

Apparate II

Übersicht

1. Freileitungen
2. Energiekabel
3. Gasisolierte Leitung GIL
4. Vergleich: Freileitung, Kabel, Gasisolierte Leitung

1. Freileitungen

Spannungsebenen nach IEC 60694

Freileitungen werden in praktisch allen Spannungsebenen zur Energieübertragung eingesetzt

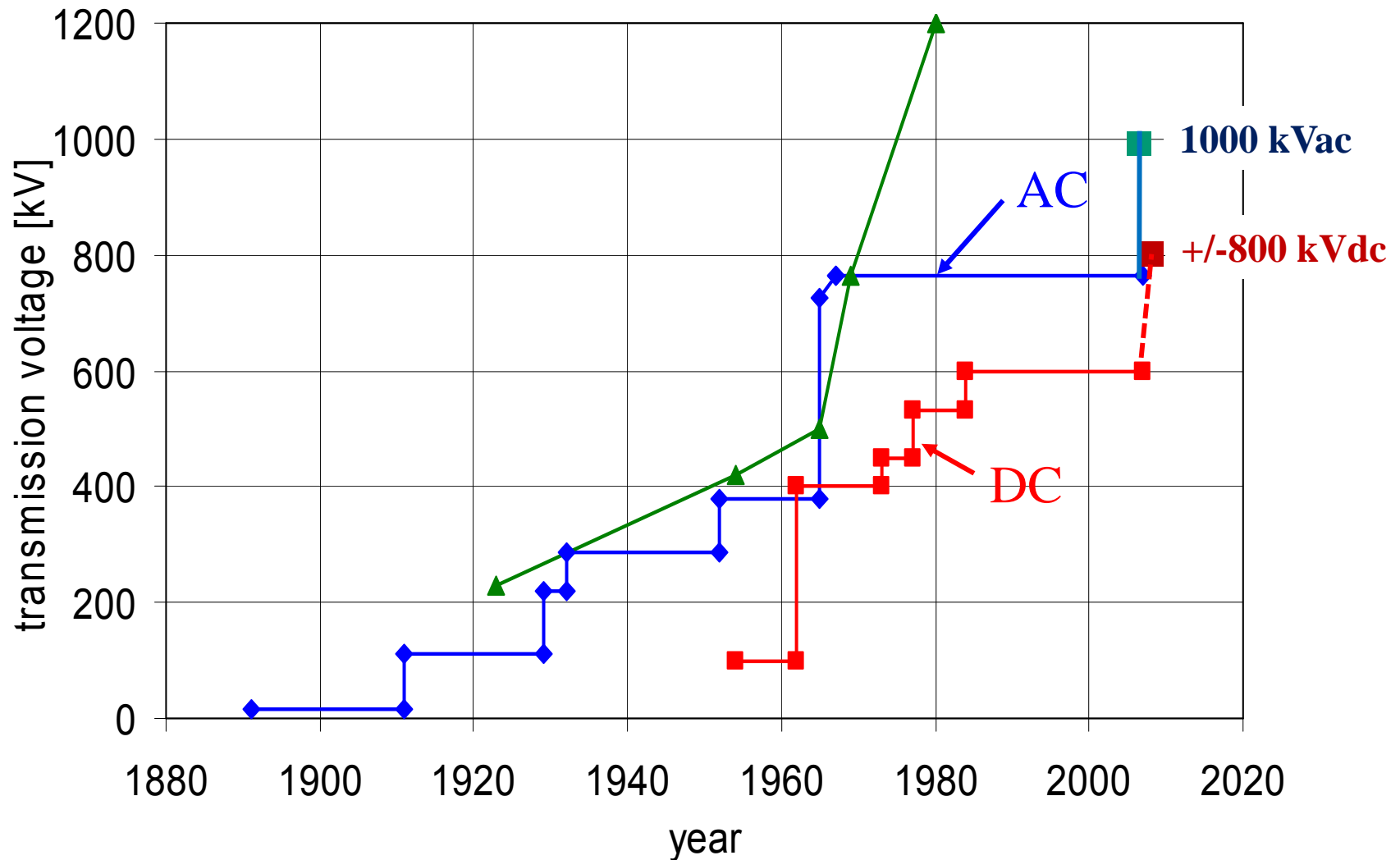
D.h. Sowohl in der Verteil- als auch Übertragungsebene

Rated Voltage [kV]		Rated Voltage [kV]
3.6	<i>Transmission Level</i>	100
7.2		123
12		145
17.5		170
24		245
36		300
52		362
72.5		420
		550
		800

Distribution Level

1. Freileitungen

Zeitliche Entwicklung der Spannungsebenen



1. Freileitungen

Verteilebene (distribution level)

Holzmast



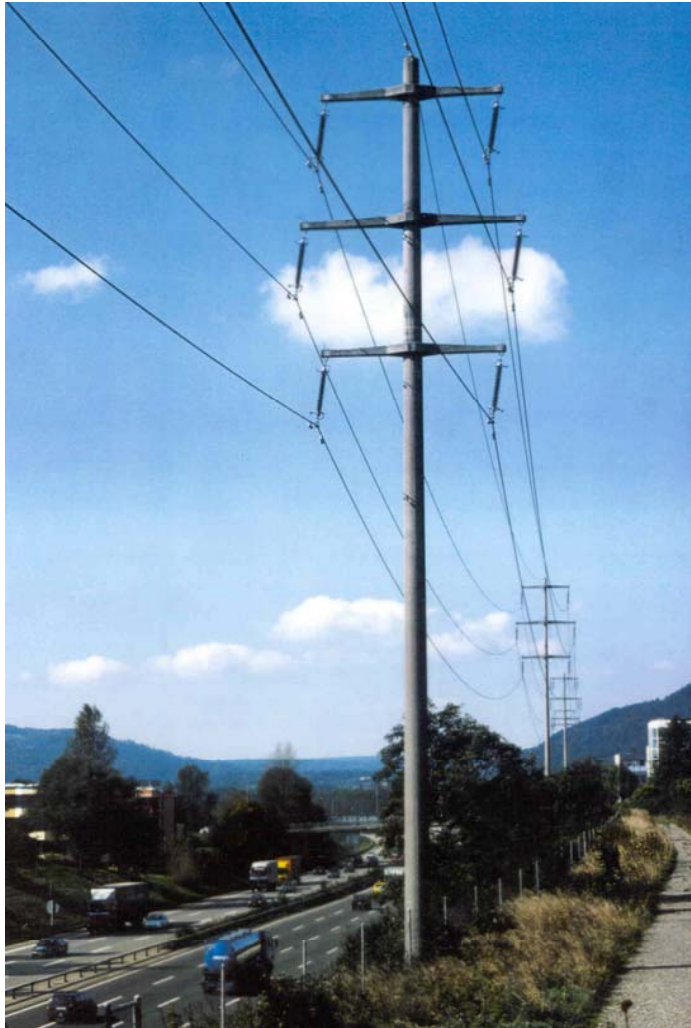
Stahlmast



1. Freileitungen

Verteilebene (distribution level)

Tonnenmast, Beton



Tonnenmast, Stahl



1. Freileitungen

Übertragungsebene (*transmission level*)

Gittermast, Stahl, 550 kV, Bonneville Power Administration, USA



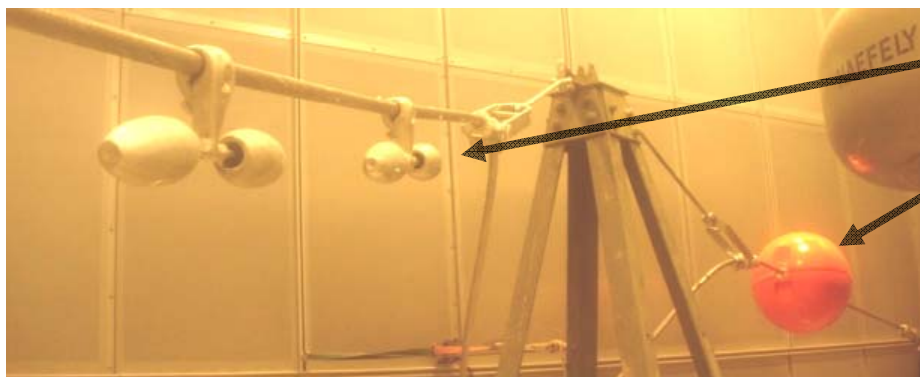
1. Freileitungen

Sichtbarkeit

Schutz vor/für Flugobjekt



- Mastbemalung für bessere Sichtbarkeit
- Corner Reflector/Katzenauge

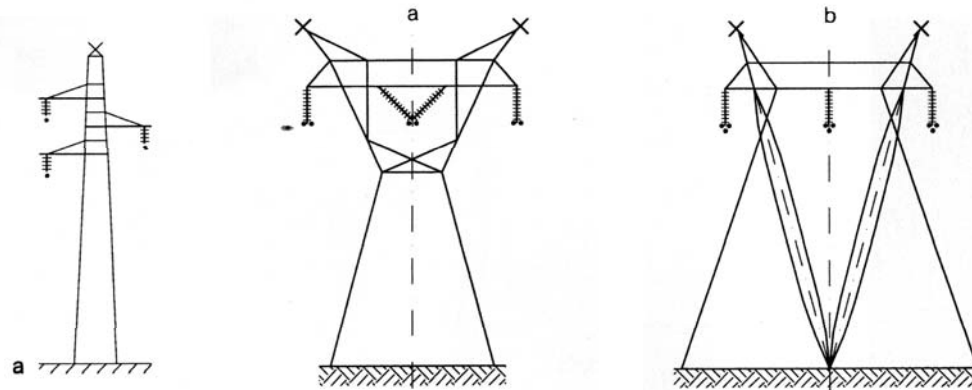


- Schwingungsdämpfer
- Markierungskugel

1. Freileitungen Mastgeometrien

1-System-Leitungen

(Kießling S. 12-4)



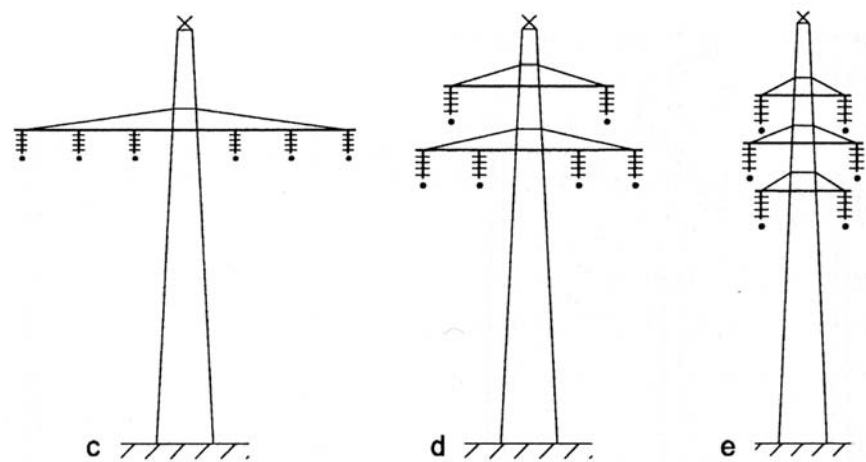
Dreieckanordnung

Y-Masttyp

2-System-Leitungen

Gestehungskosten durch:

- Masthöhe (Konstruktion)
- Mastbreite (Wegerecht)



breit

c
Einebenen-
anordnung

d
Donau-
anordnung

e
Tonnen-
mastbild hoch

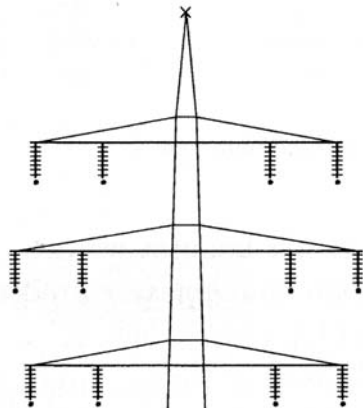


1. Freileitungen Mastgeometrien

(Kießling S. 12)

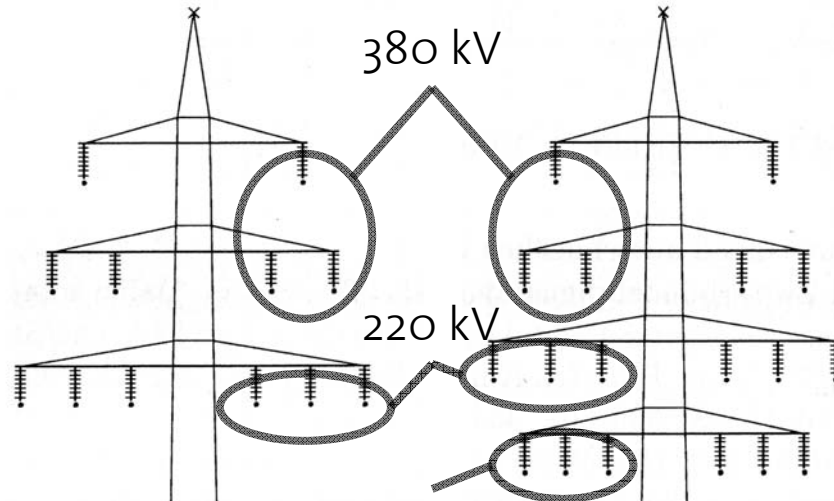
Mehrfachleitungen

4 Systeme der id.
Spannungsebene



g
Tonnen-
mastbild

4/6 Systeme



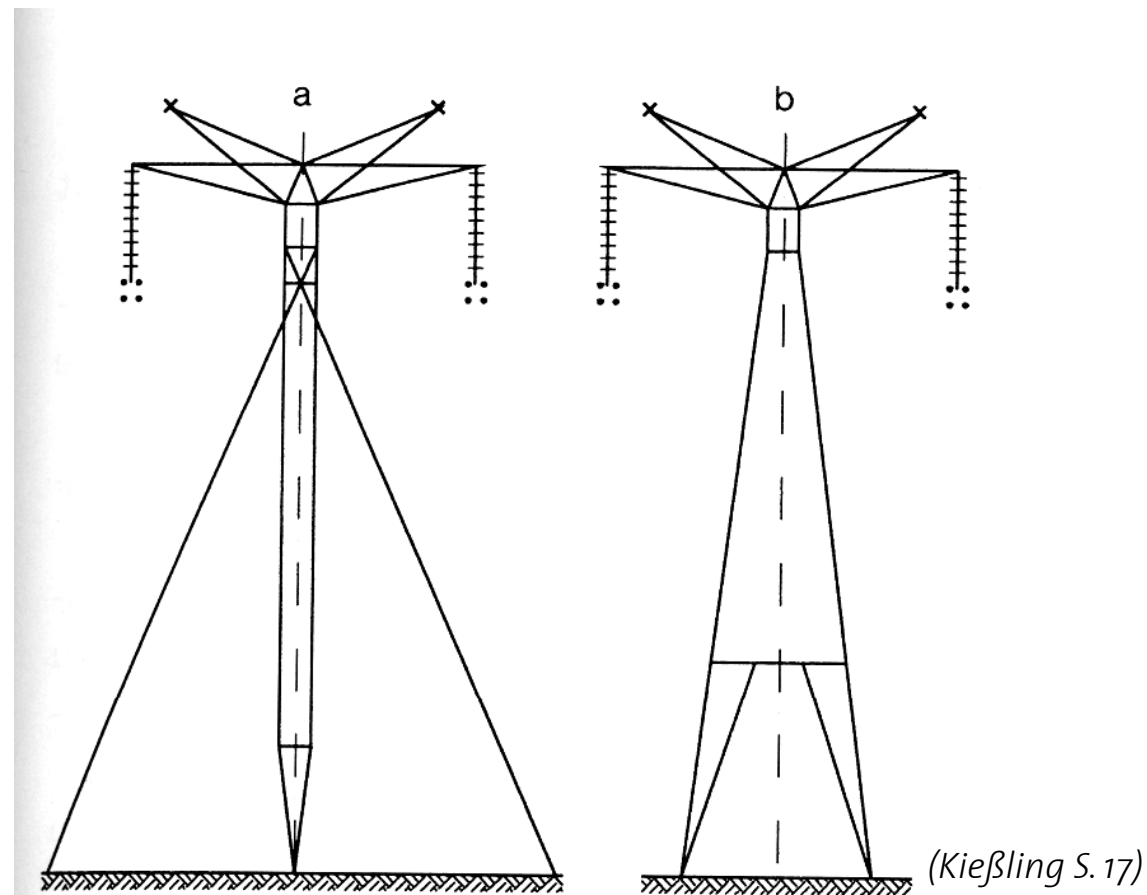
f h
Tannenbaum-
mastbild

Spannung

1. Freileitungen

Mastgeometrien

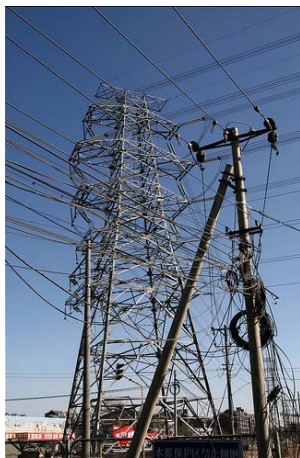
Gleichstromübertragung



Bipolare 600 kV-Hochspannungsgleichstromleitungen

1. Freileitungen

Mastgeometrien



1. Freileitungen Mastgeometrien

Optische Integration in die Landschaft

Künftig neue Designs?



Sir Norman Foster (2001 für ENEL)

1. Freileitungen

Mastgeometrien

Kompaktleitung

Aufrüstung auf höhere Spannungen mit kompakter Anordnung?

comparison between steel lattice tower of existing 125kV-line and new compact tower for 400kV/132kV-line as well as standard design

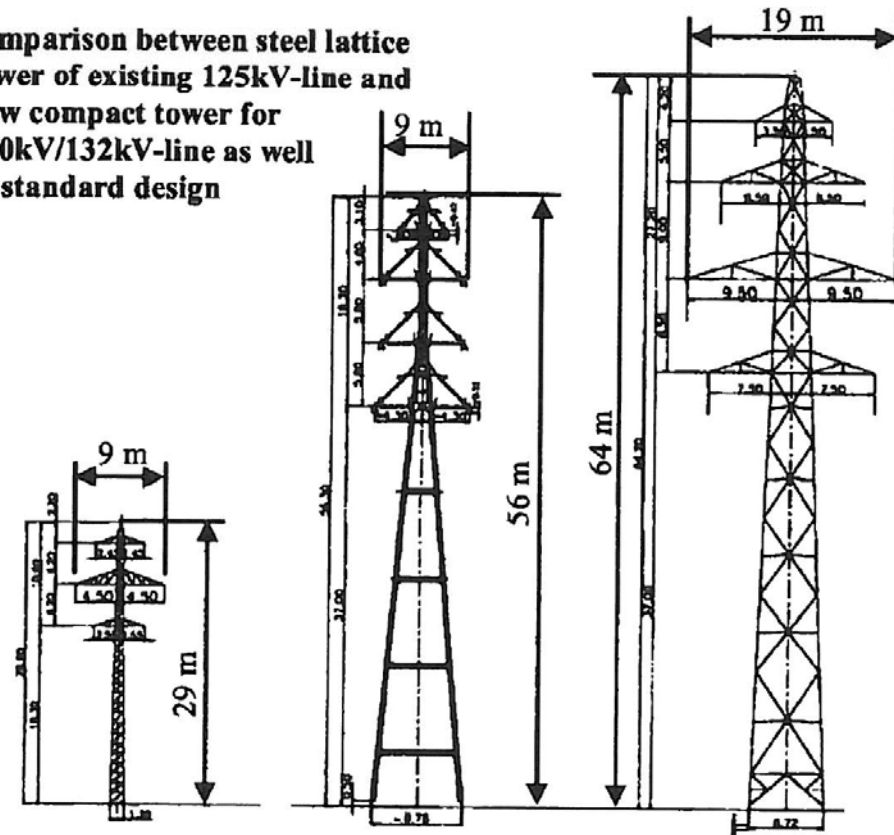


Figure 1: appearance of tower designs with/without compact design
(Burkhardt 2003)

1. Freileitungen

Bündelleiter

Problem

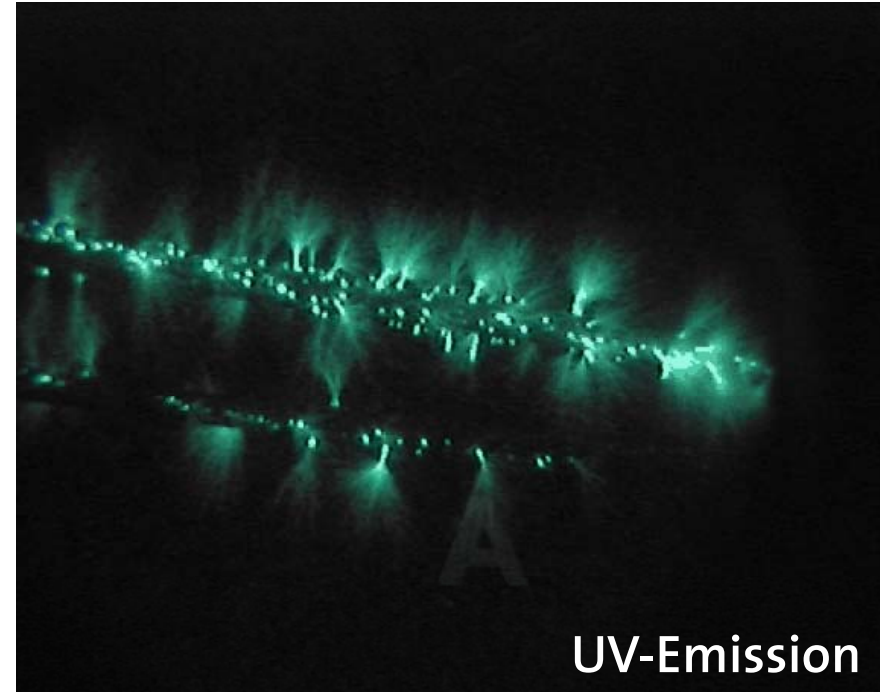
~1920 Steigerung der
Betriebsspannung auf 220 kV
⇒ Probleme mit Korona (E zu hoch)

Folgen der Korona

- Radiostörungen
- Verluste
- Geräusche

Lösung

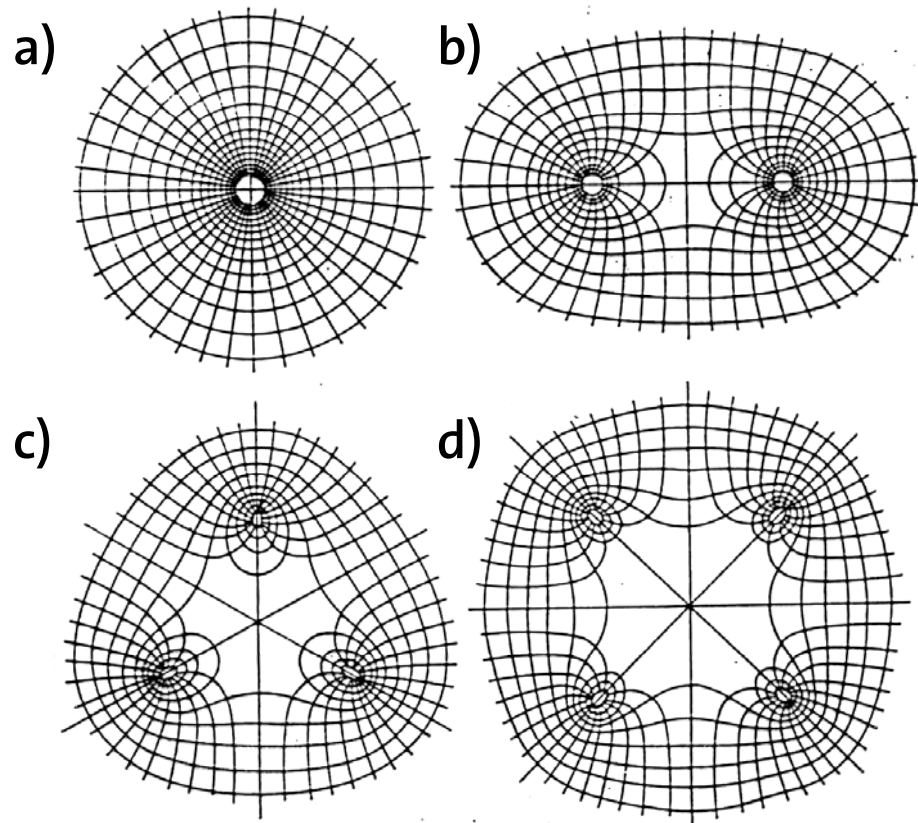
Bündelleiter



1. Freileitungen

Bündelleiter

Feldbilder gebräuchlicher Bündelleiter



- a) Einfachseil
- b) 2er-Bündel
- c) 3er-Bündel
- d) 4er-Bündel

1. Freileitungen

Bündelleiter

Technische Bedeutung des Bündelleiters

Erste Vorschläge

1909 Thomas:

Verkleinerung von L

⇒ Zunahme nat. Leistung

1910 Whitehead:

Verkleinerung von E

⇒ Abnahme Korona

Erste Veröffentlichung, welche beide Vorteile aufzeigt:

1930 Markt & Mengele
(Öst. Patent)

Realisierung

~1950 erster Bündelleiter an der ersten 380 kV-Leitung (S)



Bsp. Viererbündel

1. Freileitungen

Bündelleiter

Äquivalenter Bündelradius

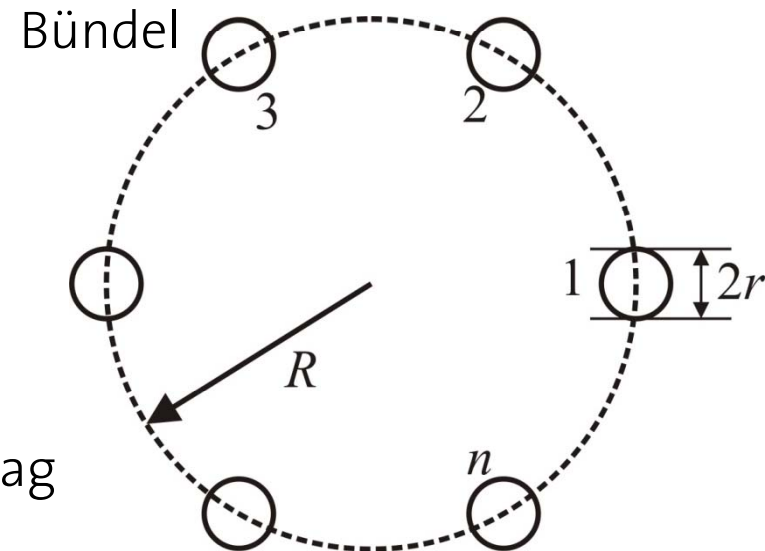
Formel für den Ersatzradius r_e

$$r_e = R \cdot \sqrt[n]{n \cdot \frac{r}{R}}$$

Bedeutung:

Einzelseil mit diesem Radius hat näherungsweise denselben Kapazitätsbelag C' wie Bündel mit n Teilleitern

Je grösser C' bei einem festen Bündel desto grösser ist die mittlere el. Feldstärke



1. Freileitungen

Bündelleiter

Koronaverluste (nach Cladé und Gary)

Koronaverlustbelag P' ist abhängig von den Parametern

C_s' Kapazitätsbelag der durch Korona gebildeten Ionen zur Erde

C' Kapazitätsbelag Leiter zu Erde

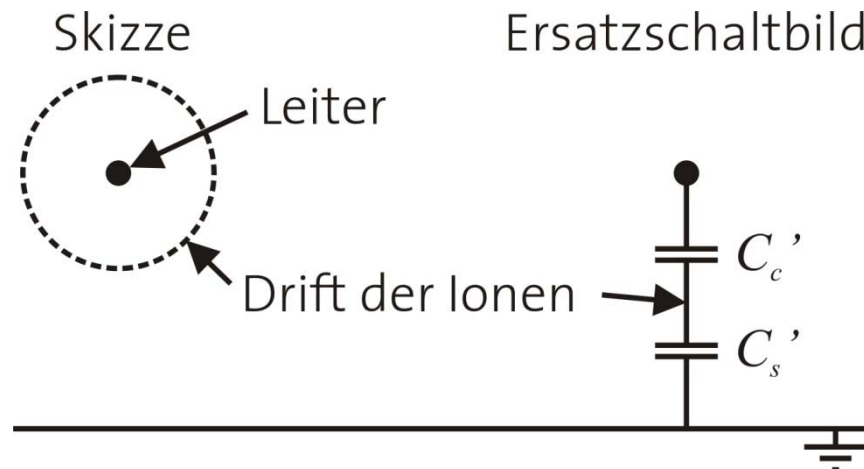
\hat{u} Scheitelwert der Betriebsspannung

u_o kritische Spannung ab der Korona einsetzt

f Frequenz

und gegeben durch

$$P' = 8f (C_s' - C') u_o (\hat{u} - u_o)$$



1. Freileitungen

Bündelleiter

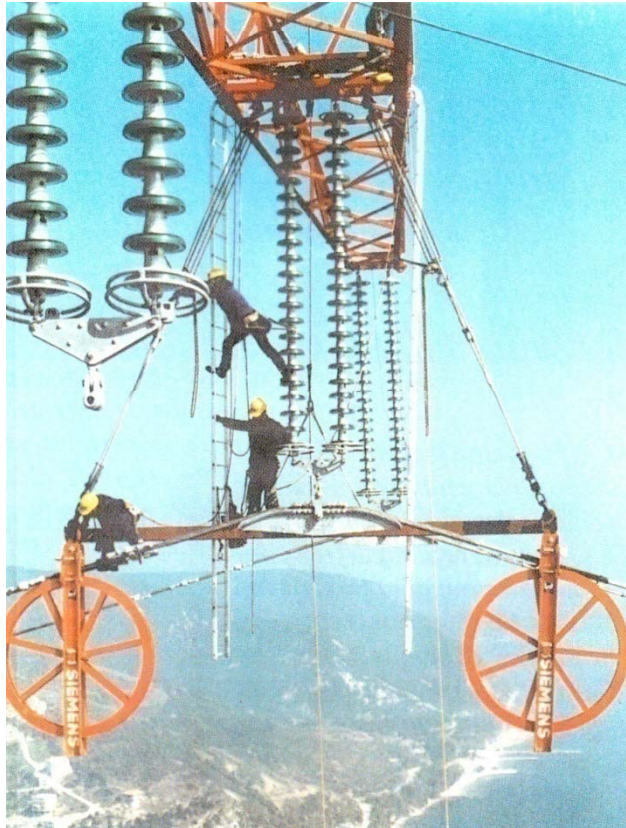
1100 kV Übertragungsleitung (China)



1. Freileitungen

Arbeiten an Freileitungen

Zweite Freileitung über den Bosphorus (1983)



Monteure auf 380 kV Leitung



1. Freileitungen

Arbeiten an Freileitungen

Video: High voltage cable inspection

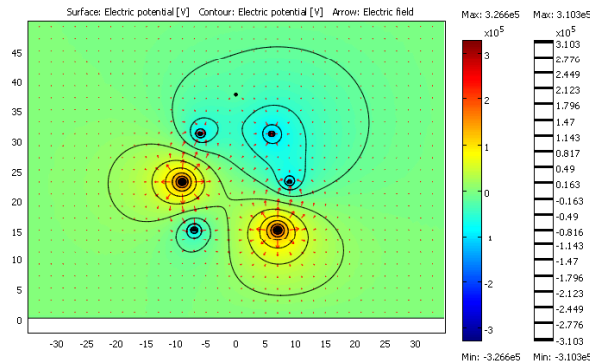


1. Freileitungen

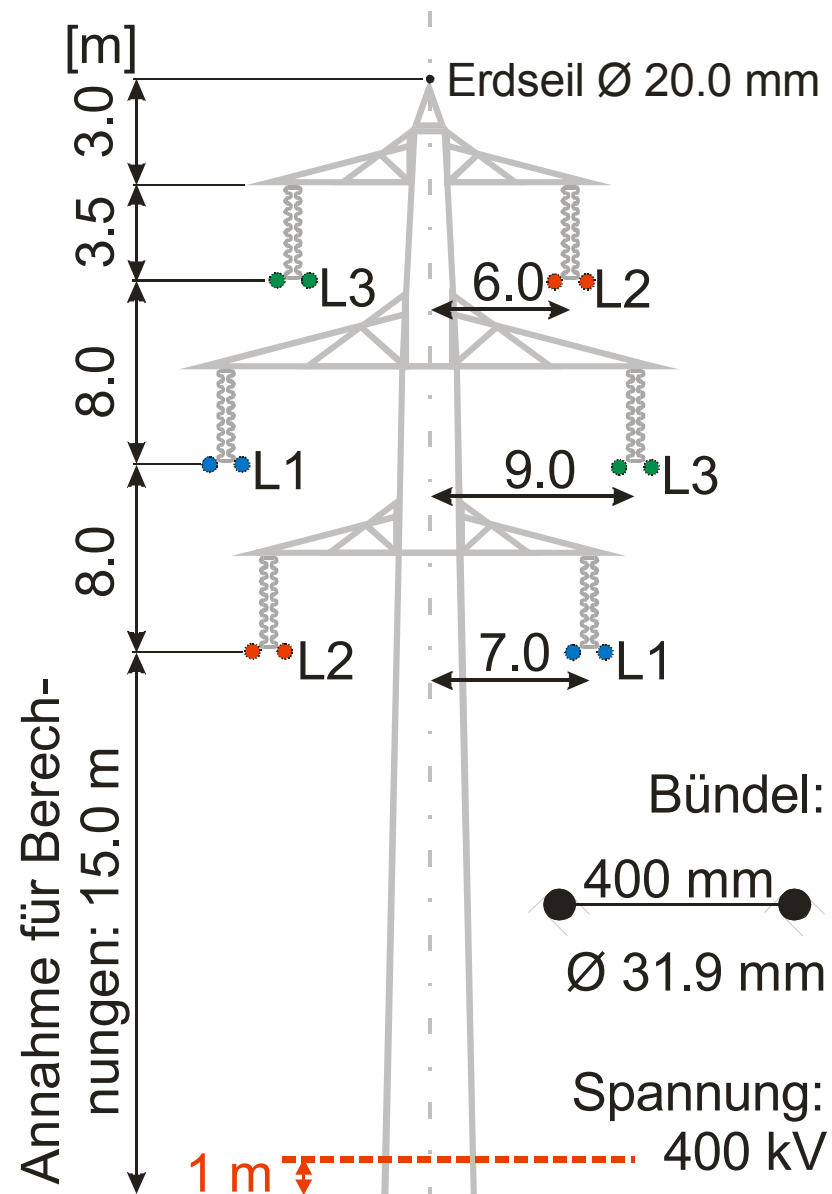
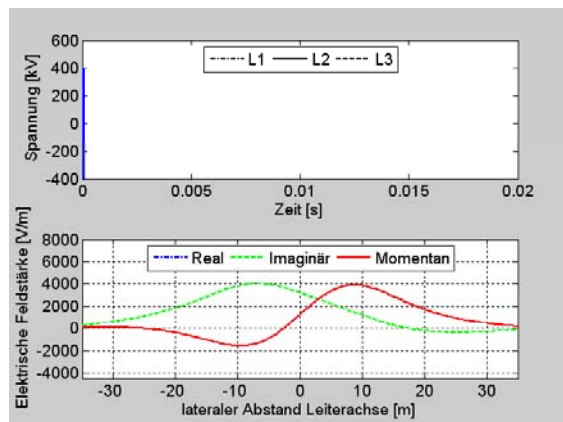
Elektrische Felder

Beispiel: 2 Stromkreise mit Zweierbündel auf Tonnemast

Zeitlicher Verlauf des el. Feld



El. Feld 1 m über Boden



1. Freileitungen

Elektrische Felder

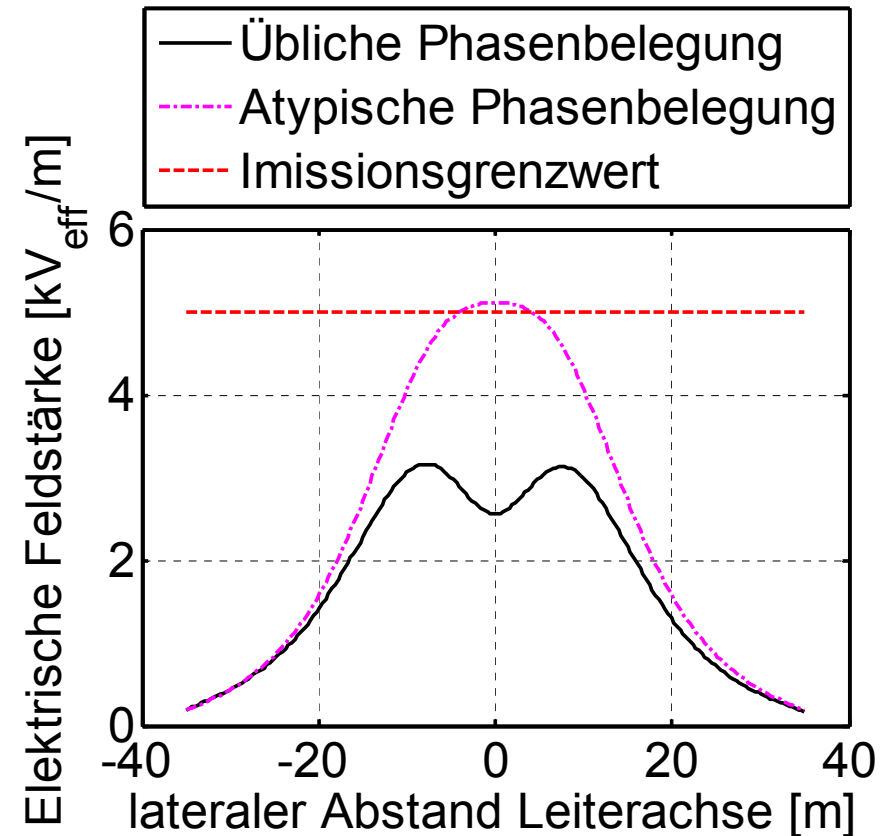
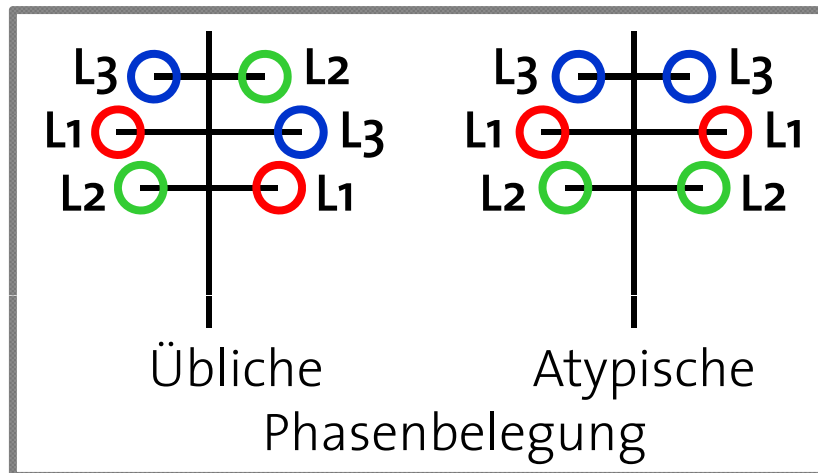
Einfluss der Phasenbelegung

Die Phasen werden zur Verminderung der E- und B-Felder bewusst angeordnet (Immissionsgrenzwert beim E-Feld: $5 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{m}$, gemäss NISV)

Beispiel

Tonnenmast wie vorher, ausser

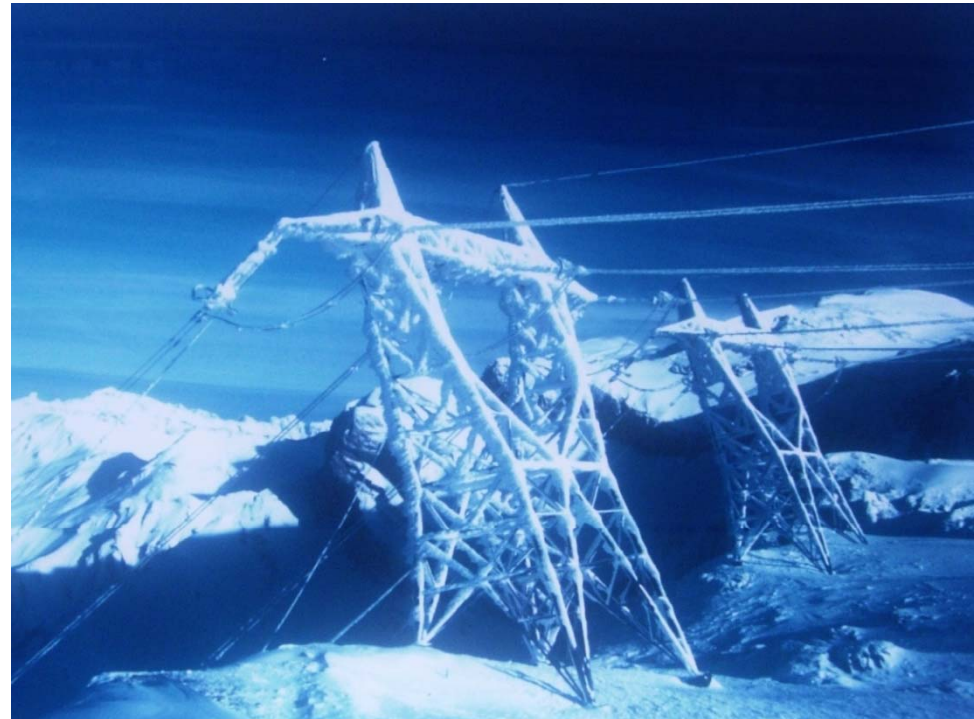
- Betriebsspannung: 420 kV
- Phasenbelegungen:



1. Freileitungen

Wetterbeständigkeit

Höchstgelegene Freileitung Europas (Vorabgletscher, GR), 380 kV



1. Freileitungen

Wetterbeständigkeit

Freileitungsmasten nach Sturmtief „Kyrill“ (Jan.07)

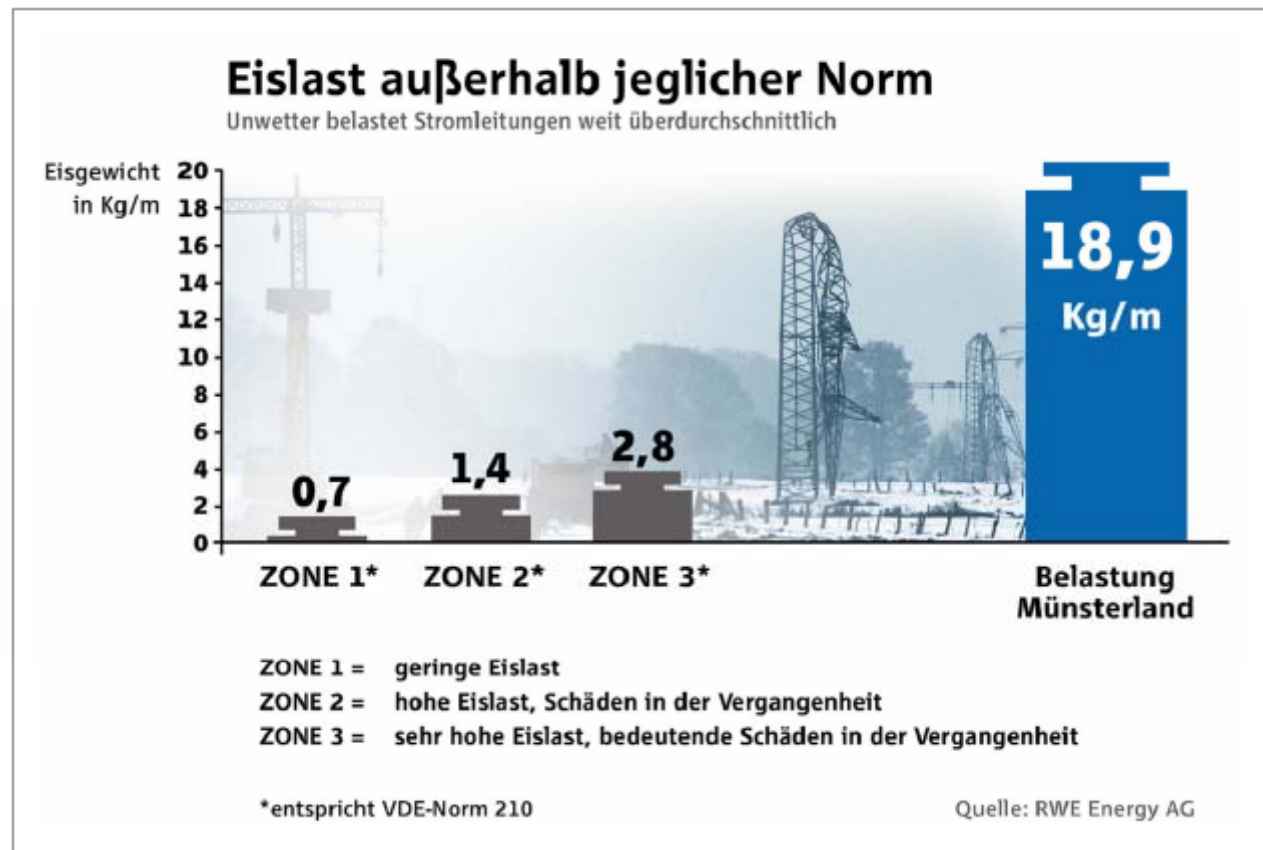


1. Freileitungen

Wetterbeständigkeit

Ausfall bei Münsterland, D (Nov. 05)

Wettersituation führte auf eine starke Vereisung der Seile



1. Freileitungen

Wetterbeständigkeit

Ausfall bei Münsterland, D (Nov. 05)

Folgen:

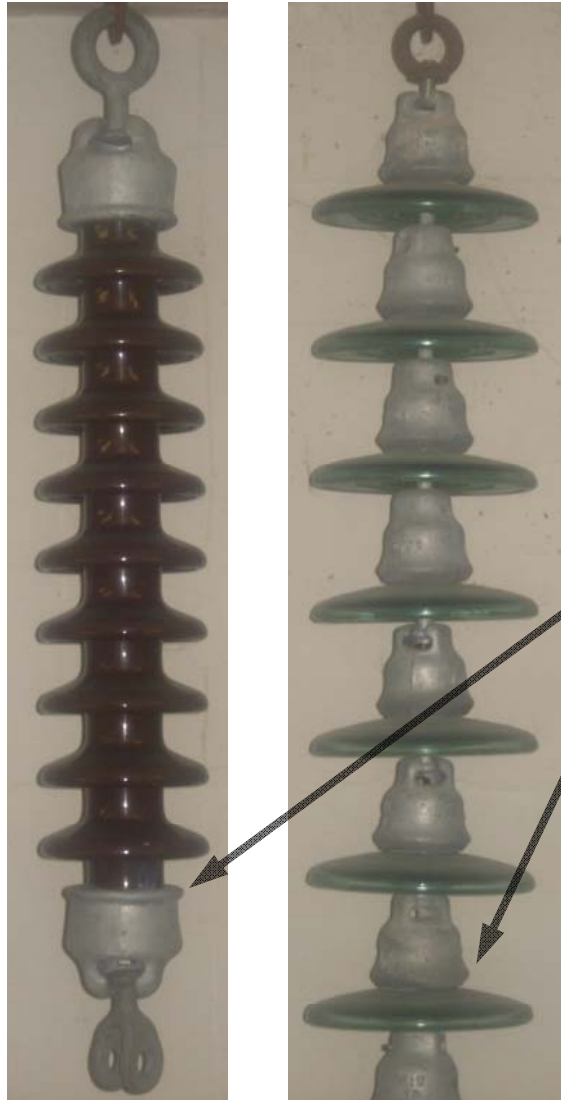


(RWE Energy AG)

- 600'000 Personen im Raum Osnabrück für 1-5 h ohne Strom
- 250'000 Personen im westlichen Münsterland ohne Strom über Stunden, z.T. aber Tage (nach 4 Tagen: 2'000 Personen ohne Strom)

1. Freileitungen

Isolatorschirmung



Ziel der Schirmung: Feldhomogenisierung

1. Reduktion der Koronaaktivität
(Radio Interference Voltage)
2. Entlastung von Interfaceflächen
(Elektrode, Gas, Isoliermaterial)

Beispiel Hängeisolator (Porzellan, Glas)

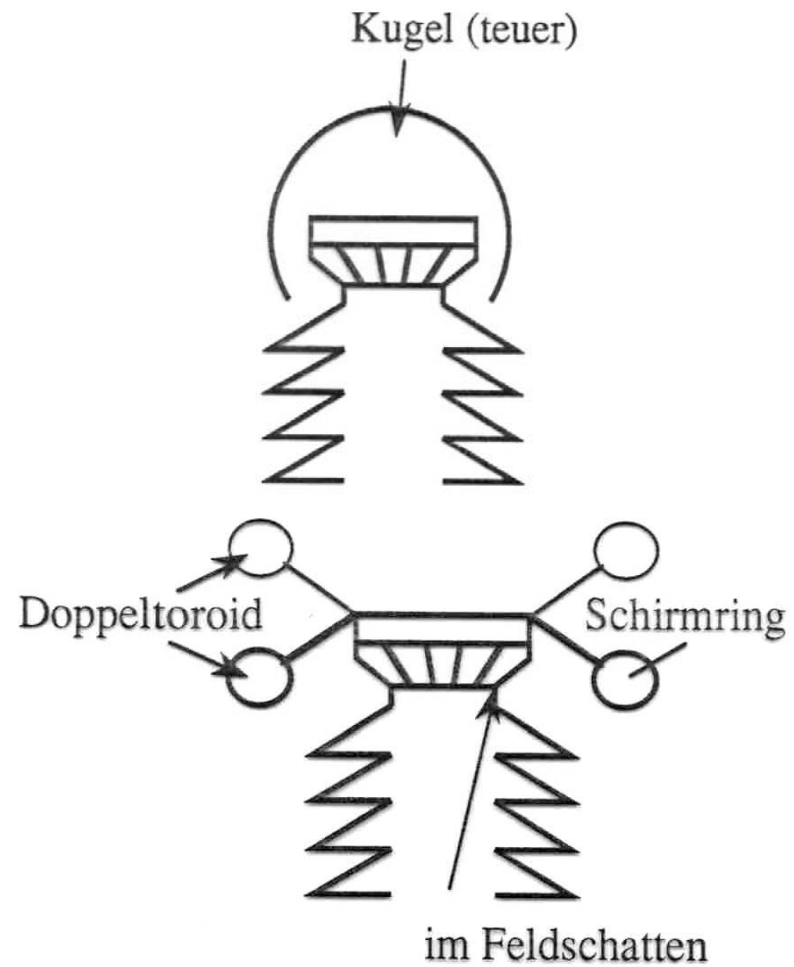
Rippen, scharfkantige Formen

- aus Kostengründen
- mechanische Anforderungen

1. Freileitungen

Isolatorschirmung

Schirmung eines Isolatorflansch



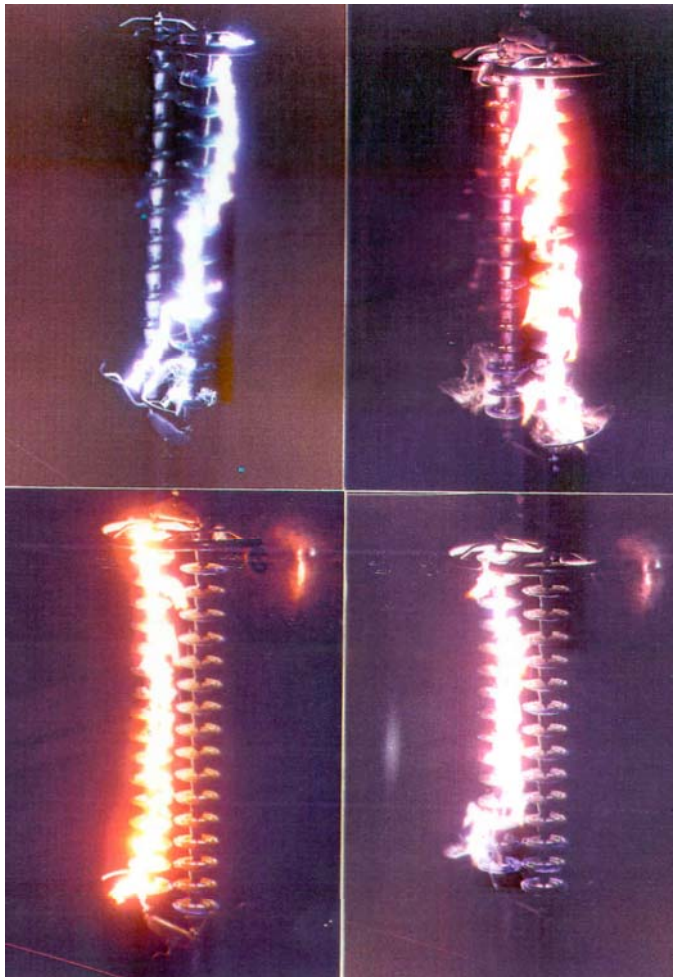
Schirmung im Labor



1. Freileitungen

Überschlag an Freileitung

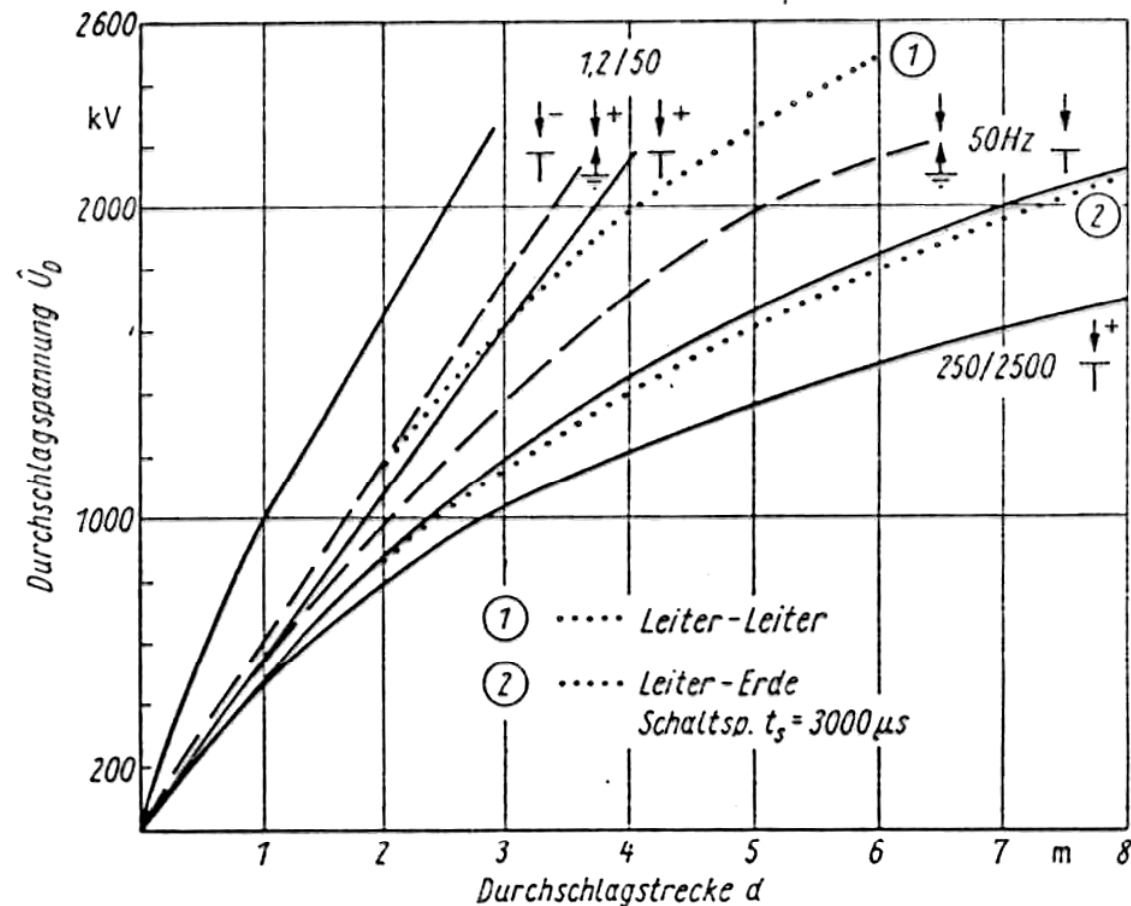
Überschlag am Hängeisolator:



1. Freileitungen

Überschlag an Freileitung

Durchschlagskennlinien technischer Modell-Durchschlagstrecken für unterschiedliche Elektroden-Konfigurationen



1. Freileitungen

Überschlag an Freileitung

Einfluss atmosphärischer Bedingungen

Wesentliche Einflussgrößen:

- Luftdichte
- Luftfeuchte

Berücksichtigung in den Normen:

1) *IEC 60060-1: Hochspannungs-Prüftechnik*

Einfluss der atmosphärischen Bedingungen des **Ortes der Prüfung** des Isolationssystems muss (bei äusseren Isolationen) berücksichtigt werden

2) *IEC 60071-2: Isolationskoordination*

Einfluss der atmosphärischer Bedingungen des **Einsatzortes** des Isolationssystems muss (bei äusseren Isolationen) berücksichtigt werden

1. Freileitungen

Überschlag an Freileitung

Einfluss atmosphärischer Bedingungen des Ortes der Prüfung (IEC 60060-1)

Berechnung der Prüfspannung

$$U = U_0 \cdot K$$

U_0 : Prüfspannung unter Bezugsatmosphäre

Definition der Bezugsatmosphäre:

T_0 : 20°C

b_0 : 101.3 kPa

h_0 : 11 g/m³

wobei der Korrekturfaktor K durch

$$K = K_1 \cdot K_2$$

mit $K_1 = \delta^m$, $K_2 = \left(\frac{h}{\delta}\right)^w$

K_1 : Dichtekorrekturfaktor

K_2 : Feuchtekorrekturfaktor

h : absolute Feuchte [g/m³]

δ : relative Dichte

m, w : Parameter

definiert ist.

Die relative Dichte ist:

$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273 + T_0}{273 + T}$$

T : Temperatur [°C]

b : Druck [kPa]

1. Freileitungen

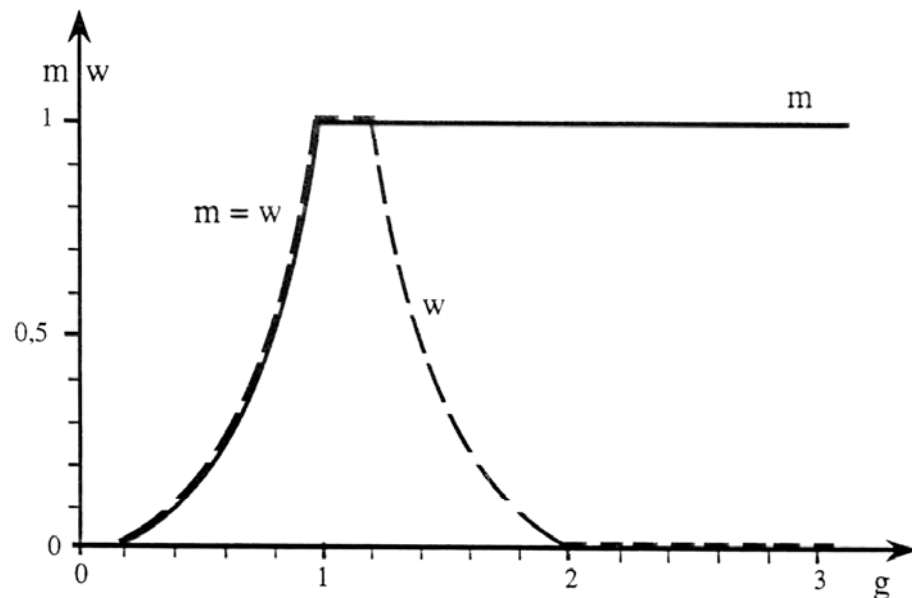
Überschlag an Freileitung

Einfluss atmosphärischer Bedingungen des Ortes der Prüfung (IEC 60060-1)

Bestimmung der Parameter m und w : mittels g und Graphik:

$$g \approx \frac{U_D [\text{kV}]}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k_g}$$

L : kürzester Entladungsweg in [m]
 k_g : Faktor (abhängig vom Typ der Spannung und von h/b)



gültig bis 2'000 m über Meer

1. Freileitungen

Überschlag an Freileitung

Einfluss atmosphärischer Bedingungen des Einsatzortes (IEC 60071-2)

- Teil der Isolationskoordination (Schritt Nr. 3 in IEC 60071-2)
- Berücksichtigung der Abhängigkeit der Festigkeit der Luft auf die lokal in der Höhe H zu erwartenden Luftdichte
- Nur via Berücksichtigung einer isothermen Atmosphäre gemäss

$$\delta = \exp\left(-\frac{H}{8150}\right) \quad (\text{folgt aus barometrischen Höhenformel})$$

Die so genannte **Koordinations-Stehspannung** U_{cw} wird mit dem Faktor

$$K_a = \exp\left(m \cdot \frac{H}{8150}\right)$$

zur **erforderlichen Stehspannung** U_{rw} ($= K_a U_{cw}$) hoch korrigiert

Einfluss der Spannungsform:

- | | | |
|-------------------|-------------------------------|----------------------------|
| - Blitzstoss: | $\rightarrow m = 1$ | $U_D = U_0 \cdot \delta^m$ |
| - Schaltstoss: | $\rightarrow 0 \leq m \leq 1$ | (abhängig von U_{cw}) |
| - Wechselspannung | $\rightarrow m = 1/2$ | |

1. Freileitungen

Beispiel von Stützisolatoren



1. Freileitungen

Beispiel von Hängeisolatoren



HGÜ-Ventil

2. Energiekabel

Merkmale

- In sich geschlossenes Isoliersystem
- (zumeist) Konzentrisch

Anwendung

- Niederspannung
- Mittelspannung
- Hochspannung

Probleme

- Geringer Wellenwiderstand (hoher Kapazitätsbelag)
- Erwärmung durch ohmsche Verluste:
Wärmeabgabe in die Umgebung, Austrocknung von Böden
- Schlechte Wärmeleitung:
starke Erwärmung ist kritisch für die Isolation

2. Energiekabel

Kabelarten

Konventionelles Kabel

- Kunststoff
- Öl-Papier
- Massekabel

Hochtemperatur-Supraleitendes Kabel

Probleme:

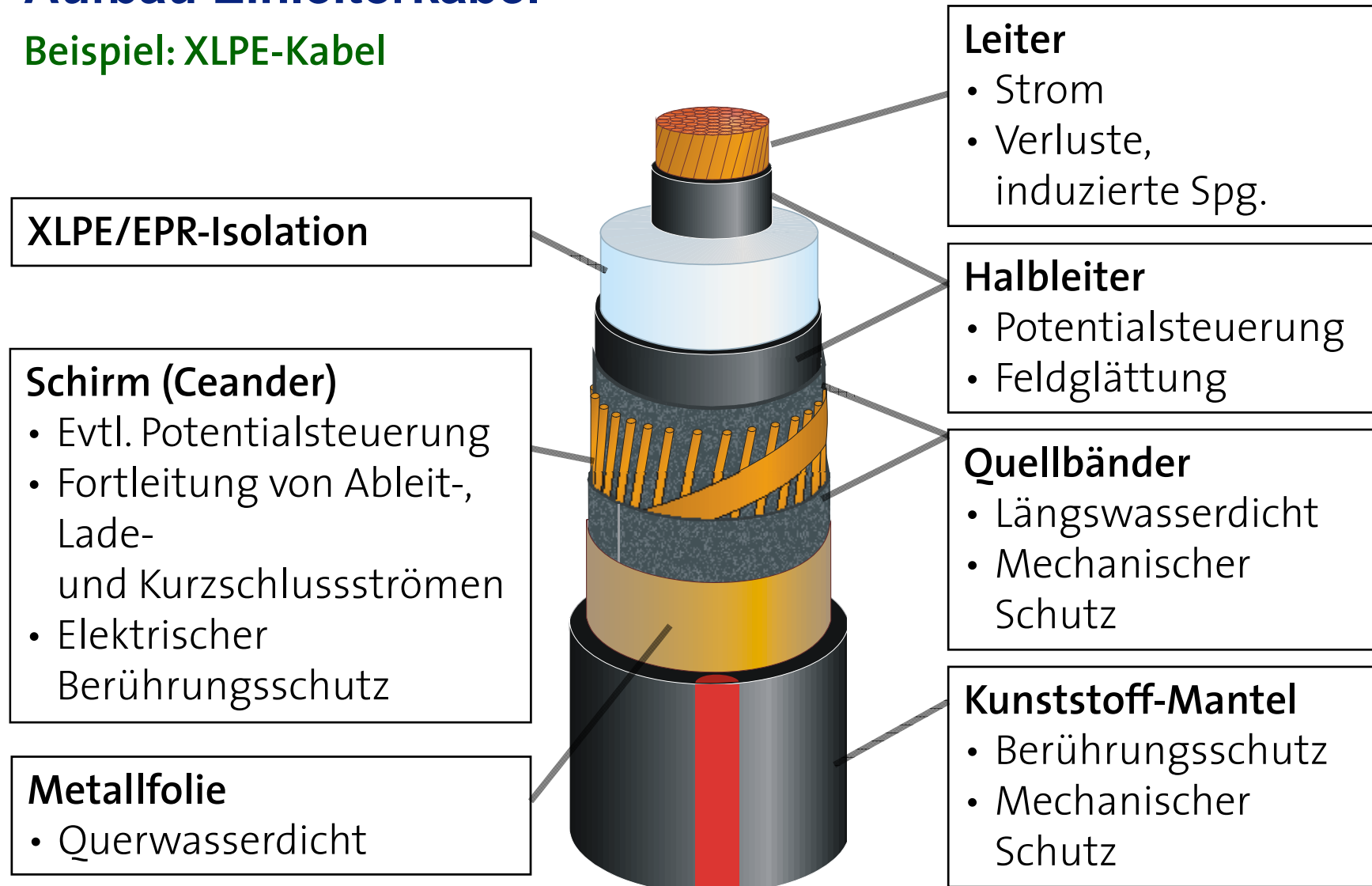
- Kühlaufwand
- Kosten

Nur Demonstrationsinstallationen

2. Energiekabel

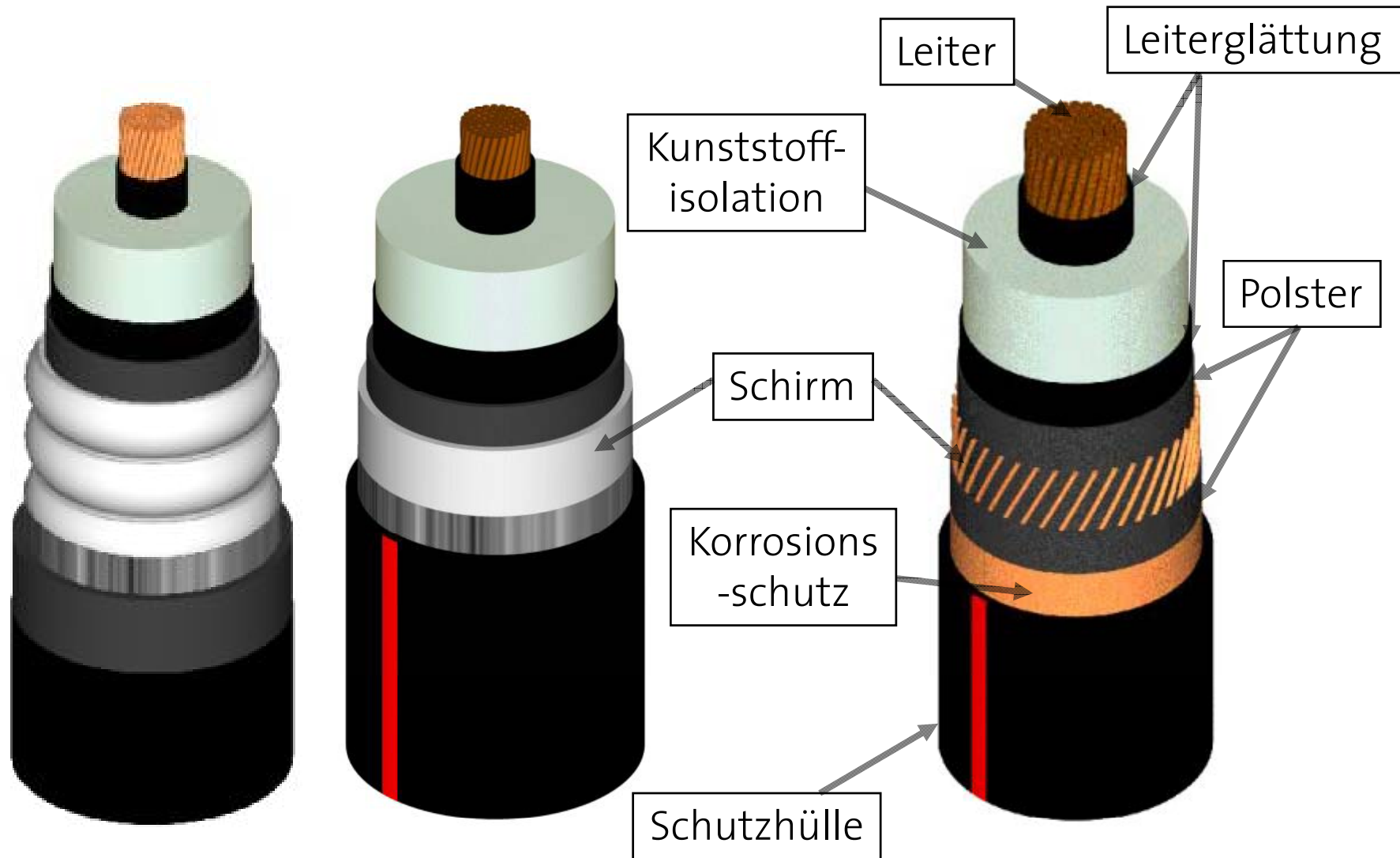
Aufbau Einleiterkabel

Beispiel: XLPE-Kabel



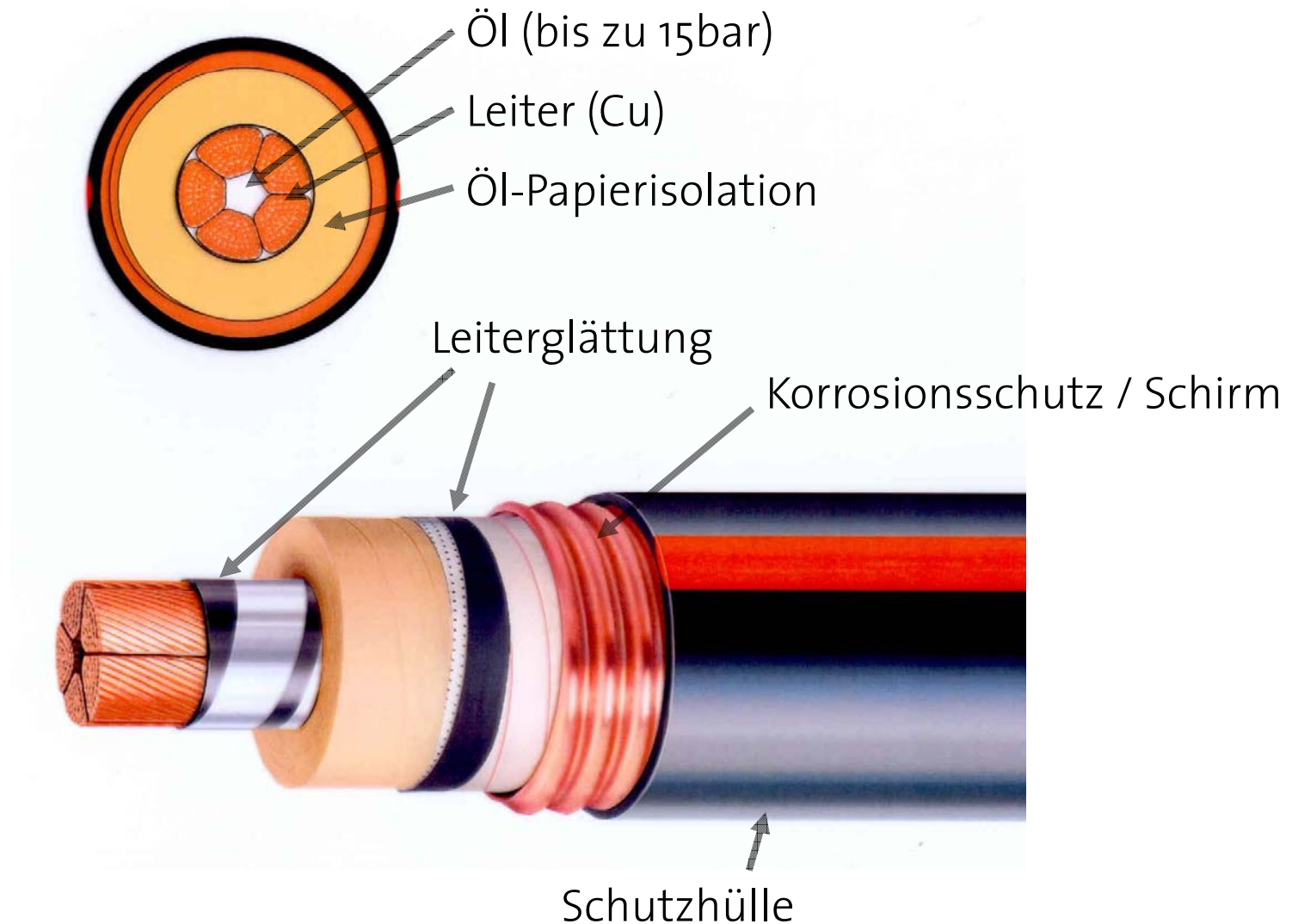
2. Energiekabel

Aufbau Einleiterkabel



2. Energiekabel

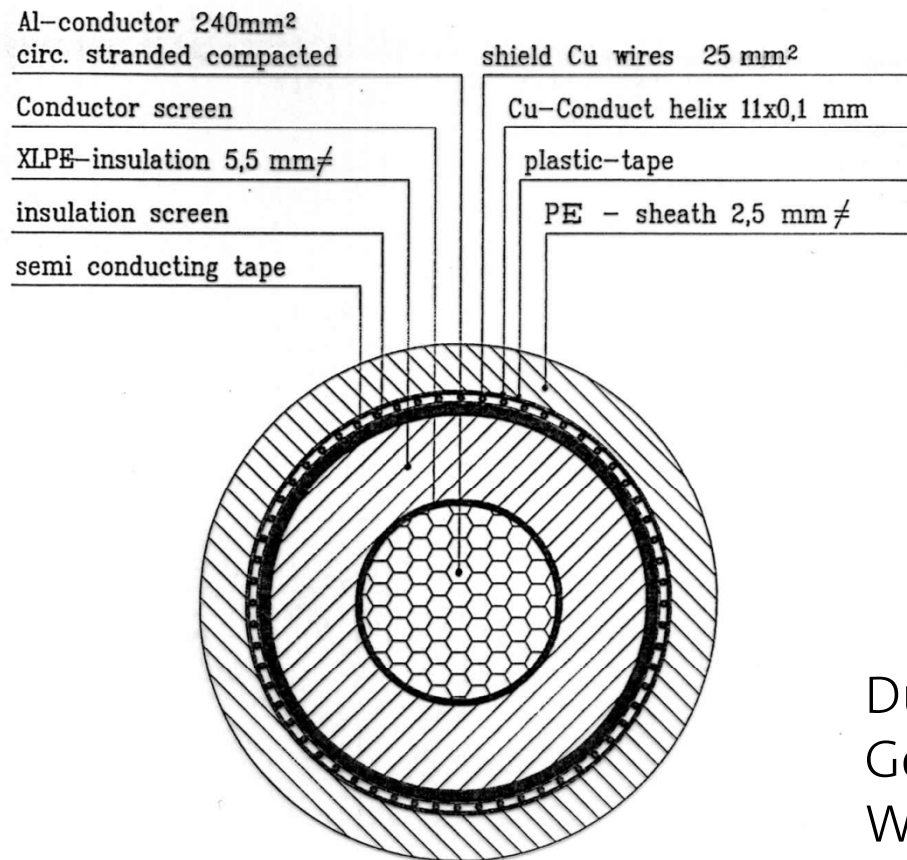
Einleiterkabel: Ölinnendruckkabel



2. Energiekabel

Einleiterkabel: XLPE-Kabel

XLPE-Kabel der Firma WKM



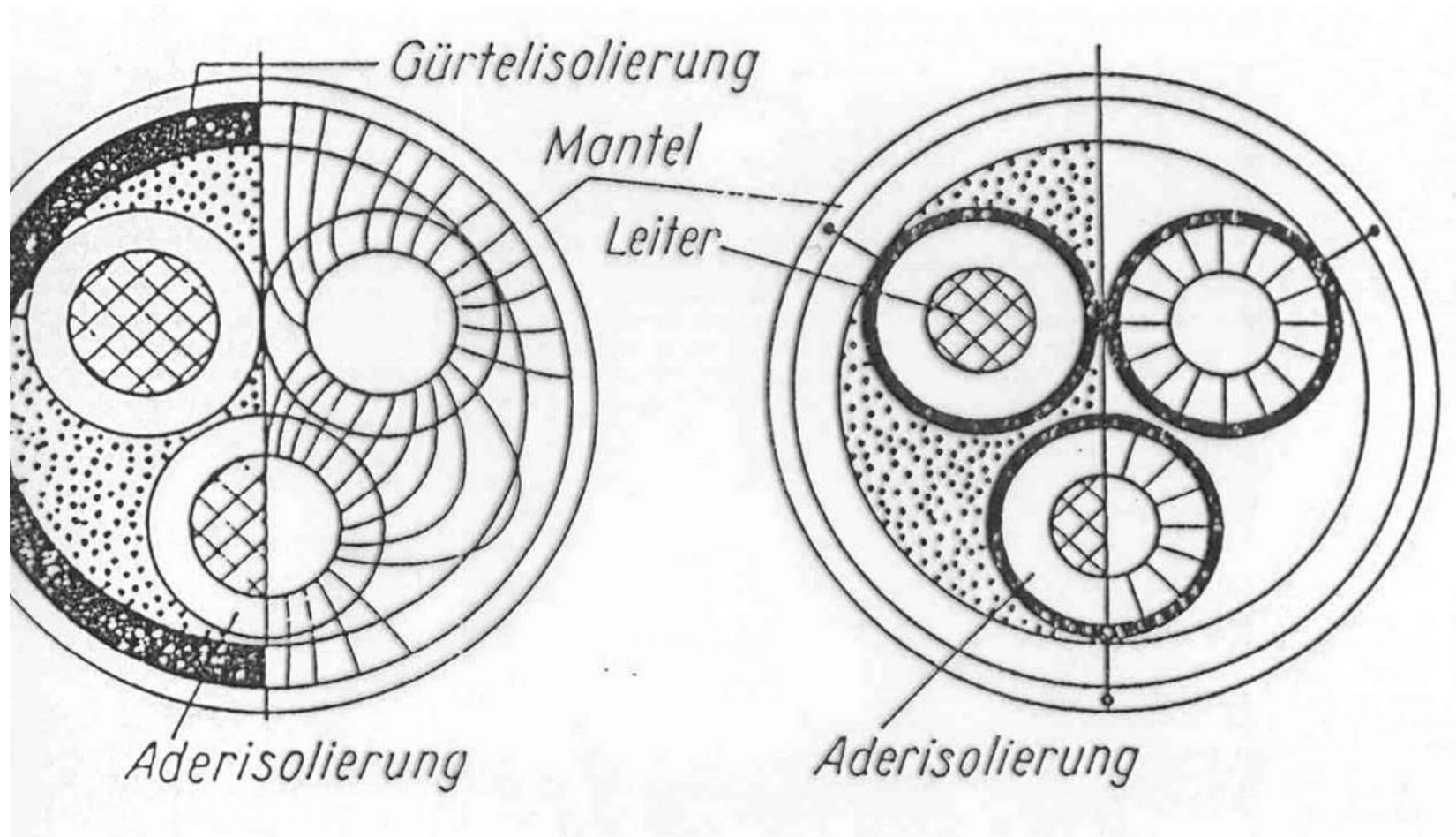
Durchmesser: 39mm
 Gewicht: 1670 kg/km
 Widerstand bei 20°C: 0.125 Ω/km

2. Energiekabel

Dreileiterkabel

Feldbild - Gesamtschirmung

Feldbild - Einzelschirmung



2. Energiekabel

Dreileiterkabel – Sektorleiterkabel

Cu Leiter 120 mm² SM
Cu conductor 120 mm²
stranded shaped

Innere Schutzuehle, Bitumen + Papier
bedding, papers, bit. compounded between

Isolationspapier 3,2 mm ≠
insulationpaper

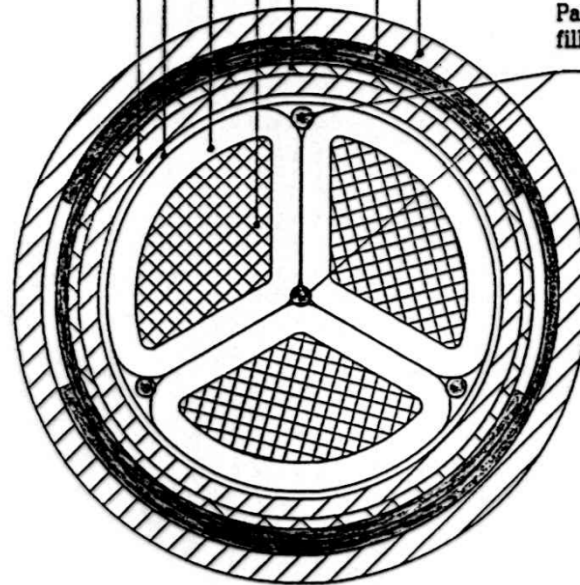
Isolationspapier 0,5 mm ≠
insulationpaper

Bleimantel 1,7 mm ≠
lead sheath

Bewehrung, 2 bit. Stahlbaender 0,8 mm ≠
armouring, 2 bit. steel tape

PVC Mantel 2,6 mm ≠
PVC sheath

Papiertrense
filler (paper)



Durchmesser: 54 mm
Gewicht: 8600 kg/km
Widerstand bei 20°C: 0.153 Ω/km

2. Energiekabel

Dreileiterkabel – Höchststädterkabel

Über Bleimantel :

Umhüllung aus Bitumenmasse und Papier Bleimantel 1,5 mm ≠

Zellwollgewebeband

Innere Schutzhülle :

Bitumenmasse+Papier 2,0 mm ≠

2 Lagen bit. Bandeisen 1,0 mm ≠

Äussere Schutzhülle:

Bitumenmasse+Jute+Kreide 2,0 mm≠

Zwickelfüllung aus bit.Papier-

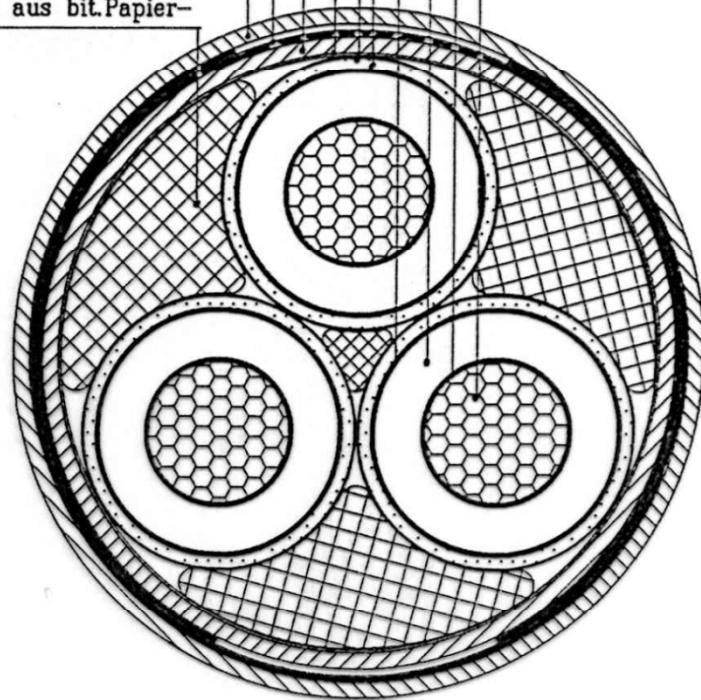
Jutetrensen

Kohlepap. mit Höchststädterfolie überlappt

Isolationspapiere 5,5 mm ≠

2 Lagen halbleitendes Kohlepapier

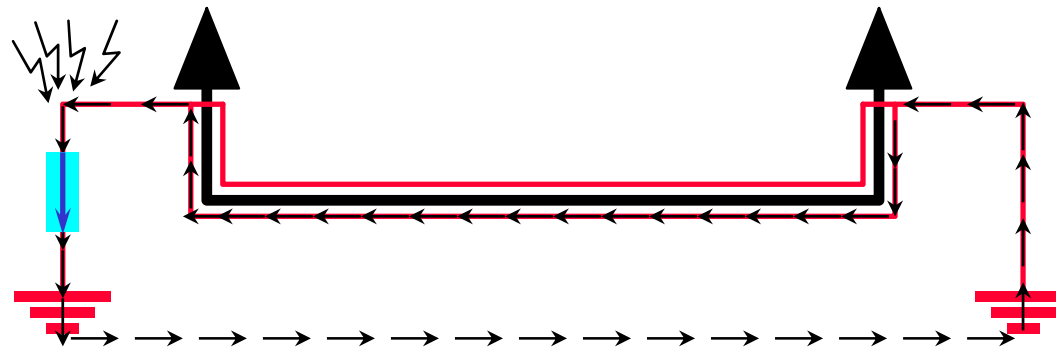
Cu Leiter 150 mm² rnv



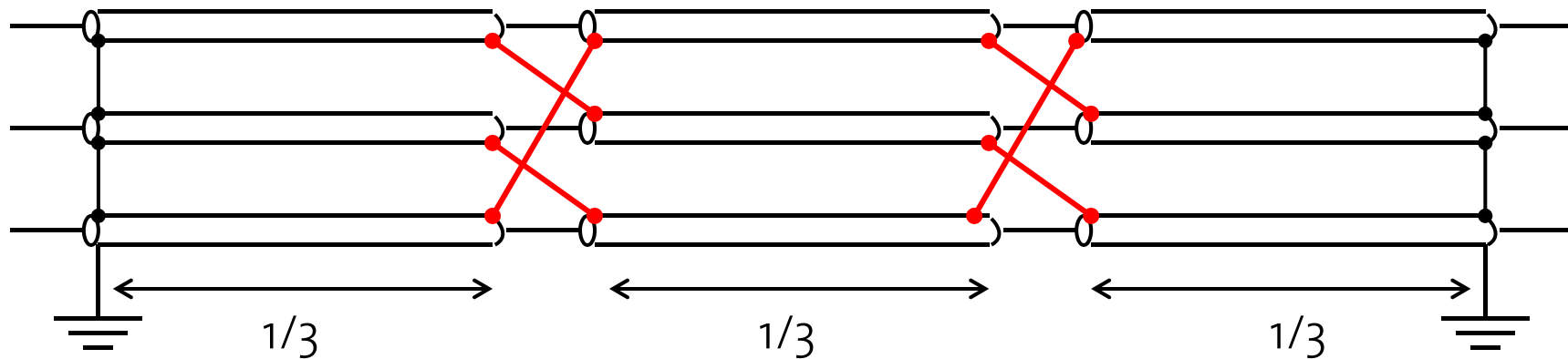
Durchmesser: 76 mm
 Querschnitt Bleimantel: 3x126 mm²
 Gewicht: 13600 kg/km
 Widerstand bei 20°C: 0.124 Ω/km

2. Energiekabel Schirmbehandlung

Mantelerdung (Überspannungsableiter)



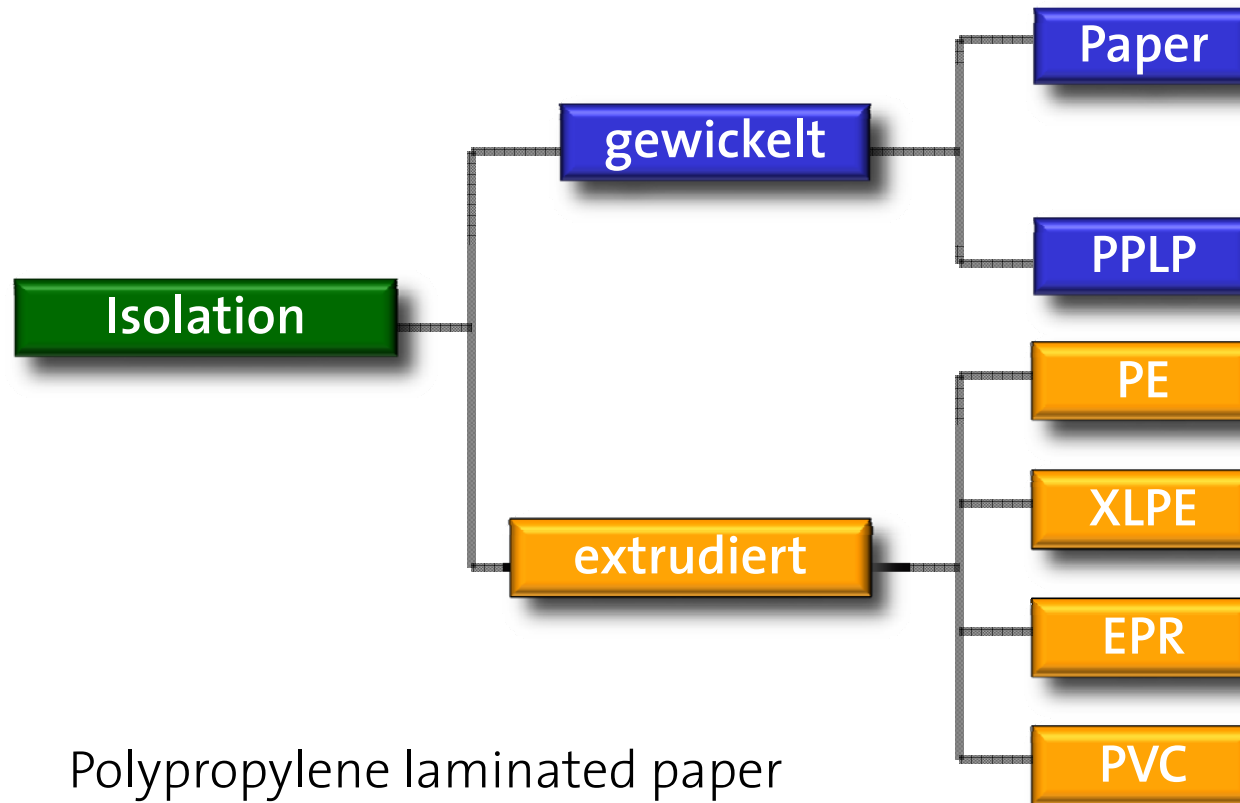
Cross bonding (120 °C versetzte Mantelströme)



2. Energiekabel

Isolationsarten

Überblick

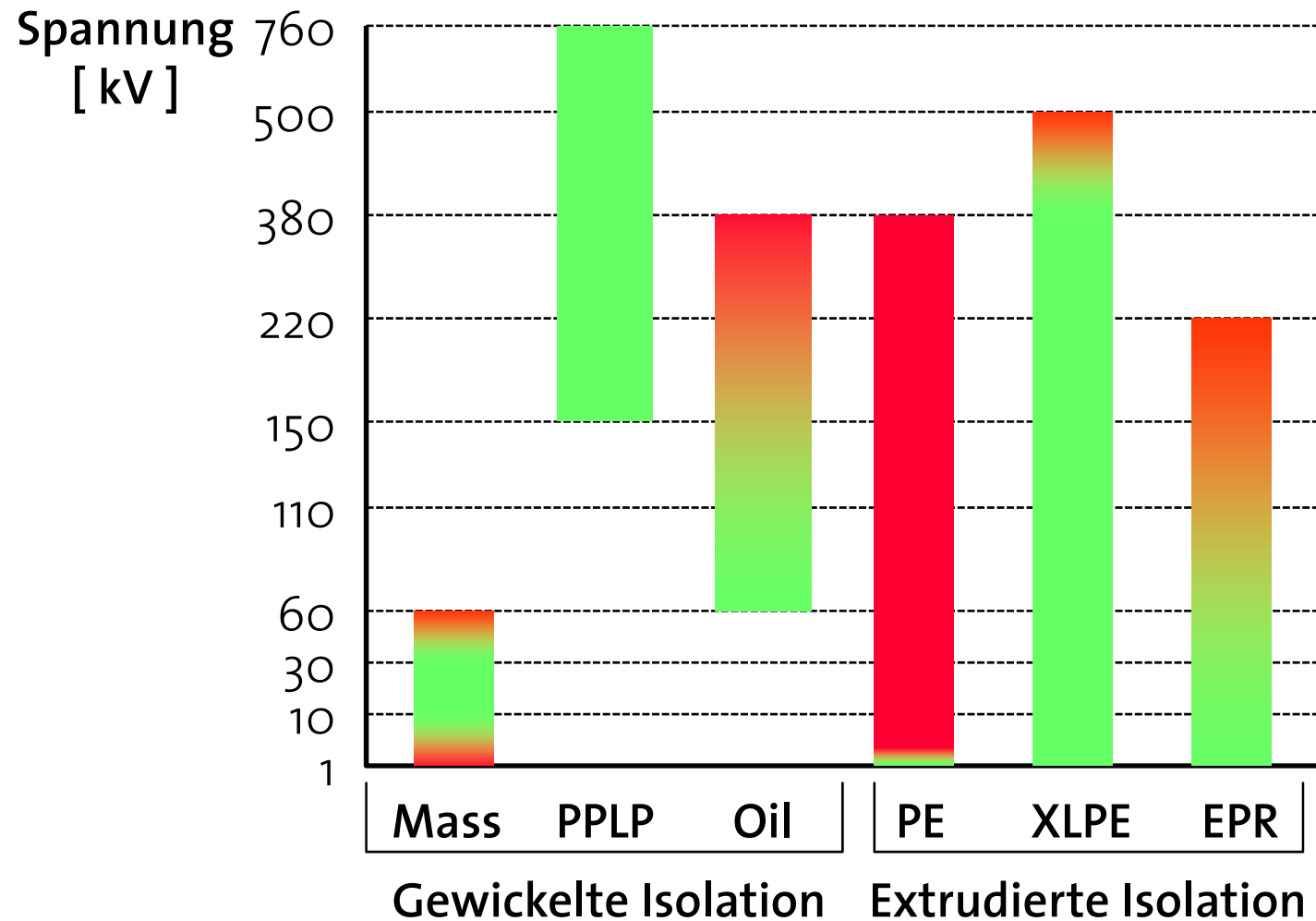


PPLP Polypropylene laminated paper
PE Polyethylene
EPR Ethylene Propylene Copolymer
PVC Polyvinylchloride

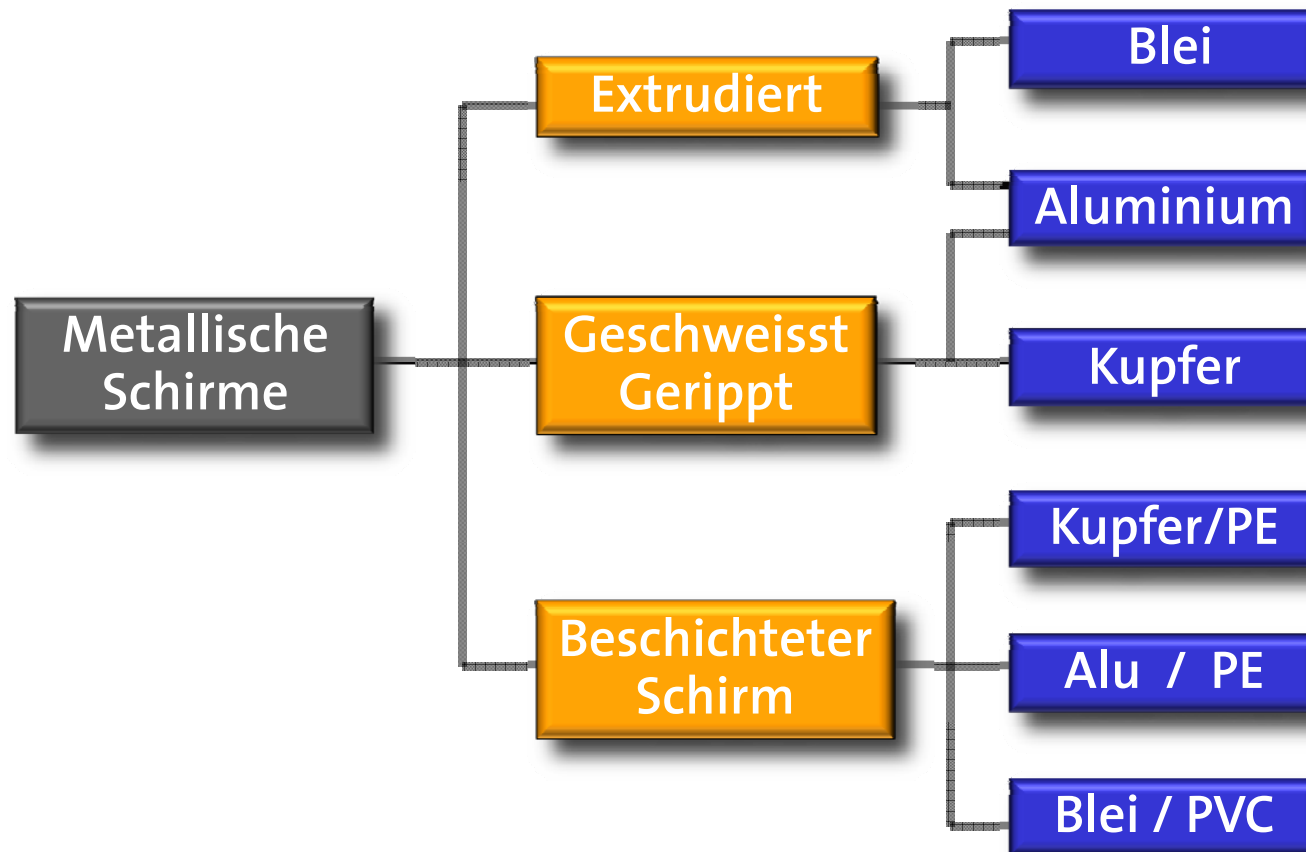
2. Energiekabel

Isolationsarten

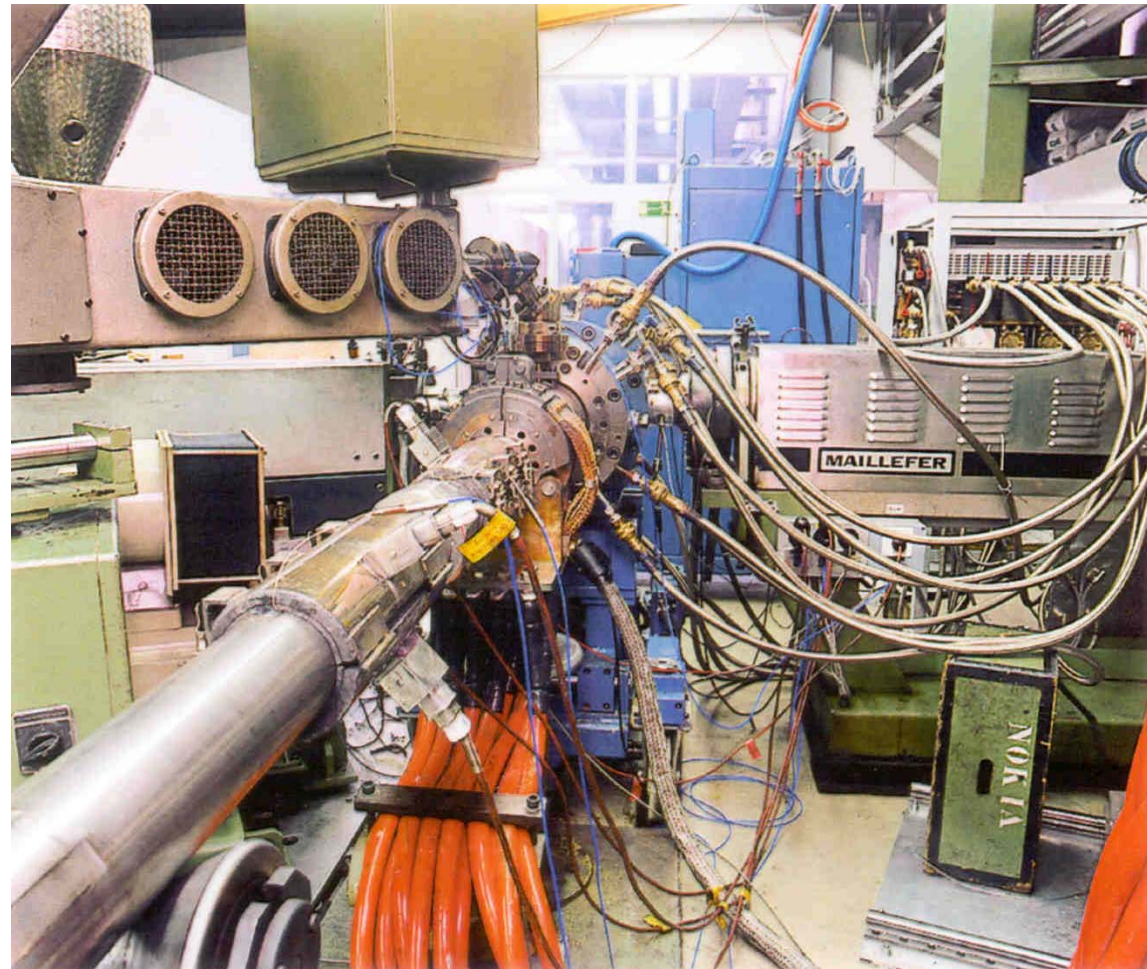
Einsatzbereiche



2. Energiekabel Schirmarten



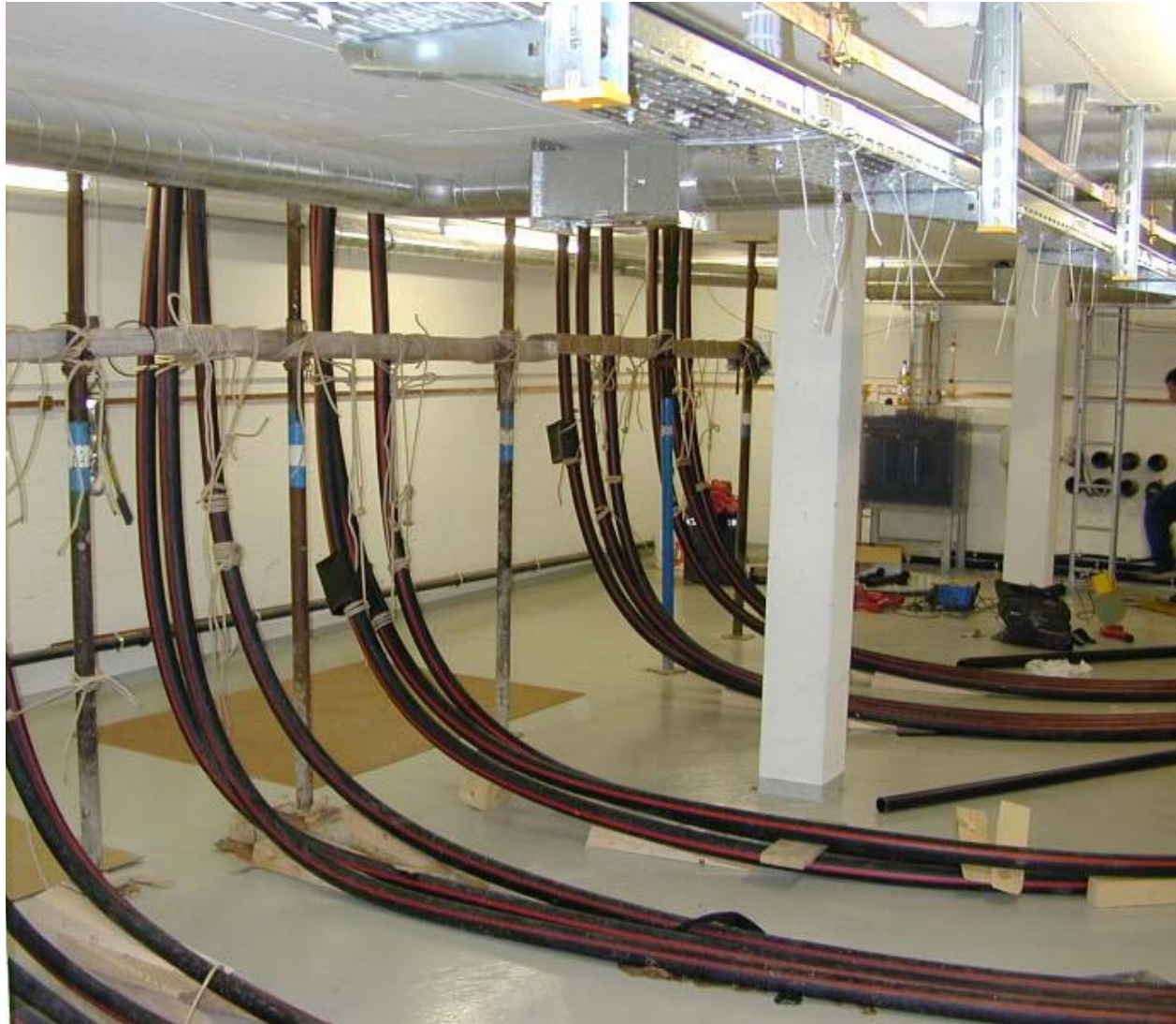
2. Energiekabel Extruder



2. Energiekabel Installationsbeispiele



2. Energiekabel Installationsbeispiele



2. Energiekabel Installationsbeispiele



2. Energiekabel Installationsbeispiele



2. Energiekabel Kabelgarnituren

Bezeichnungen

Mit Kabelgarnituren werden

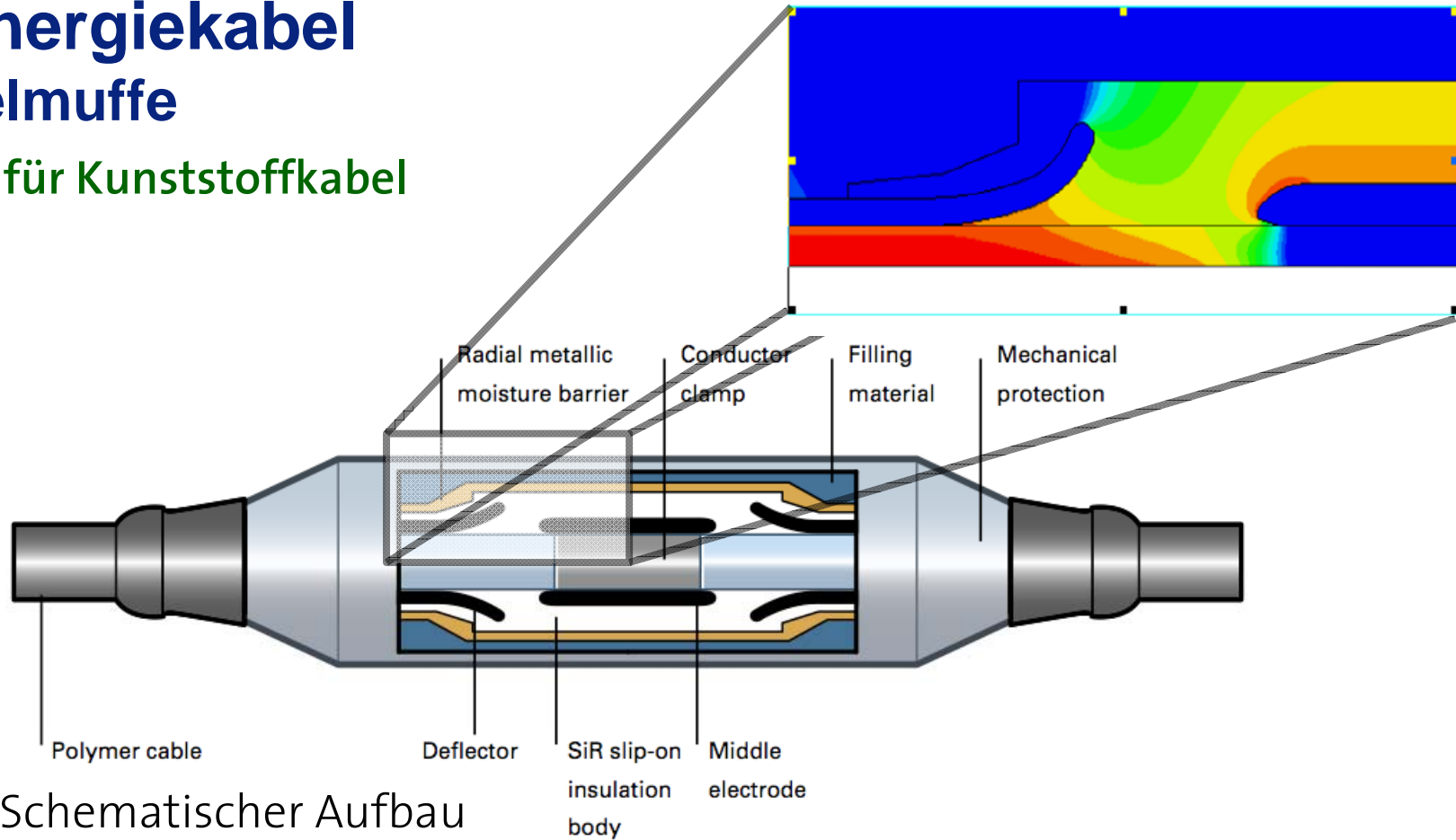
- Kabelendverschluss
(das Kabelende bedeutet ein Wechsel des Isoliersystems – ähnliche Problematik wie bei Durchführungen allgemein)
- Kabelmuffe
(über lange Strecken müssen Kabel zusammengefügt werden)
bezeichnet.

Bedeutung

Die Kabelgarnituren sind vergleichsweise komplex und stellen die empfindlichsten Punkte im Energiekabel dar.

2. Energiekabel Kabelmuffe

Muffe für Kunststoffkabel



Schematischer Aufbau

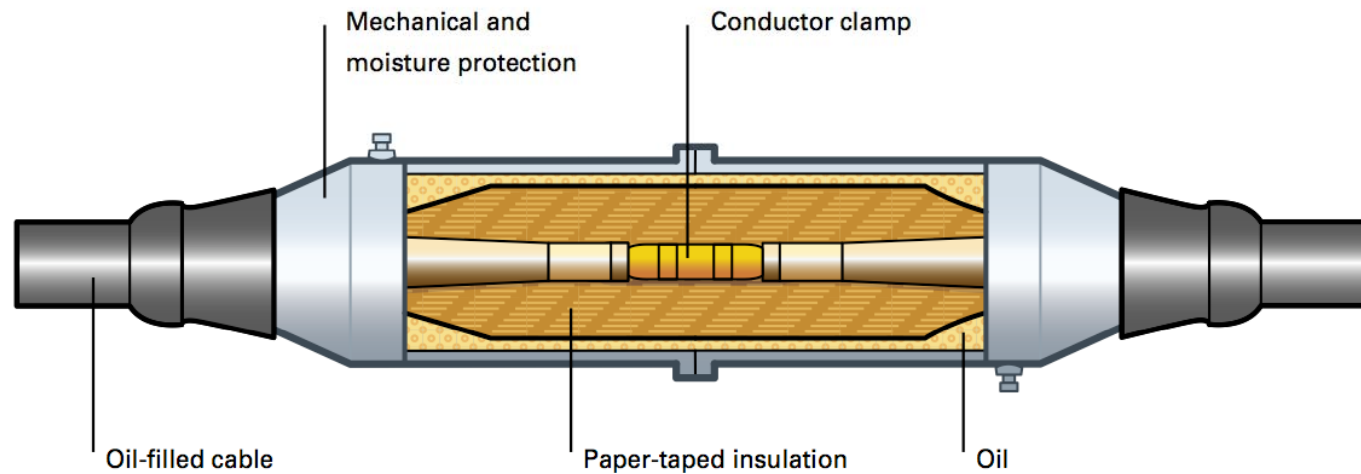


Innenansicht

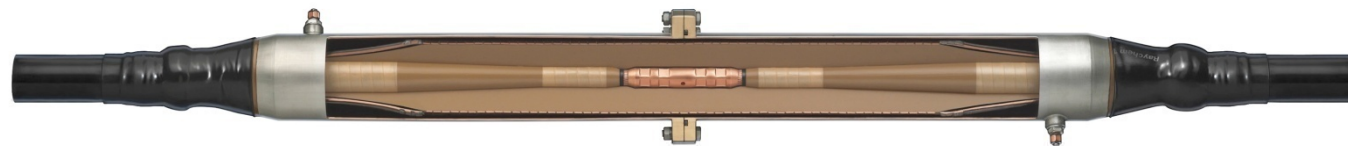
2. Energiekabel

Kabelmuffe

Muffe für Öl/Papier-Kabel



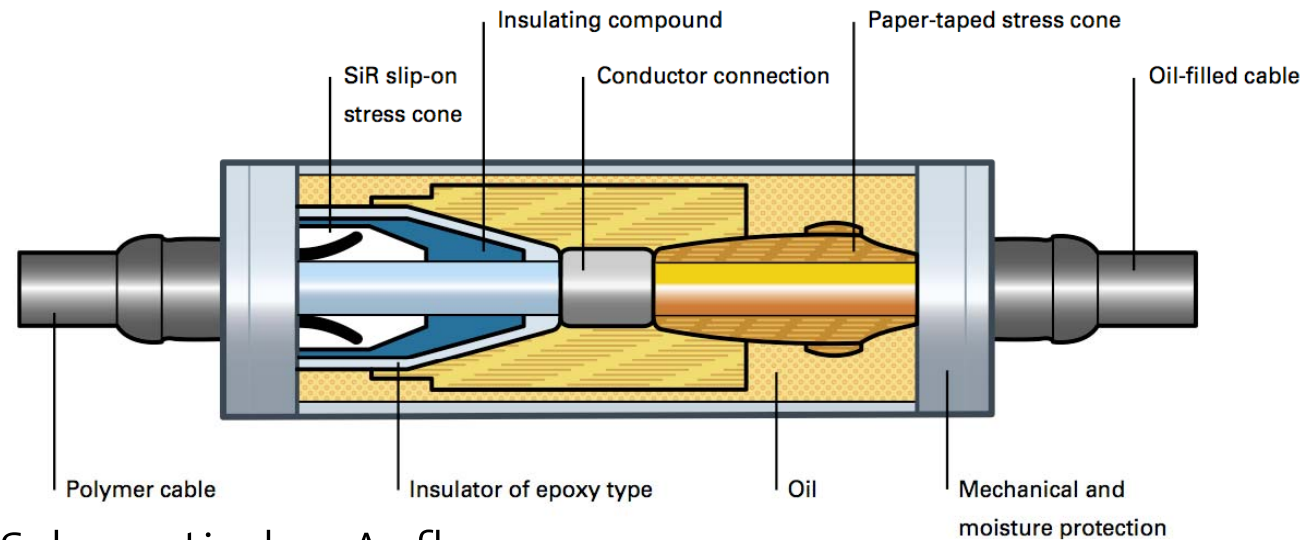
Schematischer Aufbau



Innenansicht

2. Energiekabel Kabelmuffe

Muffe für Kunststoff- zu Öl/Papier-Kabel



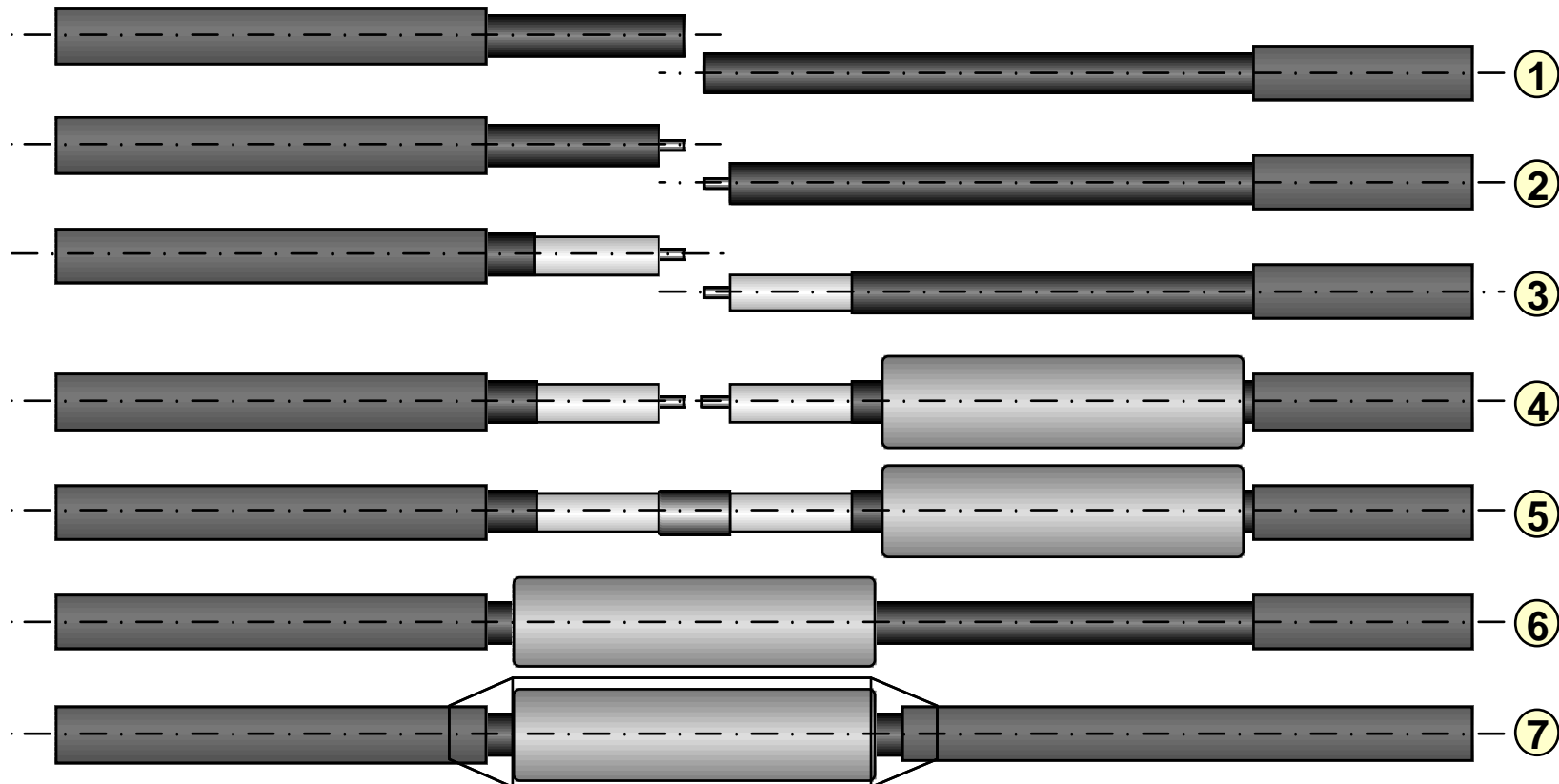
Schematischer Aufbau



Innenansicht

2. Energiekabel Kabelmuffe

Montage der Muffe des Kunststoffkabels



- | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| ① Entfernung der Ummantelung | ② Freilegung des Leiters | ③ Entfernung des äusseren Schirms |
| ④ Einführung des Muffenkörpers | ⑤ Installation der Leiterverbindung | |
| ⑥ Positionierung des Muffenkörpers | ⑦ Montage des Gehäuses | |

2. Energiekabel

Kabelmuffe

Installationsbeispiel



2. Energiekabel

Kabelmuffe

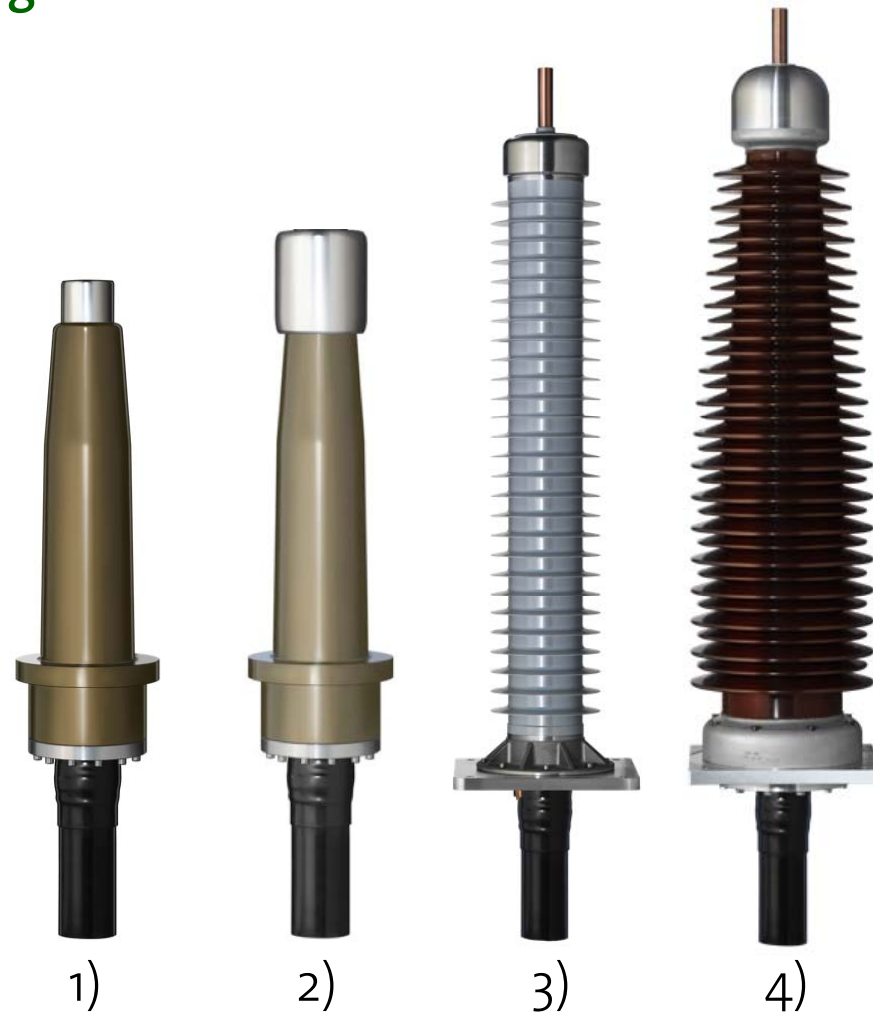
Installationsbeispiel



2. Energiekabel Kabelendverschluss

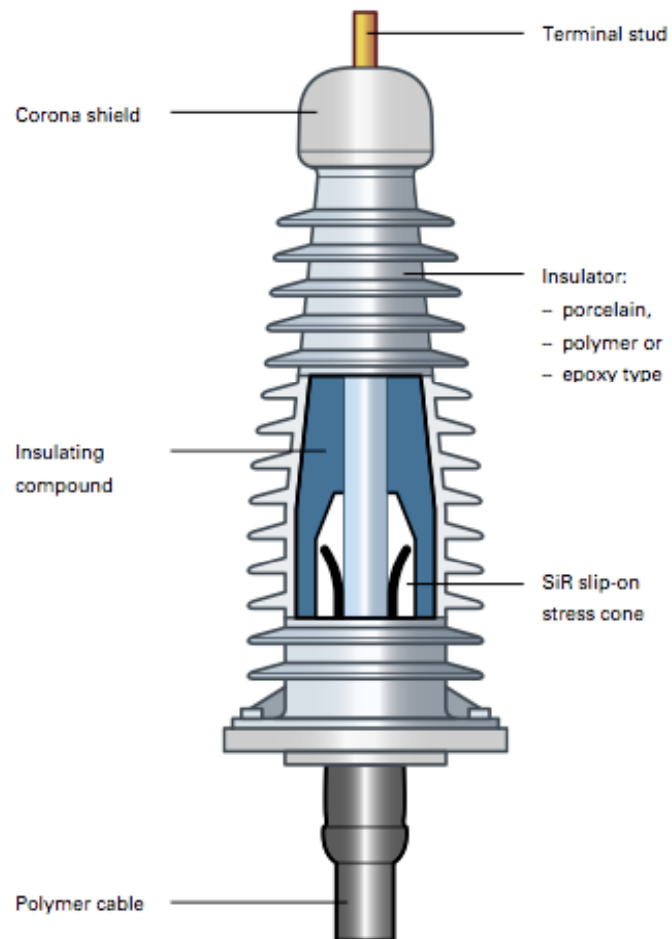
Übersicht der Typen nach Anwendung

- 1) GIS
- 2) Transformator
- 3) Freiluft mit Silikon-Isolator
- 4) Freiluft mit Porzellan-Isolator



2. Energiekabel Kabelendverschluss

Design für Kunststoffkabel



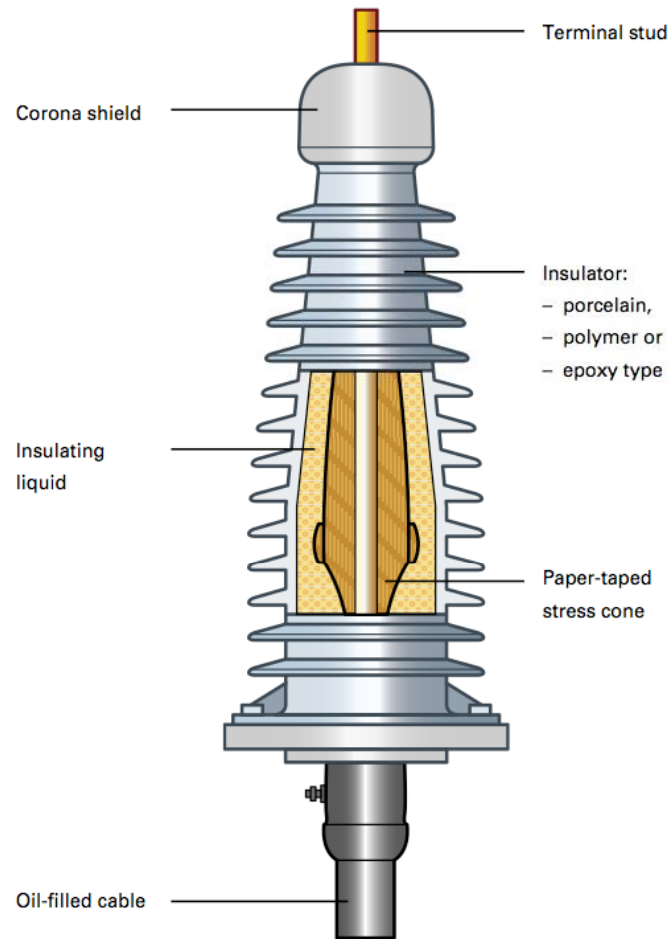
Schematischer Aufbau



Innenansicht

2. Energiekabel Kabelendverschluss

Design für Öl/Papier-Kabel



Schematischer Aufbau

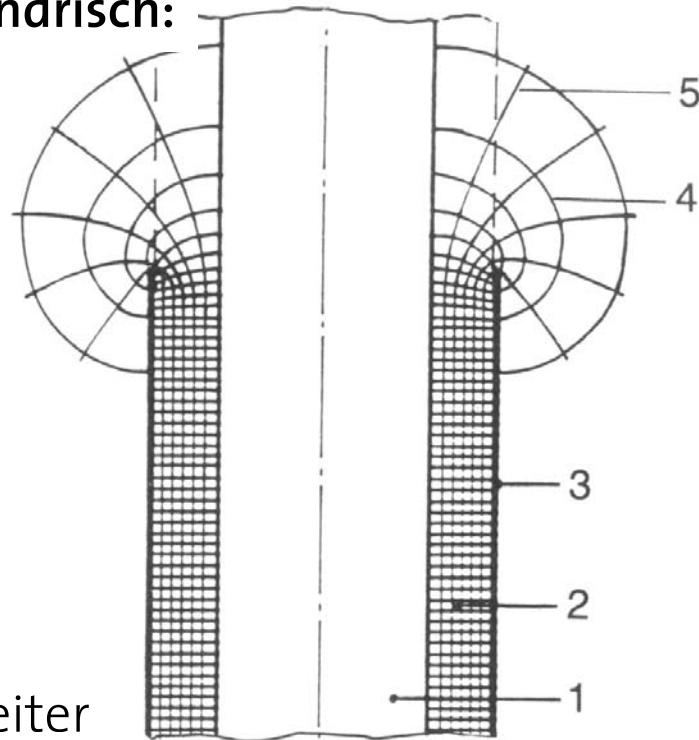


Innenansicht

2. Energiekabel Kabelendverschluss

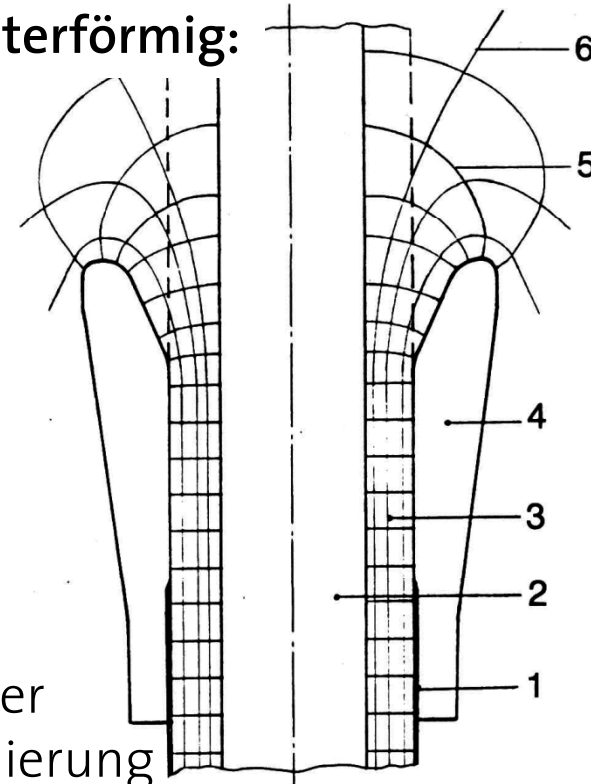
Potentialsteuerung

Zylindrisch:



- 1 Leiter
- 2 Isolierung
- 3 äussere Leitschicht
- 4 Feldlinien
- 5 Äquipotentiallinien

Trichterförmig:

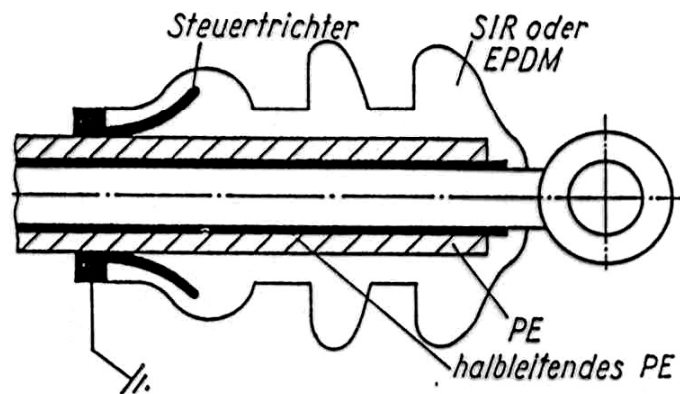


- 1 Leiter
- 2 Isolierung
- 3 äussere Leitschicht
- 4 Feldsteuerungstrichter
- 5 Feldlinien
- 6 Äquipotentiallinien

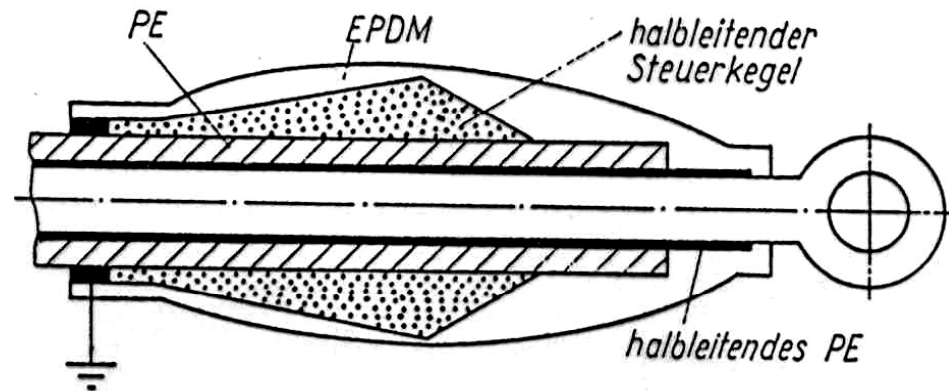
2. Energiekabel Kabelendverschluss

Potentialsteuerung Kabelendverschluss von PE-Kabeln

Geometrisch Steuerung:



Resistive Steuerung:



1. Energiekabel

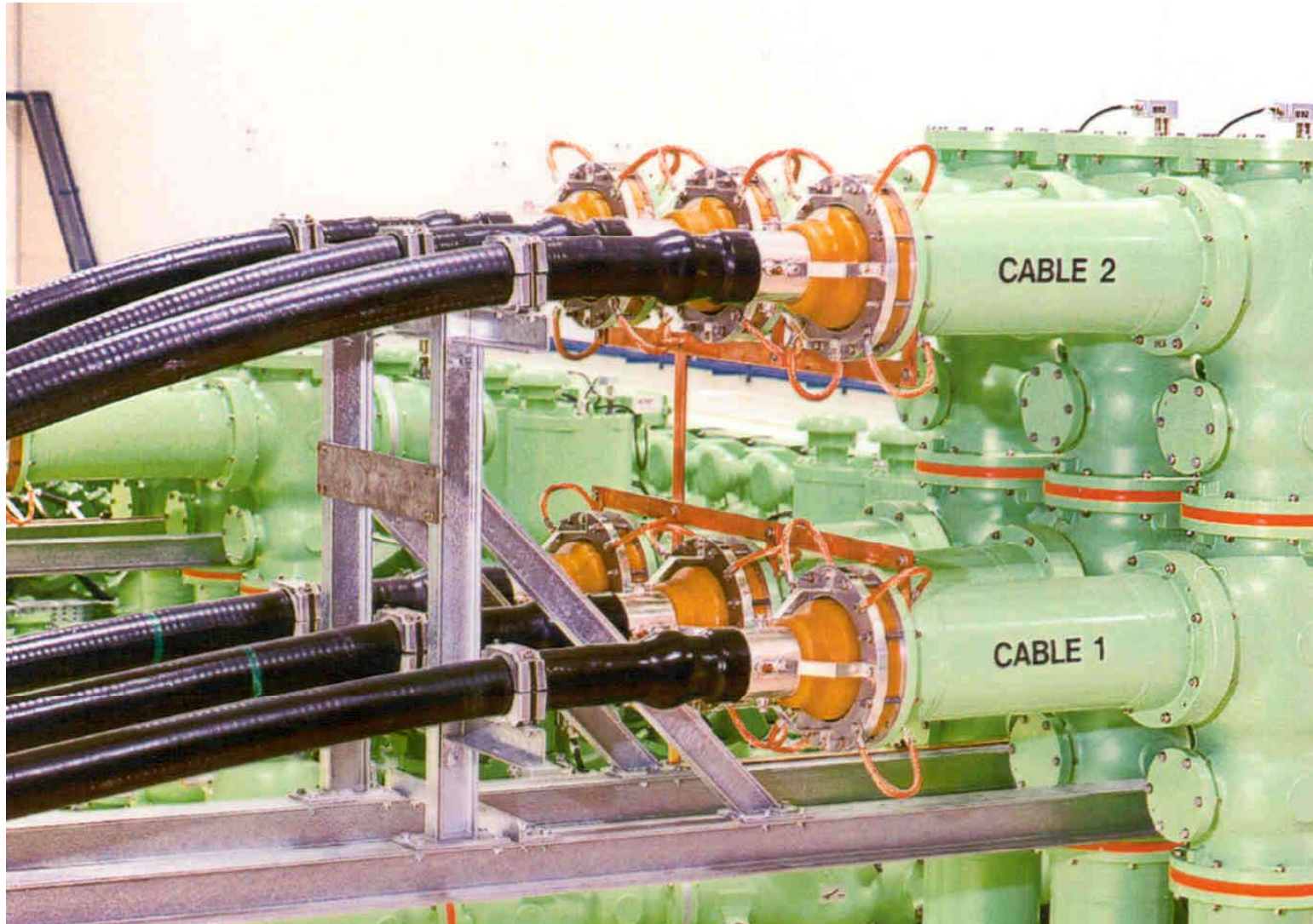
Kabelendverschluss

Freiluft-Endverschluss für 110 kV-VPE-(Protothen)-Kabel:



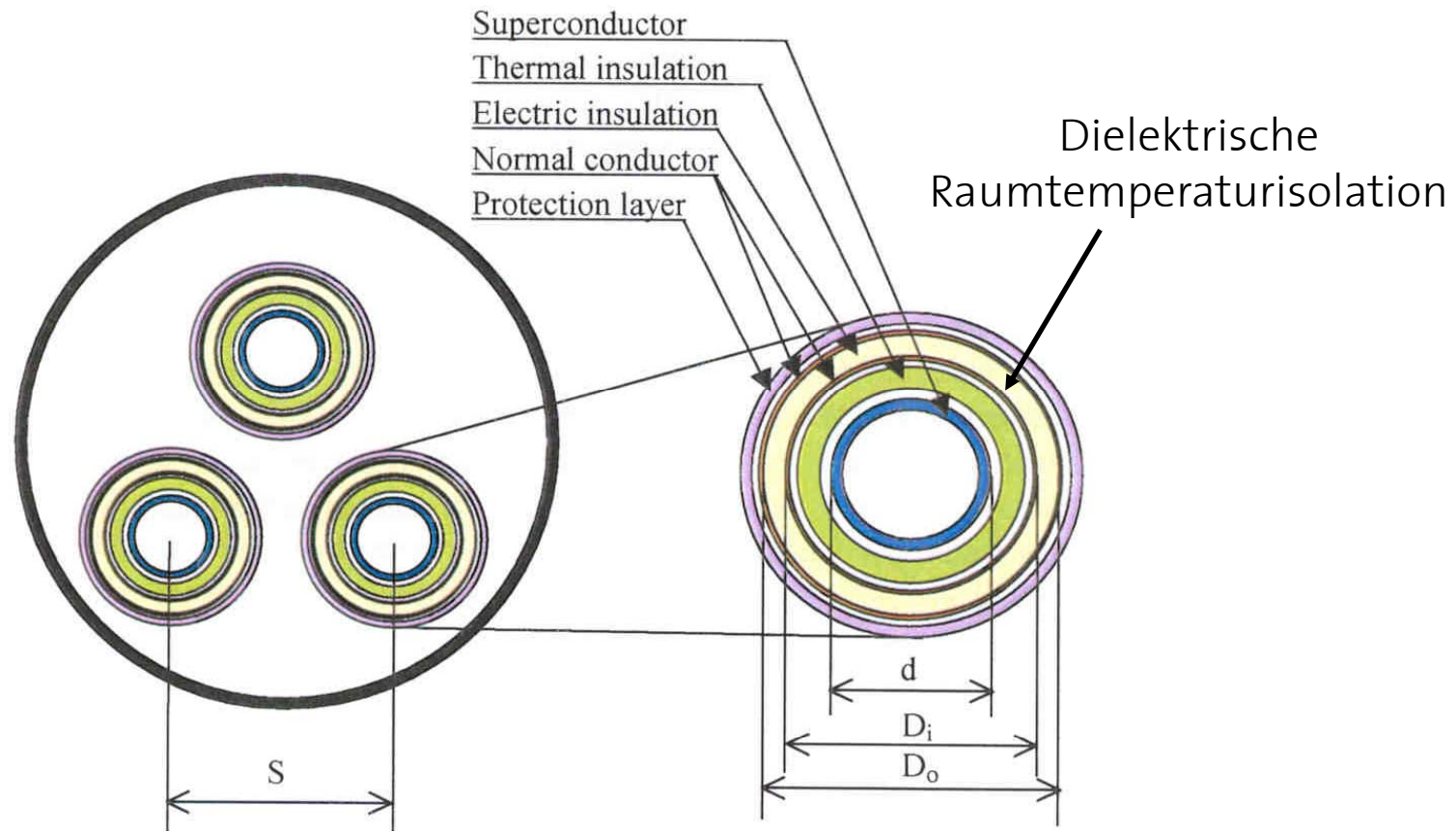
2. Energiekabel

Durchführung Kabel-GIS



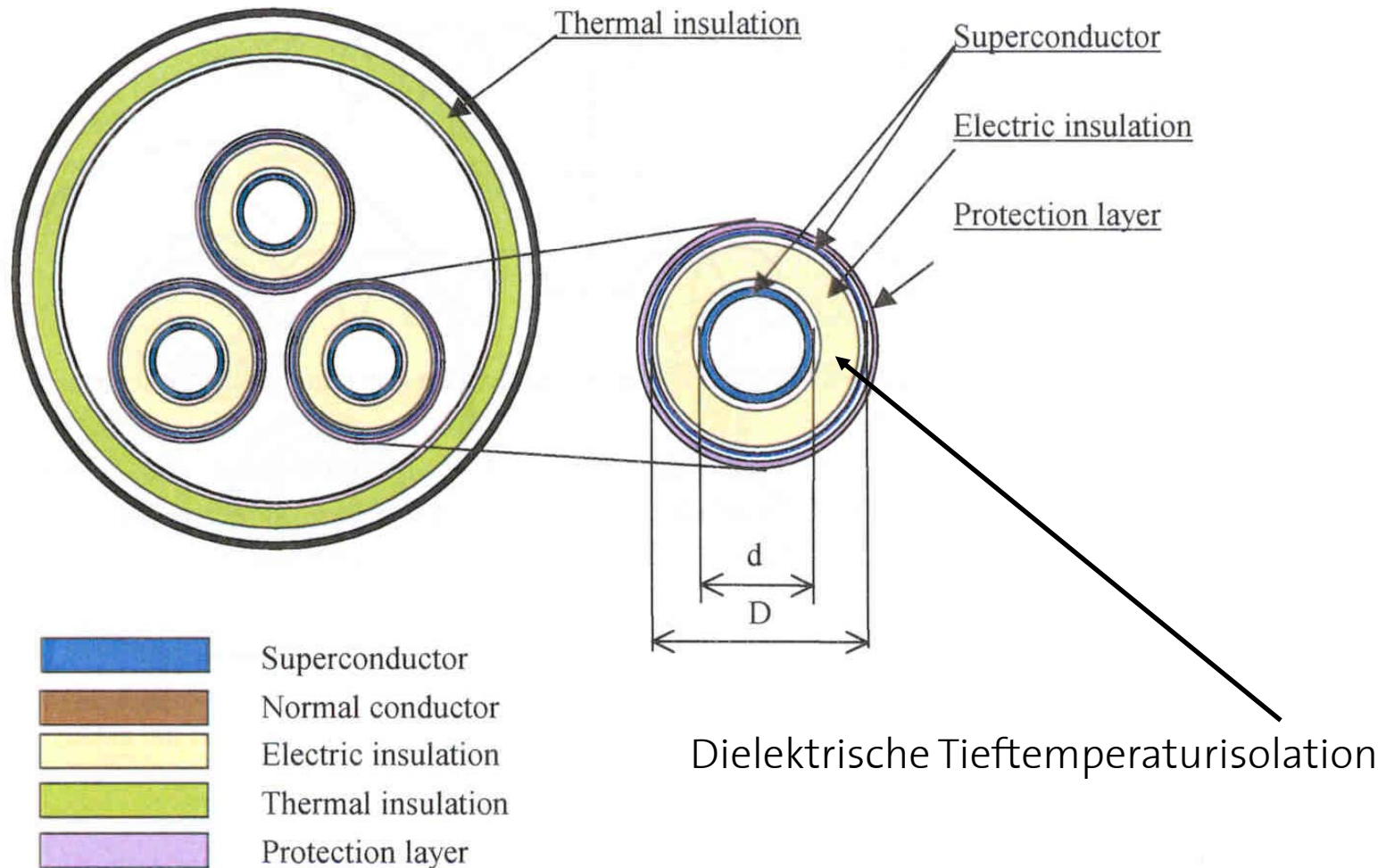
2. Energiekabel

Supraleitendes Kabel

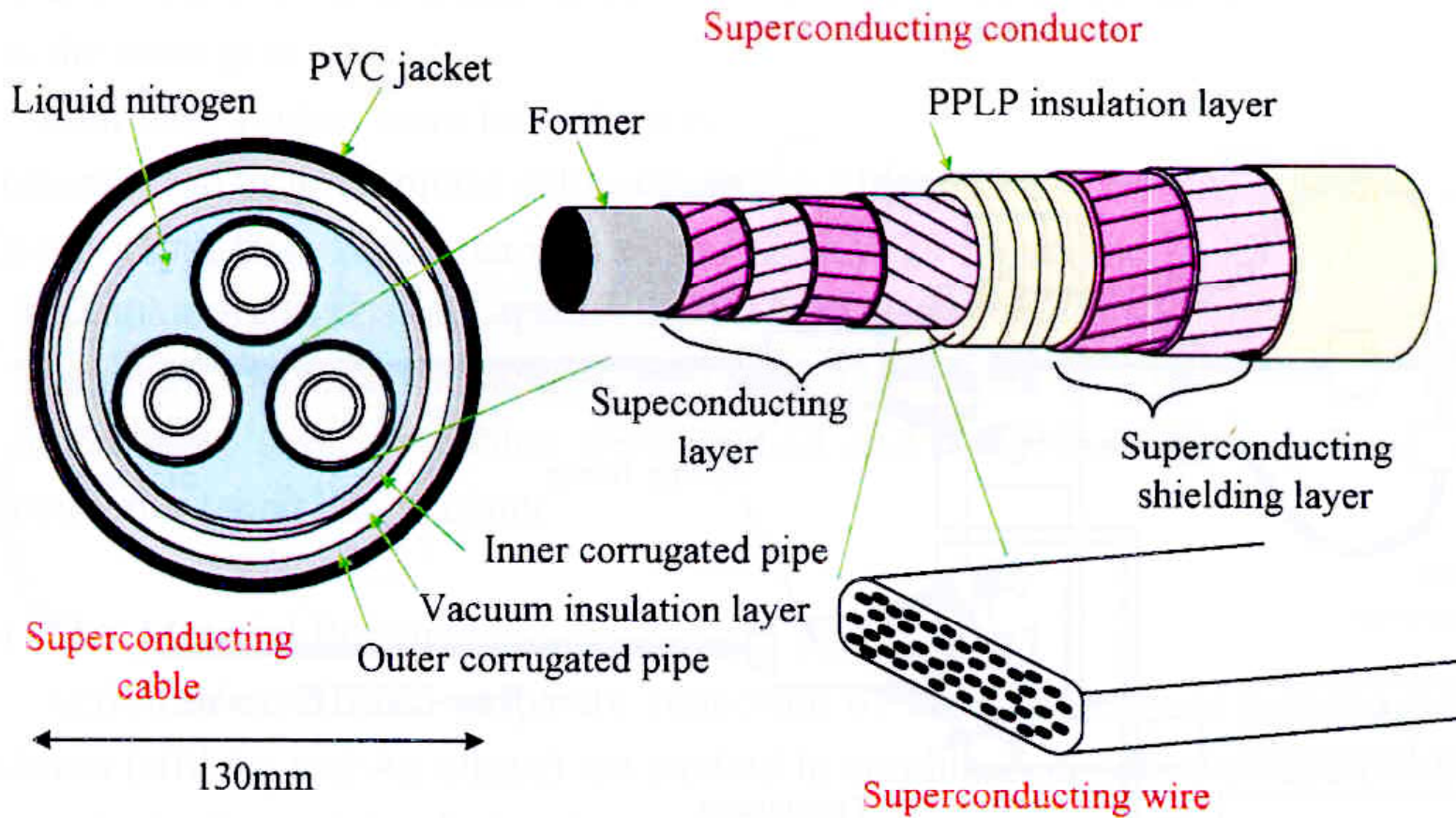


S : distance between centers of phase conductors, D_o : outer diameter of the electric insulation layer,
 D_i : inner diameter of electric insulation layer, d : outer diameter of the superconductor.

2. Energiekabel Supraleitendes Kabel



2. Energiekabel Supraleitendes Kabel



2. Energiekabel

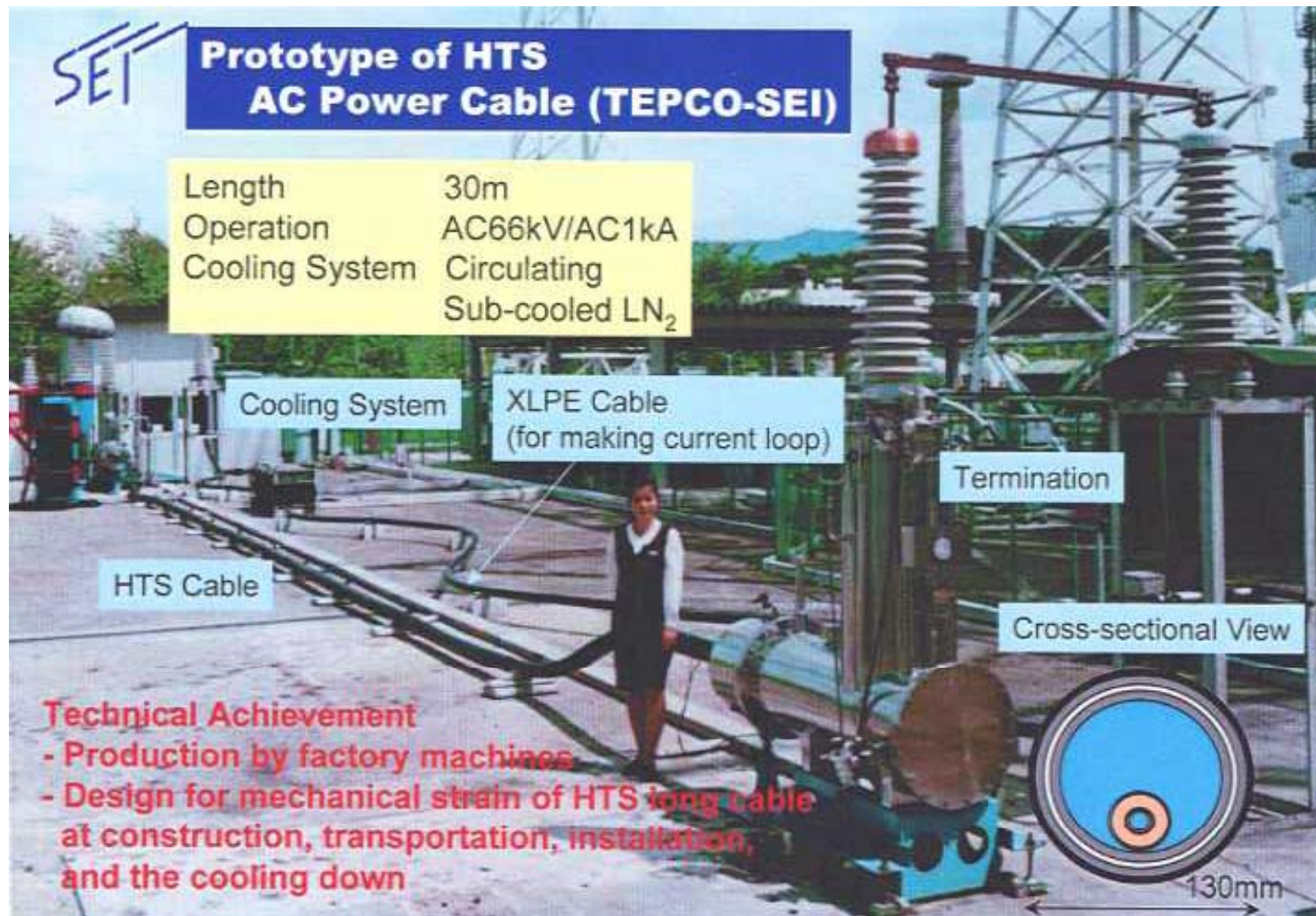
Supraleitendes Kabel



2. Energiekabel

Supraleitendes Kabel

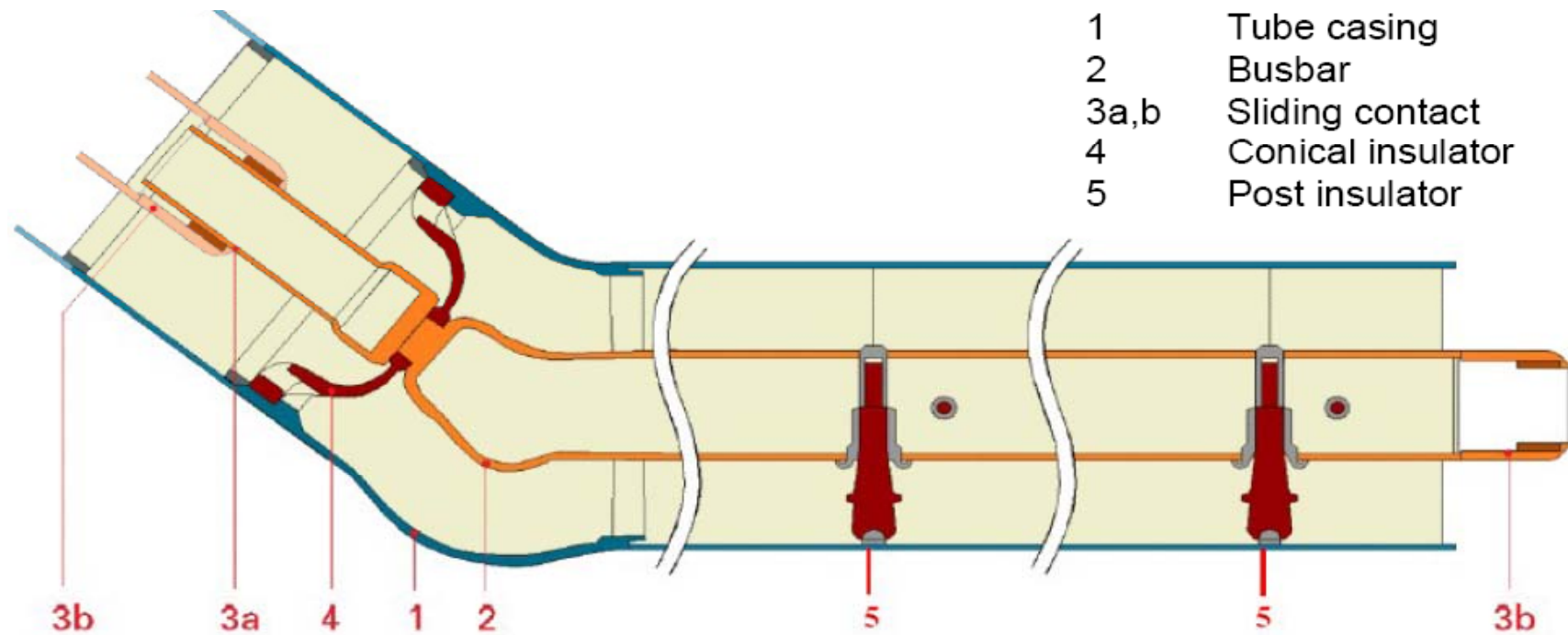
Installationsbeispiel



3. Gasisolierte Leitung GIL

Aufbau

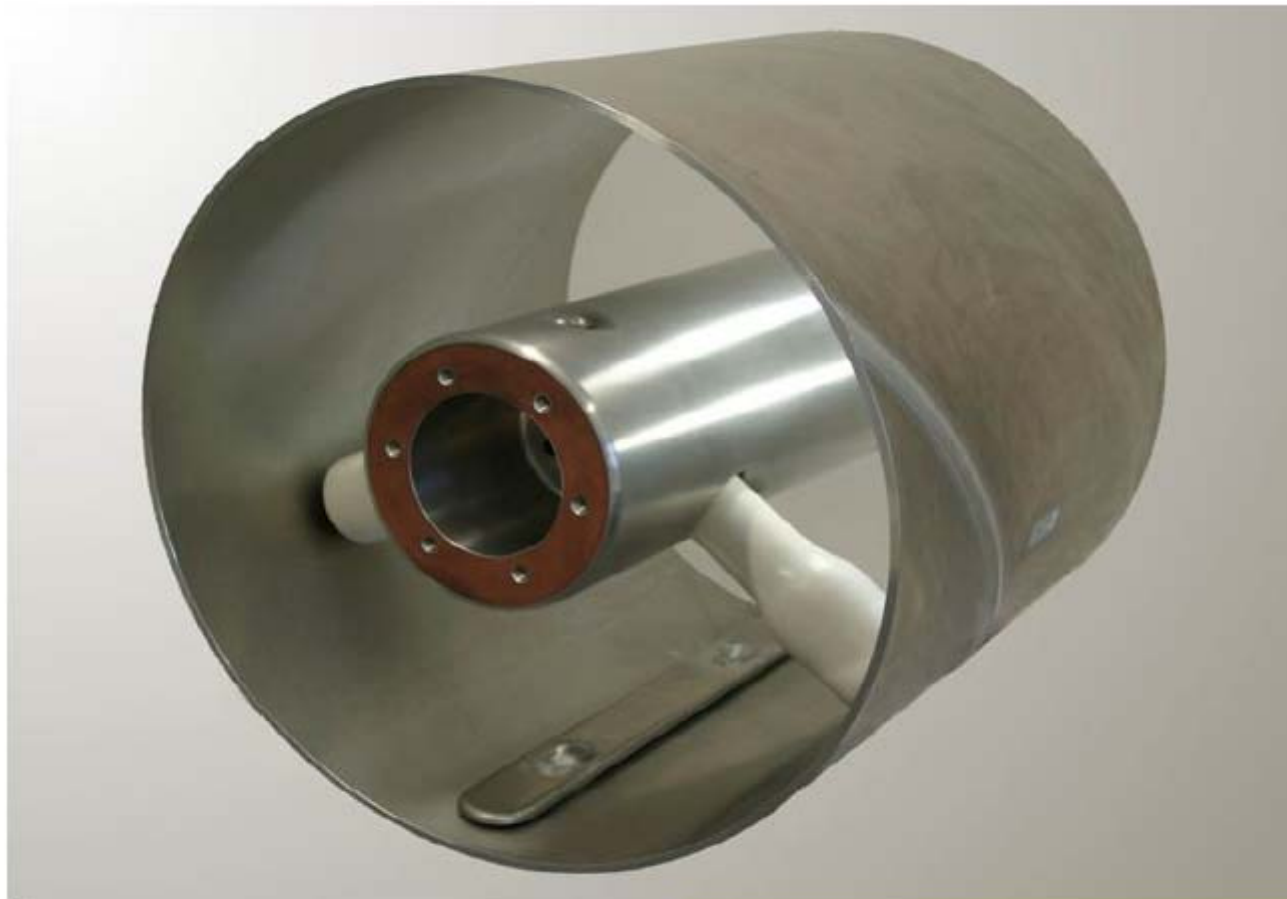
Schematisch



3. Gasisolierte Leitung GIL

Aufbau

Querschnitt



3. Gasisolierte Leitung GIL

Beispiele

Genf (Paexpo): 380 kV, 1400m Länge



Beispiel zur Installation



3. Gasisolierte Leitung GIL

Beispiele

Ägypten (Kairo Nord): 230 kV, Jahr 2004



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Thermische Grenze

Wieviel Strom ist zulässig ?

→ Wieviel Leistung bei gegebener Übertragungsspannung ?

Balance zwischen:

Zugeführter Wärmeleistung (Ohmsche Wärme) $P_w = I^2 \times R$

und

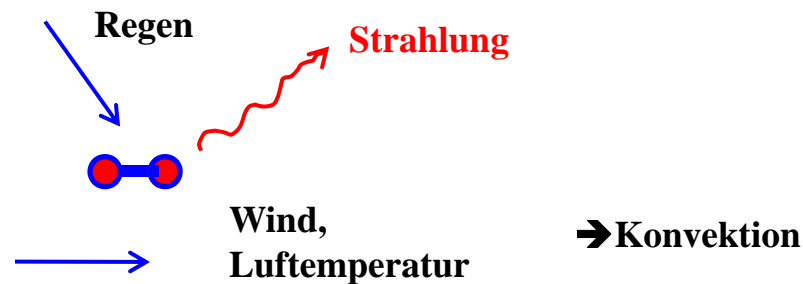
Abgeführter Wärmeleistung über die Isolierstrecke

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

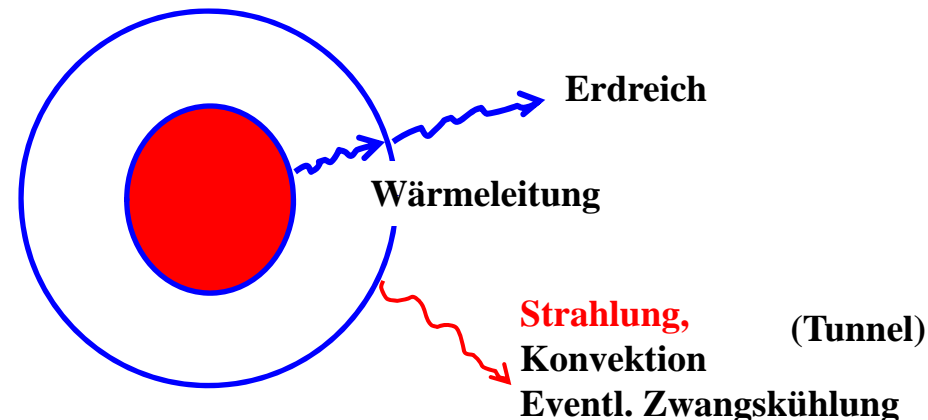
Thermische Grenze

Unterschiedliche Wärmeableitung für die einzelnen Prinzipien

Freileitung:



Kabel:



Fazit: der Querschnitt eines Kabels für eine vergleichbare Leistung muss etwa doppelt so hoch sein wie jener einer FL

GIL: Ähnlich wie Kabel, aber Wärmetransport innen durch Strahlung und Konvektion Mehr Freiheit mit dem Leiterquerschnitt

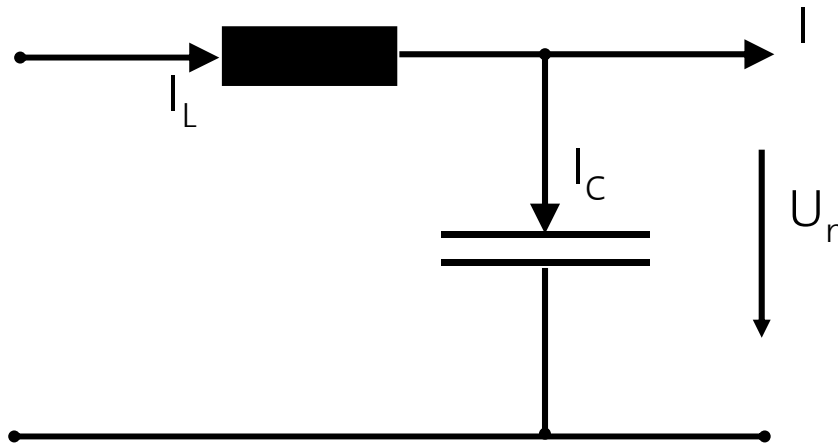
4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Thermische Grenze

- Freileitung: Luft 40°C, 2-er Bündel, 2 x 560 mm²
→ 2080 A → 1370 MW (Kiessling et al)
- Kabel: Polymerkabel 90°C, Öl-Kabel (60...90)°C
 - 1600 mm², erdverlegt → 1000 MW (Dänemark) CIGRE TB 238
 - 1600 mm² Tunnel → 1100 MW (Berlin) CIGRE TB 238
 - 2500 mm² Tunnel → 2200 A → 1500 MW (Herstellerangabe)
- GIL: bis 4000 A (Herstellerangabe) → 2800 MW

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Ersatzschaltbild

Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Drehstromleitung



Gesamtstrom I_L bei reiner Wirkleistungsbelastung P

$$I_L = I + I_C = \frac{P}{\sqrt{3}U_n} + j \frac{U_n}{\sqrt{3}} \omega C_b$$

	L	C
HFL	1	1
Kabel	x 0.3	x 20
GIL	x 0.2	x 5

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Ersatzschaltbild

Beispiel: Vergleich für 380 kV (Richtwerte)

	HFL	Kabel	GIL
$L' [\mu\text{H}/\text{km}]$	1000	350	200
$C' [\text{nF}/\text{km}]$	10	200	60
$Z_w [\Omega]$	316	41	57
$P_{\text{nat}} [\text{MW}]$	457	3452	2501

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

Faustformeln für Drehstromleitungen

Näherung für die von der Leitung benötigte Blindleistung Q in Abhängigkeit von der Wirklast (am Leitungsende):

$$Q = Q_L - Q_C = \omega L_b I_L^2 - \omega C_b U_n^2 \approx \omega \left(L_b \frac{P^2}{U_n^2} - C_b U_n^2 \right)$$

(Formel stimmt sehr gut für *leicht induktive* Belastung am Leitungsende)

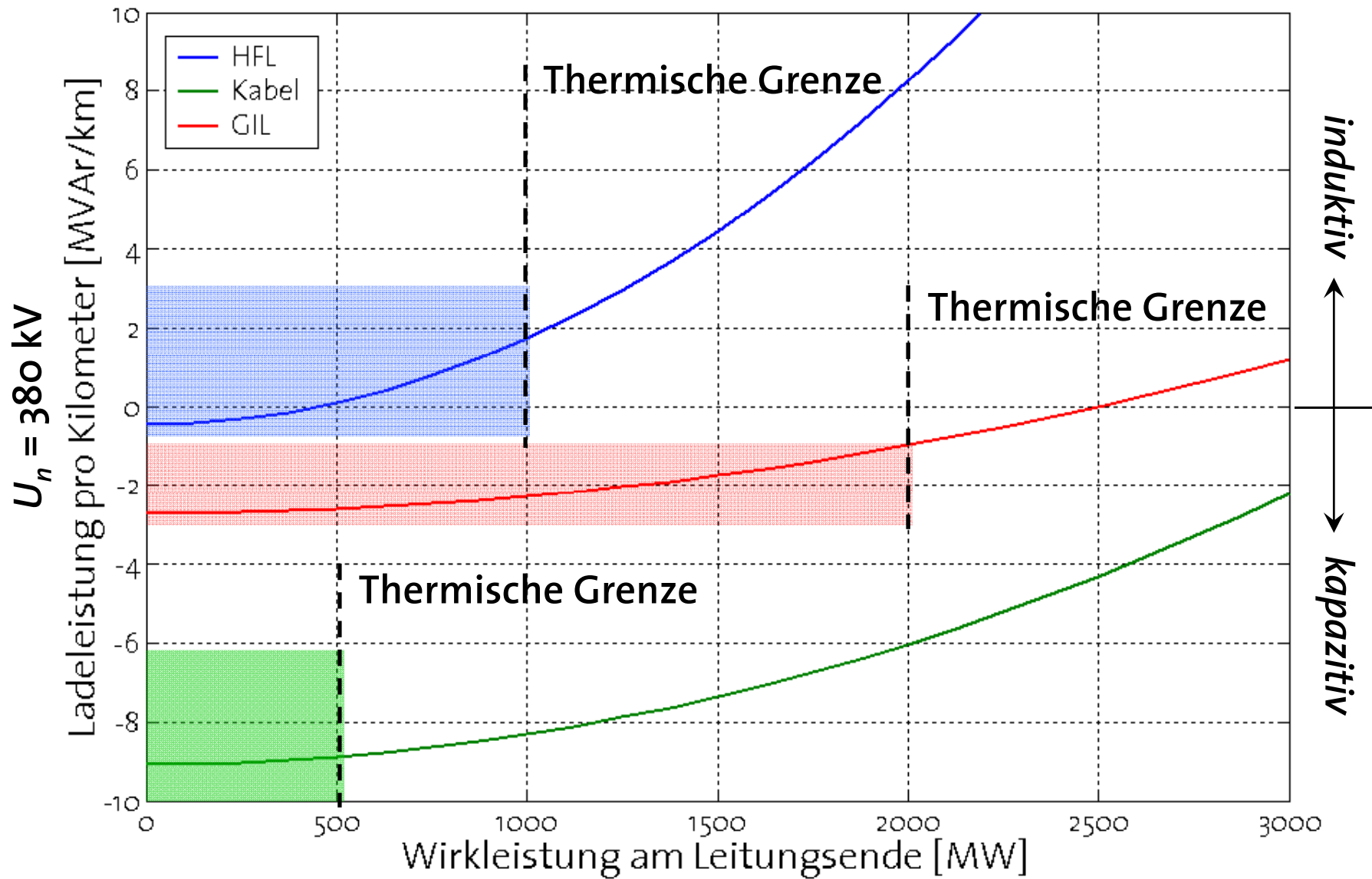
Natürliche Leistung P_{nat} :

P_{nat} : Jener Wert der Wirkleistung, bei der keine Blindleistung erforderlich ist

$$P_{\text{nat}} = \frac{U_n^2}{Z_W} \approx U_n^2 / \sqrt{\frac{L'}{C'}} \Leftrightarrow Q = 0$$

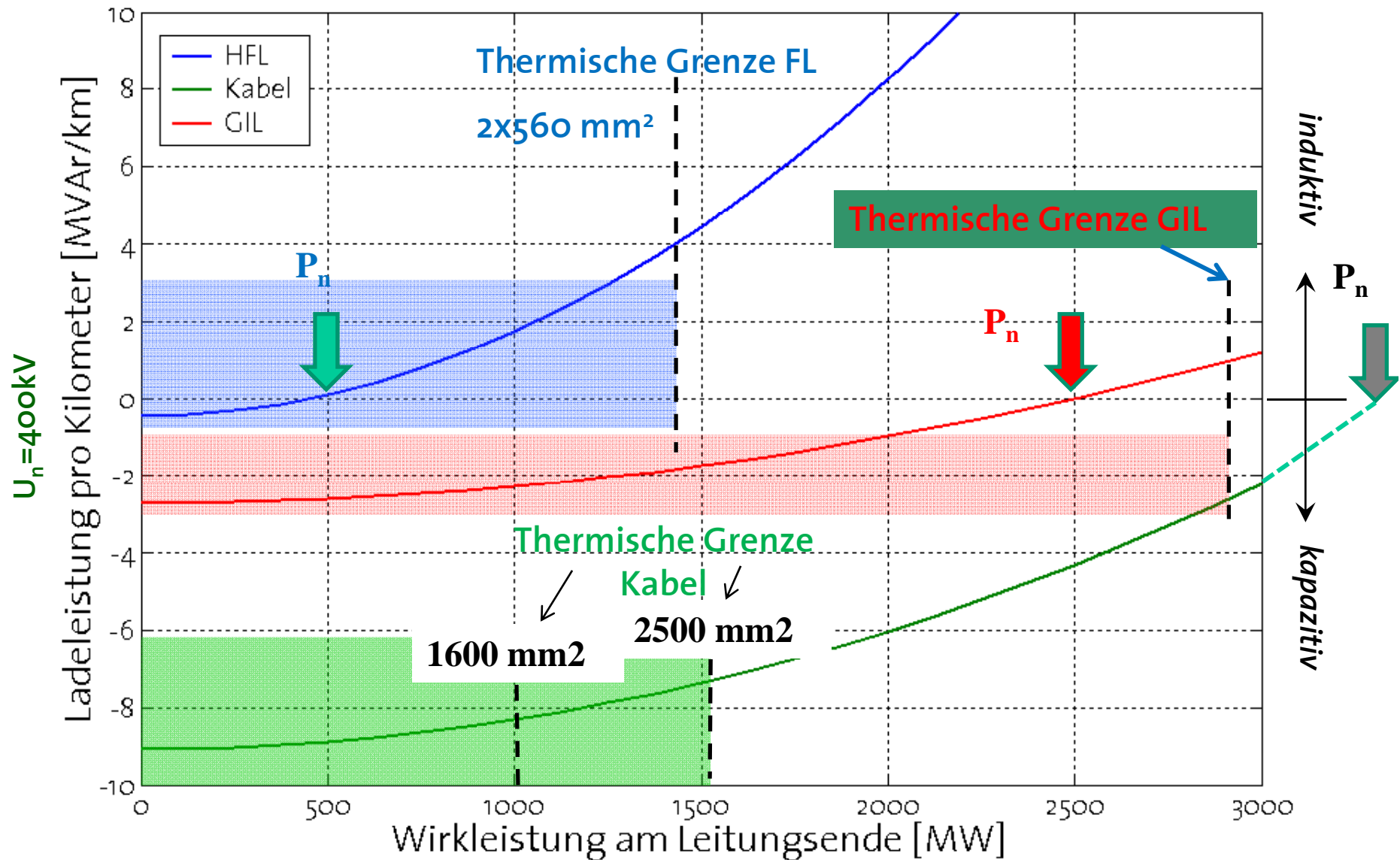
(siehe Skriptum el. Energiesysteme)

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen



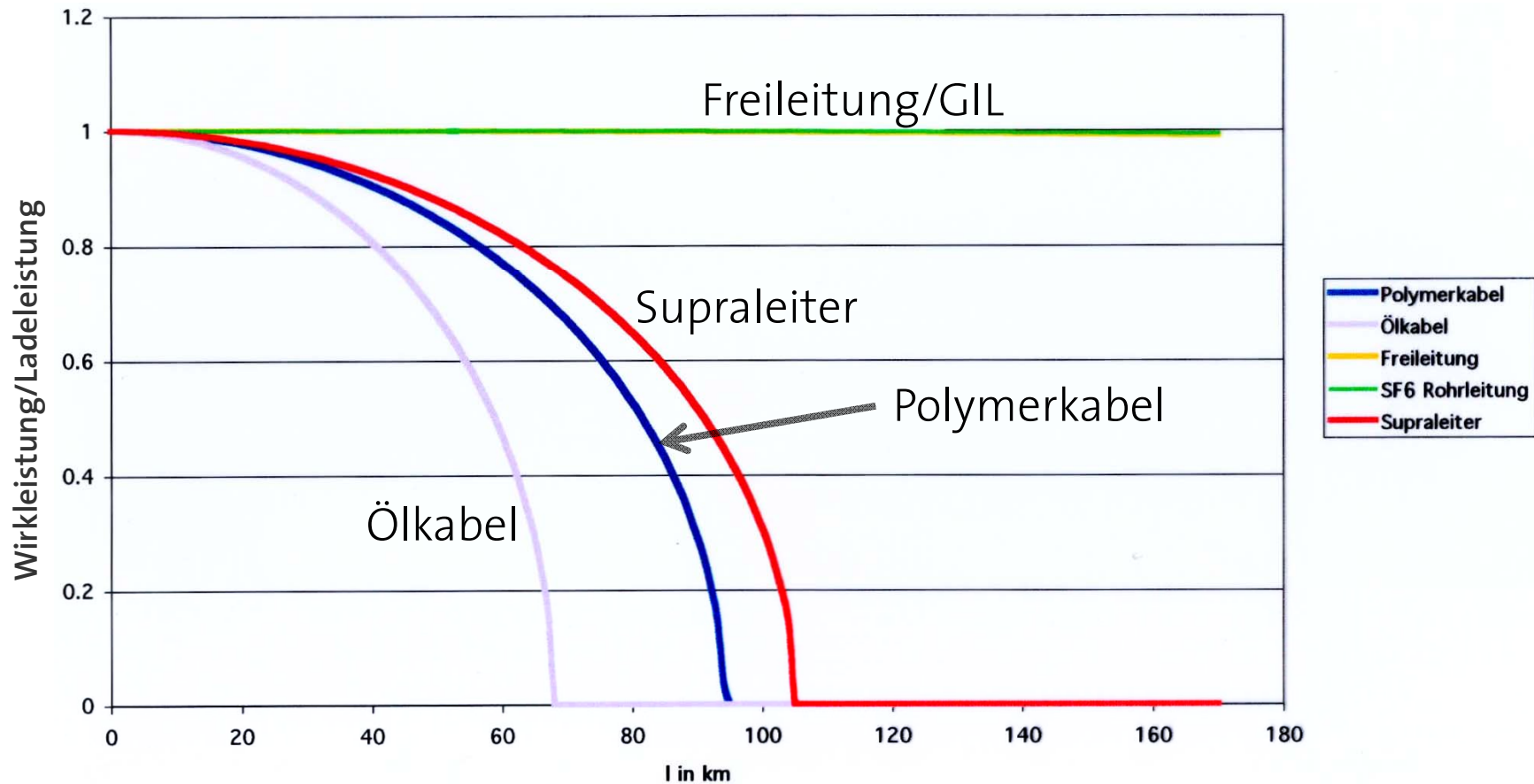
4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen (400 kV AC)



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

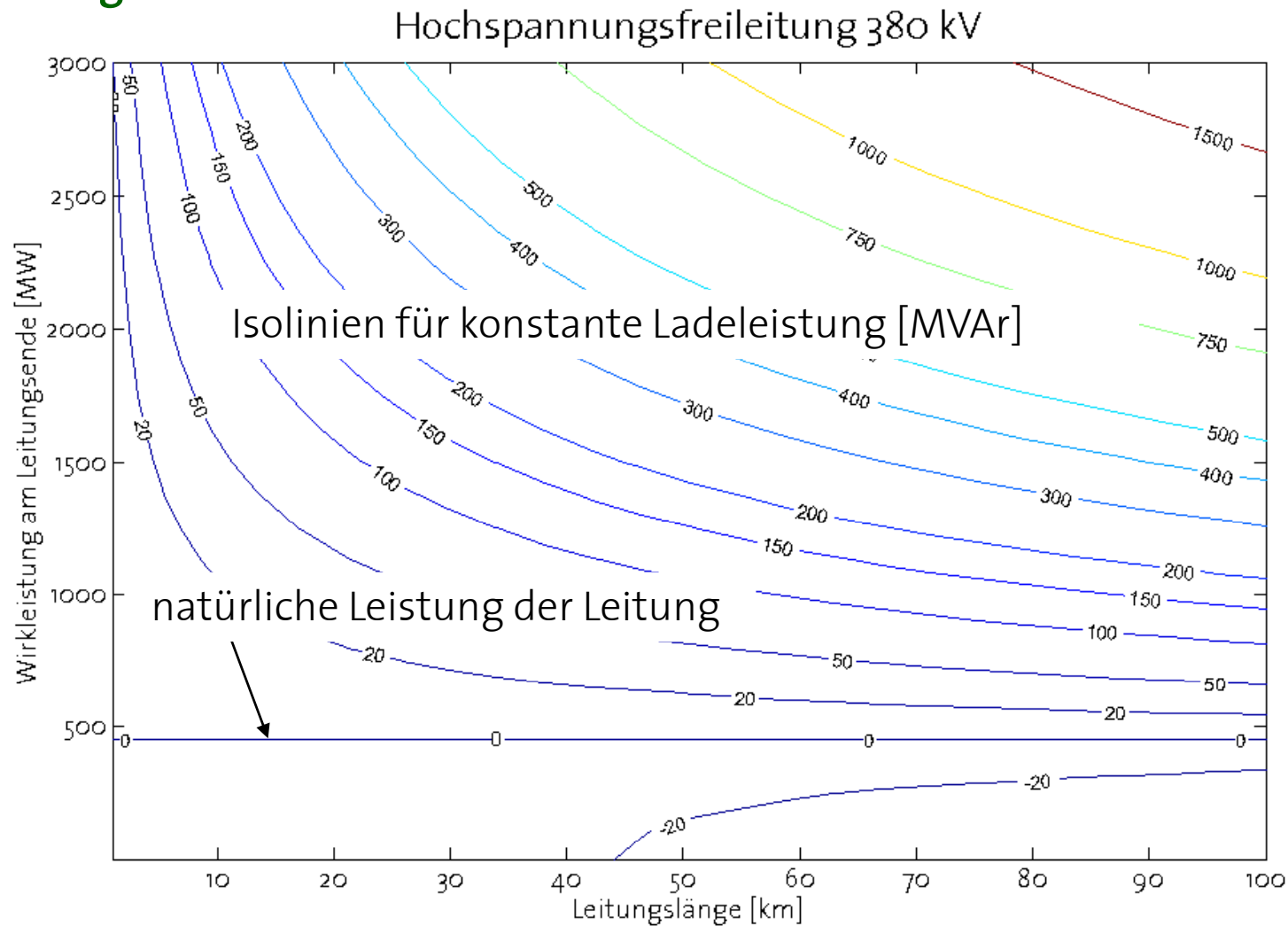
Verminderung des Verhältnisses Transportleistung/Ladeleistung



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

Freileitung

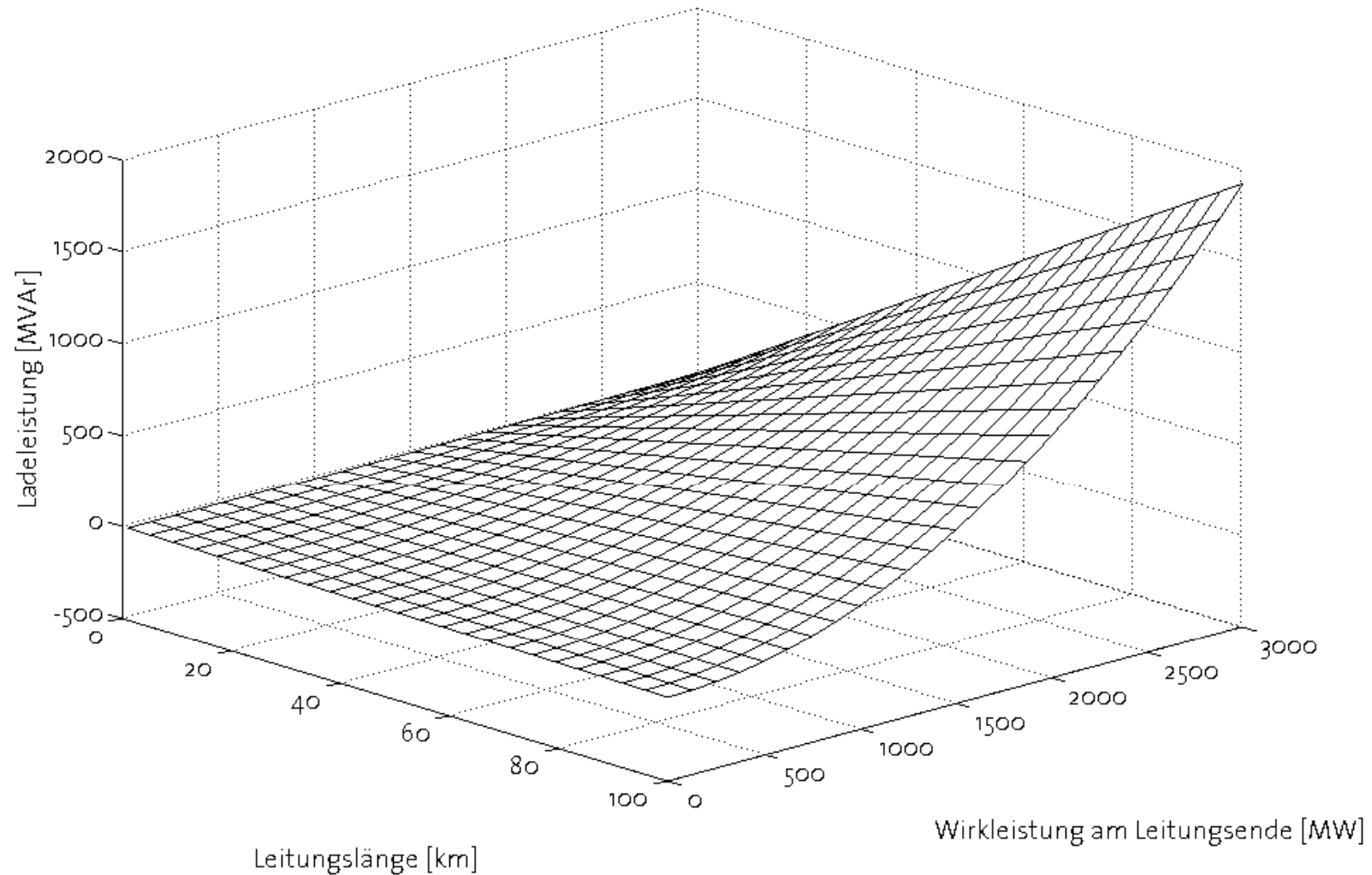


4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

Freileitung

Hochspannungsfreileitung 380 kV

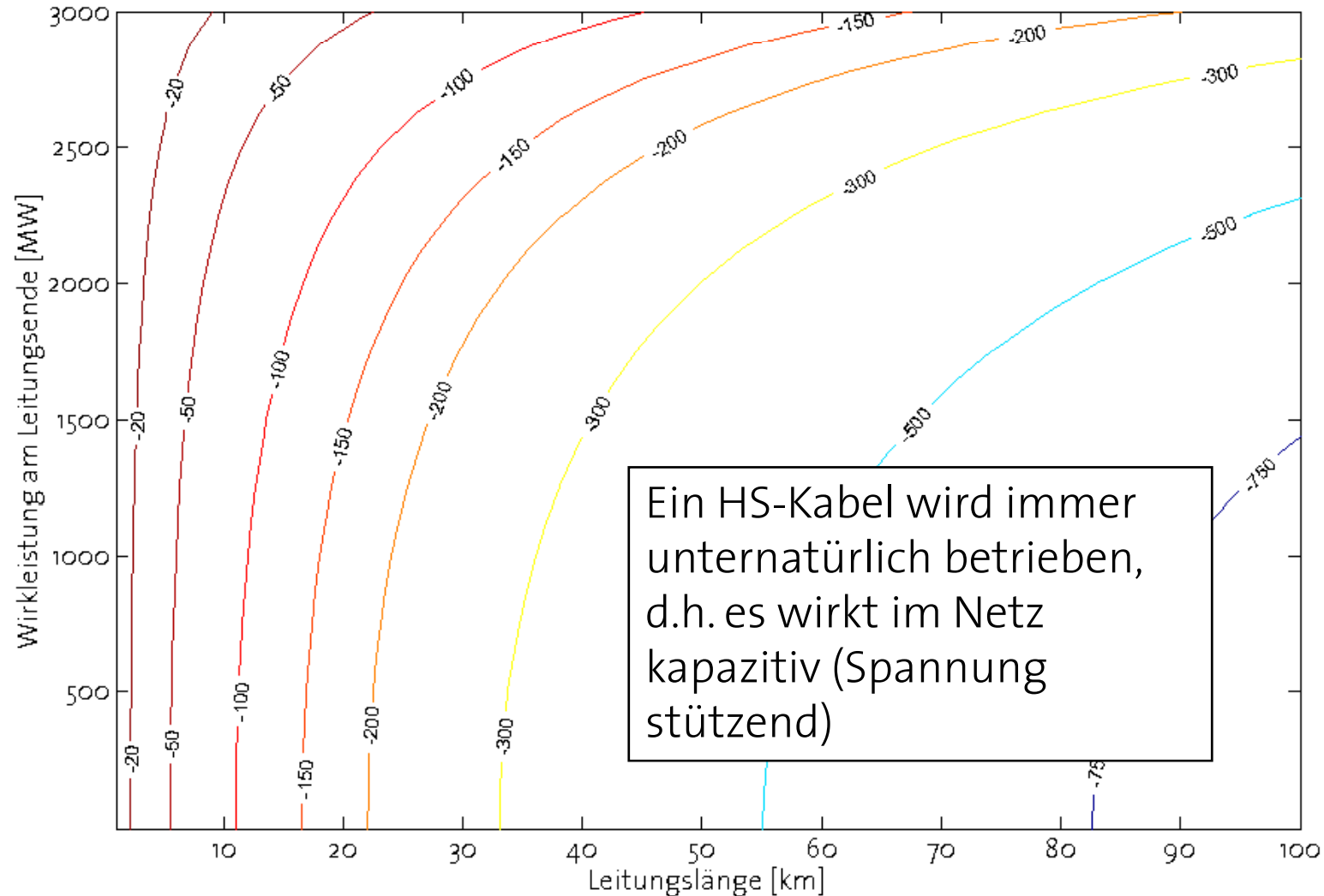


4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

Kabel

Hochspannungskabel 380 kV

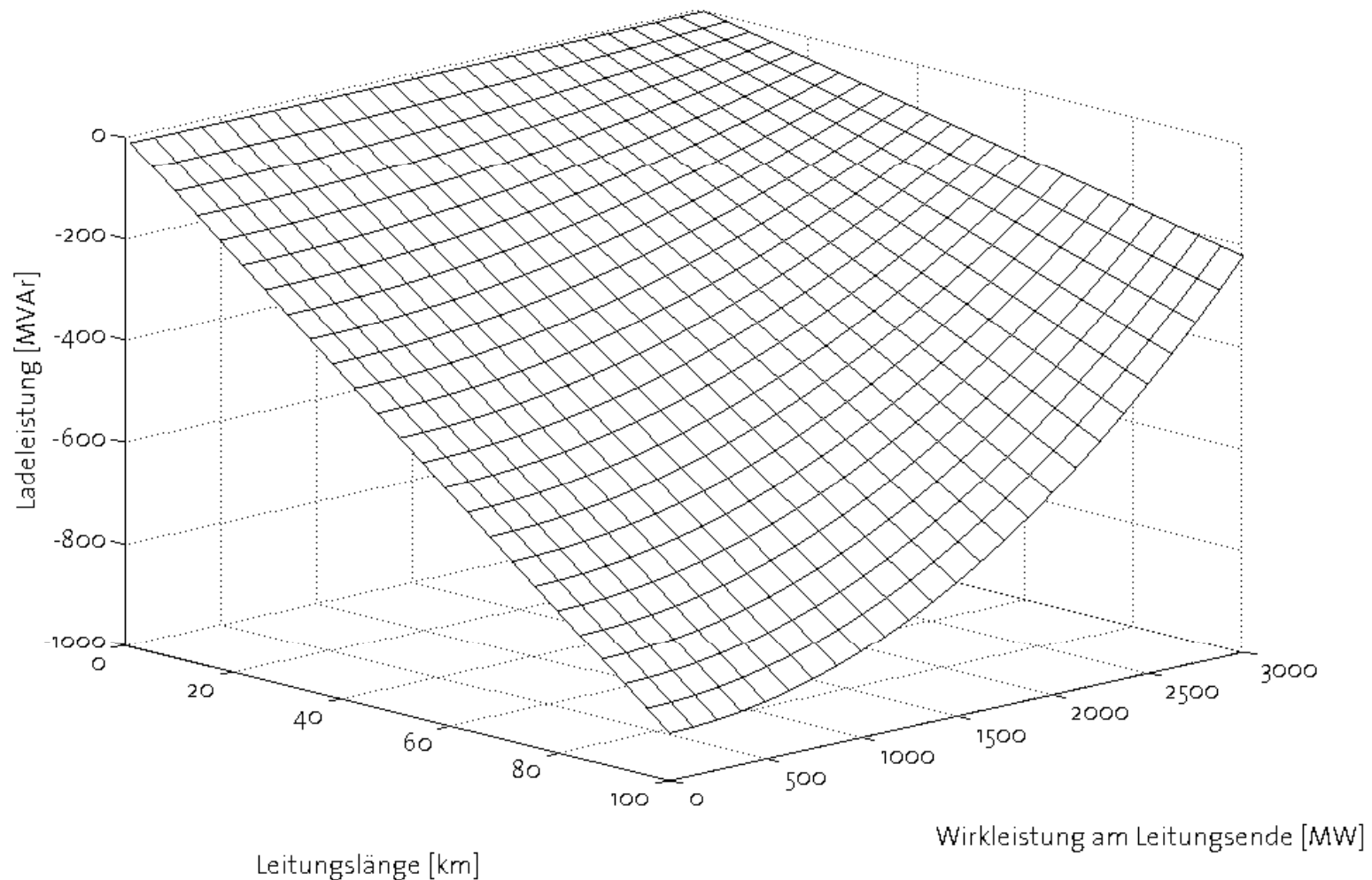


4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

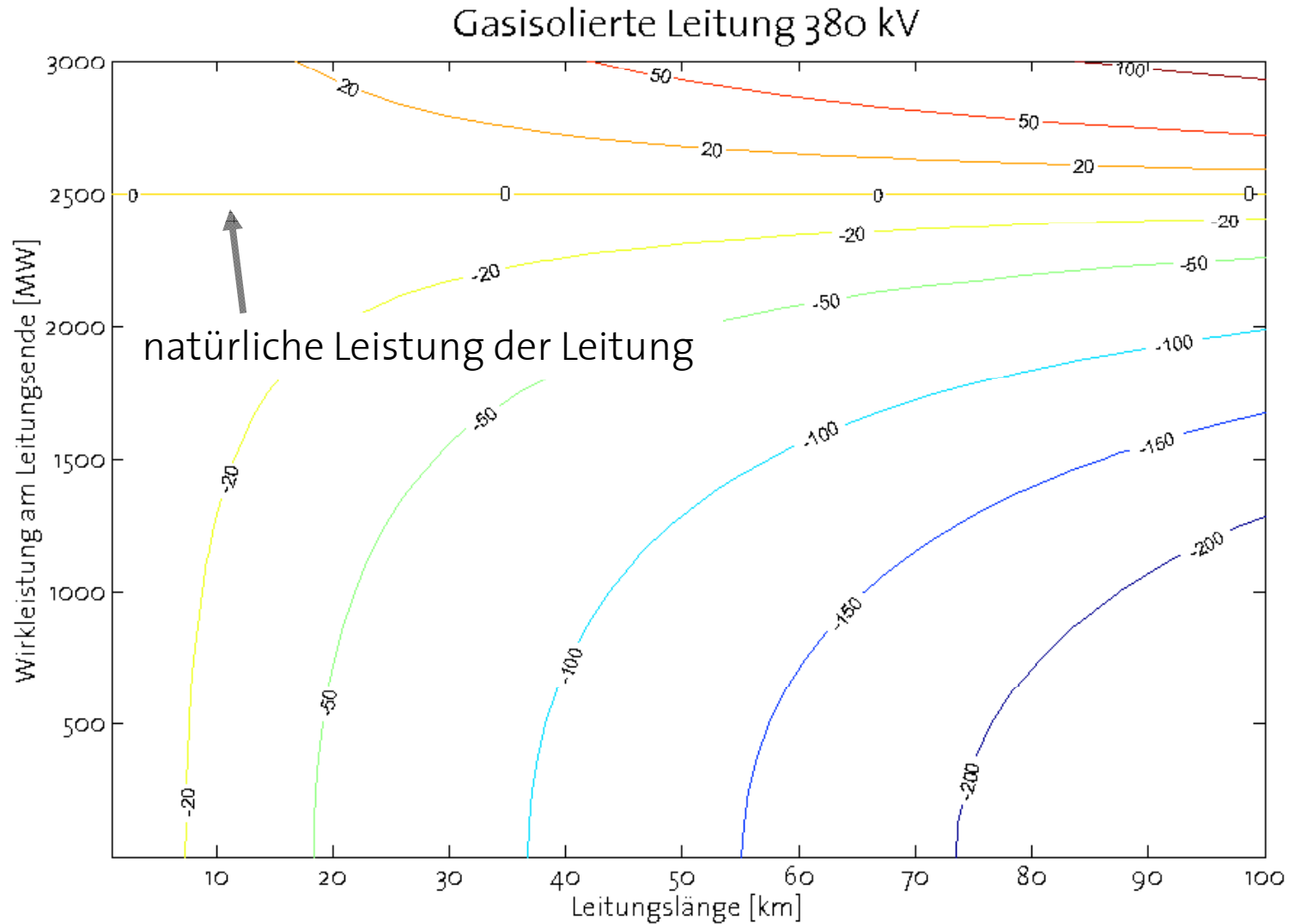
Kabel

Hochspannungskabel 380 kV



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

GIL

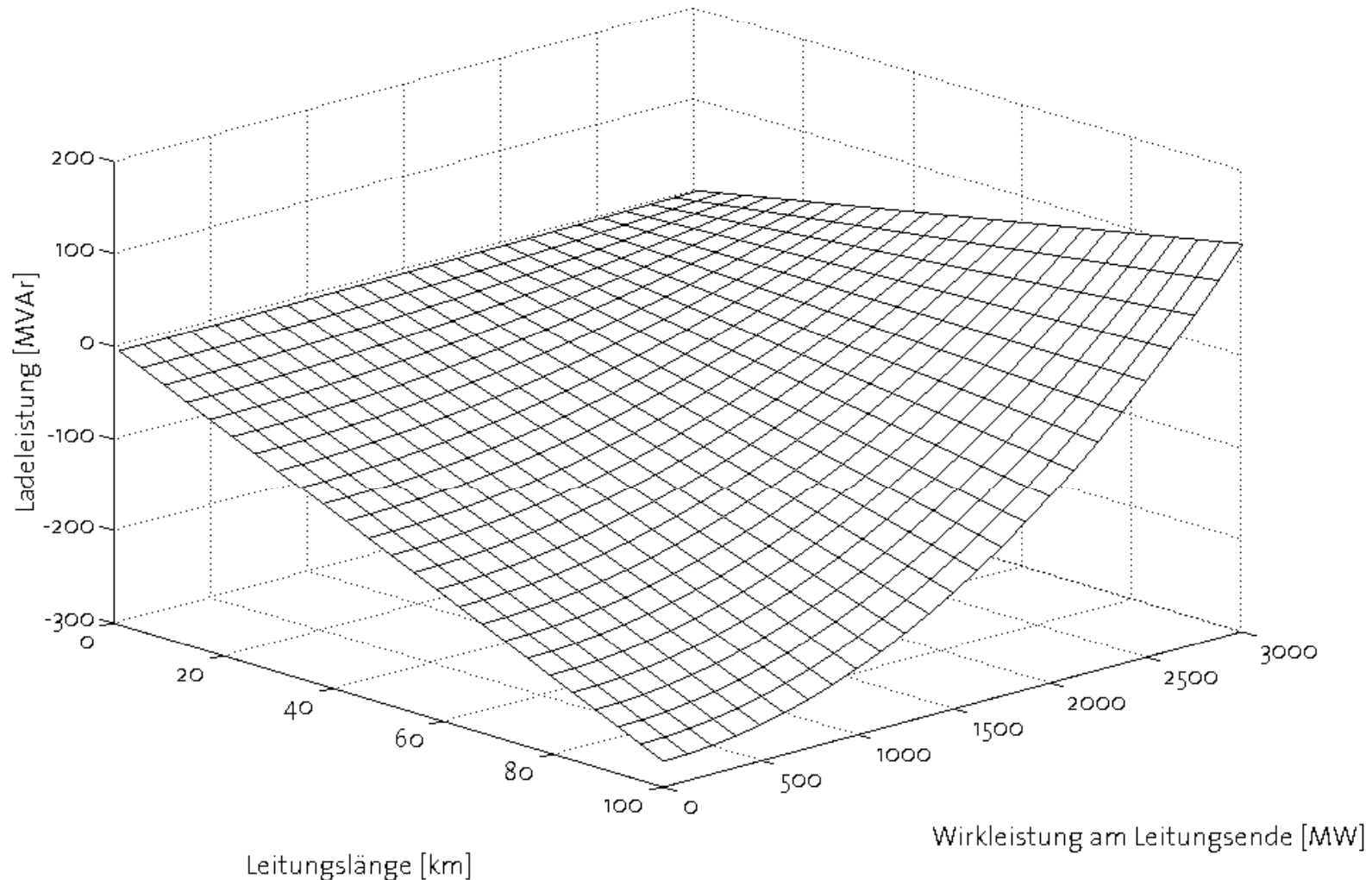


4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Blindleistungsbedarf von Drehstromleitungen

GIL

Gasisolierte Leitung 380 kV



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Begrenzung der übertragbaren Leistung

	Lange Leitung	Kurze Leitung
Freileitung	Natürlich	Thermisch
Kabel	Thermisch	Thermisch
GIL	Natürlich	Thermisch

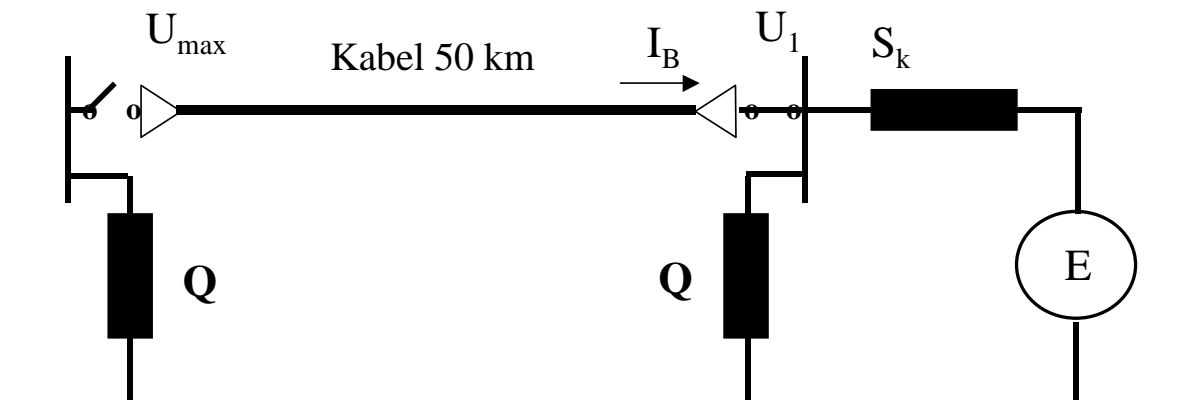
4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Ungefährer Blindleistungsbedarf bei 1000 MW und 100 km Länge

- FL: 200 MVar (Induktiv - übernatürlich)
- Kabel: 800 MVar (kapazitiv- unternatürlich)
- GIL: 250 MVar (kapazitiv – unternatürlich)

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Parallel-Kompensation am Anfang und am Ende einer Kabelstrecke (schematisches Beispiel)



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Kompensation

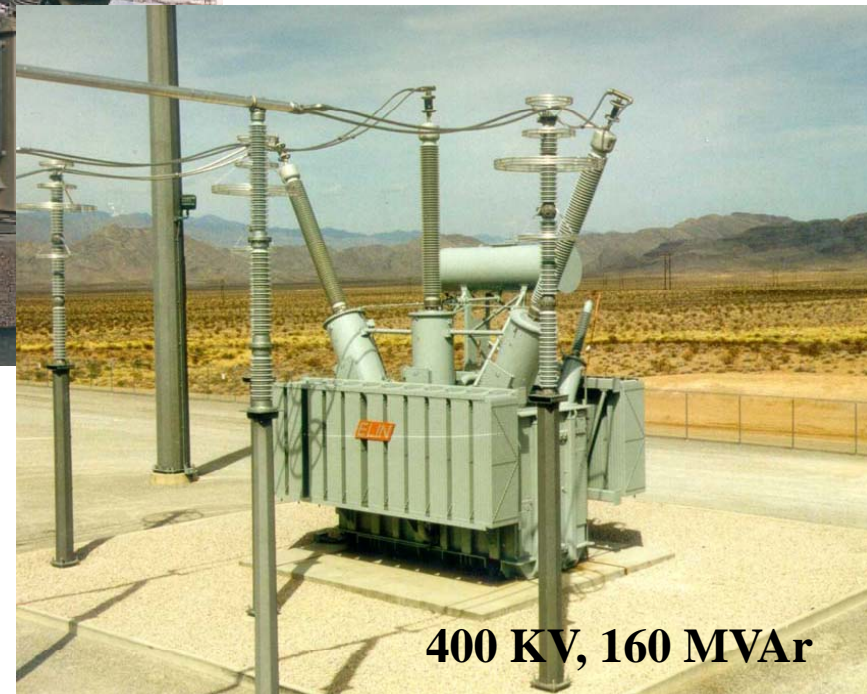
- Lange Freileitung ab einigen 100 km (für Europa kaum relevant)
 - Grosse Last → Seriekompensation
 - Kleine Last → Parallelkompensation
- GIL ca. ab 100 km → Parallelkompensation
- Kabel ca. alle 20 – 30 km → Parallelkompensation

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Kompensation



SwePol Link, Shunt reactor bay at Slupsk

**Beispiel:
400 kV Kompensationsdrosseln**



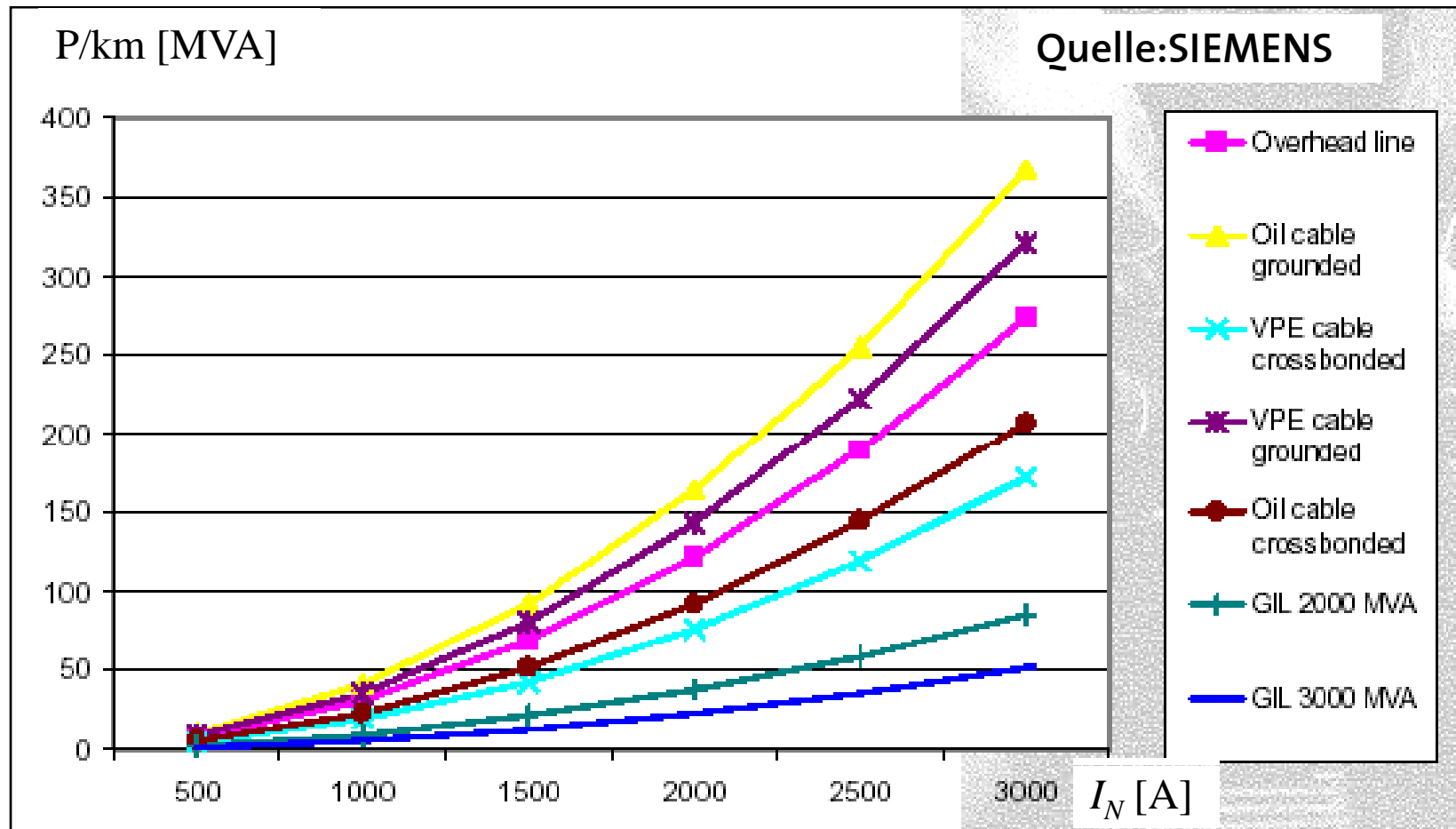
400 KV, 160 MVar

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Kostenrahmen

- In der Schweiz wird eine Freileitung mit etwa (1...2) Mio SFr./km beziffert
- CIGRE TB 238:
- Im Spannungsbereich (220...380) kV wird das Verhältnis der Kosten von Freileitung und Untergrund mit $1/(5...21)$ angegeben
- Zitat aus TB 238: Es ist praktisch unmöglich genauere Angaben zu erhalten → es ist von Fall zu Fall zu recherchieren

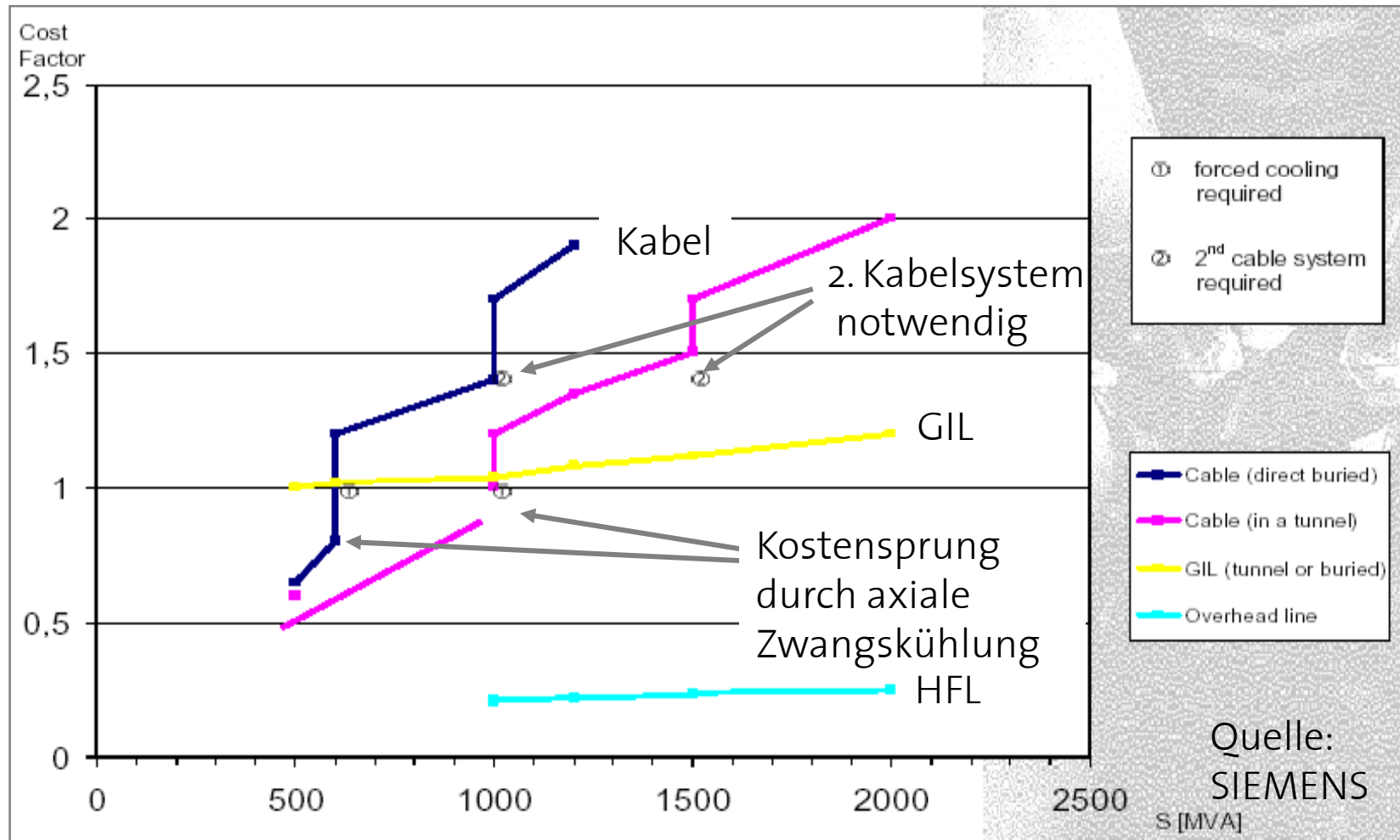
4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Verluste/Kosten

Vergleich der Verluste pro Phase für verschiedene Arten der Energieübertragung (Werksangabe)



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Verluste/Kosten

Direkter Kostenvergleich Kabel-GIL 420kV (Werksangaben)



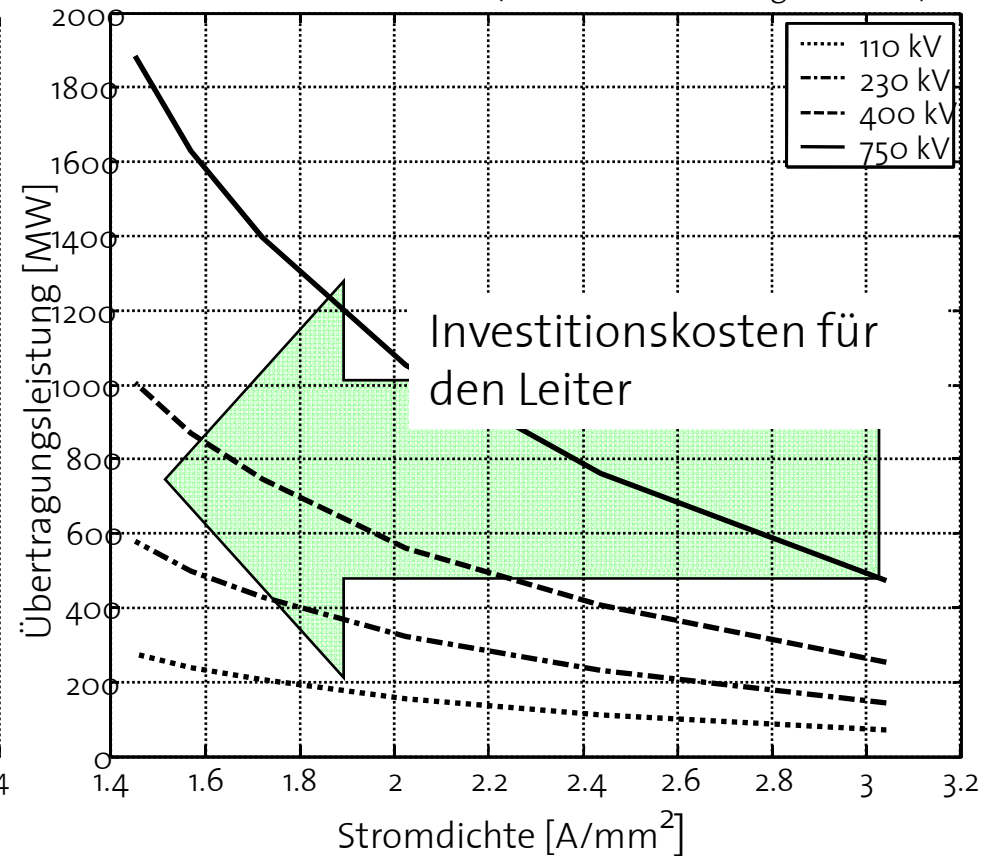
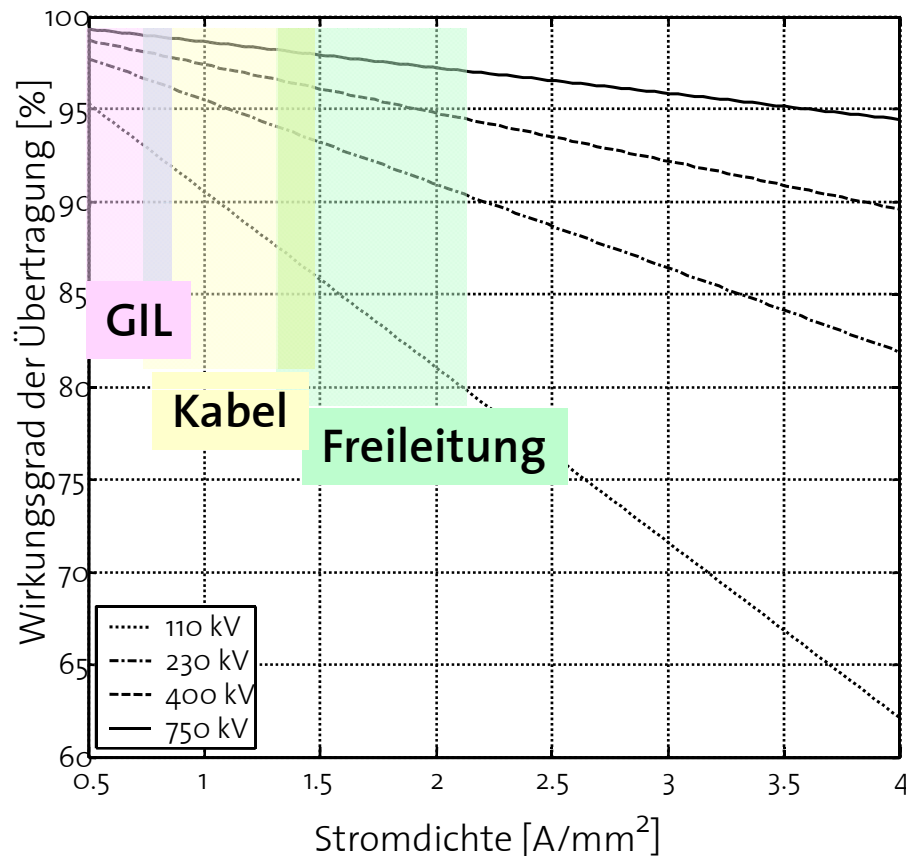
4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL Übertragungsleistung

Mögliche Übertragungsleistungen und Stromdichten bei Aluminium als Leitermaterial

$$\eta = 1 - \frac{3 \cdot \rho_T \cdot L \cdot J}{U_{in}}$$

Wirkungsgrad der Übertragung

(Daten aus Werksangaben ABB)



	Umwelt		Technik			Kosten
	Vorteile	Nachteile	Verluste @ 400KV $P=1000MW$	Blindleistungs- Kompensation Abstand	Verschiedenes	Bsp: 1GW
Freileitung		<ul style="list-style-type: none"> • Ästhetik • El-Mag.Felder • Korona (Lärm, Ozon) 	~ 4-6% auf 100Km 400-600kW/Km	~ 500-800 km	<ul style="list-style-type: none"> • Bewährt • Gefährdet durch atmosphärische Entladungen 	~ 1 MCHF/km
Kabel	<ul style="list-style-type: none"> • Unterirdisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Ölaustritt • Erwärmung des Bodens 	~ 3-4% auf 100Km 300-400kW/km	~ 10-20 km	<ul style="list-style-type: none"> • Bewährt • Für Leistung >1GW technisch schwierig. 	~ 5-20 MCHF/km
GIL	<ul style="list-style-type: none"> • Unterirdisch • Keine Feldemission 	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 20% SF₆ erforderlich 	~ 2-3% auf 100km 200-300kW/Km	~100 km	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Wärmeentwicklung • Nur für Leistung >1GW sinnvoll 	~ 5-10 MCHF/km
Supraleiter	<ul style="list-style-type: none"> • Unterirdisch • Hohe Leistungsdichte 	<ul style="list-style-type: none"> • Leiter schwer zu entsorgen. 	0% elektrisch Wärmeeinfall, Kühlleistung	Bei DC – Betrieb keine Einschränkung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Blocktrafos erforderlich • Für DC Netze gut geeignet • Teurere und komplizierte Kühlung • Technologie noch unreif!!! 	20 (?) MCHF/km wenige reale Anlagen!!!

4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

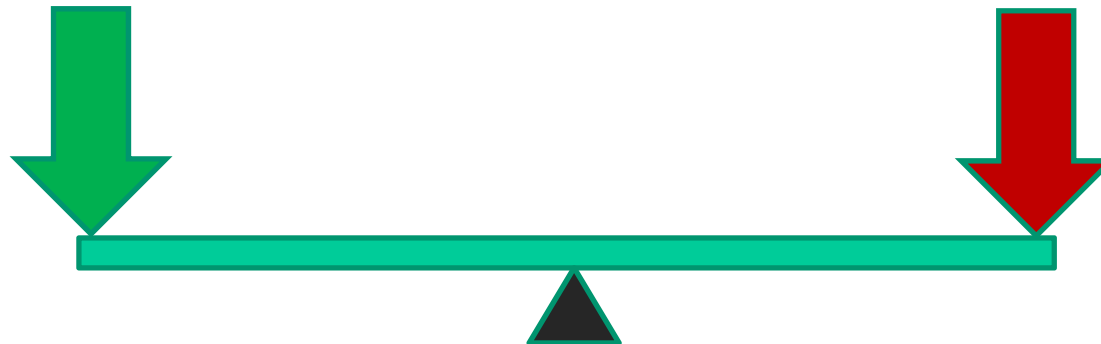
Vergleich: Freileitung - Untergrundübertragung

Qualitative Kriterien (schwer oder gar nicht quantifizierbar)

- Ästhetik
- Umweltaspekte
- Kommunale Interessen
- Versorgungssicherheit

Quantifizierbare Kriterien (Kosten in SFr)

- Investition
- Betrieb
- Verluste
- ROW (Rights of Way), Platzbedarf



4. Vergleich Freileitung, Kabel, GIL

Schlussfolgerungen

- Aus technischer Sicht bestimmen Leistung, Übertragungslänge und Topographie entscheidend die Ausführungsform und damit die Kosten
- Allgemein gültige Entscheidungskriterien sind wegen der Mannigfaltigkeit der einflussgebenden Parameter praktisch unmöglich
- Für den Entscheid - Freileitung oder Untergrund - ist projektbezogen eine Abwägung zwischen den Kosten und den nicht monetisierbaren Kriterien zu treffen
- Die Wahl der Betriebsart - AC oder DC – hat im Wesentlichen technische Aspekte, sie spielt aber für die nicht monetisierbaren Kriterien eine untergeordnete Rolle

Literatur

Kapitel *Küchler*:

N°	Titel	Kommentar
7.1.1	Kabel und Garnituren	wichtig