

# Hochspannungstechnik als Grundlage für die zukünftige Entwicklung von Übertragungsnetzen



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe SCHICHLER**

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Technische Universität Graz

13. Symposium Energieinnovation

Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation

Technische Universität Graz

Graz, 12.-14.02.2014

*Energie Zentrum Graz*

12.02.2014

# Übersicht

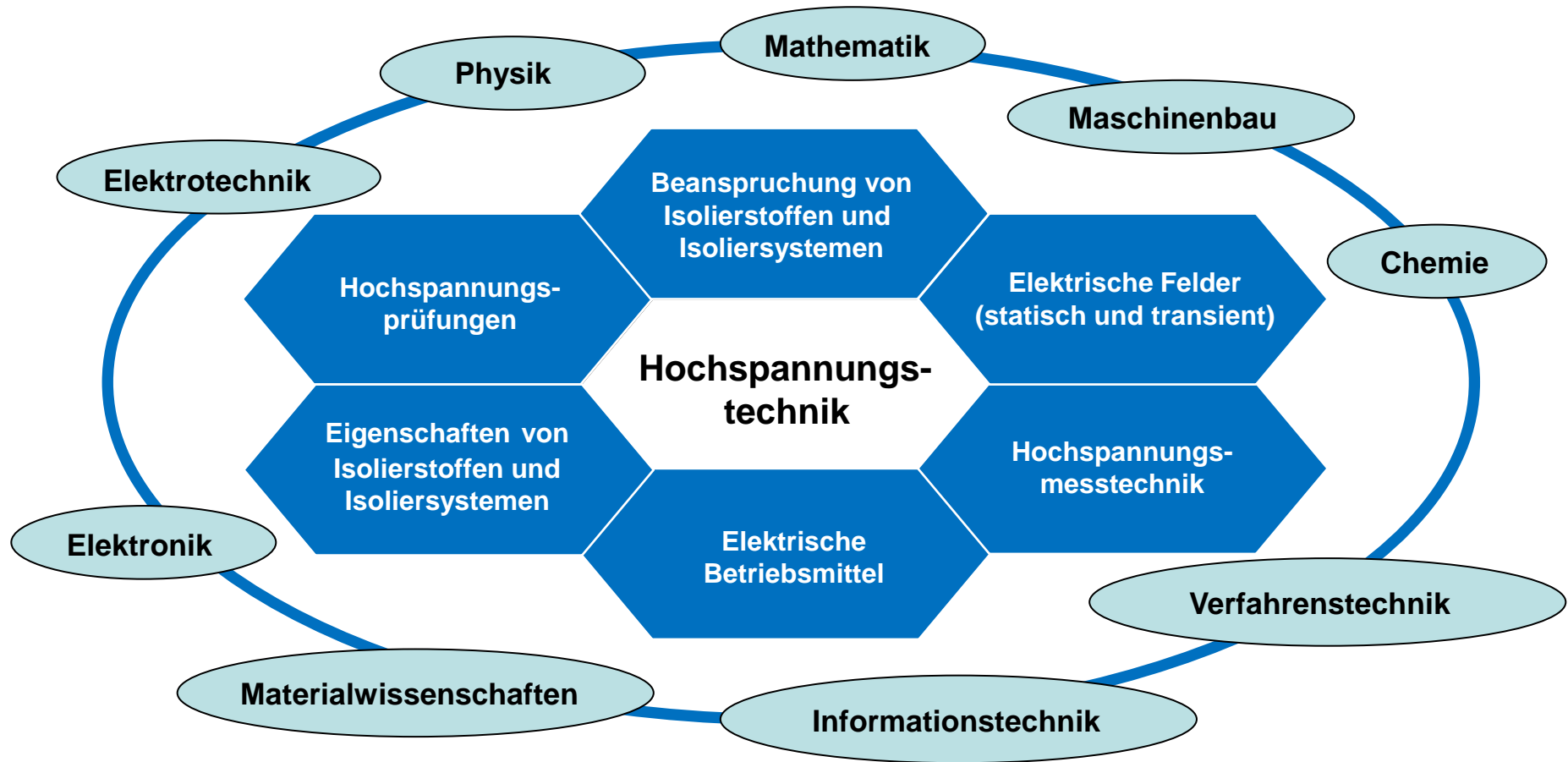
## Hochspannungstechnik

- Isolierstoffe und Isoliersysteme: Beanspruchungen und Eigenschaften
- Elektrische Felder: statisch und transient
- Hochspannungsprüfungen (AC, DC, SI/LI)
- Hochspannungsmesstechnik
- Elektrische Betriebsmittel

## Übertragungsnetze: Gegenwart und Ausblick

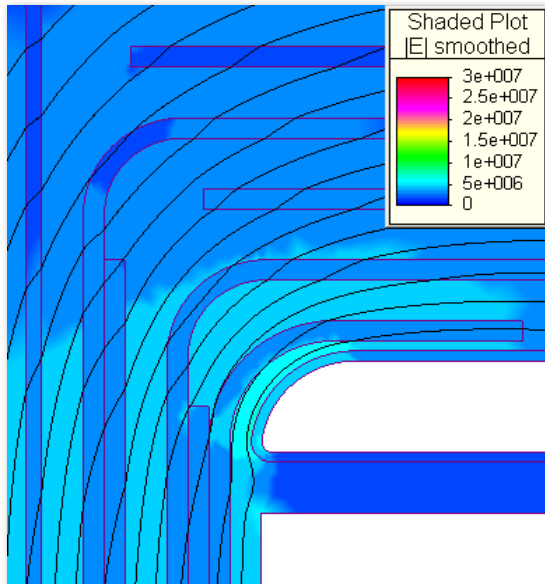
- Erste Gleichstromübertragung, 1882
- Erste Drehstromübertragung, 1891
- HGÜ-Anwendungen
- HVDC GIS/GIL
- UHV: 1100 (1200) kV AC
- Alternative Isoliergase
- GIL und Freileitungen

# Hochspannungstechnik - Übersicht

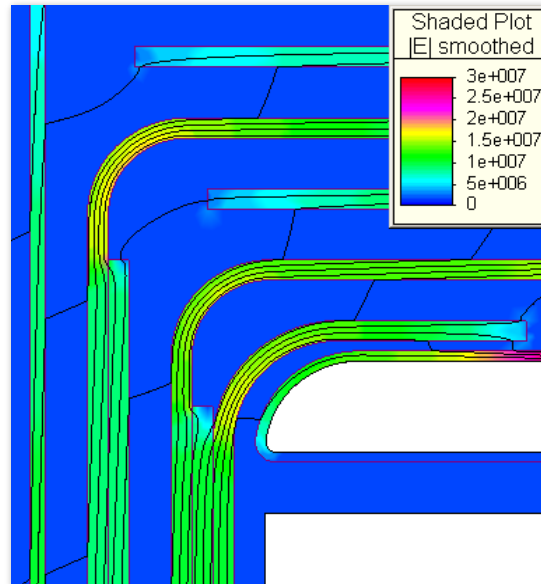


# Elektrische Feldberechnung mit FEM-Tools

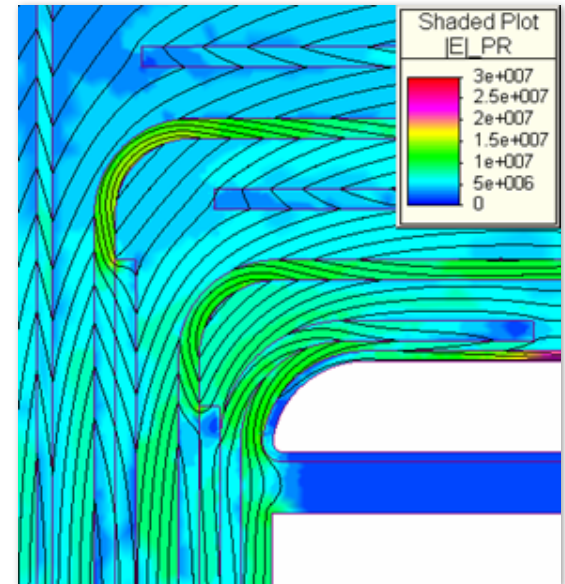
## Untersuchung des Öl/Papier-Isoliersystems eines HGÜ-Transformators



**Wechselspannung**



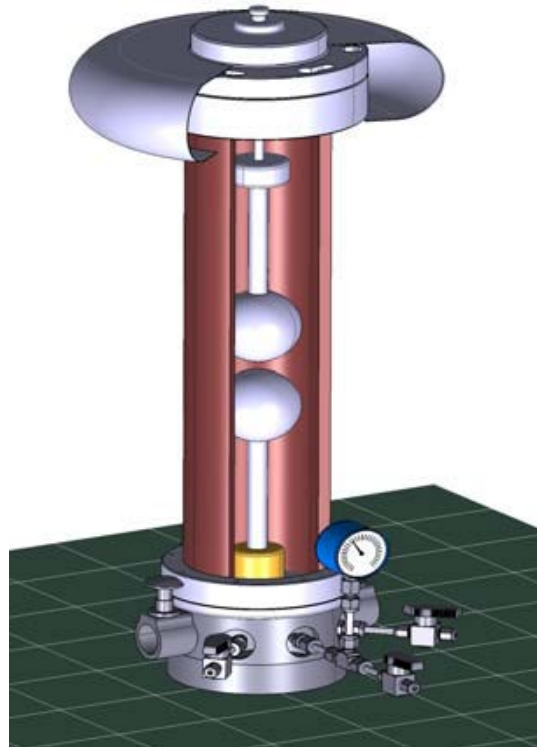
**Gleichspannung**



**Polaritätswechsel**

# Grundlagenforschung an Isolierstoffen

## Untersuchungen an alternativen Isoliergasen



**Tabelle 1:** Durchschlaggleichspannung der untersuchten Gase bzw. Gasgemische im homogenen Feld

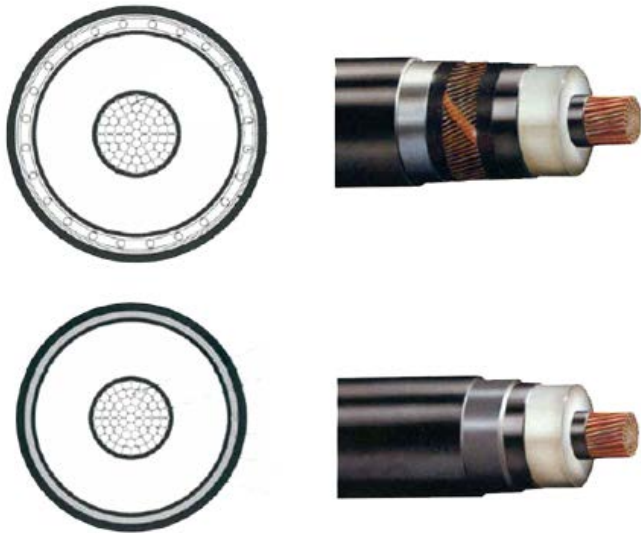
Homogenes Feld ( $\eta=0,91$ )			
	Isoliergas	positiv	negativ
$U_{d50}$ in (kV), 0,8 MPa	$N_2$	85,24	87,85
$U_{d50}$ in (kV), 0,3 MPa	$SF_6$	93,26	92,96
$U_{d50}$ in (kV), 0,5 MPa	$N_2/SF_6$ (80/20)	110,74	111,42

**Tabelle 2** Durchschlaggleichspannung der untersuchten Gase bzw. Gasgemische im inhomogenen Feld

Inhomogenes Feld ( $\eta=0,17$ )			
	Isoliergas	positiv	negativ
$U_{d50}$ in (kV), 0,8 MPa	$N_2$	40,4	74,55
$U_{d50}$ in (kV), 0,3 MPa	$SF_6$	72,13	104,82
$U_{d50}$ in (kV), 0,5 MPa	$N_2/SF_6$ (80/20)	60,98	99,72

# Hochspannungsprüfung an VPE-Kabeln

Materialtests, Qualitätssicherung und Untersuchung der Lebensdauer



Quelle: Muhr, TU Graz, 2011



# Hochspannungsprüfungen

## Entwicklungsprüfungen an Prototypen



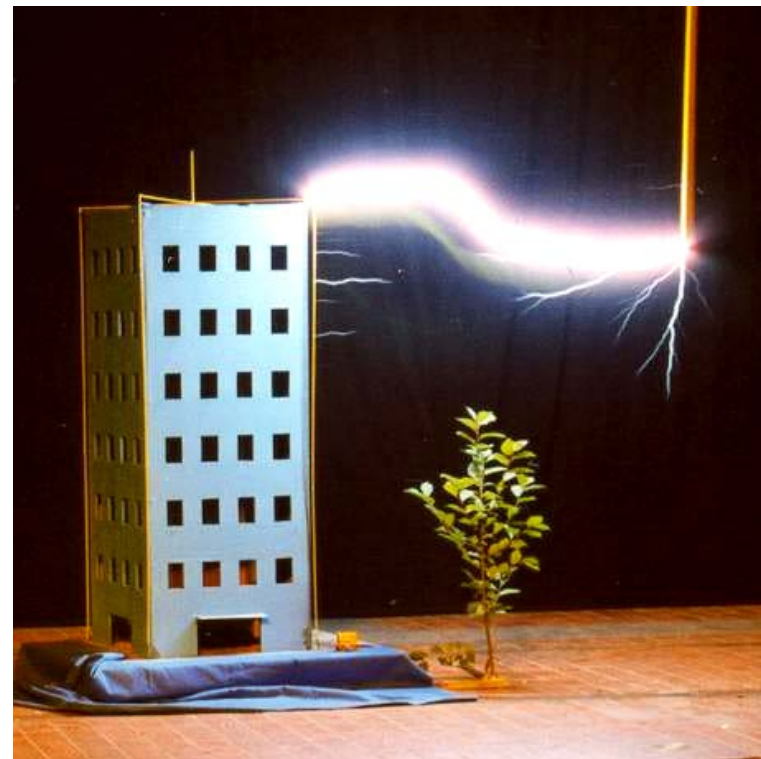
**500-kV-HGÜ-Isolatorketten  
mit Mastnachbildung**



**800-kV-Durchführung**

# Blitzeinschlag und Blitzschutzmaßnahmen

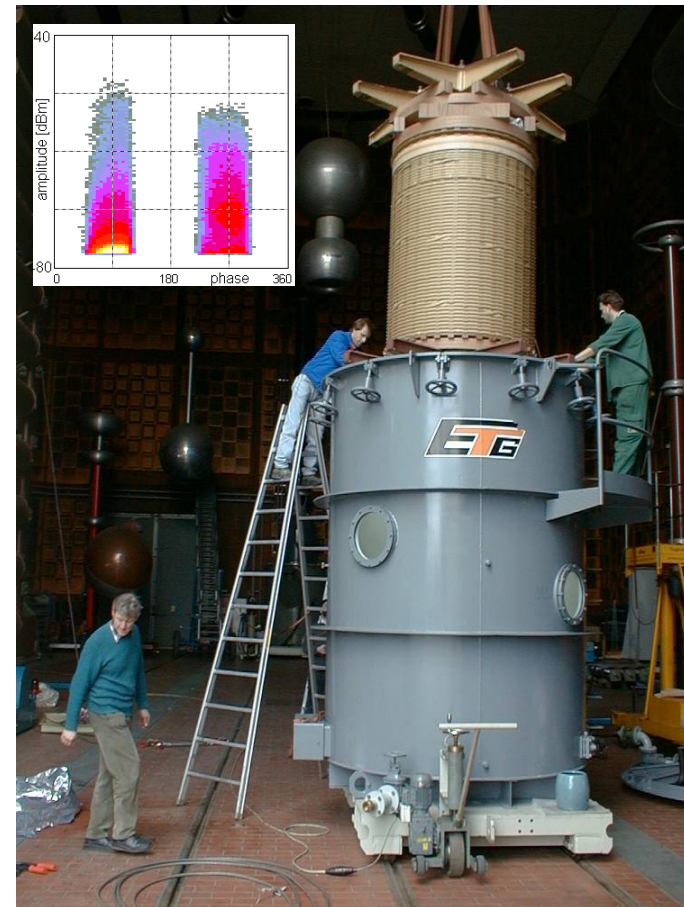
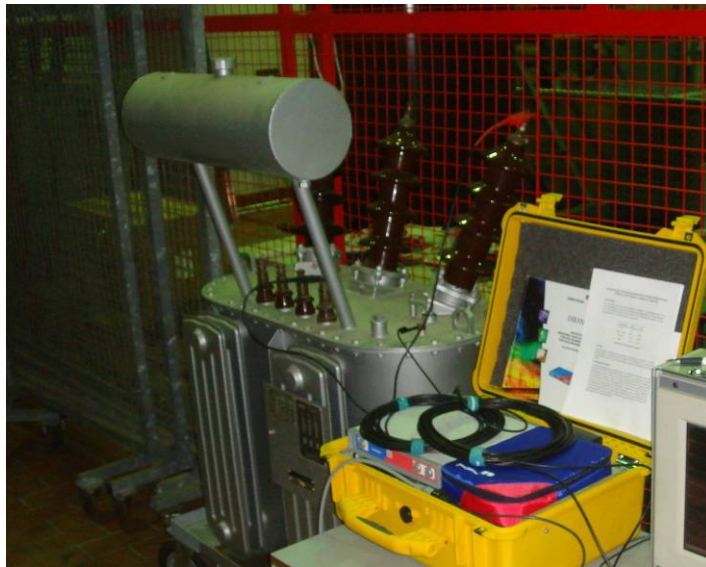
## Spannungsbeanspruchung und Schutz von Betriebsmitteln bzw. Gebäuden



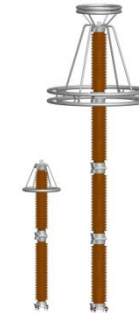
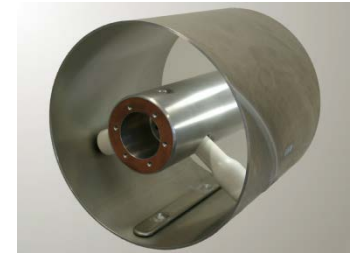
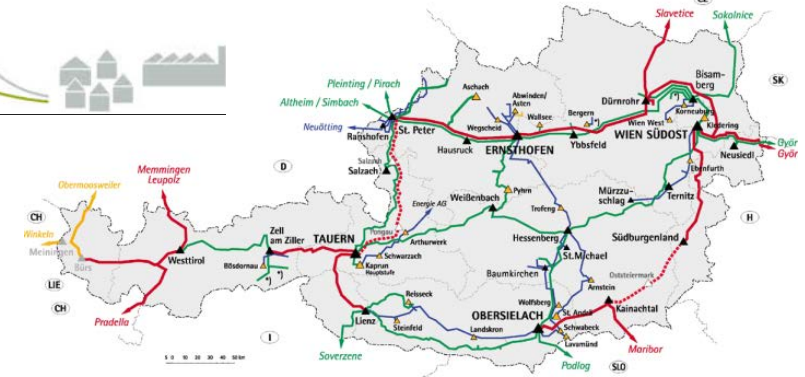
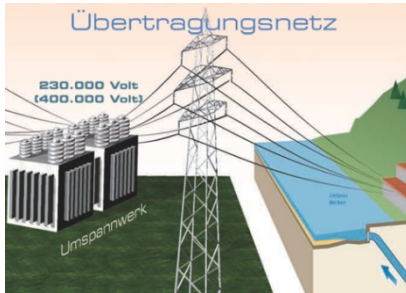


## Zustandsbewertung an Betriebsmitteln

**Diagnosemessungen für die  
Ermittlung des Betriebszustands  
(Alterungsverhalten der Isolierelemente)**



# Hochspannungstechnik und Übertragungsnetze



Quelle: Siemens, ABB, TransnetBW, Kelag, APG, DENA (alle Internet)



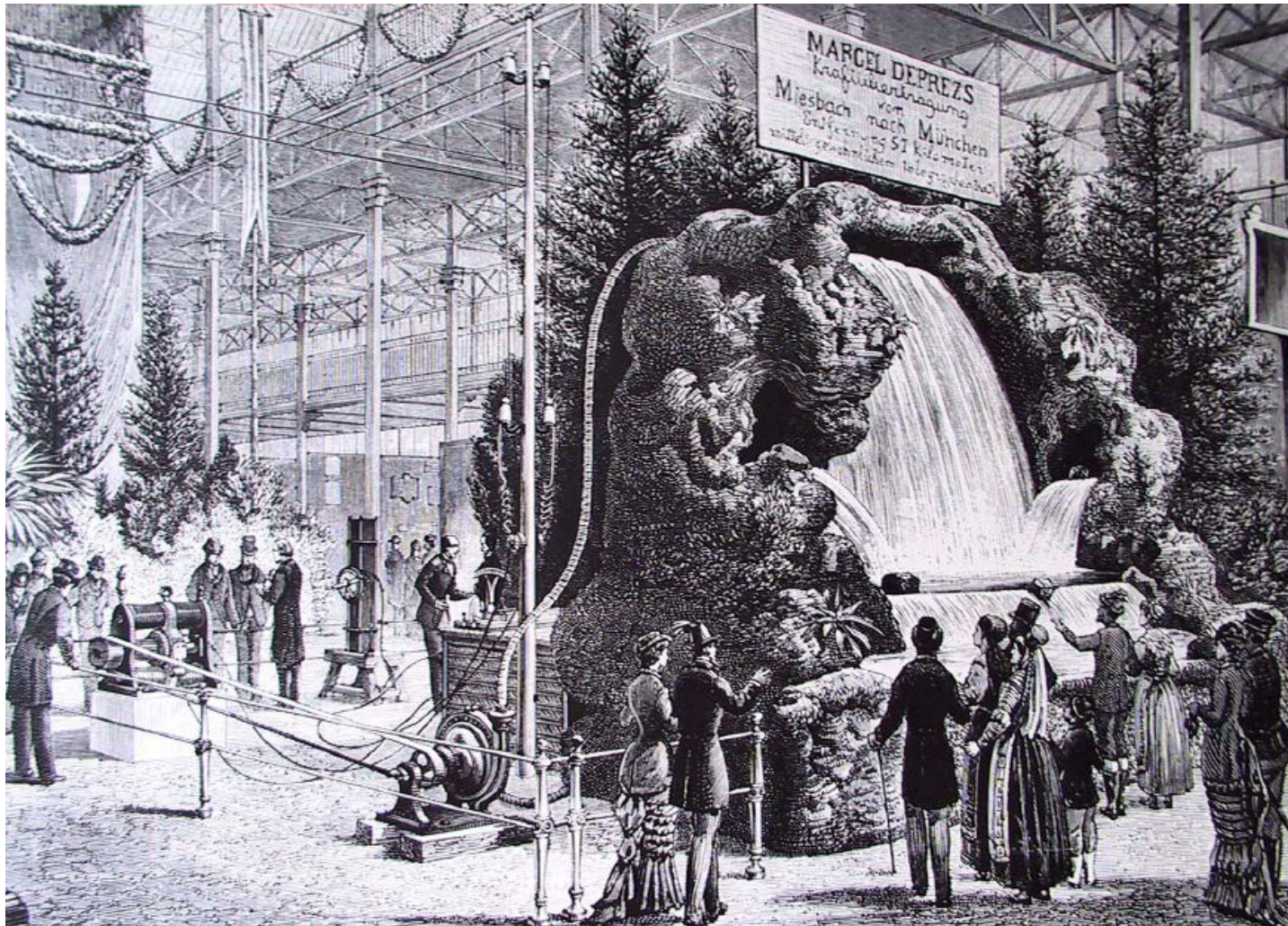
## Erste Gleichstromübertragung: Miesbach - München, 1882



Länge = 57 km,  $U = 2 \text{ kV}$ ,  $P = 1,5 \text{ PS}$

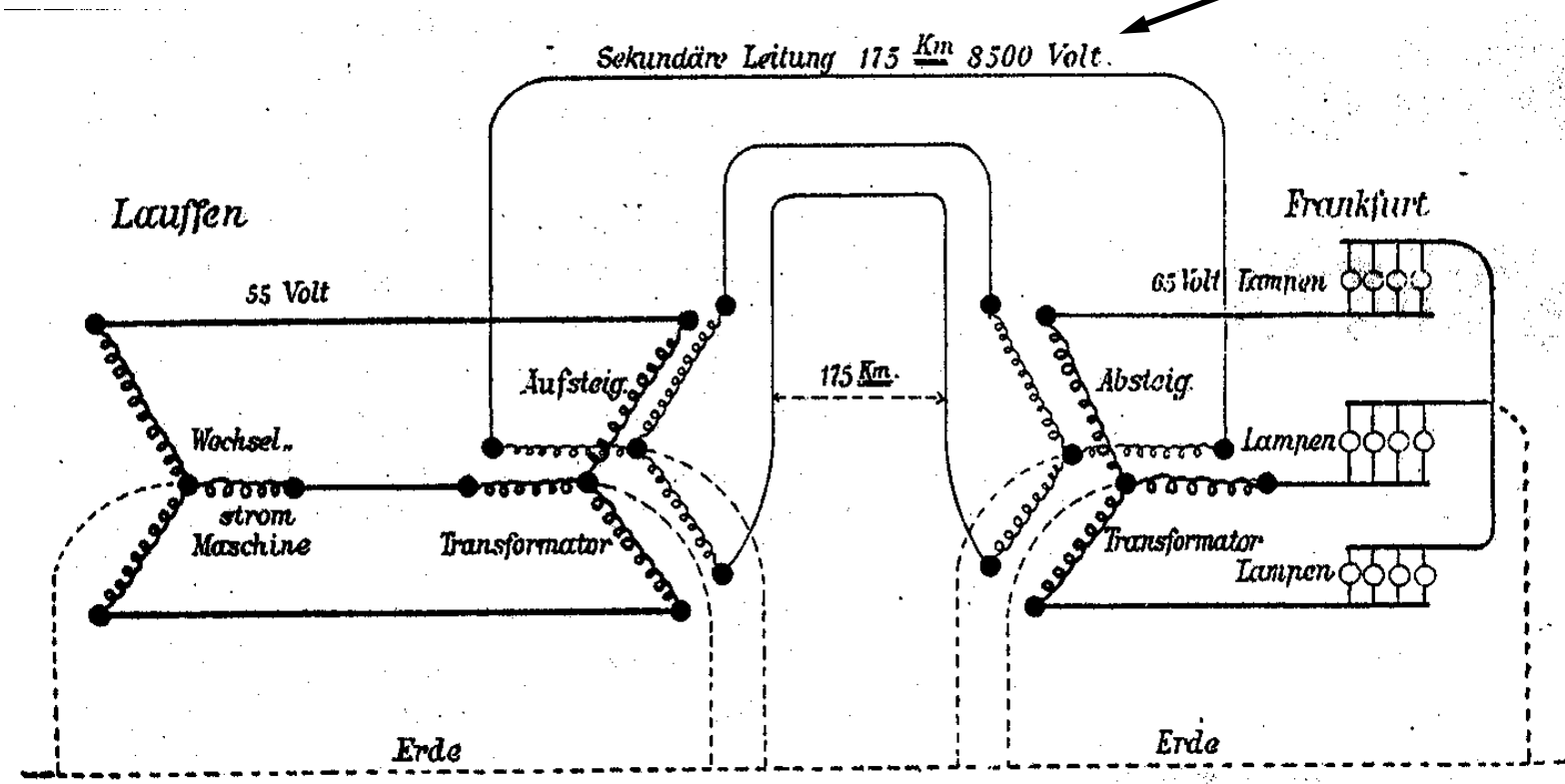


## Erste Gleichstromübertragung: Miesbach - München, 1882



# Erste Drehstromübertragung: Lauffen - Frankfurt/Main, 1891

später: 15.000 Volt

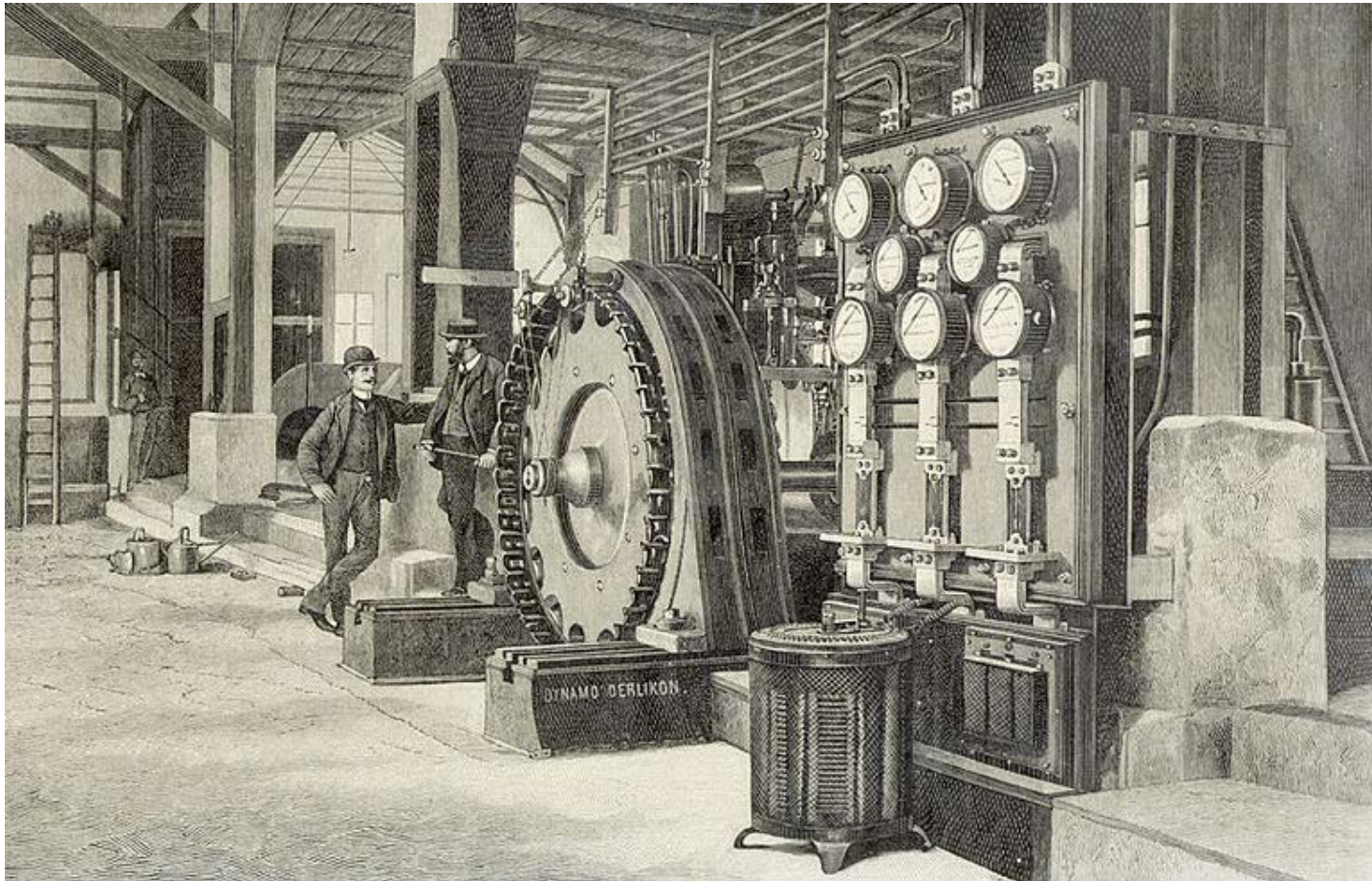


482. Schaltungsdiagramm der Versuchsanlage Lauffen-Frankfurt a. M.

Quelle: Wikipedia

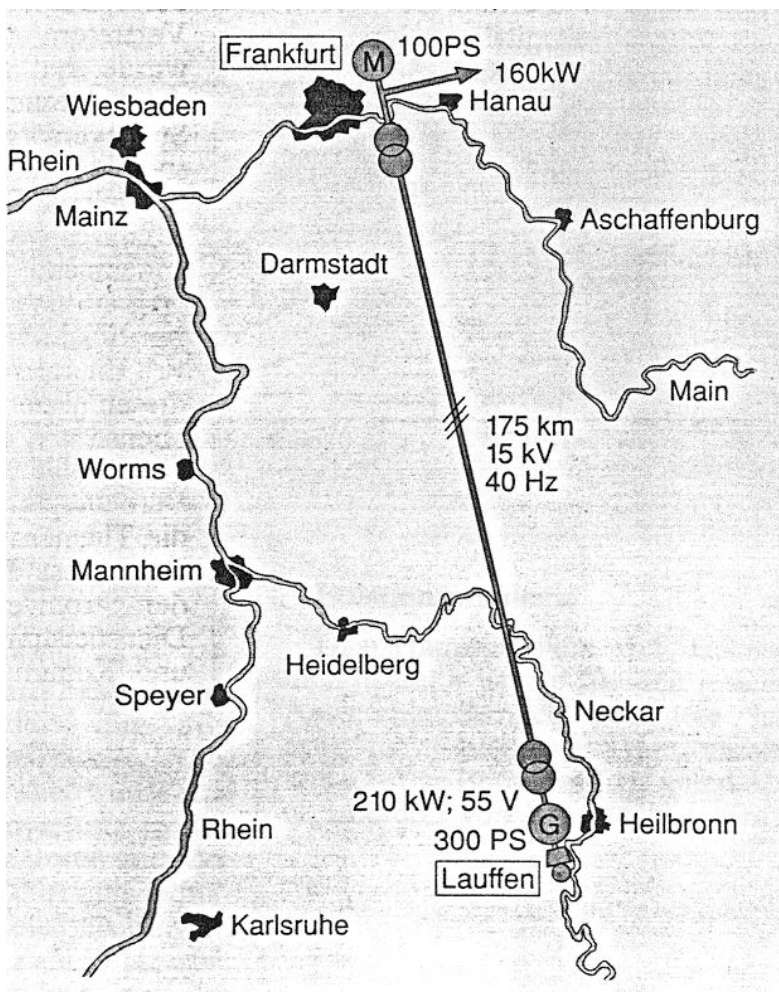


## Erste Drehstromübertragung: Lauffen - Frankfurt/Main, 1891



**Drehstromgenerator in Lauffen mit Schalttafel**

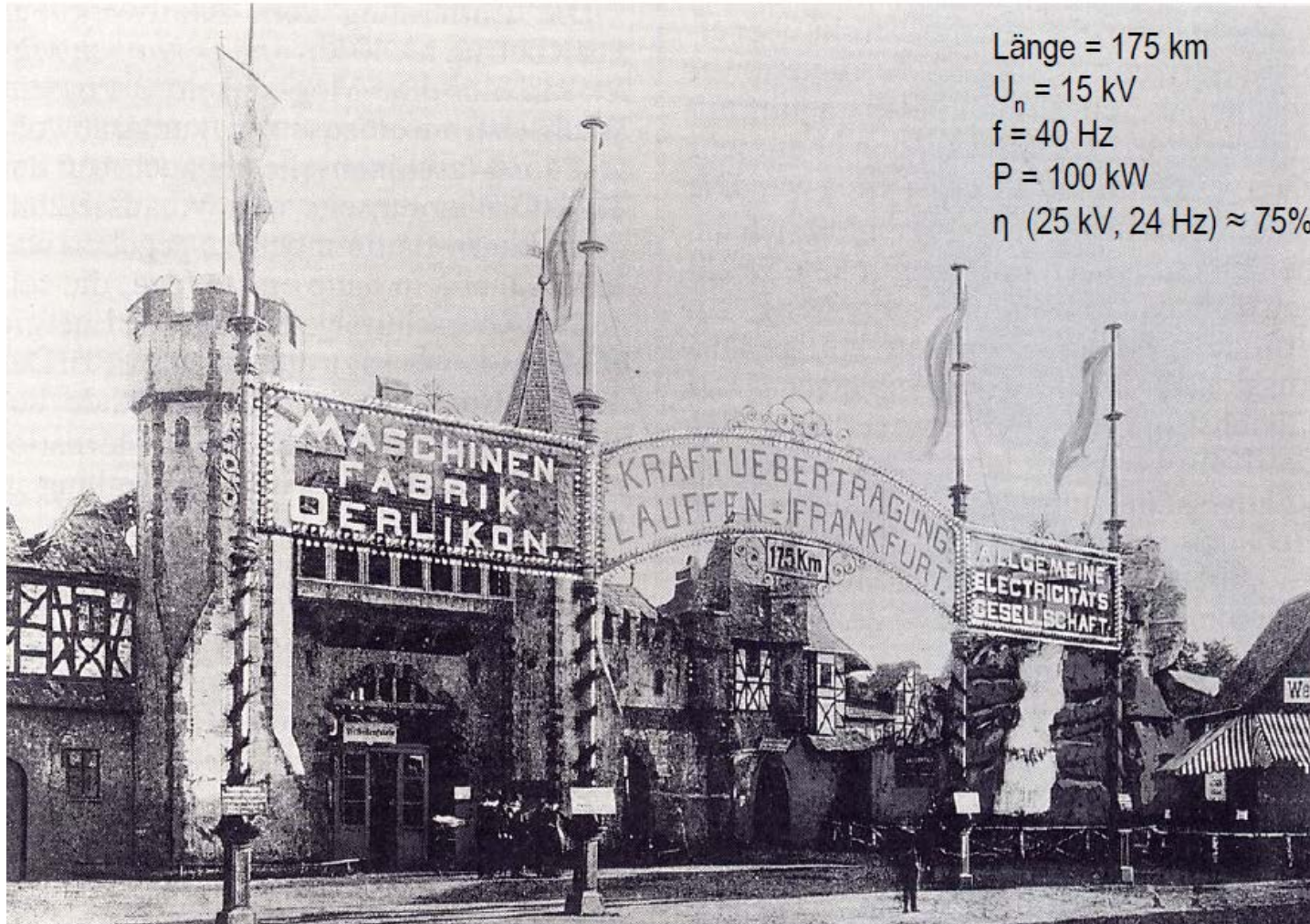
# Erste Drehstromübertragung: Lauffen - Frankfurt/Main, 1891



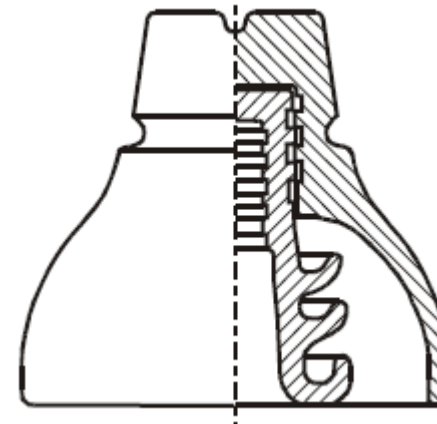
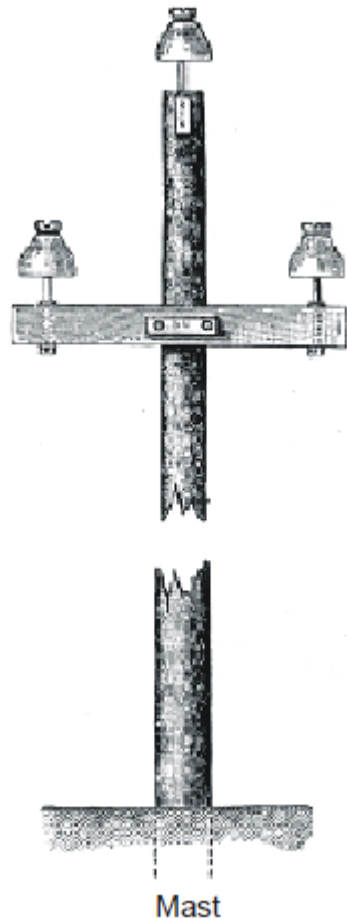
Quelle: Wikipedia



## Erste Drehstromübertragung: Lauffen - Frankfurt/Main, 1891



## Erste Drehstromübertragung: Lauffen - Frankfurt/Main, 1891



ø 230 mm, ölgefüllt

175 km, 3000 Masten, 9000 Öl-Isolatoren, 60 t Kupferdraht (Ø 4 mm)

# HGÜ - Ergebnis des Netzentwicklungsplans

## NEP Korridor A(Süd) „Ultranet“



### Ausgangslage:

- Massiver Ausbau der Windenergie im Norden und Photovoltaik im Süden von Deutschland
- Abschaltung von Kernkraftwerken bis 2022
- Bereits heutzutage sehr hohe Auslastung des Transportnetzes

### Ergebnis von NEP2012/13

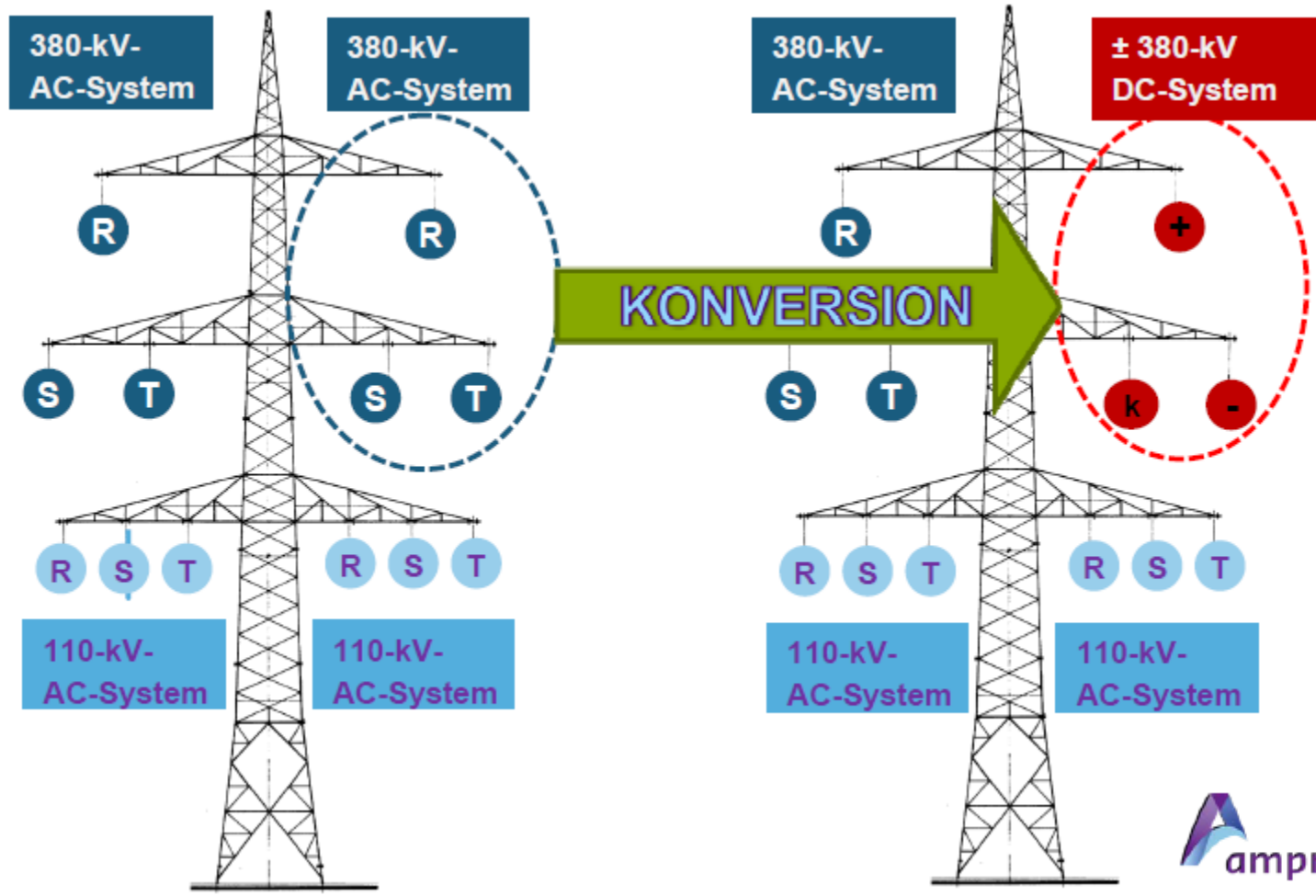
- 2GW DC Verbindung zwischen Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg notwendig
- Zeitliche Rahmenbedingungen erfordern schnelle Umsetzung: Nutzung vorhandener Freileitungen



Quelle: Rusek, Amprion, 2013



# HGÜ - Hybridtower



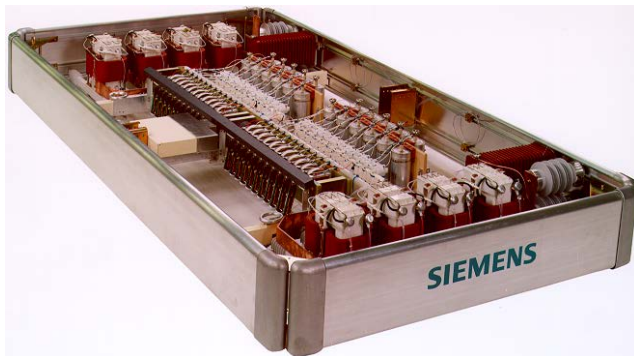
Quelle: Rusek, Amprion, 2013

# HGÜ - Feldversuch in Datteln (Hybridtower)



Quelle: Rusek, Amprion, 2013

# HGÜ - Anlagentechnik



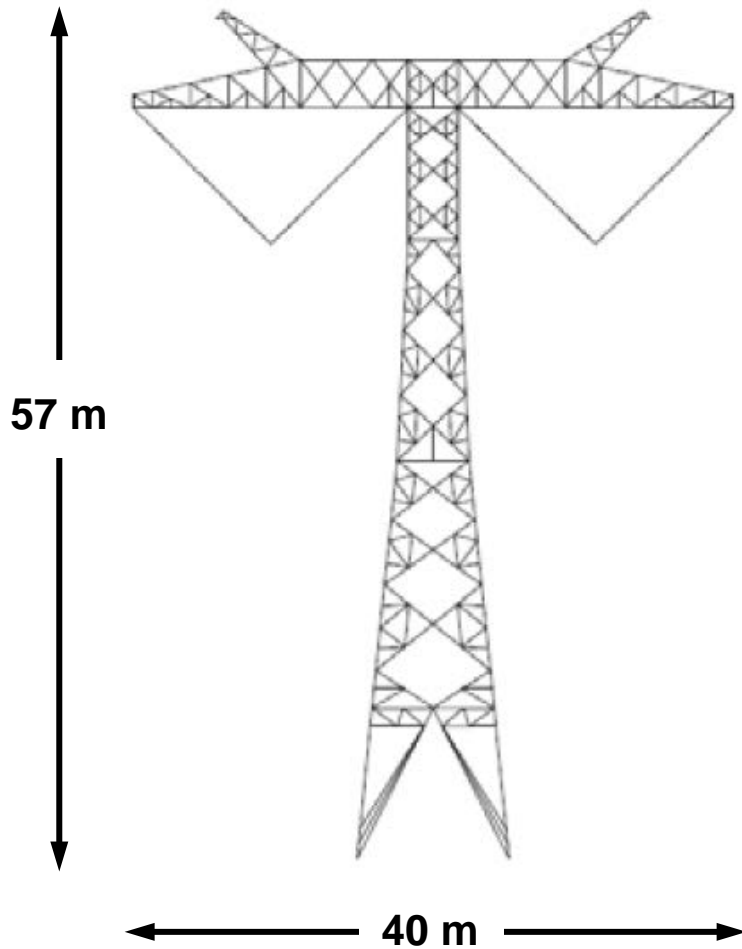
**HGÜ Xiangjiaba - Shanghai, China:  
± 800 kV DC, 2.100 km, 6.400 MW**



Quelle: Siemens, 2013

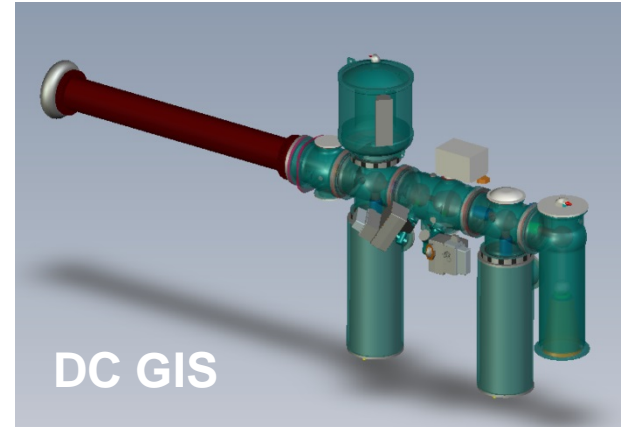
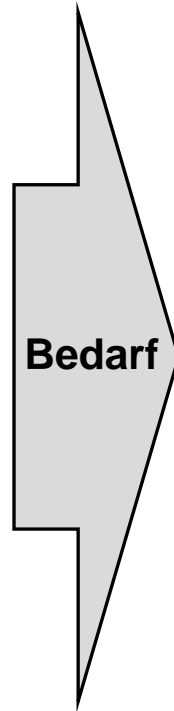
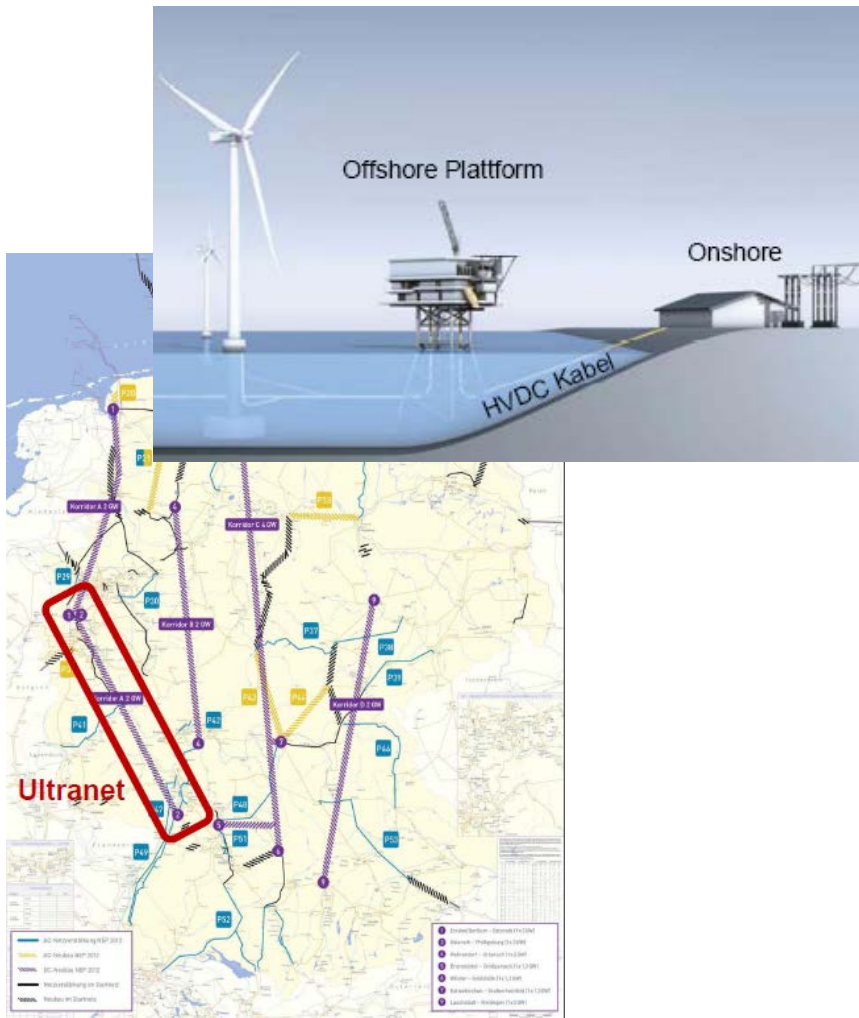


# HGÜ - Freileitung für $\pm 800$ kV DC



Quelle: Siemens, 2013

# HGÜ - HVDC GIS/GIL



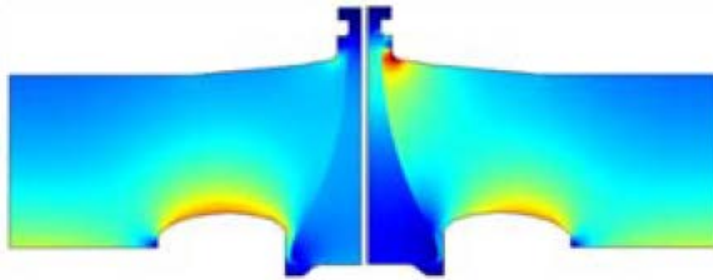
Quelle: Siemens, 2013



# HGÜ - HVDC GIS/GIL

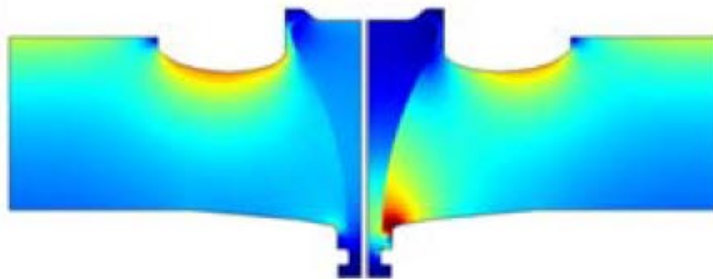
## Feldverteilung

kapazitiv  $\longleftrightarrow$  resistiv

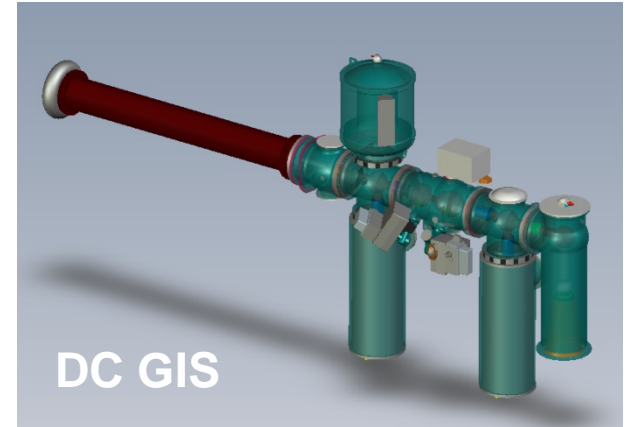


AC

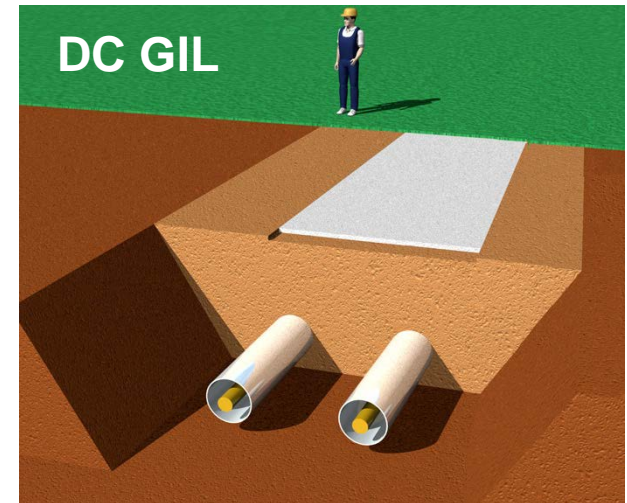
DC



Quelle: Riechert, ABB, 2013



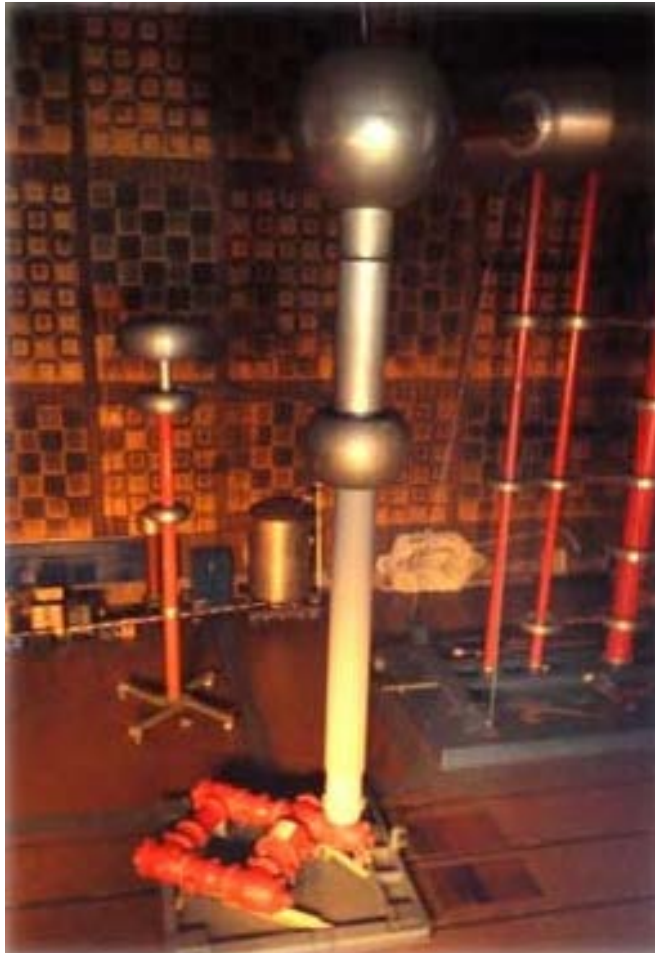
DC GIS



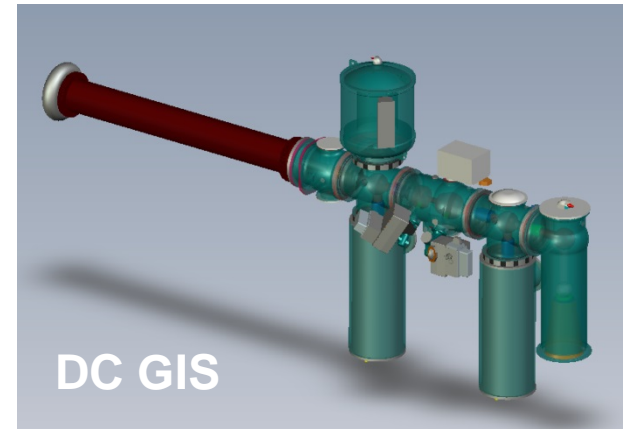
DC GIL

Quelle: Siemens, 2013

# HGÜ - HVDC GIS/GIL: Entwicklungsprüfung



Quelle: Riechert, ABB, 2013



DC GIS



DC GIL

Quelle: Siemens, 2013

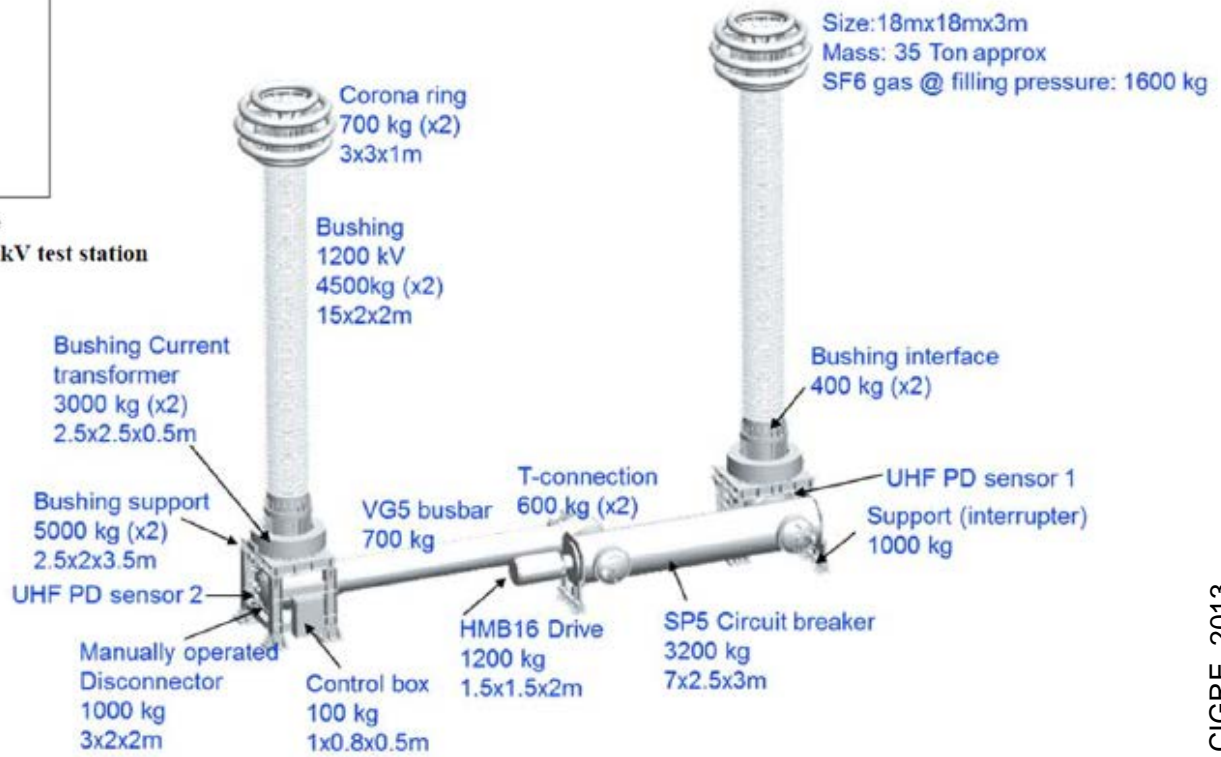
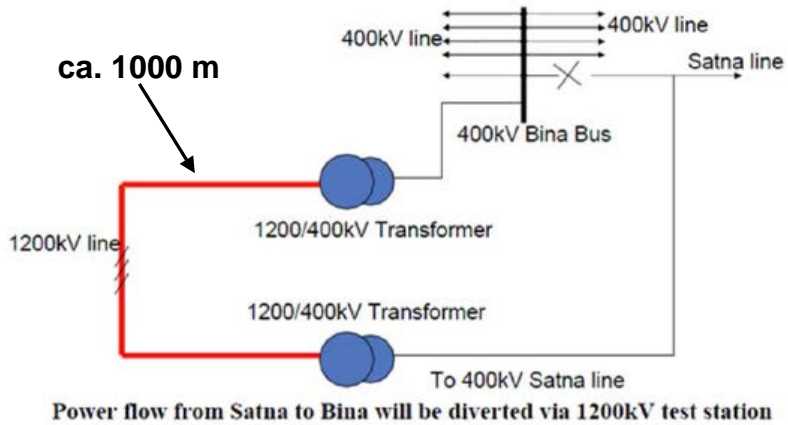


# UHV 1100 kV AC



**1100 kV Jin Dong Nan Substation, China (seit 2009 in Betrieb)**

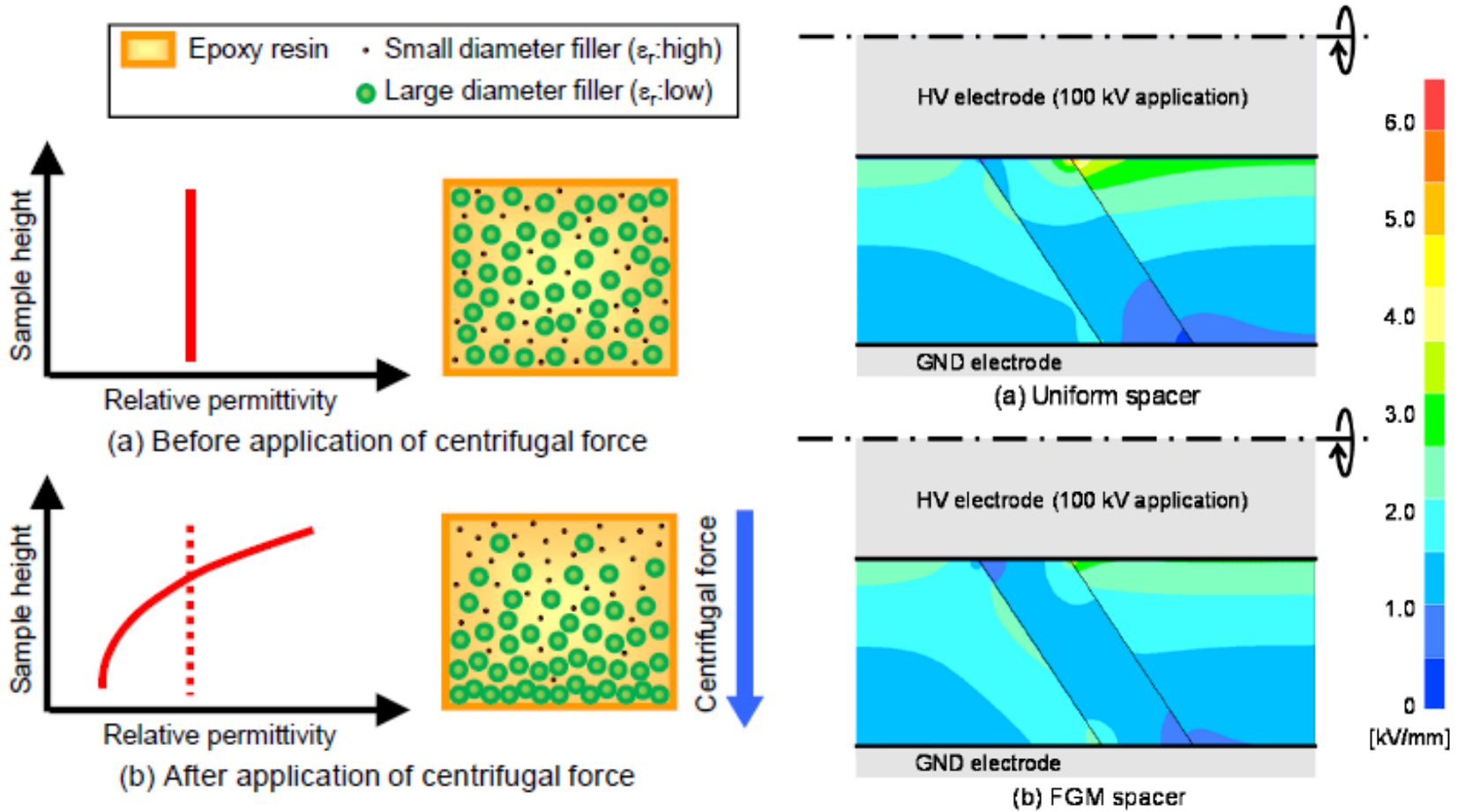
# UHV 1200 kV AC



## 1200-kV-Teststation in Bina, Indien und 1200-kV-Hybrid-GIS (ABB)

Quelle: CIGRE, 2013

# Zukünftige GIS mit Funktionswerkstoffen (FGM)

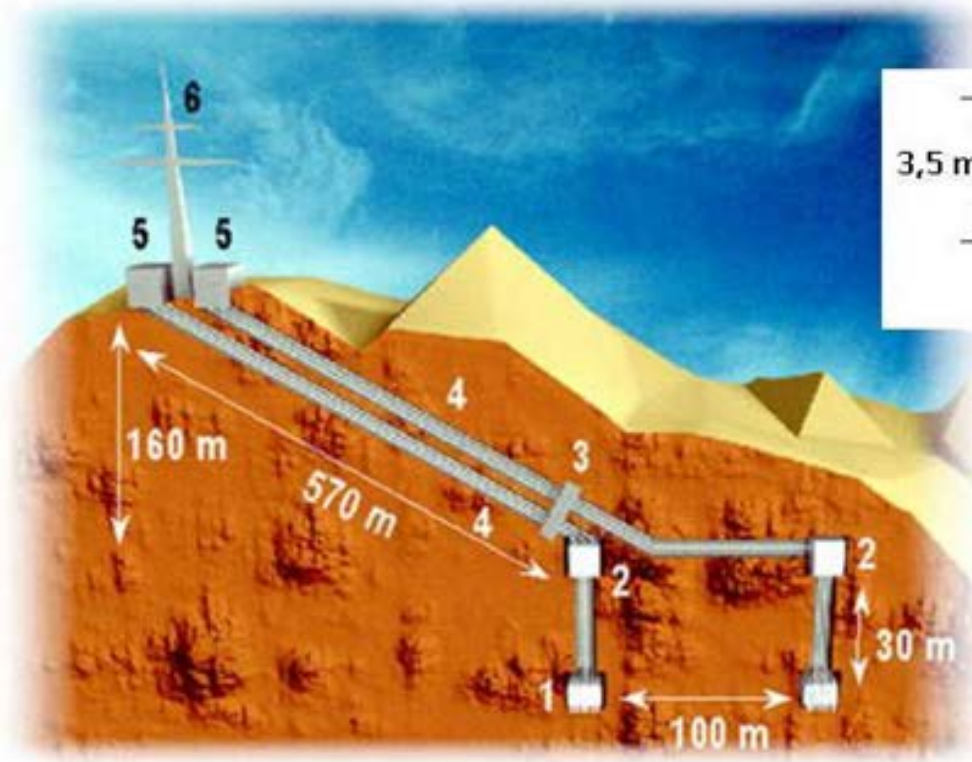


**Reduzierung der max. Feldstärke um 30 % >>> GIS-Durchmesser kleiner**

Quelle: Okubo, 2013



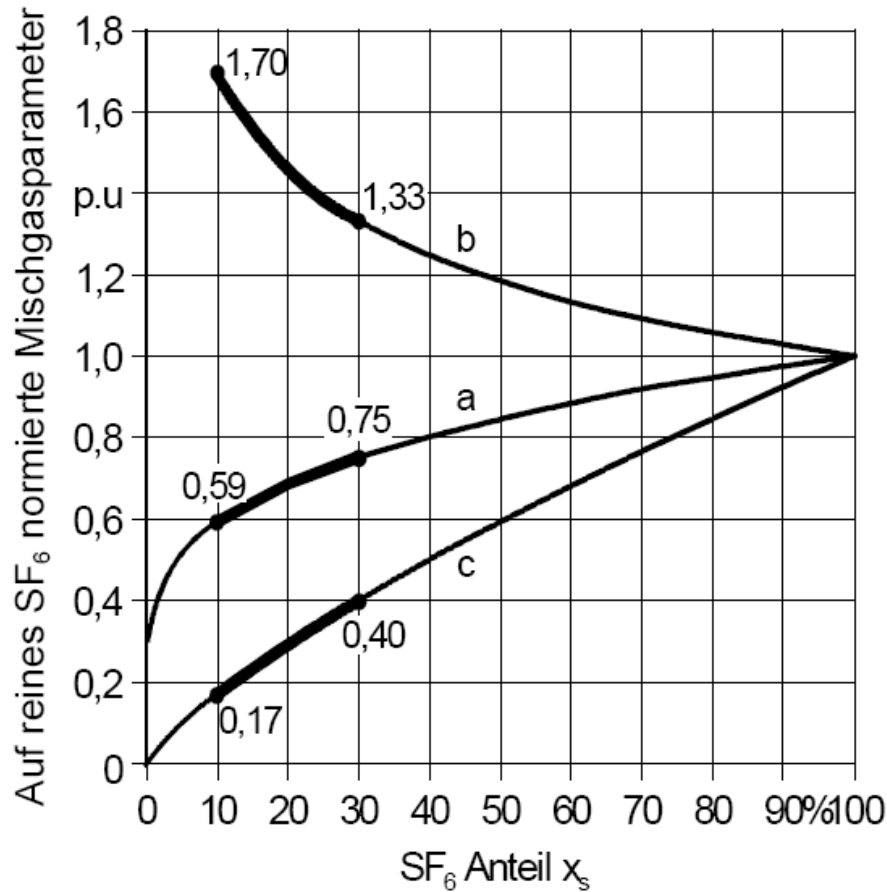
# Gasisolierte Übertragungsleitung (GIL)



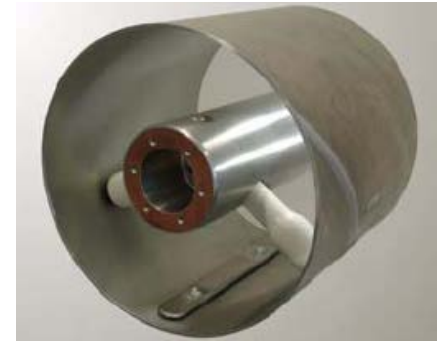
**GIL im Kavernenkraftwerk Wehr, Schluchsee, 1974**  
**380 kV, 2000 A, 700 m, 100% SF6**

Quelle: Siemens, 2013

# Gasisolierte Übertragungsleitung (GIL)



**GIL der  
2. Generation**



**GIL München, 380 kV, 2014  
N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>-Mischgas: 80% / 20%**



Quelle: Siemens, 2013

## Gasisolierte Übertragungsleitung (GIL)

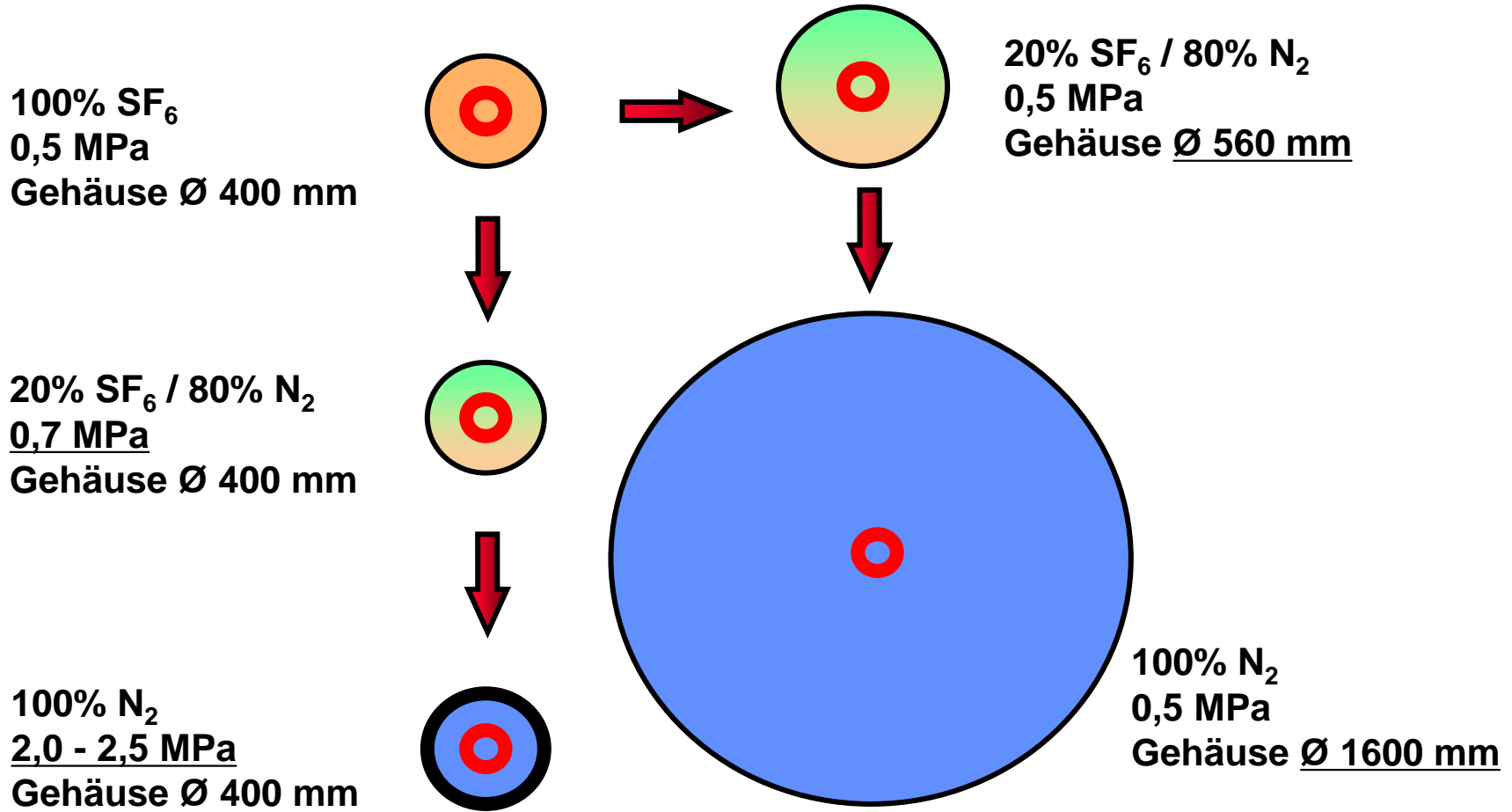


**GIL Kelsterbach, Frankfurt/Main**  
**380 kV, 2750 A, 950 m, erdverlegt, 2011**  
**N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>-Mischgas: 80% / 20%**

Quelle: Siemens, 2013



# Gasisolierte Übertragungsleitung (GIL)



Quelle: Siemens, 2003

## SF6 und alternative Isoliergase

Molecule	Mol wt [gr]	Diel. Str. vs SF6	Boiling Point [°C]	GWP	Toxicity	Comment
CF <sub>4</sub>	88	~0,46	-128	5700	None	Diel. Strength
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	200	~1,25	-6	10000	None	BP, GWP
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	188	~0,96	-37	8600	None	
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	138	~0,78	-78	11900	None	Diel. Strength, GWP
CF <sub>3</sub> I	196	~1,2	-22,5	~5	CMR3, e.g. 3 – 4 ppmv	Toxicity
SF <sub>6</sub>	146	1	-63	22800	None	GWP
<b>NEU:</b> Novec 1230™		1,7	49	1	low	BP, Toxicity

# Freileitungen



**Optimierte  
380-kV-Freileitungen  
(Mastbild und Seildurchhang)**



Quelle: SAG, 2013



# Freileitungen



**380-kV-Freileitung mit Raumbedarf einer 110-kV-Trasse durch optimierte Verbundisolatoren (ESKOM, Südafrika)**

Quelle: Lapp, 2013

# Energiewende und Hochspannungstechnik





# Hochspannungstechnik ist Basis für Übertragungsnetze

