

Elektrische und Magnetische Felder bei Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

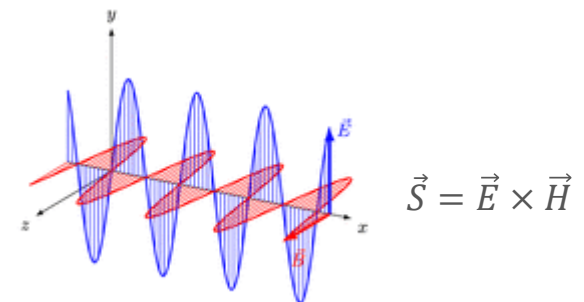
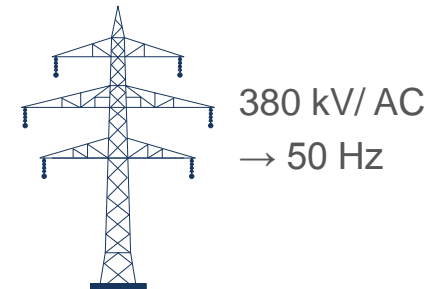
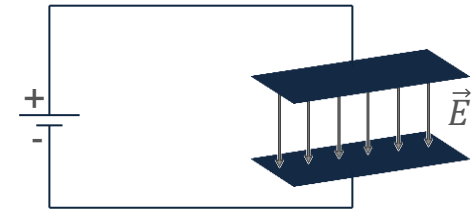


Agenda

- **Elektrische und magnetische Felder**
 - Grundlagen
 - Natürliche und künstliche Felder
- **Hochspannungsgleichstromübertragung**
 - Vergleich zur Wechselspannungsübertragung
 - Technologische Umsetzung
- **HGÜ-Forschungszentrum der TU Dortmund**
 - Aktueller Stand
 - Forschungsschwerpunkte / Ziele

Technische Feldtypen (Bereichsnäherungen)

- **Statische und stationäre Felder**
 - Es treten keine zeitlichen Änderungen auf
- **Quasi-stationäre Felder**
 - Zeitlich veränderliche Größen vorhanden, aber gering → Vernachlässigung
 - Langsam veränderliche Felder
 - Verschiebungsstrom sehr klein gegenüber Leitungsstrom
 - induzierte Spannung wird vernachlässigt
- **Schnell veränderliche Felder**
 - Hohe Änderungsgeschwindigkeiten,
 - Kopplung der Felder bei räumlicher Ausdehnung
→ Wellenbetrachtung erforderlich (Laufzeiten)



Quelle: Wikipedia

Elektrisches Feld und Spannung

- **Elektrisches Feld E ...**

- ... beschreibt eine Raumeigenschaft
- ... wird quantifiziert durch die auf eine Probedlg. q wirkende Kraft F in Amplitude und Richtung.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

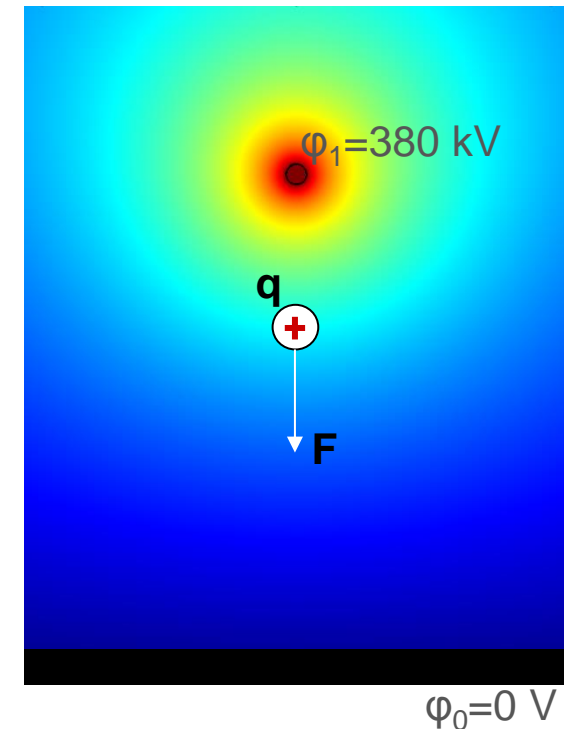
- **Spannung U₁₂ ...**

- ... der „aufsummierten Feldstärke entlang des Weges zwischen zwei Raumpunkten“
- ... entspricht der Differenz der elektrischen Potentiale φ zweier Raumpunkte

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} = E_{\text{mittel}} \cdot L$$

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$$

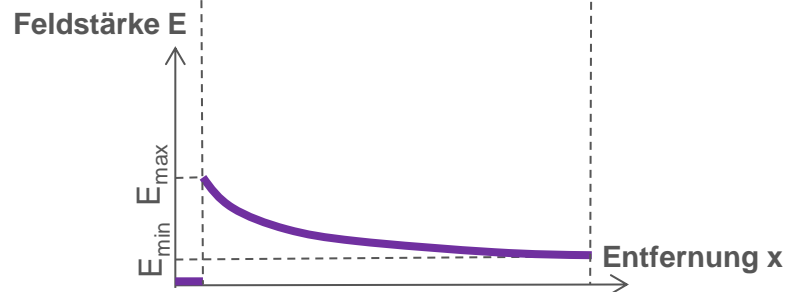
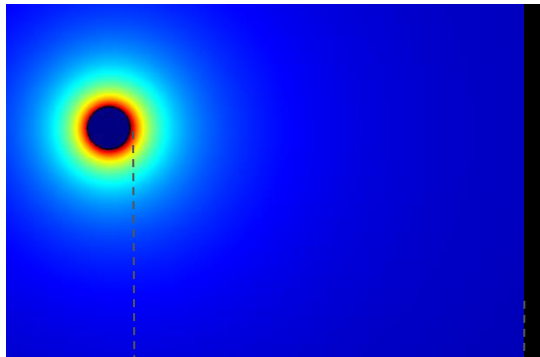
Potentialfeld



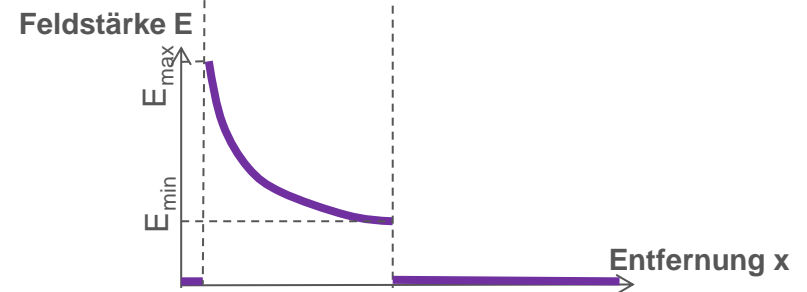
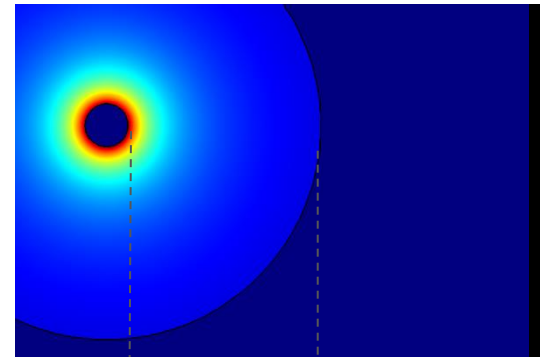
<< **Spannung U immer in Verbindung mit E-Feld** >>

Elektrische Feldstärke im Raum/ Schirmung

Bspl: Linienleiter über Erde



Bspl: Geschirmte Leitung (Kabel)



**<< E hängt von Geometrie ab (und von der Systemspannung),
Schirmung möglich >>**

Superposition der elektrischen Felder (Freileitungen)

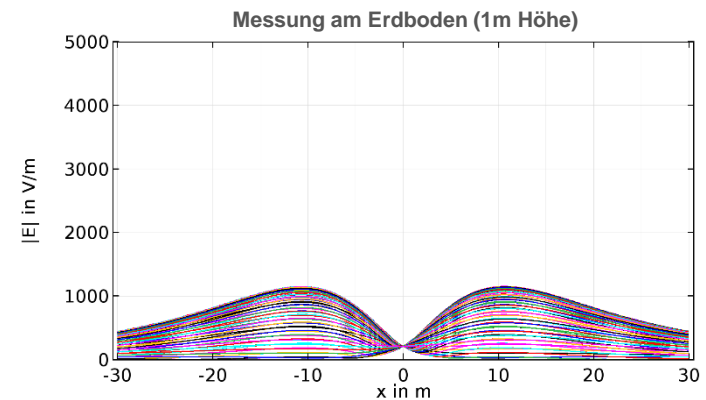
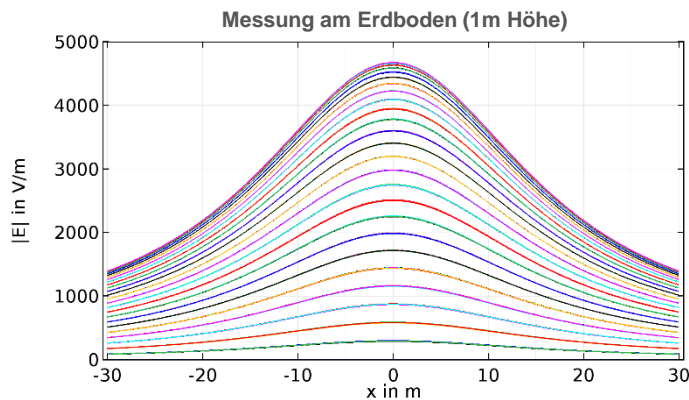
1 Leiter



3 Leiter



Messlinie



<< Die Superposition der einzelnen E-Felder führt zur Reduktion der elektrischen Feldstärke am Boden >>

Elektrische Felder in der Energieübertragung



Quelle: 50Hertz

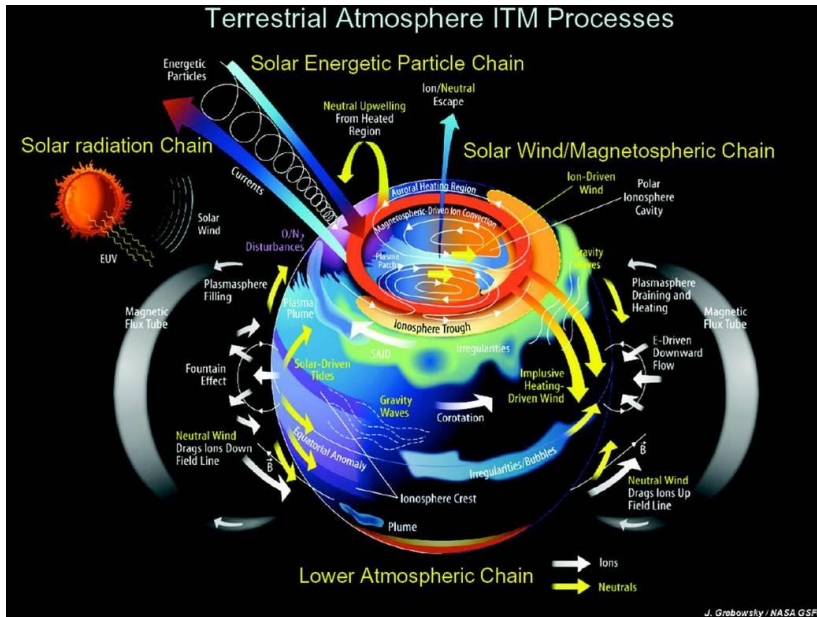


Quelle: Südkabel

- Freileitungen
 - Felder sind maßgeblich abhängig von ...
 - Spannungsebene, Mastgeometrie, Abstände
 - Leiteranordnung, etc.
- Kabel:
 - Elektrisches Feld innerhalb der Kabelisolierung (Schirmung!)
 - Außerhalb der Schirmung keine Emission elektrischer Felder

**<< Charakteristika für Drehstromsysteme
und für HGÜ-Netze gültig >>**

Schönwetterfeldstärke



Quelle: NASA

Ionisierung der Atmosphäre, u.a. durch UV-Strahlung

- Höhe: $h = 100 \dots 300 \text{ km}$
- Potential: $\Phi_{\text{ion}} = + 300 \text{ kV}$



$E_s = \text{Schönwetterfeldstärke ca.:}$
 $|\vec{E}_s| = 130 \text{ V/m}$

<< **Natürliches E-Feld für den Menschen**
nicht spürbar wg. Leitfähigkeit >>

Atmosphärische Entladungen



Quelle: sn-online.de

- Ladungstrennung durch aufsteigende feuchte Luftmassen
- Hohe Blitzdichte in Deutschland im Sommer



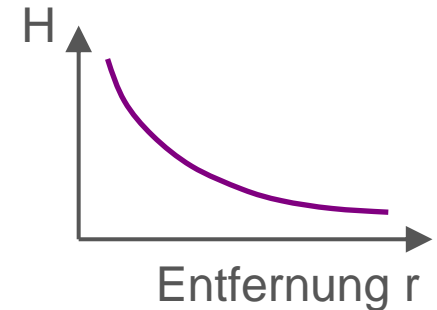
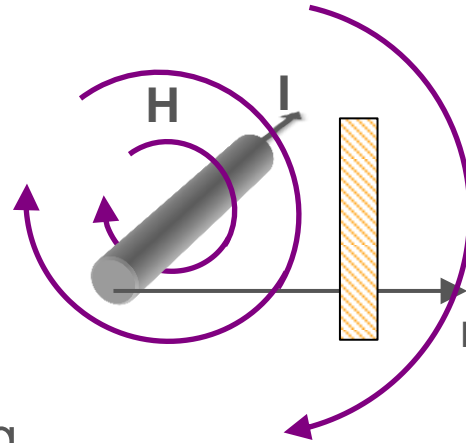
Gewitterfeldstärke:

$$E = 1 \dots 10 \text{ kV/m}$$

**<< Natürliches Gewitterfeld deutlich größer als
die Schönwetterfeldstärke >>**

Magnetisches Feld H und Flussdichte B

- Strom I erzeugt magn. Feld H:
- Die Summe der magn. Feldstärke H in Richtung eines geschlossenen Umlaufweges entspricht dem eingeschlossenen Strom I.



$$I = \oint \vec{H} d\vec{l}$$



$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

in A/m

Magn. Flussdichte
B:



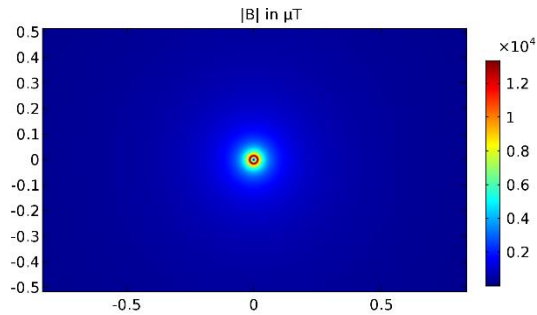
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

in T

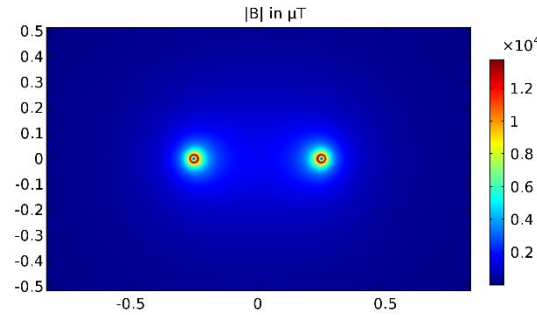
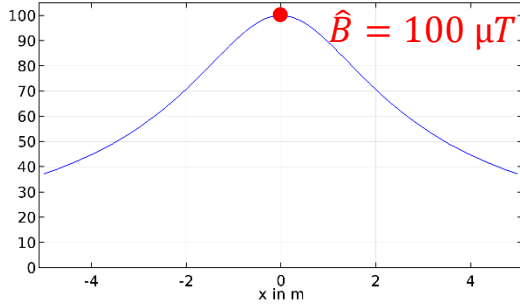
<< Magn. Feld H nimmt mit der Entfernung r ab,
Schirmung effektiv bei hohen Frequenzen >>

Einfluss des Rückleiters

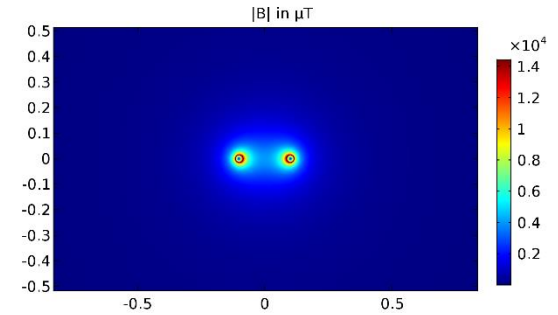
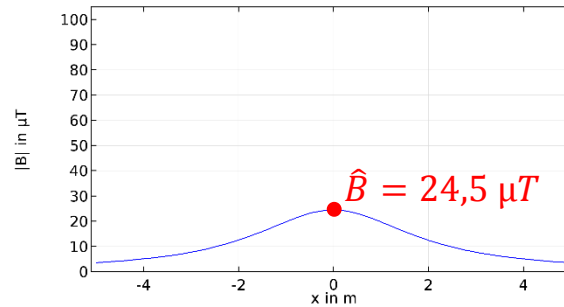
Simulation: 2m oberhalb Leiterebene



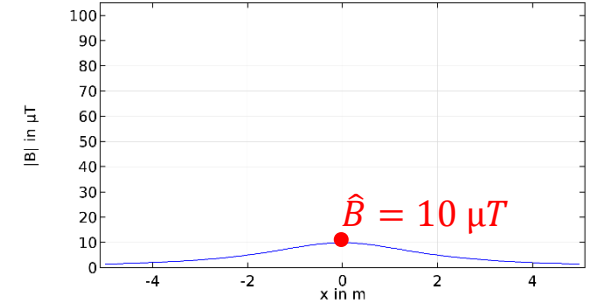
1 Hinleiter (I=1kA)



Hin- & Rückleiter (d=50cm)



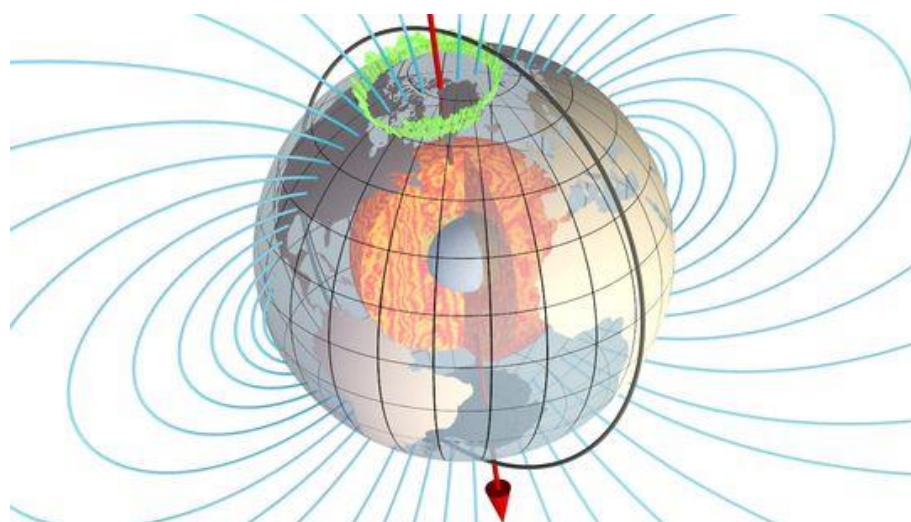
Hin- & Rückleiter (d=20cm)



<< Rückleiter reduziert das magnetische Feld >>

Erdmagnetfeld

- Das Erdmagnetfeld ist ein Gleichfeld
- Wirkung an Erdoberfläche wie „magnetischer Dipol“



www.zeit.de/wissen

Ort	Magn. Flussdichte B
Deutschland	42 μT
Weltweit	33 ... 67 μT
<u>Vergleich (26. BImSch):</u>	
0 Hz	500 μT

<< Natürliches Erdmagnetfeld geringer als 26. BImSch >>

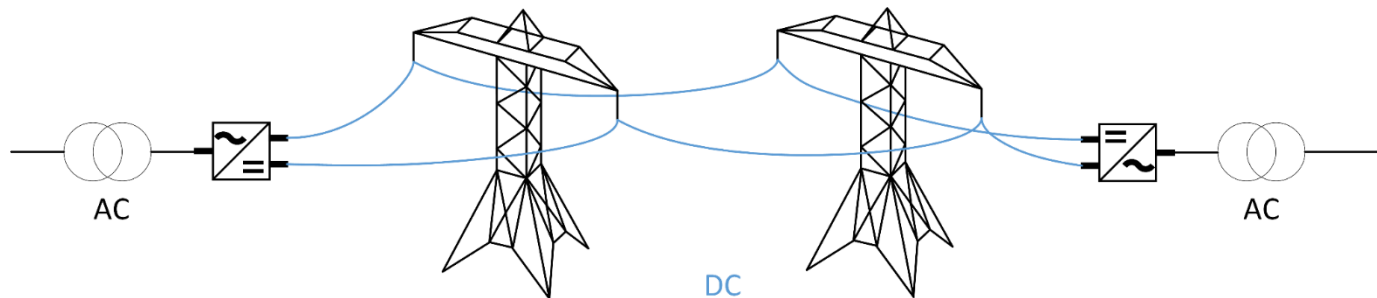
Vorteile der Gleichspannungsübertragung

- Die DC-Übertragungstechnik bietet u.a. folgende Vorteile:
 - **Spannungs- und Frequenzstabilisierung**
durch Regelbarkeit des Blind- und Wirkleistungsbudgets
 - Energieübertragung, keine Notwendigkeit der **Blindleistungskompensation (DC)** auf der Übertragungsstrecke
 - **Kopplung** (auch asynchroner) Teilnetze
 - große **Übertragungslängen** wirtschaftlich möglich
(Minimierung der Verlustleistung)
 - See: ca. 150 km (DC-Kabel)

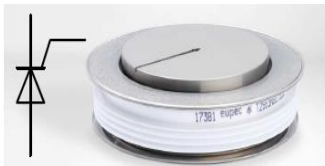


DC-Prüftechnik an der TU Dortmund

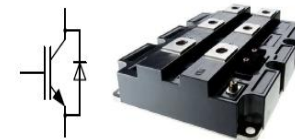
HGÜ - Überblick



- Netzgeführte Umrichter (**LCC**)
 - **L**ine **C**ommutated **C**onverter
 - Einsatz von Thyristoren



- Selbstgeführte Umrichter (**VSC**)
 - **V**oltage **S**ourced **C**onverter
 - Einsatz von Halbleiterschaltern (z.B. IGBT)



➤ Abschalten im Nulldurchgang

➤ Schalten beliebig

Hochspannungsgleichstromübertragung - Umrichtertypen

Netzgeführte Umrichter (LCC)

- Asynchrone Kopplung von Drehstromsystemen
- Transport großer Energiemengen möglich
- Blindleistungskompensation nahe des Umrichters notwendig
- Bedarf von Filteranlagen

Selbstgeführte Umrichter (VSC)

- Versorgung von (passiven) Netzteilen, Schwarzstart fähig
- Max. Scheinleistung durch thermische Grenzen beschränkt
- Blindleistung abhängig von der Scheinleistung
- Schaltfrequenz der Umrichter erhöht Verluste
- Geringerer Filterbedarf

Projektrahmen InfraHGÜ und E²HGÜ

- Öffentlicher Träger:

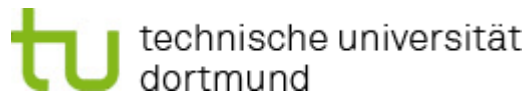
- Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung (NRW MIWF, Projektträger ETN) für InfraHGÜ
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi / Projektträger Jülich) für E²HGÜ

Ministerium für Innovation,
Wissenschaft und Forschung
des Landes Nordrhein-Westfalen



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

- Verbundpartner:



SÜDKABEL



FH | W-S

Hochschule für angewandte Wissenschaften
Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt

SIEMENS



- Laufzeit: 4 Jahre (2014 – 2018)

Projektüberblick InfraHGÜ und E²HGÜ

- Das vorgestellte Projekt bezieht sich auf Betriebsmittel und Komponenten für **HVDC-Netze**
- **Projektziel** ist ...
 - ... die **Evaluierung / Qualifizierung bereits vorhandener / neuartiger Komponenten**
 - ... **die Neuentwicklung** innovativer zukünftiger Komponenten für den Einsatz in transeuropäischen Netzen mit HGÜ-Technologie
- **Untersuchungsschwerpunkte** sind ...
 - ... HGÜ-Transformatoren
 - ... HGÜ-Isolatoren
 - ... HGÜ-Kabel
 - HGÜ-Durchführungen
 - DC-Teilentladungen
 - Feldexposition durch HGÜ-Systeme
- An der **TU Dortmund** genutzte Prüfressourcen:
 - HVDC-Prüfanlage +/- 1200kV, 150mA, Freiluftausführung
 - Prüfanlage für Gleichstrom 4kA, 20V

Aufbau der Testumgebung für HVDC



Aktuelles Bild des HGÜ-Testzentrums



Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



www.tu-dortmund.de

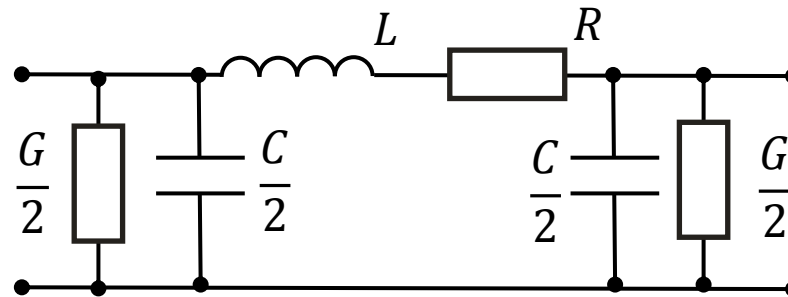


Historie der Gleichspannungsübertragung

- In den 1880er Jahren: „war of currents“
 - Thomas Edison: Verfechter der DC-Übertragung
 - Verbrauchernahe Erzeugung zur Verlustminimierung
 - Nikola Tesla: Befürworter der AC-Übertragung
 - Transformationsprinzip ermöglicht verlustoptimierte Übertragung
- 1882: DC-Übertragungsstecke Miesbach – München
 - Länge: 57 km, Betriebsspannung: 2 kV
 - Technischer Ausfall nach wenigen Tagen
- 1930er Jahren „Wiederentdeckung“ der DC Technologie
 - Quecksilberdampfgleichrichter: verlustoptimierte Spannungswandlung
- 1950er Jahren Startpunkt **moderner** DC Übertragung
 - HGÜ-Link Gotland: Betriebsspannung: 100 kV, Leistung: 20 MW

Motivation zur Gleichspannungsübertragung

- π -Ersatzschaltbild einer Leitung



- Freileitungen:
 - **AC** Induktive Eigenschaft der Leitung $Z_L = j\omega L$
 - **DC** Induktivität bei stationären Betrieb unwirksam, $\omega = 0$
- Lange Kabel:
 - **AC** Kabelkapazität $Z_C = \frac{1}{j\omega C} \rightarrow$ Blindleistungskompensation
 - Besondere Herausforderungen bei Seekabeln
 - **DC** Kabelkapazität bei stationären Betrieb unwirksam, $\omega = 0$