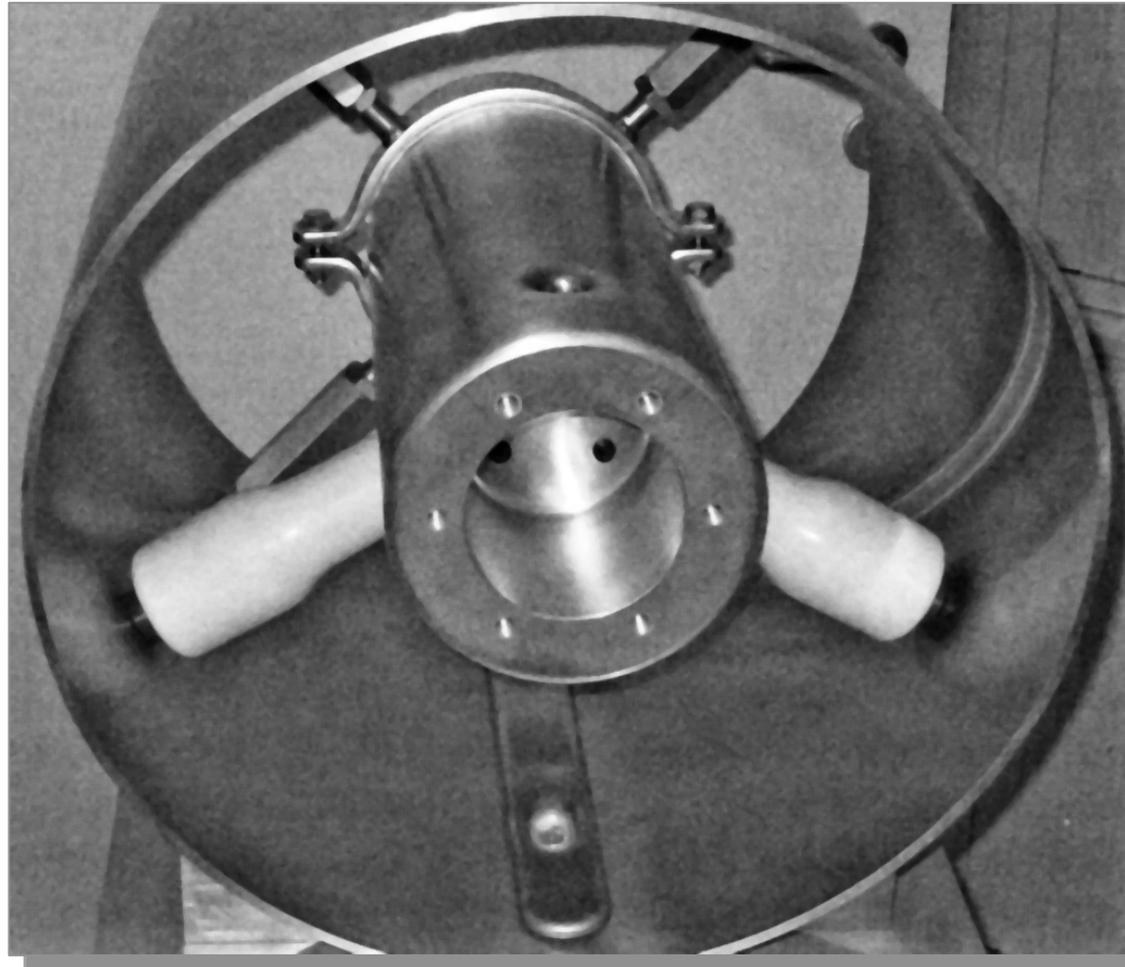
Verbindungs-, Schutz- und Isolationselement zwischen Kabelabschnitten



Gasisolierte Leitung (GIL)

- Isoliermittel ist SF₆ und N₂, derzeit 80 % N₂ + 20 % SF₆ bei einem Druck von 3 bis 6 bar
- Kaum erdverlegte Leitungen, nur im Tunnel oder offen verlegt.
- Viele Verbindungsstellen notwendig
- Kompensation der axialen Wärmedehnung der Rohrleiter
- SF₆ – Umweltverträglichkeit
- Gasüberwachung
- Einfacher Übergang auf GIS
- Hohe Übertragungsleistung
- Hohe Überlastbarkeit
- Minimale dielektrische Verluste
- Geringe Betriebskapazität, damit geringere Ladeleistung
- Gute Wärmeableitung an Umgebung

GIL



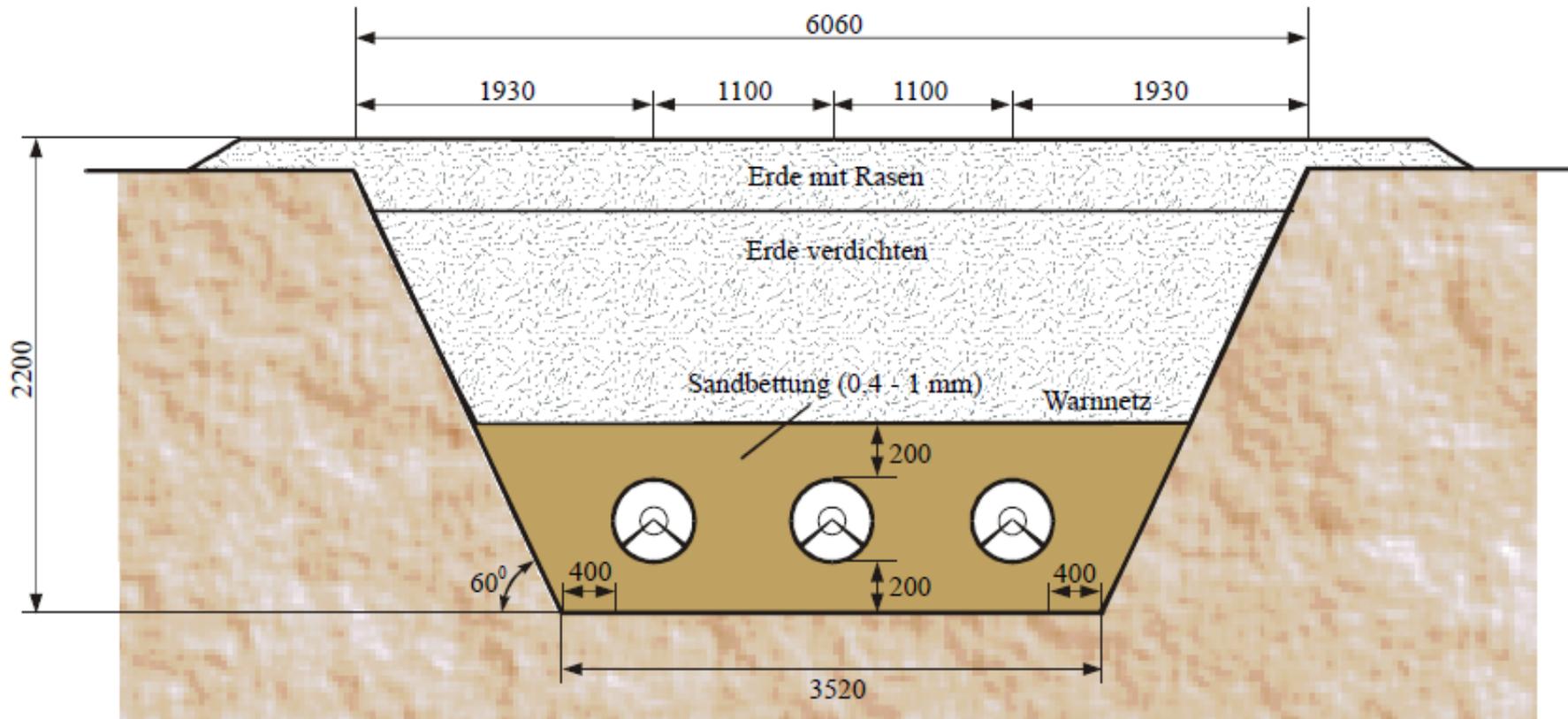
Gasisolierte Leitung

Vorteile

- Sehr große Leistungsübertragung
- Hohe Belastbarkeit
- Hohe Überlastbarkeit
- Geringerer Impedanzbelag als Freileitung
- Geringe Fehlerrate
- Hohe Lebensdauer erwartet (Erfahrung durch GIS)
- Keine Alterung
- Kleinste Werte der elektromagnetischen Felder
- Geringere Verluste als Kabel
- Geringere Betriebskosten inklusive Verluste als Kabel

Nachteile

- Höchste Reinheit und Gasdichtigkeit
- Höhere Blindleistung als Freileitung
- Gaswächter, Fehlerortungssystem, Teilentladungsüberwachung
- Höhere Nichtverfügbarkeit als Kabel durch längste Reparaturdauer
- Geringe Betriebserfahrung, nur kurze Abschnitte in Betrieb
- Größere Trasse, stark eingeschränkte Bodennutzung, SF₆
- 7 bis 12-fache Investitionskosten als Freileitung



Erdverlegung GIL

Quelle: Oswald B., 2005

Vergleich grundlegender Systemeigenschaften I

	FL	Kabel	GIL
Verlegung	oberirdisch	unterirdisch (eingegraben oder in Schächten)	unterirdisch (eingegraben oder in Schächten)
Anzahl der Blindleistungs- kompensationseinrichtungen	wenig	viel	mittel
Betrieb bei Nennlast ¹	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 ²</i>	mittel	hoch	hoch

Vergleich grundlegender Systemeigenschaften II

	FL	Kabel	GIL
Übertragungsleistung pro System ³	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
<i>Einhaltung von Grenzwerten</i> ⁴	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
<i>Erforderlicher Flächenbedarf</i>	groß	gering	gering
<i>Beeinträchtigung des Landschaftsbildes</i>	stark	gering	gering
<i>Akustische Wahrnehmbarkeit</i>	durch Korona und Luftschwingungen möglich	nein	nein
<i>Wartung</i>	Trassenfreihaltung, IH ¹ von Masten und Seilen	keine (eventuell Muffen und Ölanlage bei Ölkabeln)	Korrosionsschutz überprüfen, Gasdruckanlage

Vergleich grundlegender Systemeigenschaften III

	FL	Kabel	GIL
<i>Lebensdauer</i> ²	lange	mittel	mittel
<i>Sicherheitsrisiko für Mensch und Tier</i>	Bruch, herabfallen von Komponenten bzw. Eislasten	kaum	kaum (eventuell bei Austreten großer SF ₆ Gasmengen)
<i>Umweltrisiko</i>	keines	kaum (eventuell bei Brand eines Kunststoffkabels und Erwärmung des Erdreiches)	durch austretendes SF ₆
<i>Mögliche Ausfallsursachen</i>	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.

Vergleich grundlegender Systemeigenschaften IV

	FL	Kabel	GIL
<i>Durchschnittliche Ausfallsdauer 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> ³	niedrig	hoch	hoch

¹ ÜNB steht für übernatürlichen Betrieb und UNB für unternatürlichen Betrieb

² T_n =übertragbare Leistung/Trassenbreite

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

⁴ Als Basis wurden die internationalen Empfehlungen von ICNIRP herangezogen

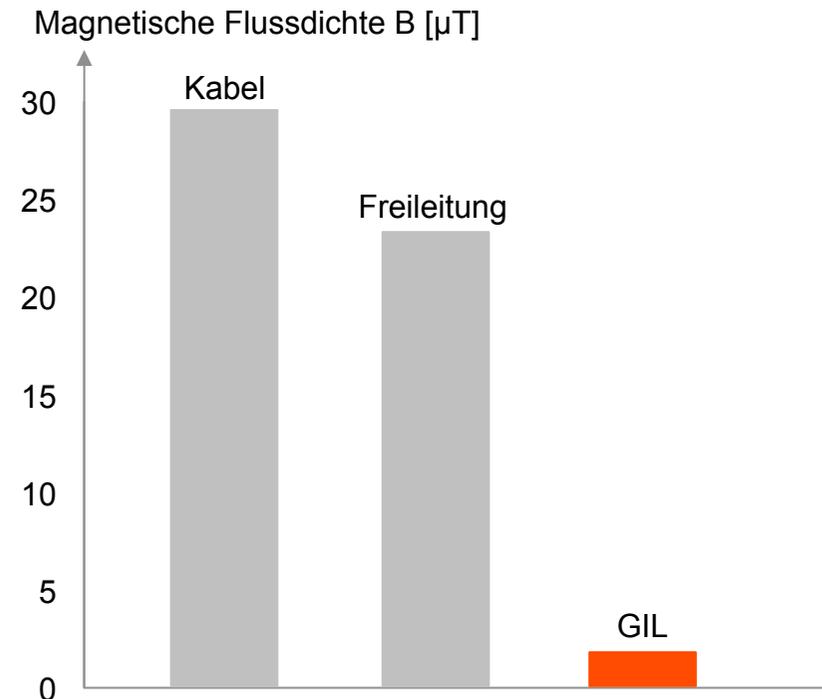
Weiter Kriterien I

Elektromagnetische Felder

- Elektrische Felder
nur bei Freileitungen
(Kabel und GIL geschirmt)

- Magnetische Felder

Vergleich von Magnetfeldern in μT für Freileitung, Kabel und GIL (400 kV Zweifachsystem bei 2x 1000 MVA; Kabel und GIL in 1m Tiefe verlegt)



Weiter Kriterien II

Lärm

- Bewegung von Tröpfchen
- Korona

Ökologische Effekte

- Bodenaustrocknung (Kabel, GIL)
- Flächenverbrauch
- Beeinträchtigung des Landschaftsbildes
- Umweltrisiko
- Sicherheitsrisiko

Technische Entwicklung

- High Temperature Superconductivity (HTS)

Kabeltechnologie – neue Entwicklungen kommen zur Anwendung im Mittelspannungsbereich

- Weniger Verluste
- Geringeres Gewicht
- Kompakte Anordnung
- Derzeitige Temperatur 138° K (-135° C)

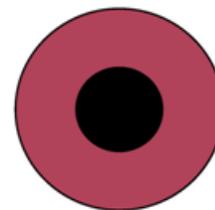
- Nanotechnologie

Kabeltechnologie – Wechsel- und Gleichspannungsanwendung vom Mittelspannungsbereich bis 500 kV

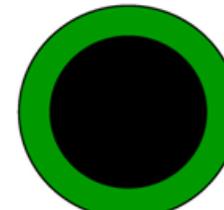
- Reduktion der Raumladung
- Verbessertes Teilentladungsverhalten
- Erhöhung der Durchschlagsfeldstärke

Nanocomposite Dielectrics

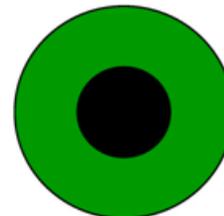
Vorteile



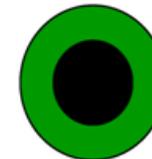
Standard 15 kV



High Amp 15 kV
(higher current)



Reduced Diameter 35 kV
(higher voltage)



Reduced Diameter 15kV
(small diameter, longer sections)

XLPE + vinylsilane-treated nano silica

Hochtemperaturleiterseile

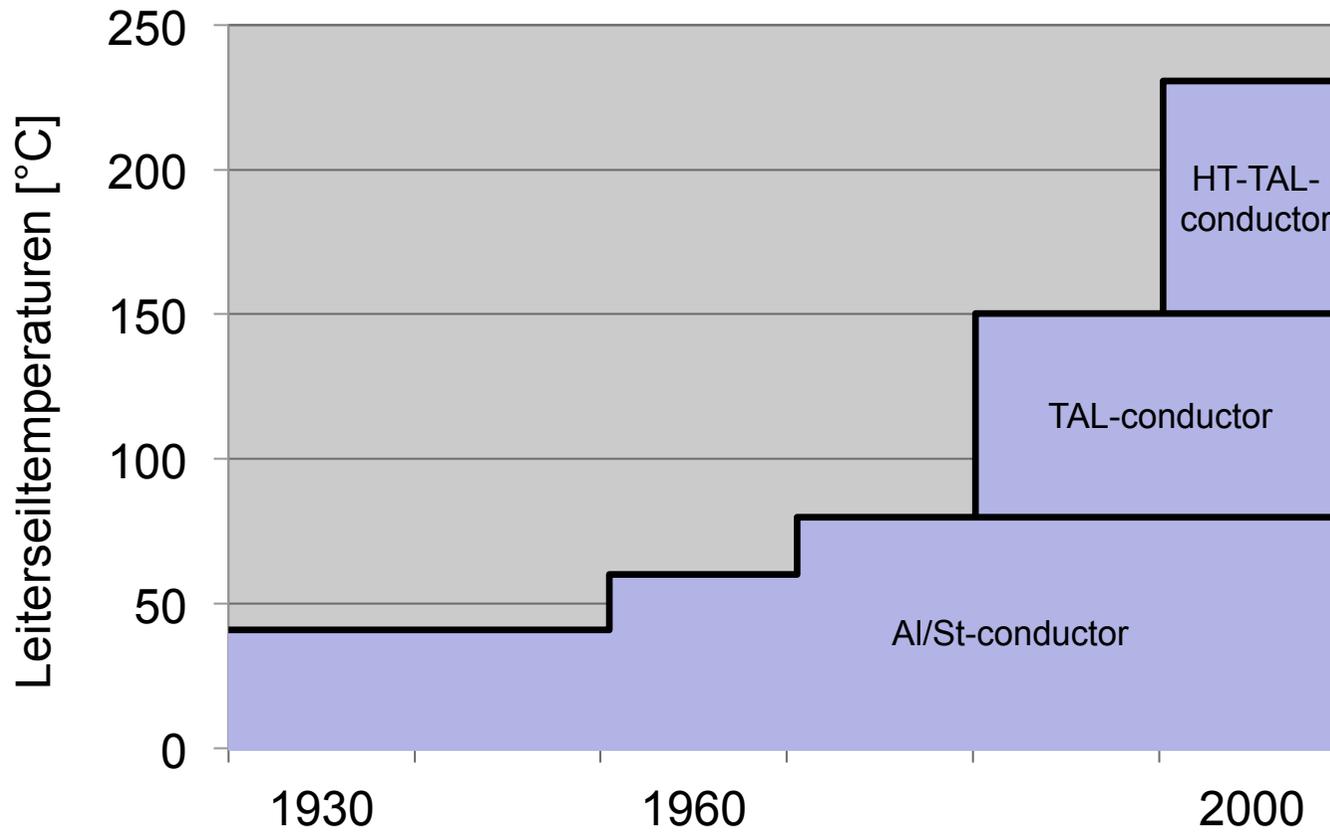
Erhöhung der Energieübertragung in bestehenden Leitungen

Heiße Seile

Anforderungen

- Höhere Strombelastbarkeit
- Keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften
- Geringere Längenausdehnung bei erhöhter Temperatur

Hochtemperaturleiterseile Auslegung der Seiltemperaturen



Isoliergase – SF₆

Vorteile

- Beste Isoliereigenschaften
- Hohe elektrische Feldstärke
- Gute Stabilität
- Nicht toxisch
- Nicht entflammbar

Nachteile

- Globales Erwärmungspotential ist 22800 mal höher als CO₂

Alternative Isoliergase

Gasgemisch mit SF₆

- 80%N₂ und 20% SF₆

Gasgemisch ohne SF₆

- N₂ und O₂
- N₂ und O₂ Zusatzgase

Trockene Luft

Komprimierte Luft

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

