

# Elektrische Energieversorgungsnetze – von Smart Grids, Verbundsystemen und Fernübertragungen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Energiekolloquium TU Darmstadt Energy Center, 8.2.2010

Prof. Volker Hinrichsen, Technische Universität Darmstadt



Quelle: EUR 22040 — European Technology Platform SmartGrids



# Wovon heute nicht die Rede ist...



## Energiewandlung

- konventionell
  - thermische Kraftwerke
    - fossile Kraftwerke
    - Kernkraftwerke
    - Gasturbinen
    - GUD-Kraftwerke
  - Wasserkraftwerke
  - "Zu-Hause"-Kraftwerke
  - Kernfusion
- "erneuerbar"
  - Windenergieanlagen
    - on-shore
    - off-shore
  - Biogasanlagen
  - Blockheizkraftwerke
  - Photovoltaik
  - Solarthermie
  - Gezeitenkraftwerke
- .....

## Energiespeicherung

- Pumpspeicherseen
- Batterien
- Druckluft
- Wasserstoff
- supraleitende Magnetspeicher
- .....

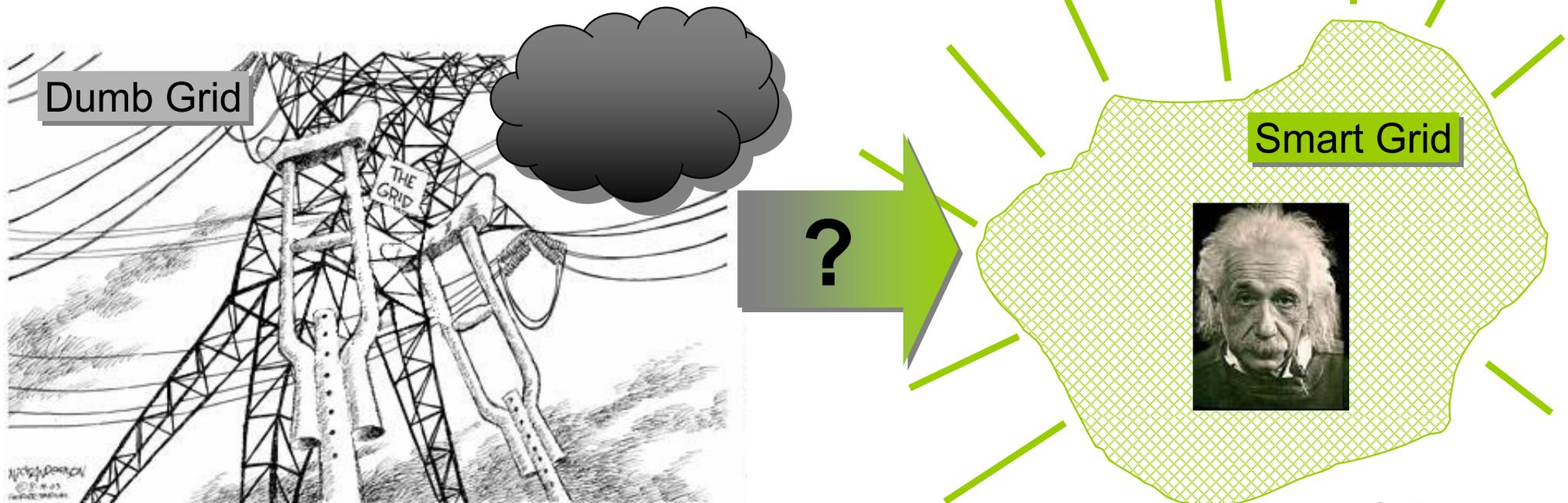
## Energieverbrauch

- Hybridautos
- Elektroautos
- Eisenbahnverkehr
- energieeffiziente Antriebe
- energieeffiziente Elektronik
- Energiesparlampen
- .....



# Wovon heute die Rede ist...

- Wie kann all das künftig in die elektrischen Netze **eingebunden** werden?
- Gibt es Alternativen zum "**lastgeführten**" Verbrauch?
- Sind heute elektrische Netze **dumm**?
- Wie **klug** müssen elektrische Netze künftig sein?
- Wie lösen wir das Problem der **Fernübertragungen**?



Quellen: Internet

- Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und –verteilung
- Der europäische Stromverbund
- "Smart Grids" – Definition, Anforderungen und Realisierung
- Zukunft: HTSL-Netze?
- DESERTEC und Supergrid – die Erschließung erneuerbarer Energiequellen in Europa, Mittlerem Osten und Nordafrika
- Drehstromübertragung – Hochspannungsgleichstromübertragung
- Freileitung – Kabel – Gasisolierte Leitung
- Zusammenfassung

# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

- 1882: Gründung des weltweit ersten Lehrstuhls für Elektrotechnik an der TH Darmstadt – Prof. **Erasmus Kittler**
  - Elektrische Energieversorgung damals: "Centralstationen" zur Deckung des lokalen Bedarfs
  - Darmstädter Centralstation 1888, geplant durch Kittler
  - **Oskar von Millers** Vision: Verbundnetze und Fernübertragungen
    - Initiierung einer elektrotechnischen Ausstellung 1891 in Frankfurt a.M.: Demonstrationsprojekt Fernübertragung
- Planung und Umsetzung:
- **Charles E.L. Brown**; MF Oerlikon; 1891 Gründung der BBC (heute ABB)
  - **Michael von Dolivo-Dobrowolski**; AEG; einer von Kittlers ersten Schülern; "Erfinder" des 3-Phasen-Drehstromsystems



von Miller



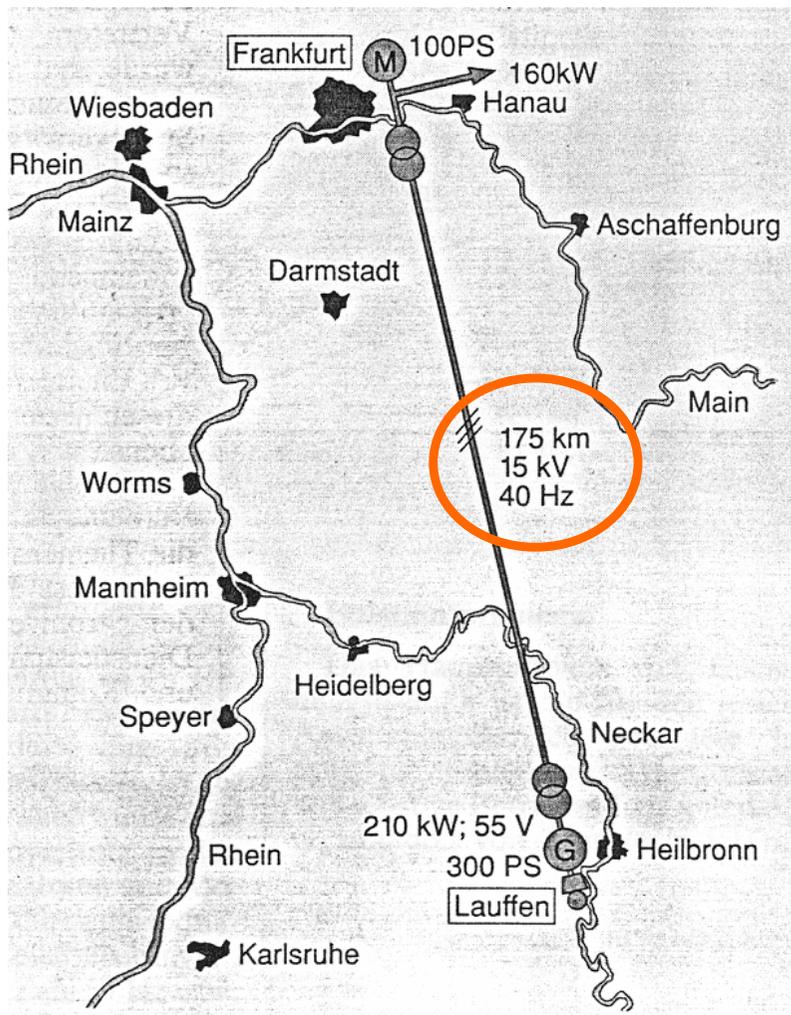
Brown



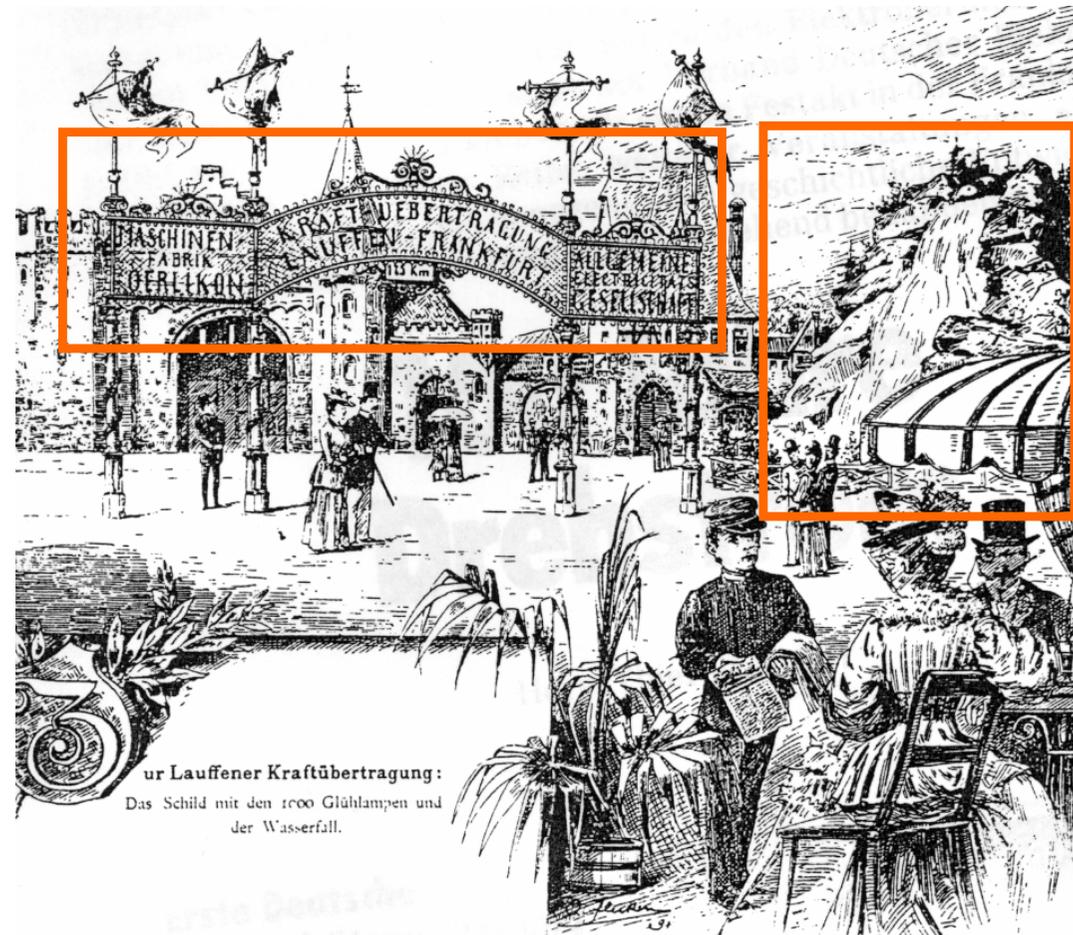
Dolivo-  
Dobrowolski

# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

Weltweit erste Drehstromübertragung Lauffen – Frankfurt 1891



1000 Lampen + 1 künstlicher Wasserfall !!



# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

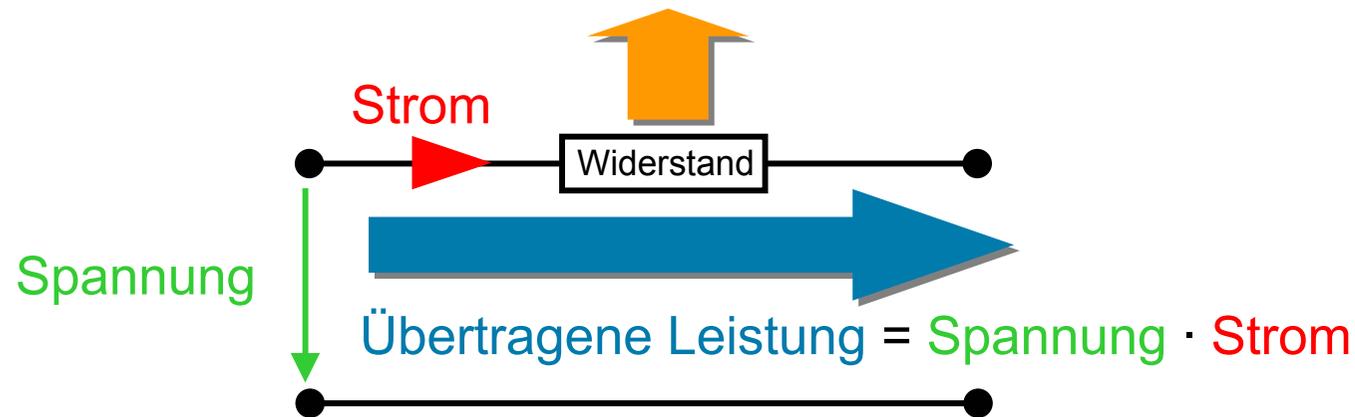


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Warum hohe Übertragungsspannungen?

Nur selten kann elektrische Energie dort erzeugt (gewandelt) werden, wo sie benötigt wird → **Übertragung** erforderlich!

Übertragungsverluste = Widerstand · **Strom zum Quadrat**



Hoher **Strom** → hohe Verlustkosten (quadratisch zum Strom!)

Hohe **Spannung** → hohe Isolationskosten (proportional zur Spannung)



Es gibt eine **wirtschaftlich optimale** Übertragungsspannung.

# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

Richtwerte für Übertragungsspannung, übertragbare Leistung und Entfernungen:

Übertragungsspannung	Leistung	Strecke
$U_n = 110 \text{ kV}$	30 MW ( $\approx$ Bedarf einer 30 000-Einwohner-Stadt)	100-200 km
$U_n = 220 \text{ kV}$	125 MW (kleiner Kraftwerksblock; $\approx$ Bedarf einer 125 000-Einwohner-Stadt $\rightarrow \approx$ Darmstadt)	200-400 km
$U_n = 380 \text{ kV}$ (500 kV)	600 MW (großer Kohle-Kraftwerksblock)	400-800 km
$U_n = 800 \text{ kV}$	2000 MW (2 Kernkraftwerks-Blöcke)	1000 km

# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung



## Entwicklung der Übertragungsspannungen

Jahr	Spannung (kV)	Ort
1891	15	Lauffen-Frankfurt / D
1907	50	Stadtwerke München / D
1911	110	Lauchhammer-Riesa / D
1929	220	RWE Rheinleitung / D
1932	287	Boulder Dam / USA
1952	380	Hårspranget-Hallsberg / S
1959	525	UdSSR
1965	736	Manicouagan-Montréal / CA
(1985)	(1200)	(Ekibastuz - Kokchetav/UdSSR)
2009	± 800 d.c.	China
2010	1100	China
2011 ?	1200	Indien

# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

Erzeugung

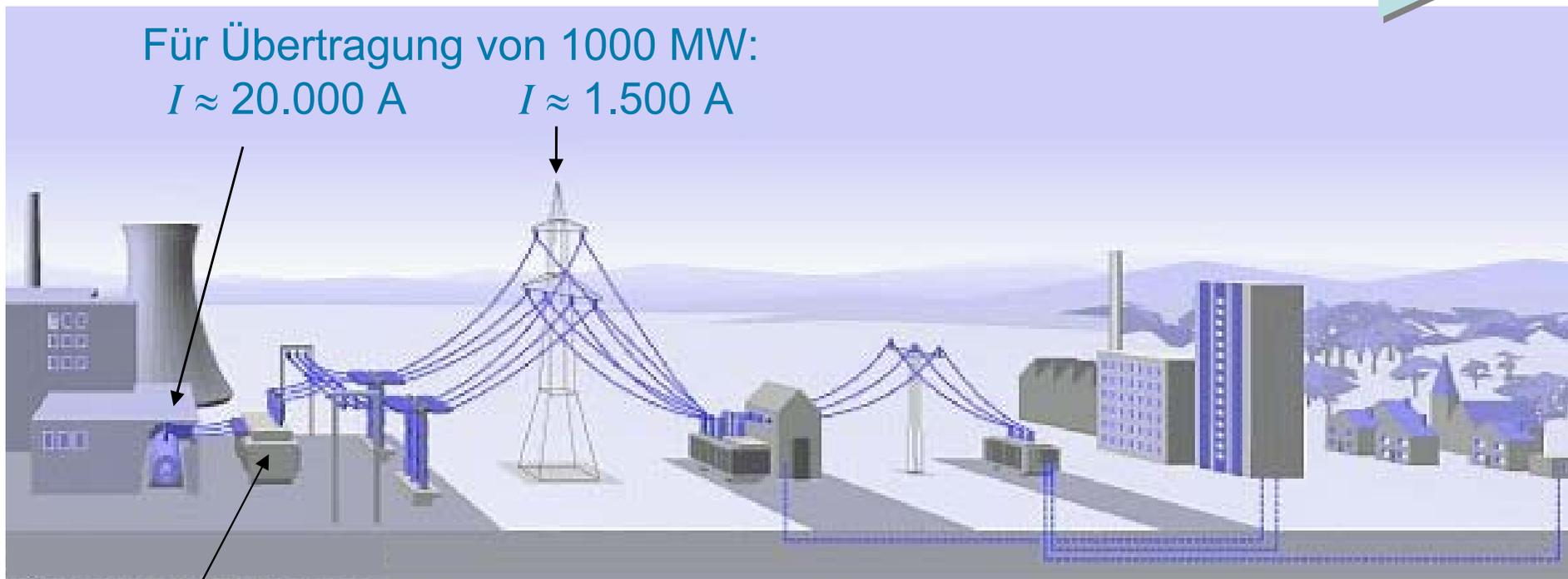
"klassische" Lastflussrichtung: "top down"

Verbrauch

Für Übertragung von 1000 MW:

$I \approx 20.000 \text{ A}$

$I \approx 1.500 \text{ A}$



Transformator im Kraftwerk: transformiert Generatorspannung auf Netzspannung

**13 kV ... 27 kV**

**110 kV ... 380 kV**

**12 kV ... 36 kV**

**0.4kV**

"Hoch- und Höchst-  
spannung"

"Mittel-  
spannung"

"Nieder-  
spannung"

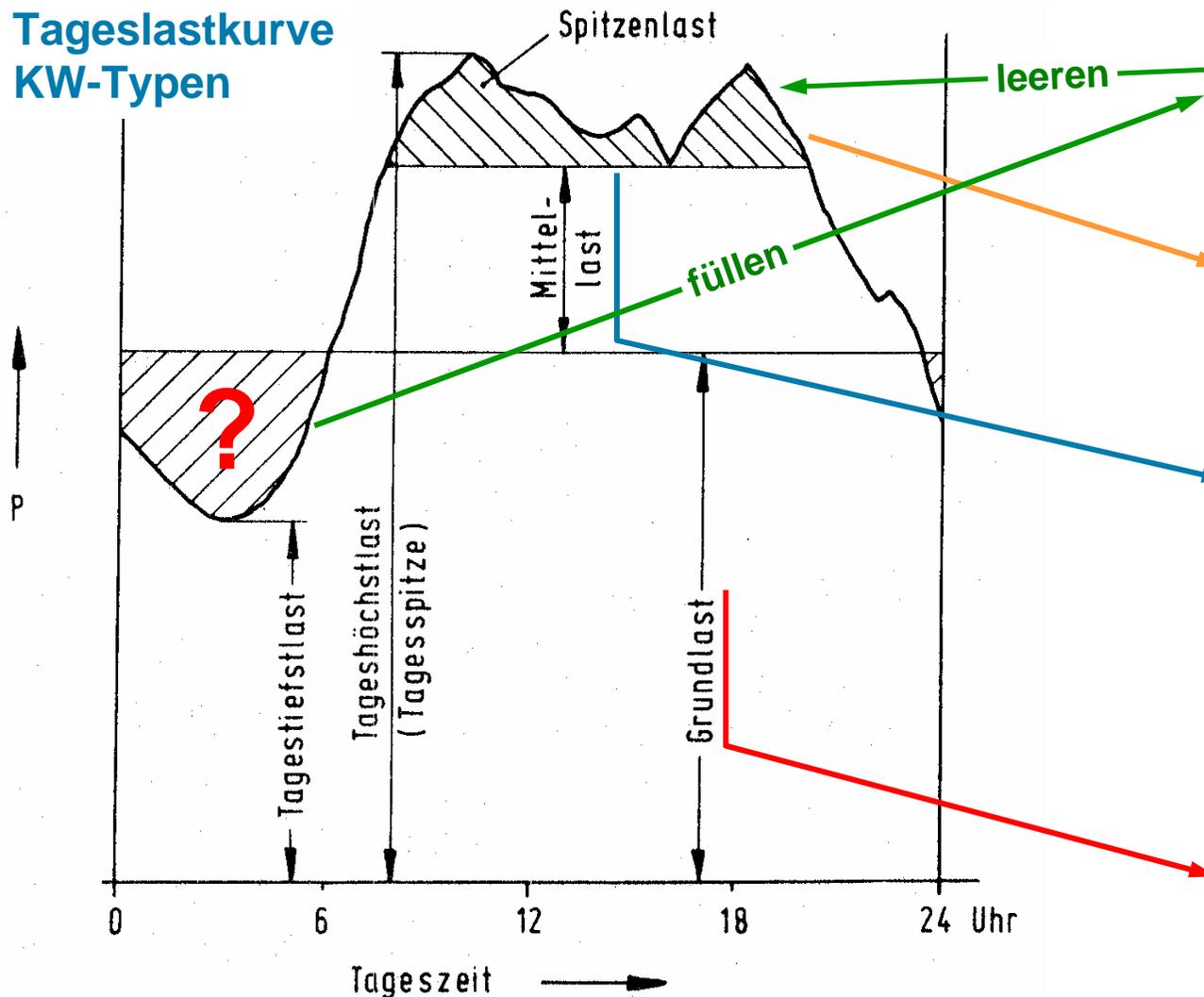
# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Zusammenwachsen zum **Verbundbetrieb**

- Tageslastkurve
- KW-Typen



**Pumpspeicher**



**Gasturbinen  
Wasserkraft  
Fremdbezug**



**Kohlekraftwerke**

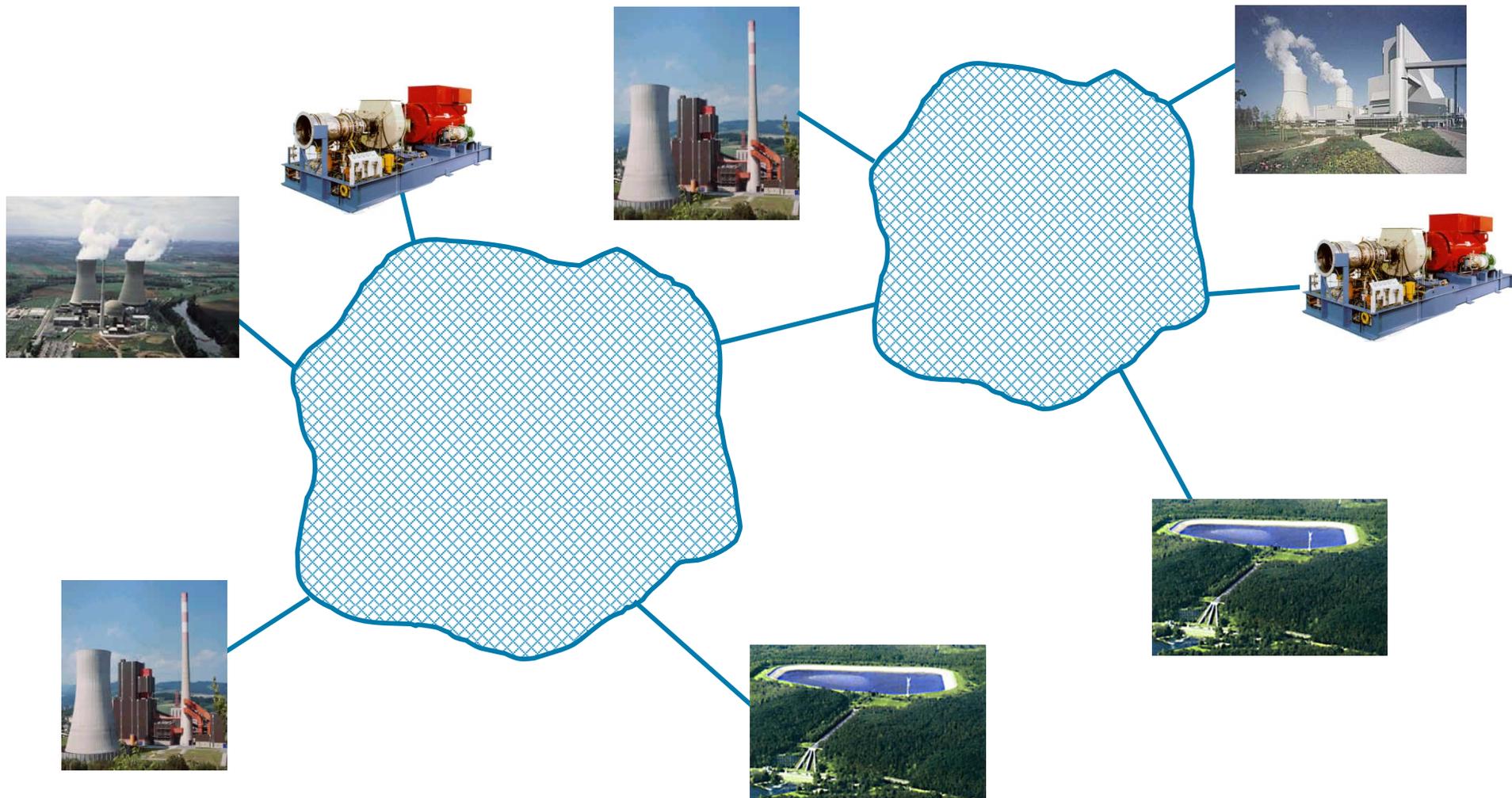


**Kernkraftwerke**



# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

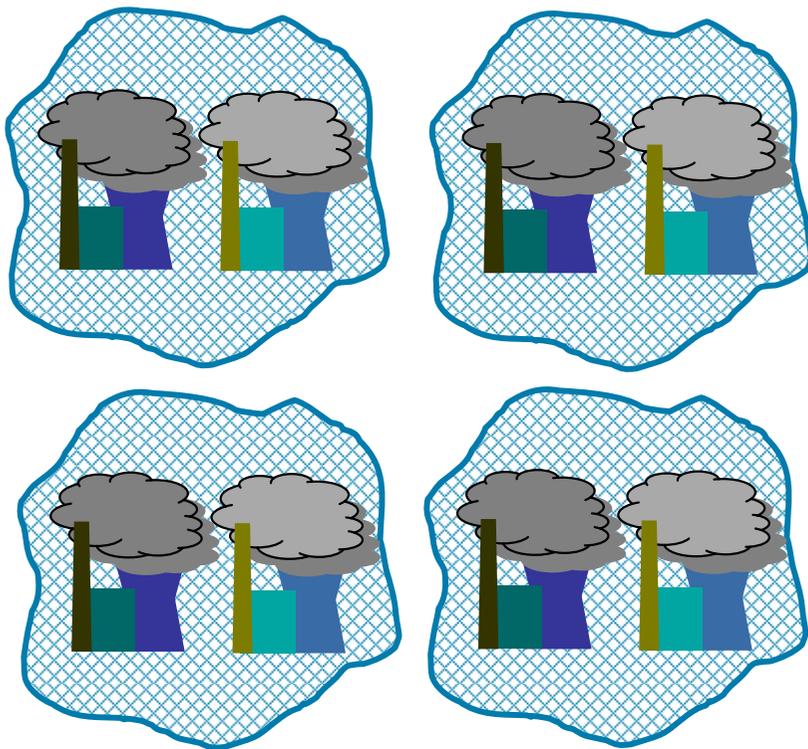
**Verbundbetrieb:** Optimale Nutzung verschiedener Kraftwerkstypen



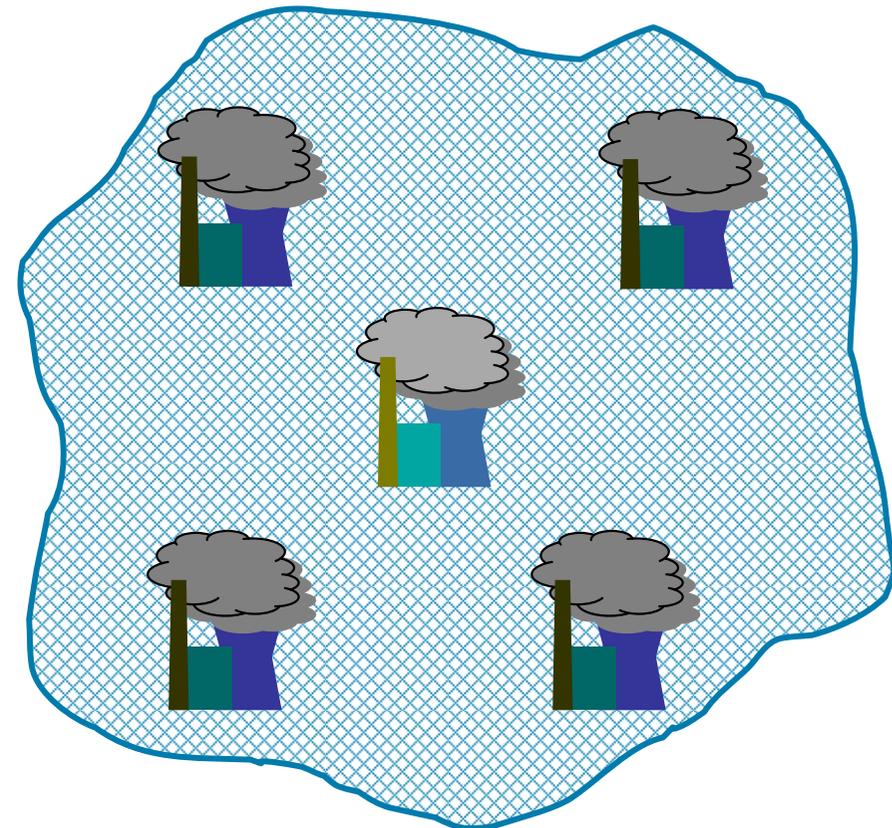
# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

## Verbundbetrieb: Redundanz

4 Einzelnetze mit  
Redundanz: → 8 Kraftwerke



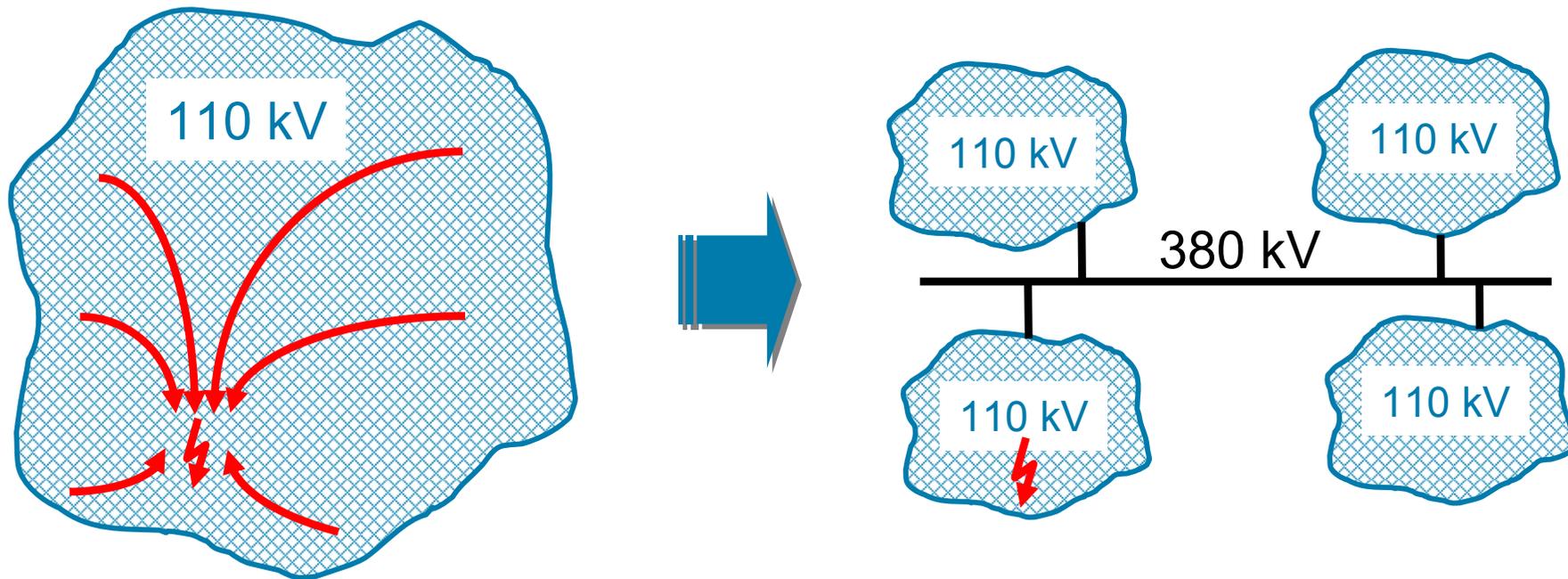
1 Verbundsystem mit  
Redundanz: → 5 Kraftwerke



# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

**Verbundbetrieb:** Begrenzung der Kurzschlussleistung:

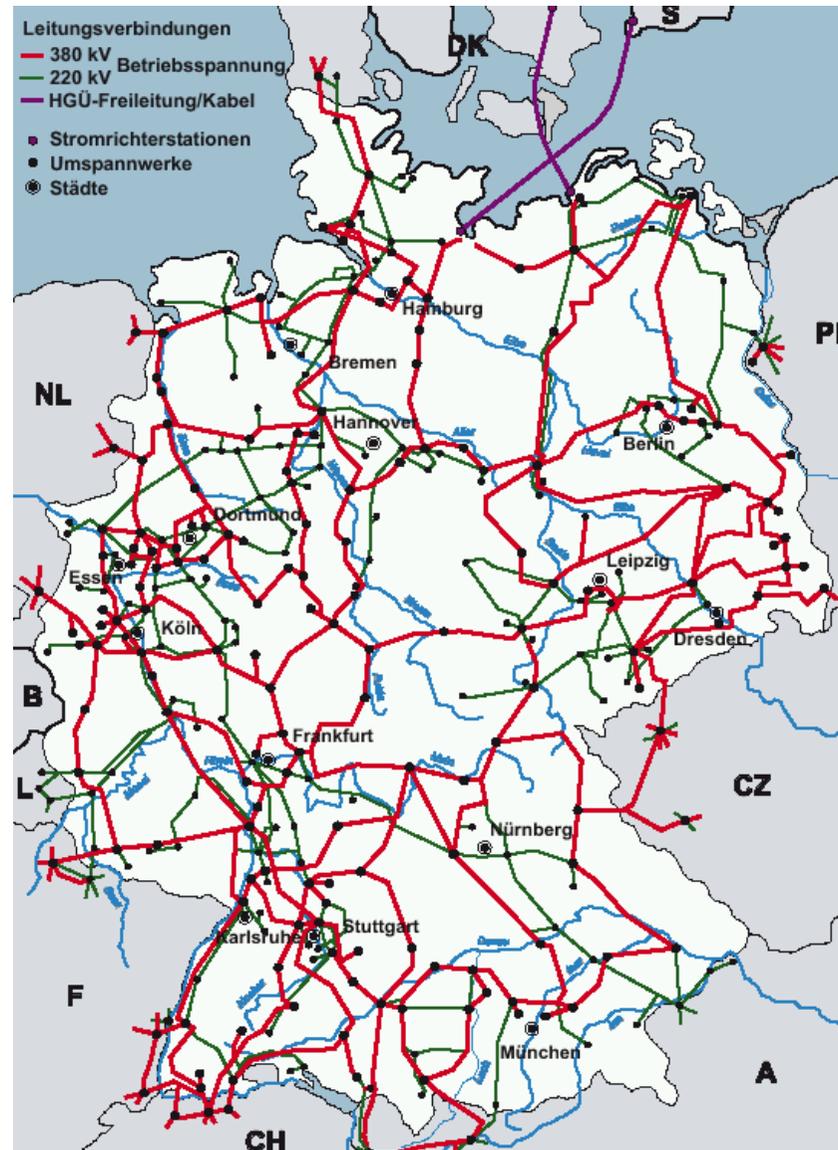
- Bei Kurzschluss: Bildung von **Teilnetzen** durch **übergeordnete Übertragungsspannung**
- **Kurzschlussleistung** und Kurzschlussströme des Netzes begrenzt.



Heute beherrschbare Kurzschlussströme: **80 kA = 80 000 Ampere**

# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

Verbundbetrieb:  
Deutsches  
Höchstspannungsnetz



— 380 kV  
— 220 kV  
— HGÜ  
(Seekabel)

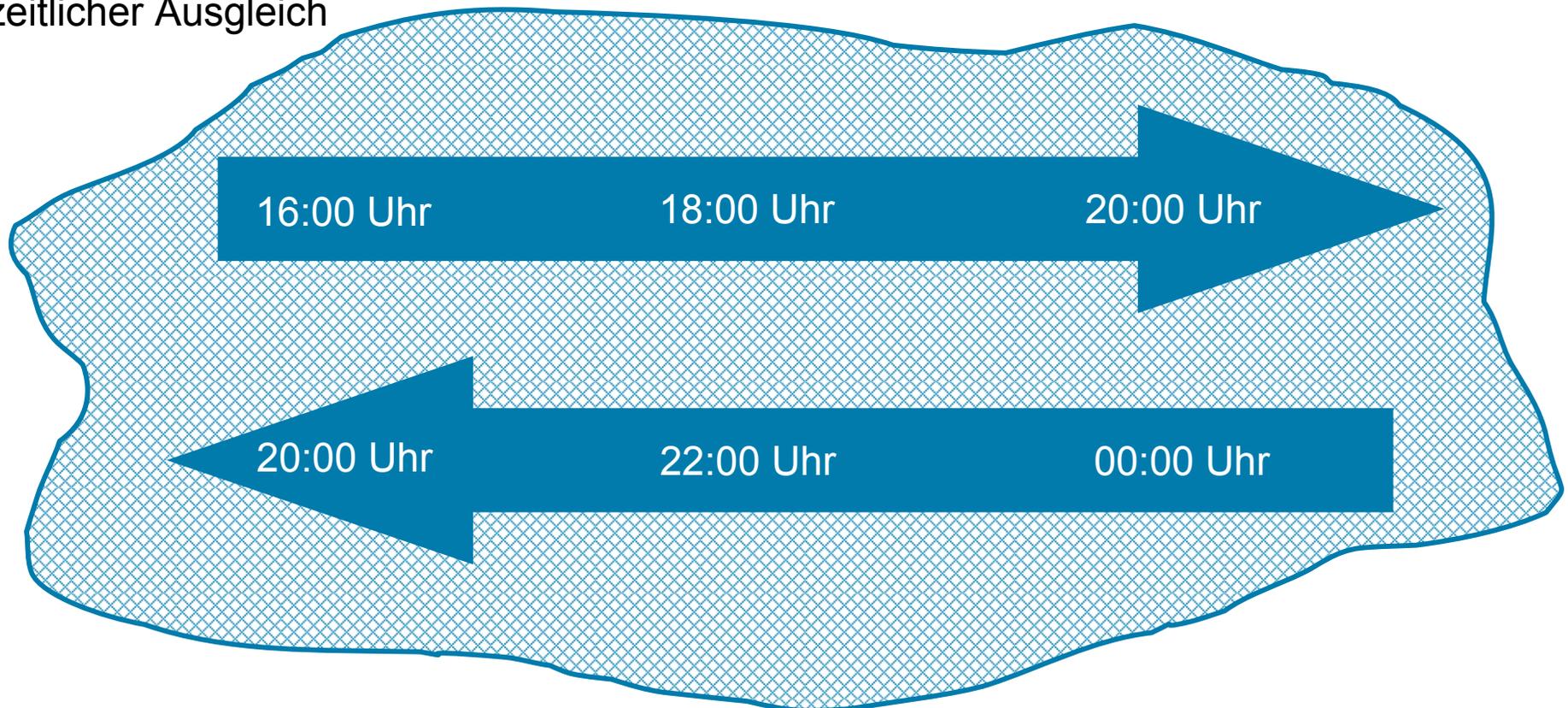
HGÜ = Hochspannungs-  
Gleichstromübertragung

Quelle: VDN

# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

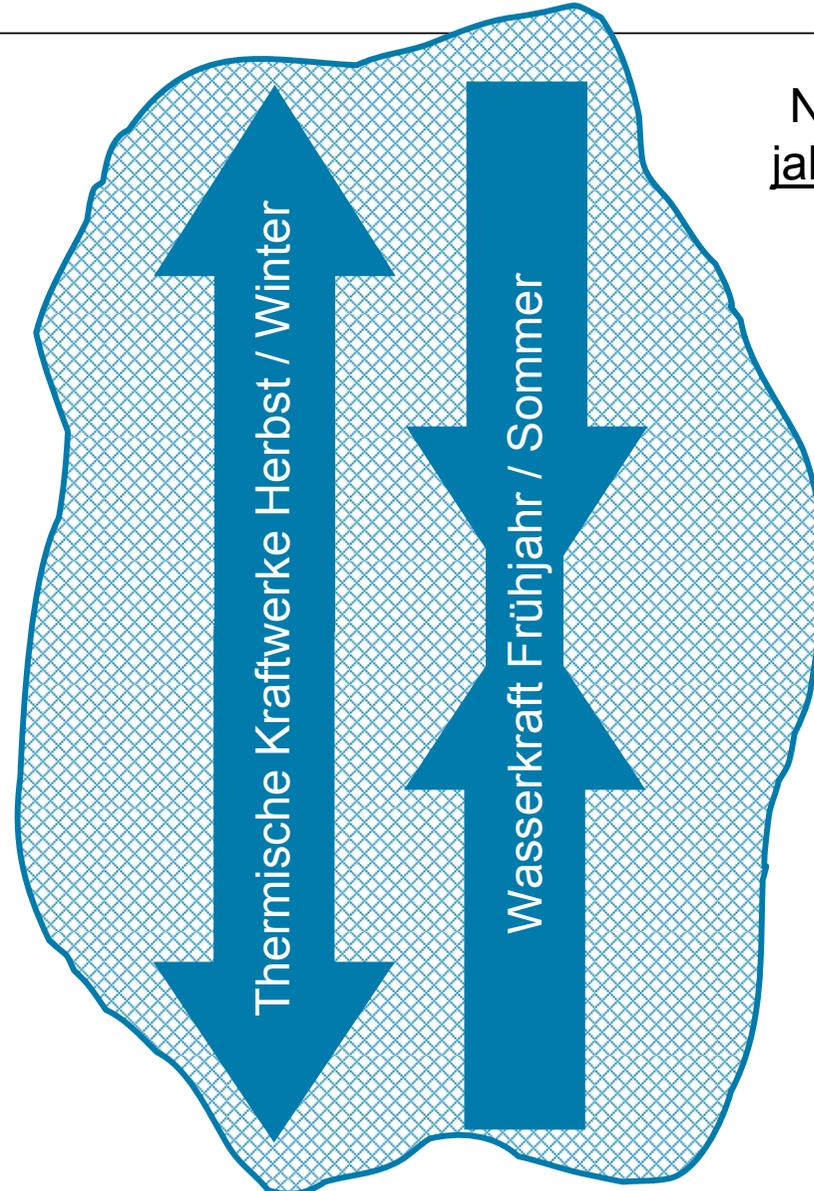
## Verbundbetrieb

Ost-West-Ausdehnung:  
tageszeitlicher Ausgleich



# Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieübertragung und -verteilung

## Verbundbetrieb



Nord-Süd-Ausdehnung:  
jahreszeitlicher Ausgleich

# Der Europäische Stromverbund



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

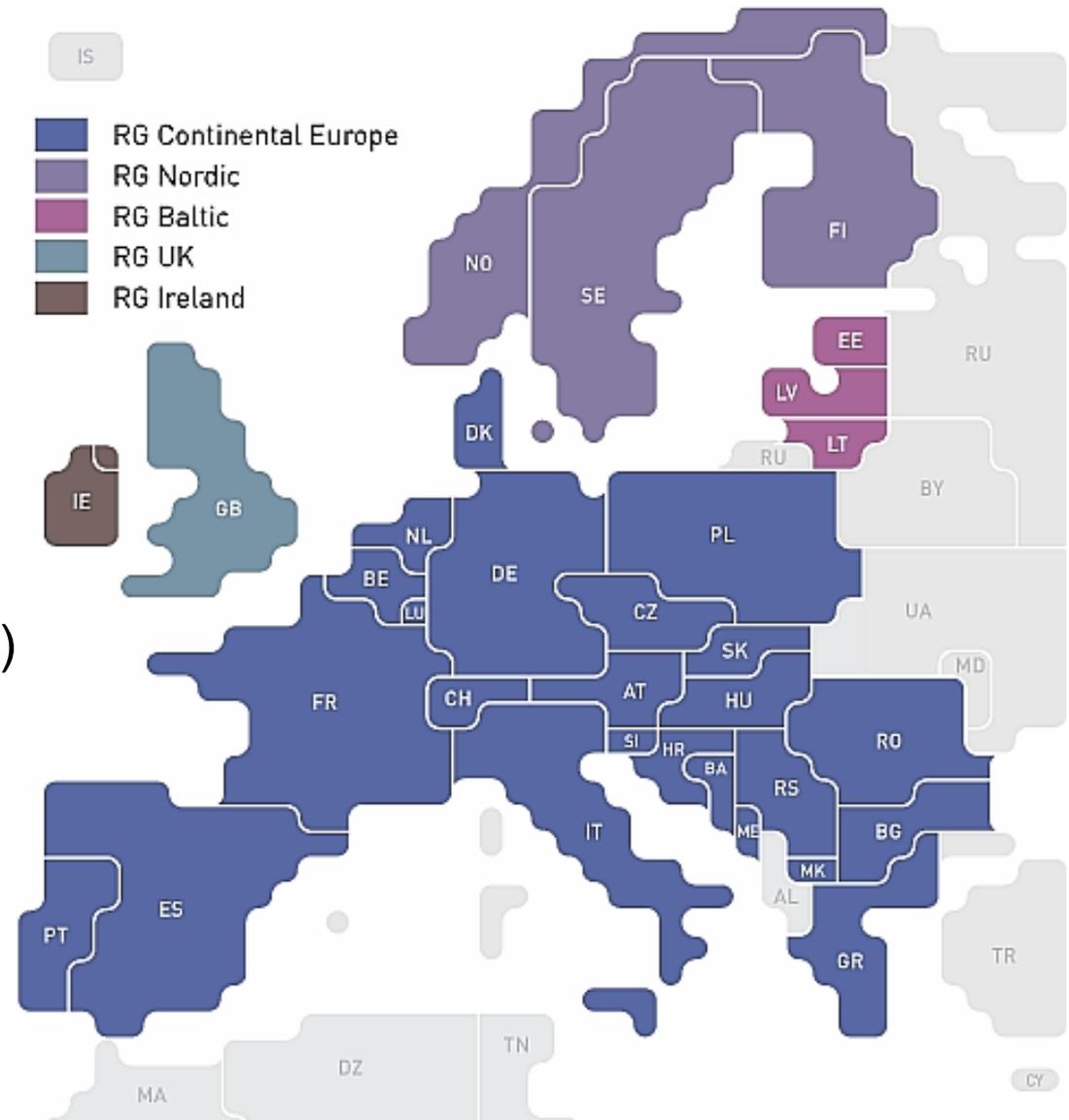


Dachorganisation **ENTSO-E**  
(**E**uropean **N**etwork of **T**ransmission  
**S**ystem **O**perators for **E**lectricity)

5 Regional Groups (RG) =  
"Synchrongebiete" bzw.  
"Synchronzonen"

RG Continental Europe (früher UCTE)  
= größtes Verbundsystem Europas  
> 600 GW installiert  
> 400 GW gesichert

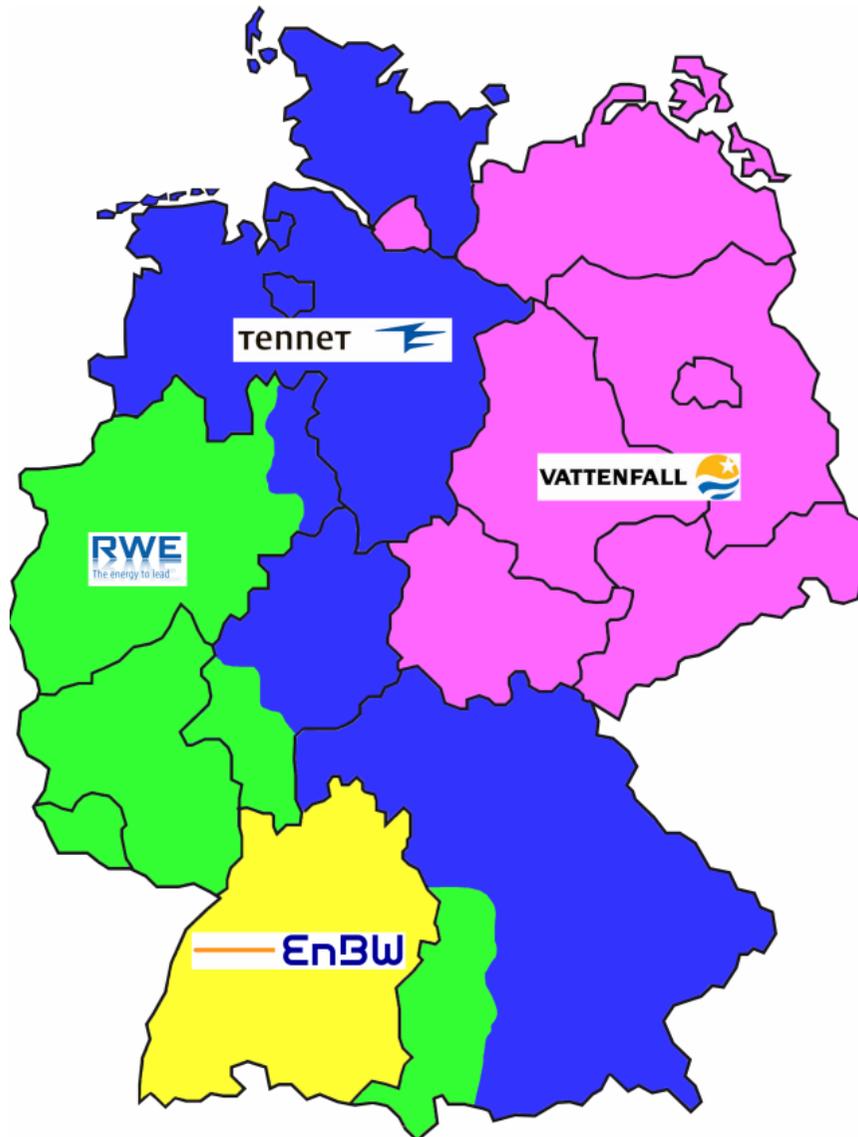
Regelblock Deutschland =  
4 ÜNB (Übertragungsnetzbetreiber)



# Der Europäische Stromverbund



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## Regelblock Deutschland:

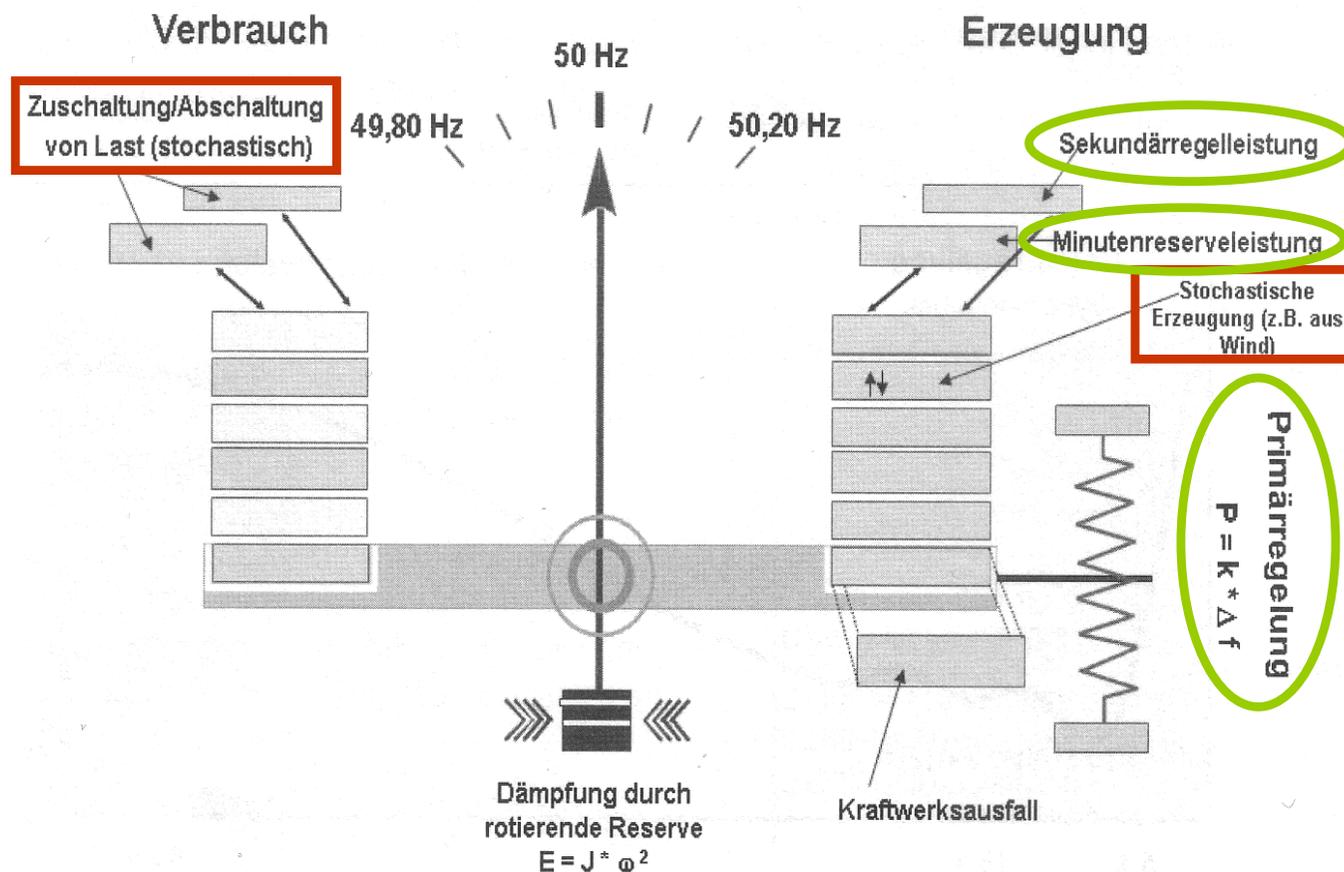
- Amprion GmbH (ehem. RWE)
- EnBW Transportnetze AG
- transpower stromübertragungsnetze GmbH (Verkauf von E.ON an TenneT)
- Vattenfall Europe Transmission GmbH
- einige angrenzende ÜNB

**regelblockverantwortlich:** Amprion

# Der Europäische Stromverbund

## Netzstabilität

Erzeugung und Verbrauch müssen zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht sein.



Quelle: ETG 2010

# Der Europäische Stromverbund



## Netzstabilität

**Primärregelung** (festgelegt im "UCTE Operational Handbook"):

- In RG Continental Europe: Primärregelleistung =  **$\pm 3000 \text{ MW}/0,200 \text{ Hz}$**
- Muss innerhalb von **30 s** bereitgestellt werden (durch thermische Kraftwerke und Pumpspeicherwerke)
- Alle Regelblöcke/Regelzonen sorgen gemeinsam dafür
- Der Deutschland-Anteil beträgt derzeit **700 MW**

## **Sekundärregelung:**

- Wirkt auf das regelblockspezifische Ungleichgewicht (Abweichungen des Leistungsaustauschs zwischen den Regelblöcken)
- Erfordert **dauernde Messungen an den Regelblockgrenzen**
- Bereitgestellt durch Pumpspeicherwerke und thermische Kraftwerke mit Gradienten von mindestens  **$>2\%/Minute$  der Nennleistung**

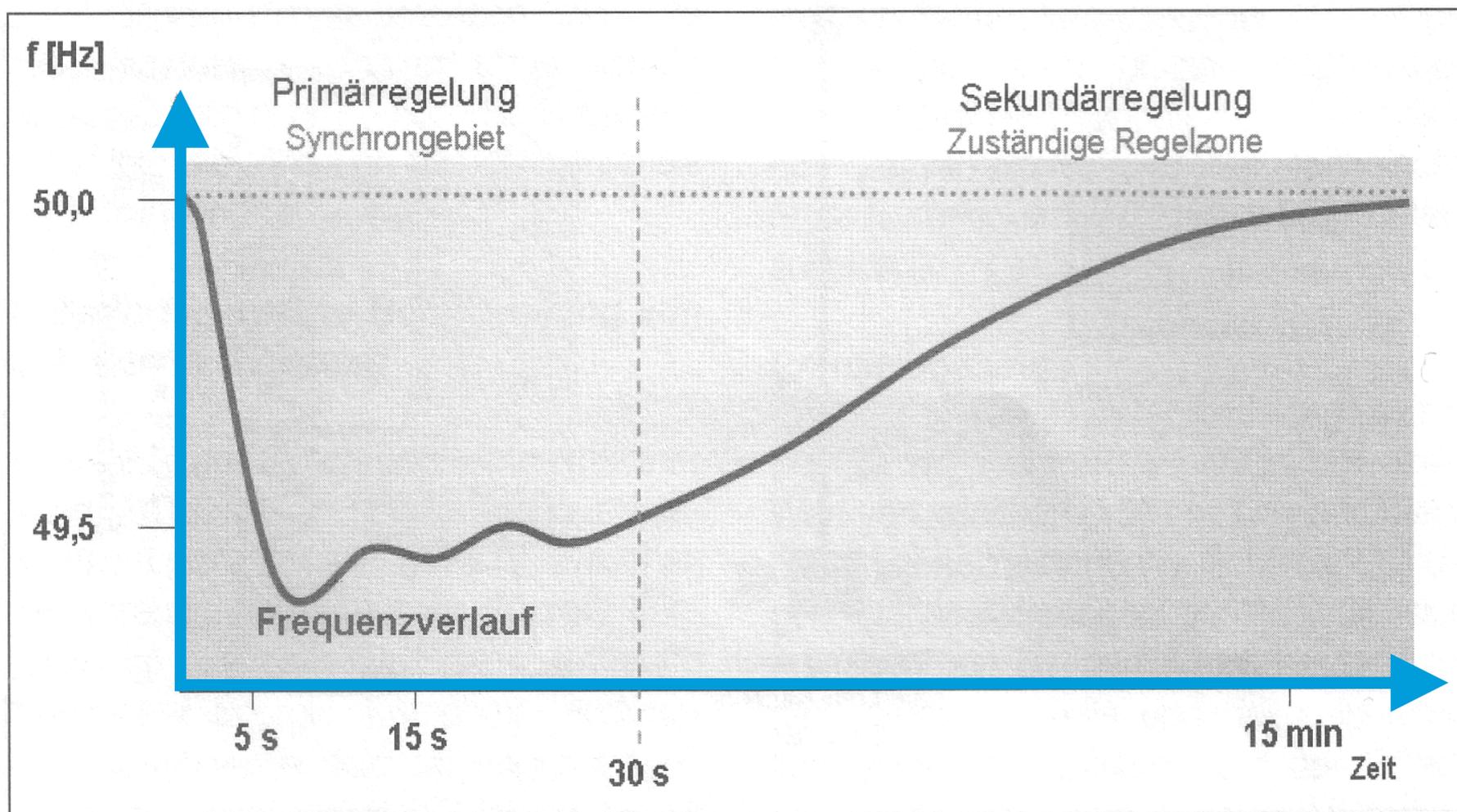
## **Minutenreserve:**

- Muss **15 Minuten nach Abruf** bereitgestellt werden können (Pumpspeicherwerke, Gasturbinen)

Alle diese Leistungen werden heute an der Strombörse gehandelt!

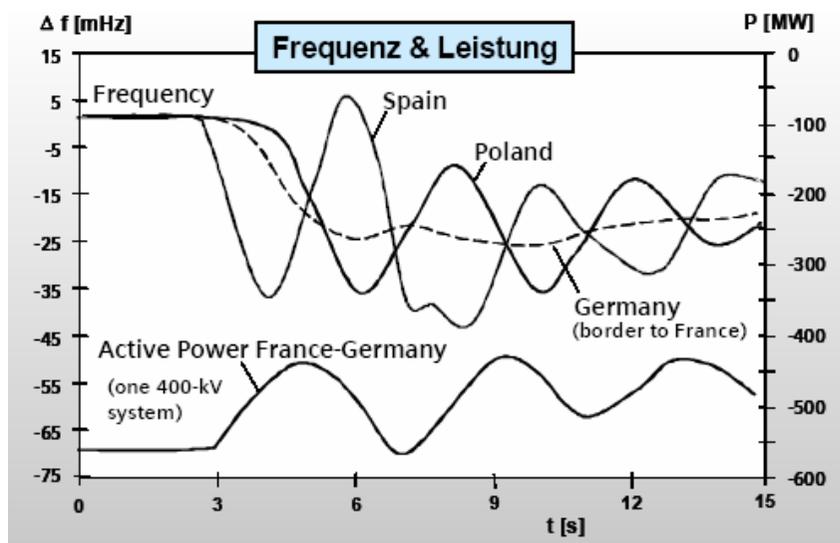
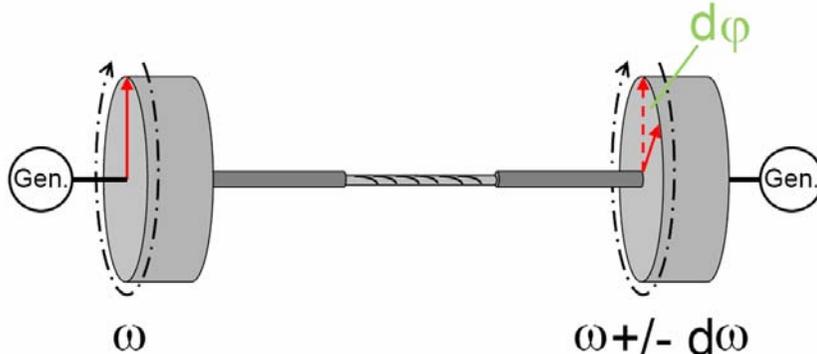
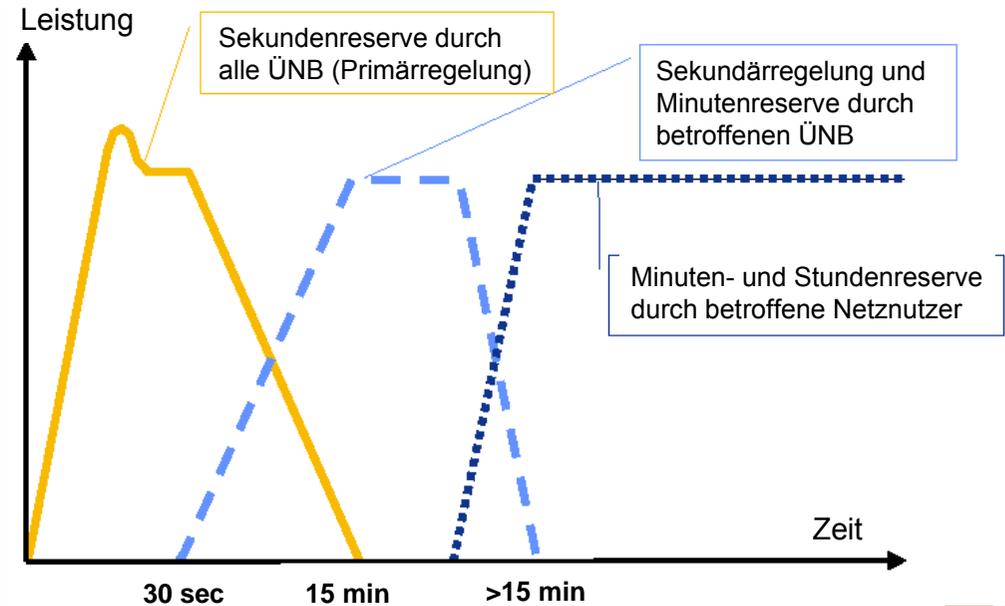
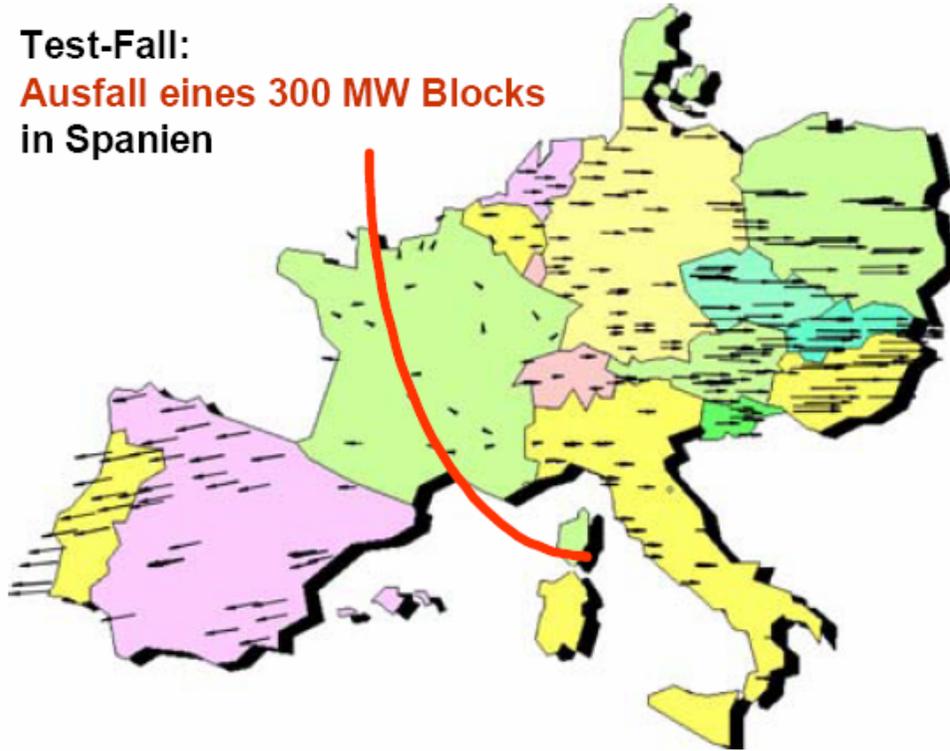
# Der Europäische Stromverbund

## Netzstabilität



# Der Europäische Stromverbund

**Test-Fall:**  
**Ausfall eines 300 MW Blocks**  
**in Spanien**

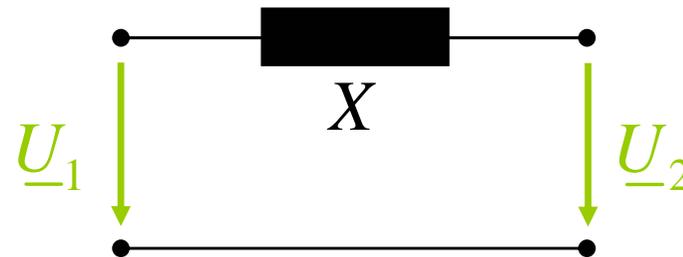


Quelle: Siemens, ETG

# Der Europäische Stromverbund

**Entwicklung:** Wide Area Monitoring (WAM) mit Phasor Measurement Units (PMU)

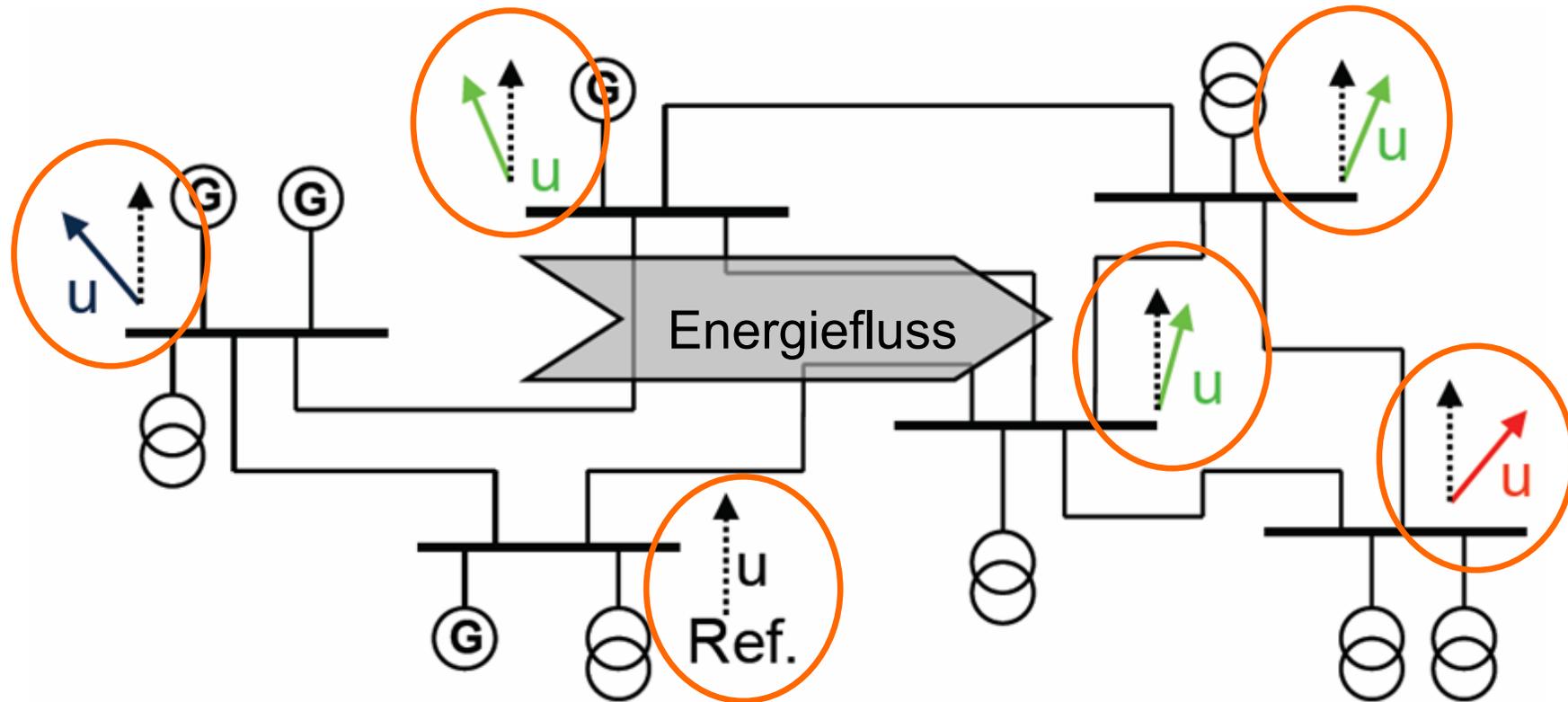
$$P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \sin(\delta)$$



→ Der Wirkleistungsfluss ist proportional zum Sinus des Phasenwinkels zwischen  $U_1$  und  $U_2$ .

# Der Europäische Stromverbund

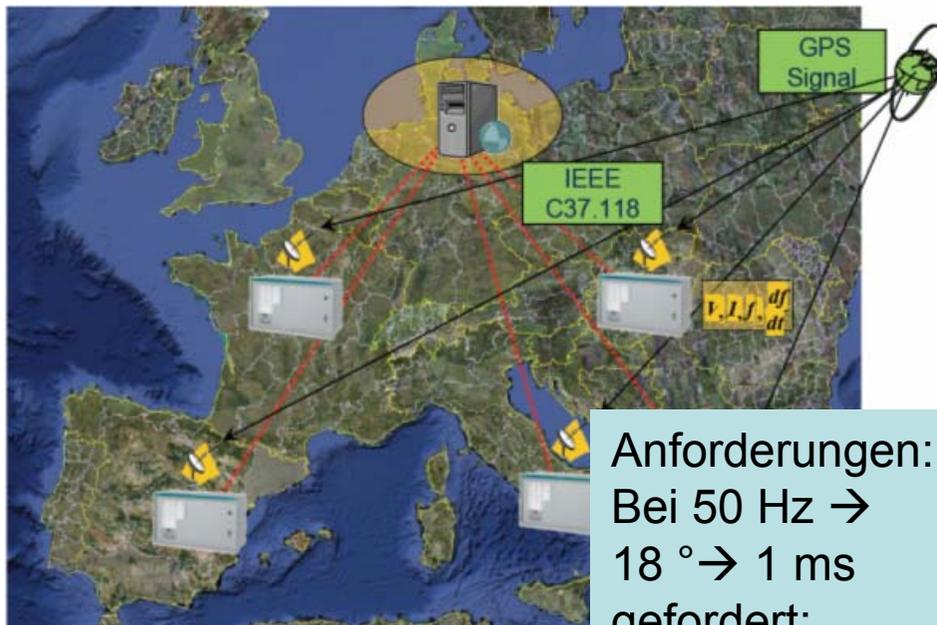
**Entwicklung:** Wide Area Monitoring (WAM) mit Phasor Measurement Units (PMU)



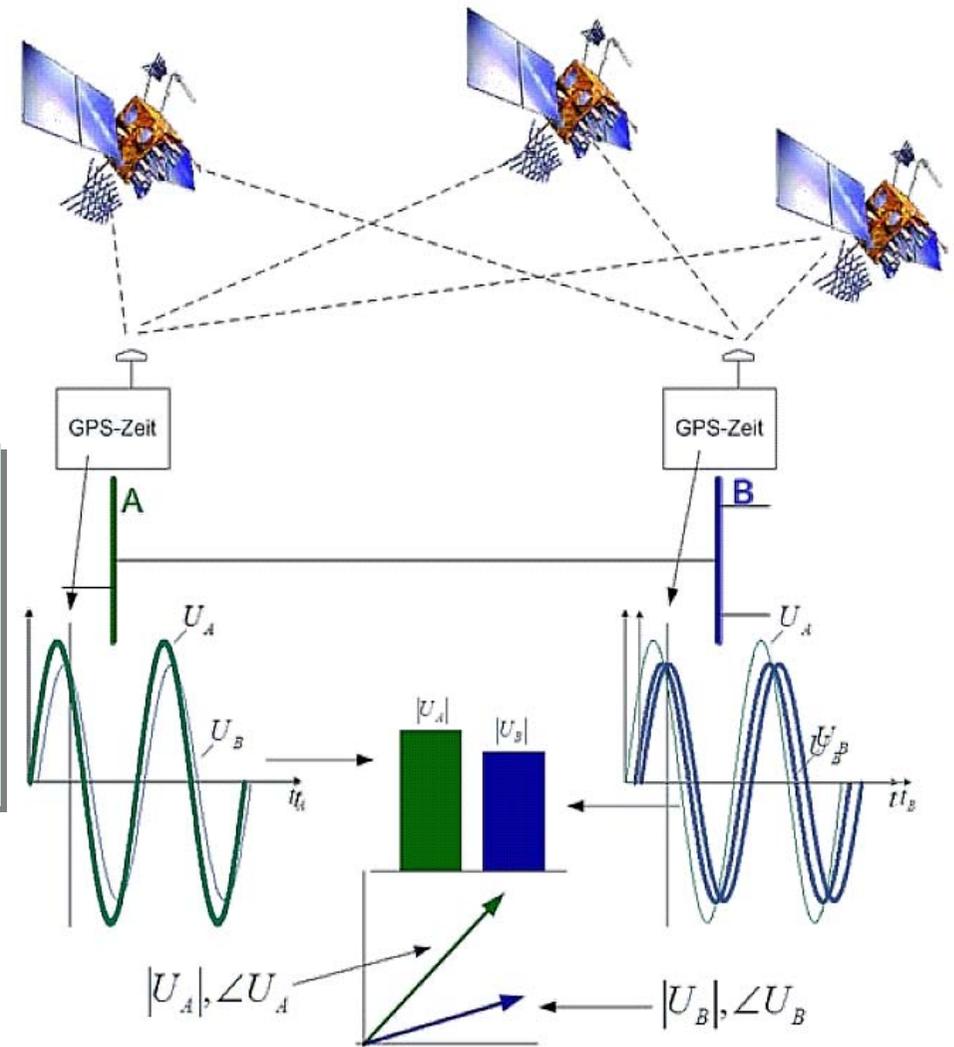
Links: Erzeugungsüberschuss /  
Rechts: Erzeugungsmangel

# Der Europäische Stromverbund

## Entwicklung: Wide Area Monitoring (WAM) mit Phasor Measurement Units (PMU)



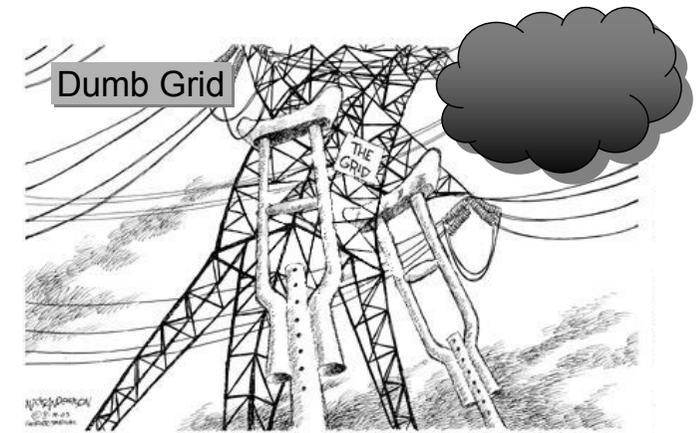
Anforderungen:  
Bei 50 Hz  $\rightarrow$   
 $18^\circ \rightarrow 1$  ms  
gefordert:  
 $< 0,2^\circ \rightarrow < 10 \mu\text{s}$   
 $\rightarrow$  GPS-Synchr.



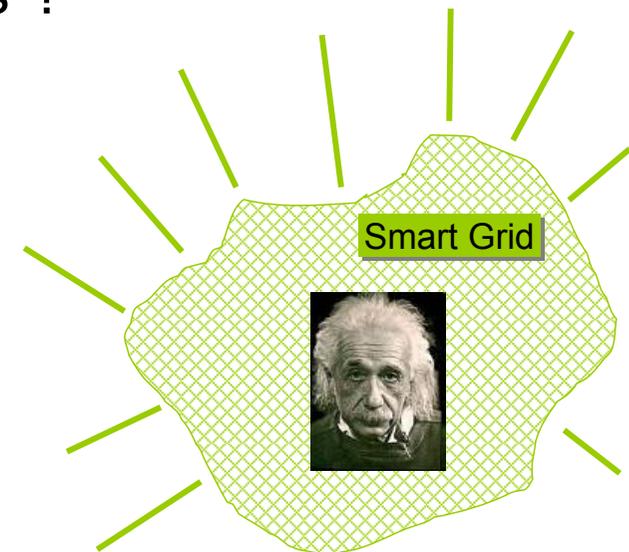
# Der Europäische Stromverbund

Frage: Ist dieses Netz dumm?

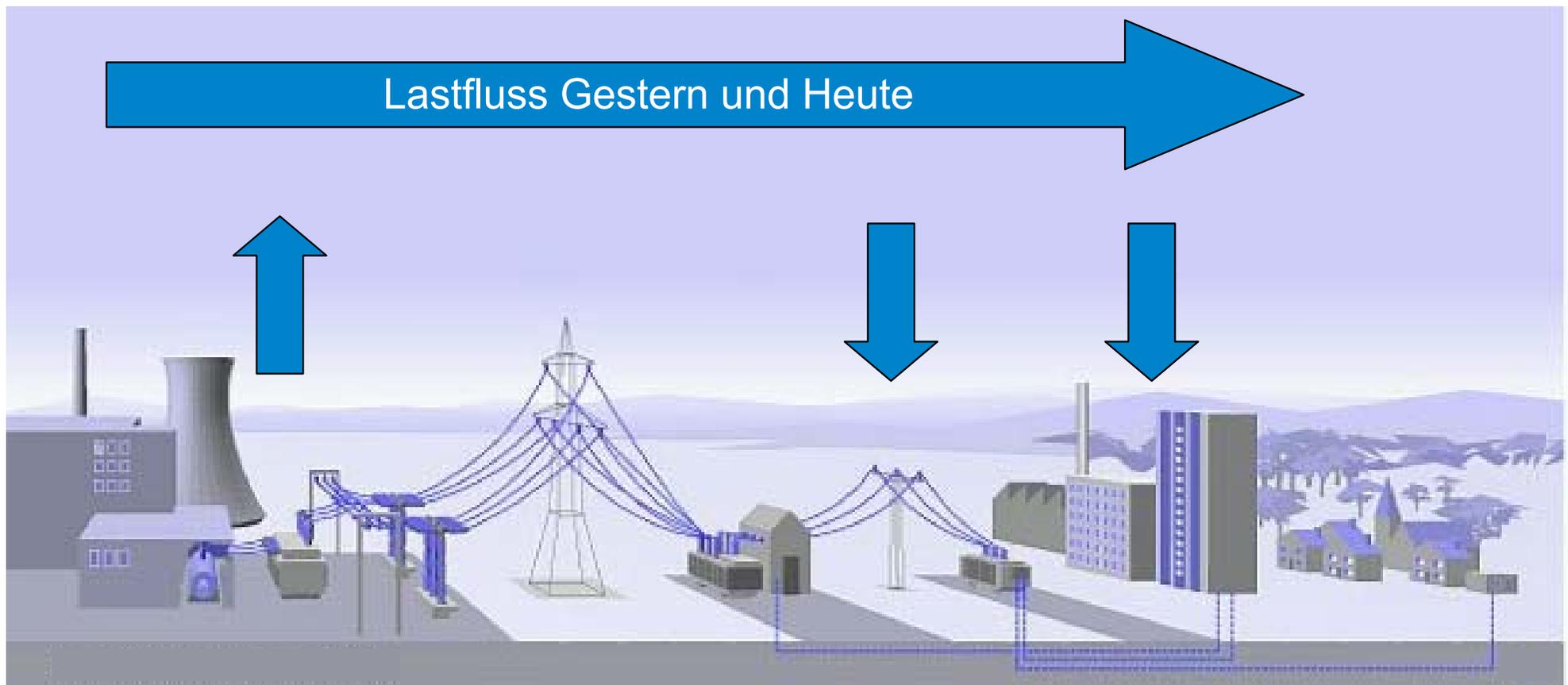
Sicherlich nicht!



Frage: Warum rufen dann alle nach "Smart Grids"?



# Smart Grids



13 kV...27 kV  
Erzeugung

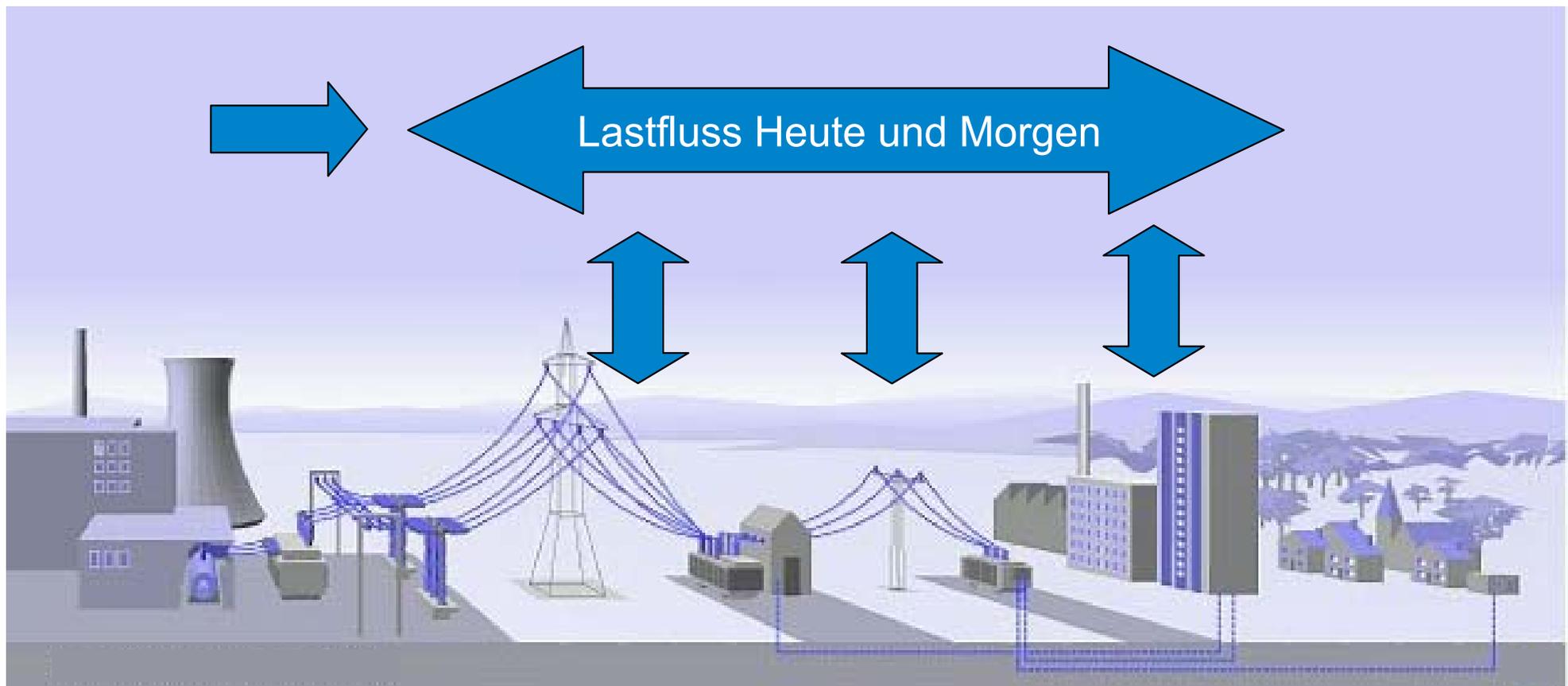
420 kV...245 kV...(123 kV)  
Übertragung  
"Hoch- und Höchstspannung"

(123 kV)...36 kV...12 kV  
Verteilung

0,4 kV

"Mittelspannung" "Niederspannung"

# Smart Grids



13 kV...27 kV  
Erzeugung

420 kV...245 kV...(123 kV)  
Übertragung + Erzeugung  
"Hoch- und Höchstspannung"

(123 kV)...36 kV...12 kV 0,4 kV  
Verteilung + Erzeugung  
"Mittelspannung" "Niederspannung"

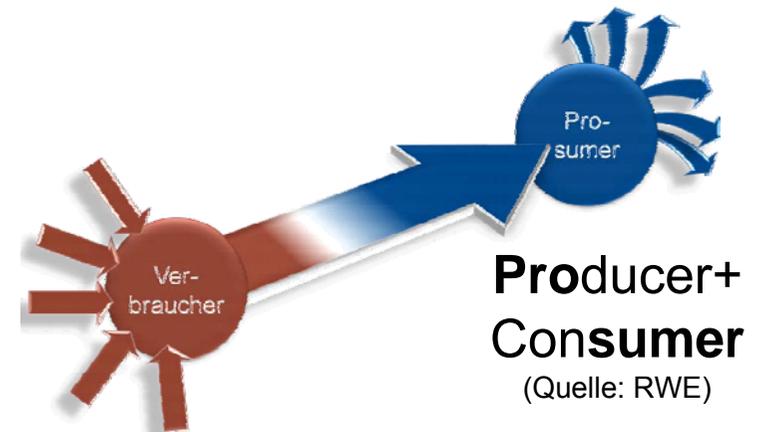


# Smart Grids - Definition

**Definition Smart Grids** (Dr. Kreusel, ETG-Vorstand):

"In Smart Grids werden die **Verbrauchsseite** und **dezentrale, verbrauchsnahe Erzeugungseinheiten** in den **jederzeit erforderlichen Abgleich** zwischen Erzeugung und Verbrauch einbezogen werden."

- Weg vom "top down"-Prinzip
- Weg vom ausschließlich lastgeführten Betrieb
- Einflussnahme auf den Verbrauch
- Reaktion auf fluktuierende Einspeisung
- Beteiligung dezentraler Erzeuger an Regelung
- Einbeziehen von Speichern unterschiedlichster Art
- Ausbau der Informations- und Kommunikationsmöglichkeiten durchgängig von den Erzeugungseinheiten bis zum Verbraucher (zukünftig teilweise identisch)



# Smart Grids - Definition



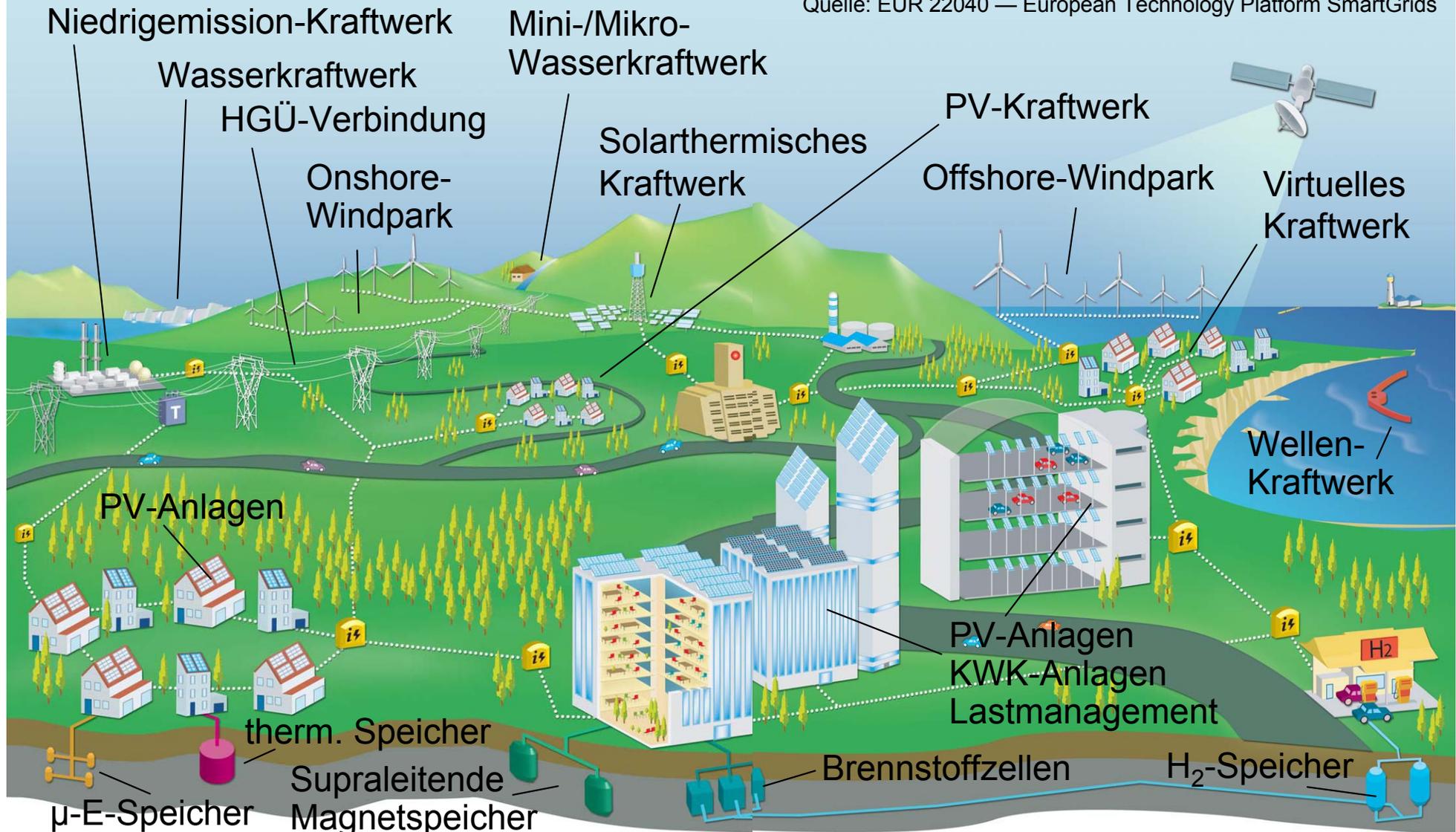
**"Smart Grid" bedeutet mehr als einfach nur "die Netze intelligent" zu machen.**

Smart Grid bedeutet **auch**:

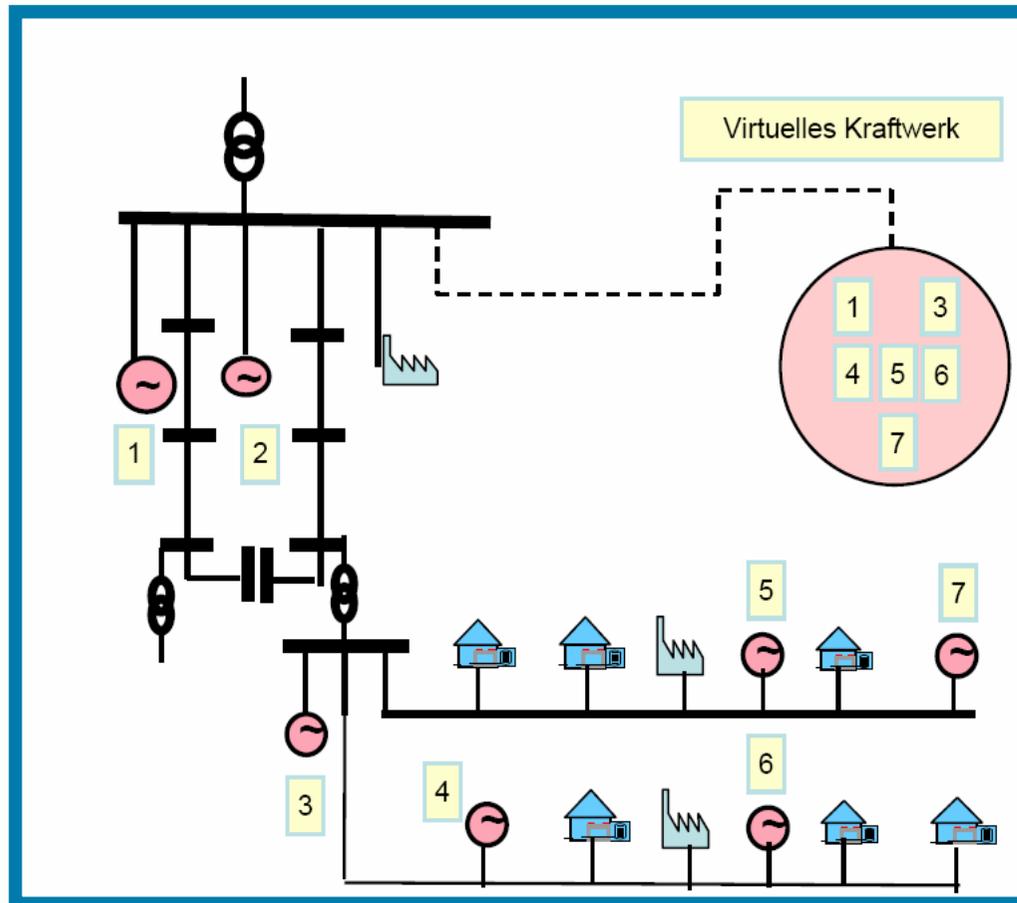
- die Netze *intelligent* auszubauen zur Beherrschung wesentlich größerer Lastflüsse und anderer Lastflussrichtungen als heute
- den Verbrauch *intelligent* zu beeinflussen (nicht nur durch Zweitarif-Zähler)
- Speicher nicht nur zu entwickeln, sondern sie *intelligent* zu integrieren (Speichermanagement)
- erneuerbare Energiequellen nicht nur erschließen, sondern so *intelligent* einzubinden, dass sie
  - die Netzstabilität nicht gefährden
  - Regelleistung bereitstellen statt bei Fehlern "aussteigen" ("fault-ride-through")
  - bestehenden Anlagen nicht schaden (Beispiel: größerer Verschleiß von thermischen Kraftwerken)
- den stärkeren Lastfluss und Energieaustausch im europäischen Verbundnetz ggf. durch eine neue überlagerte UHV-Ebene *intelligent* zu unterstützen
- neue Energiewandlungsanlagen (Off-Shore-Windparks, Desertech) durch neu zu bauende Fernübertragungsleitungen *intelligent* anzubinden

# Smart Grids - Beteiligte

Quelle: EUR 22040 — European Technology Platform SmartGrids



# Smart Grids - Beteiligte



Erzeuger Industrie Haushalt

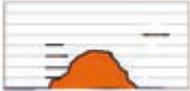
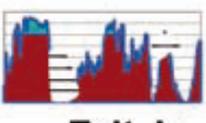
## Virtuelles Kraftwerk

- besteht aus vielen kleinen **Erzeugern**, **Speichern** und **regelbaren Lasten** und verhält sich in der Summe wie ein regelbares großes Kraftwerk
- muss daher die Fähigkeit haben
  - Fahrpläne einzuhalten,
  - die Regelung des Systems zu unterstützen,
  - zum Netzwiederaufbau nach Störungen beizutragen.

Quelle: Kisters AG

# Smart Grids - Beteiligte

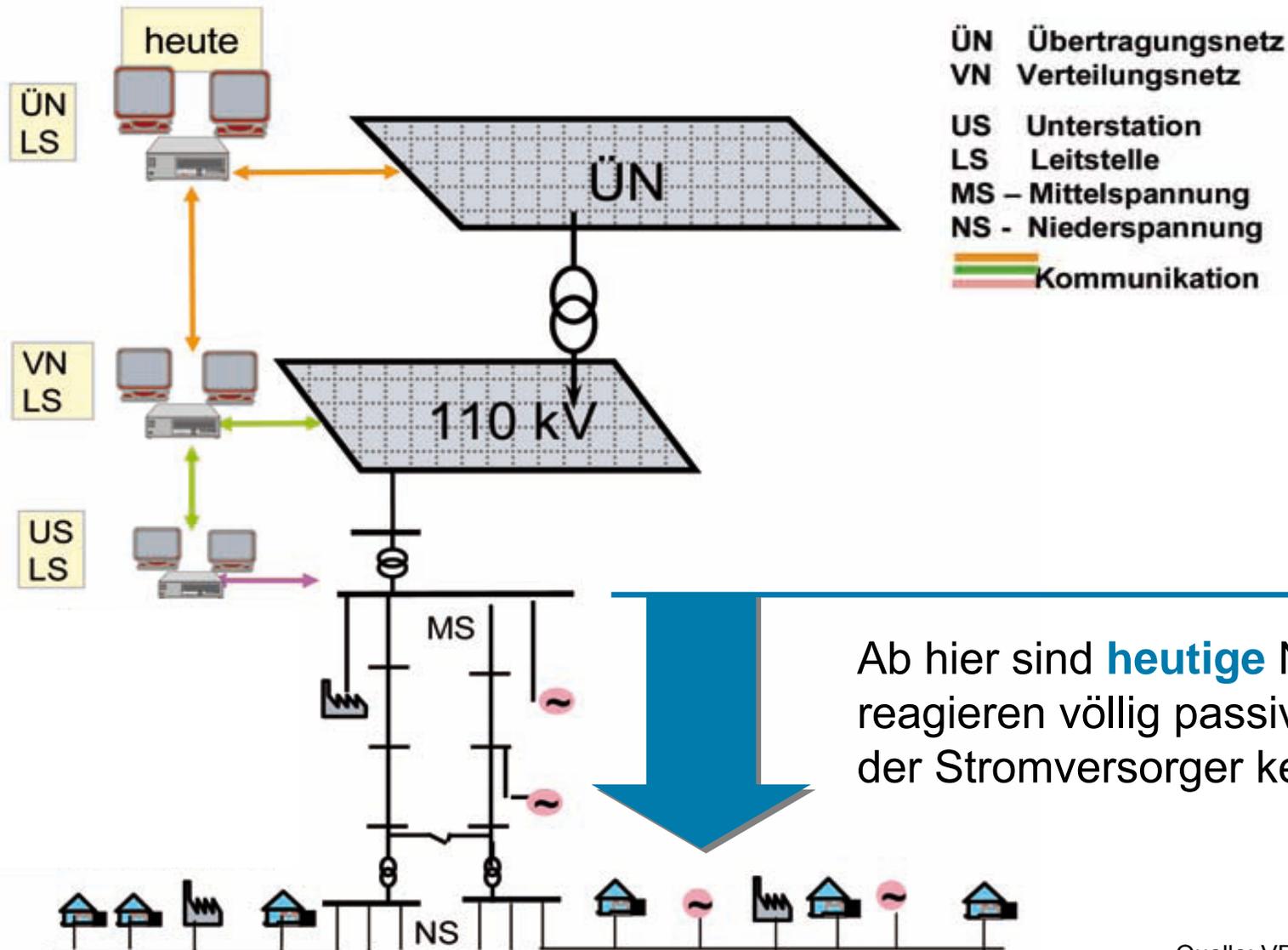
## Systemdienstleistungen einzelner Komponenten in virtuellen Kraftwerken

Anlage	Erzeugerprofil	Systemdienstleistungen			
		F	P	U	N
 Photovoltaik	 Zeit, h	nein	Prognosen	ja	ja*
 Windpark	 Zeit, h	negativ	Prognosen	ja	ja*
 KWK, bio/fossil	Regelbar	negativ positiv	ja	ja	ja
 Lastmanagement	Aktiv (Schaltung)	positiv	ja	nein	ja
	Passiv (dyn. Tarif)	nein	Prognosen	nein	nein
 Speicher	Regelbar	negativ positiv	ja	ja	ja

F ... Frequenzstabilität  
 P ... Fahrplanmanagement  
 U ... Spannungsqualität  
 N ... Netzwiederaufbau

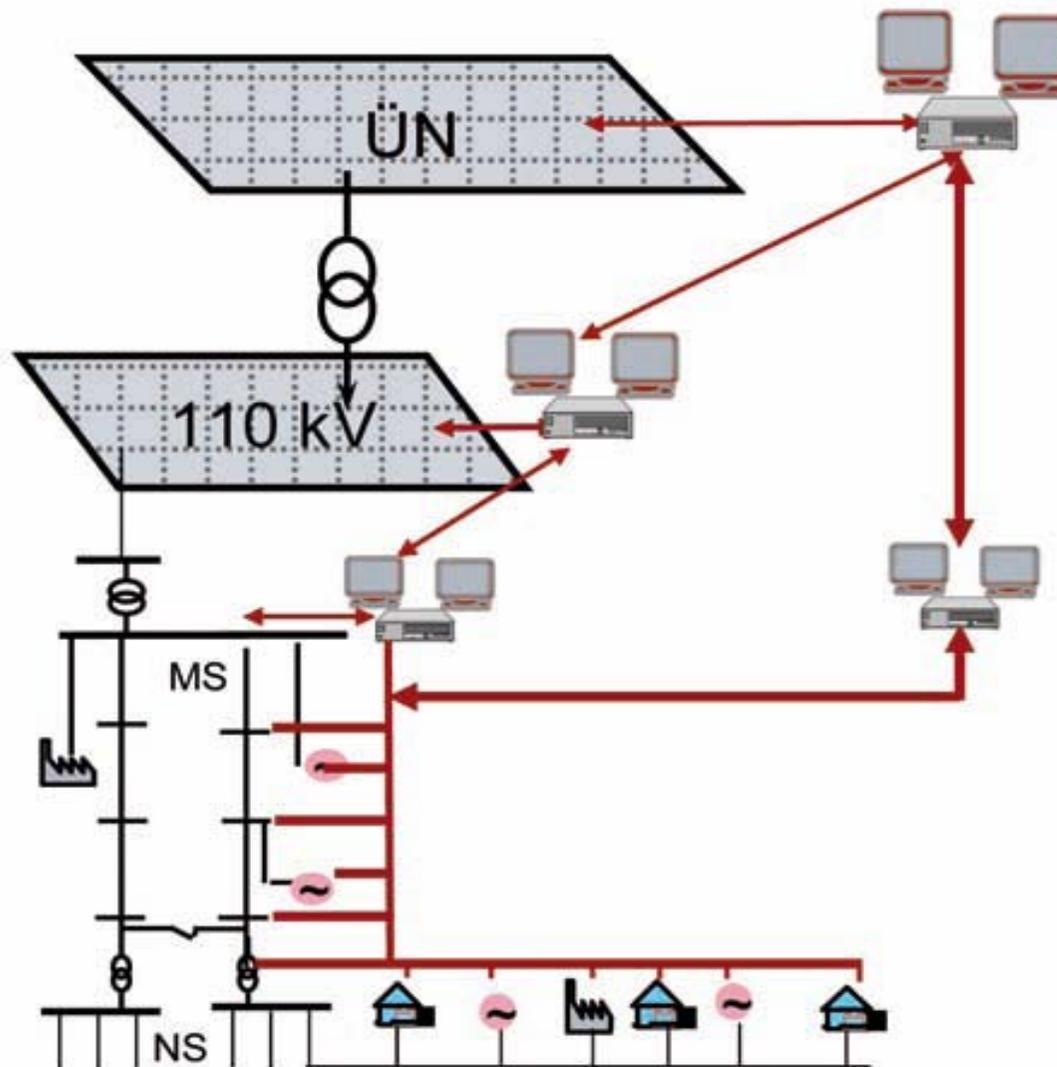
Quelle: VDE-Studie "Smart Distribution"

# Smart Grids - Kommunikationsstrukturen



Quelle: VDE-Studie "Smart Distribution"

# Smart Grids - Kommunikationsstrukturen



ÜN Übertragungsnetz  
MS – Mittelspannung  
NS - Niederspannung  
— Kommunikation

Künftig kommunizieren die Netze **miteinander** über alle Spannungsebenen sowie die einzelnen Netzkomponenten **untereinander**.

Jeder Verbraucher/Erzeuger/ "Prosumer" kann damit aktiv am Geschehen teilnehmen, z.B. durch

- eigene Einspeise- und Abnahme-Angebote
- Lastmanagement

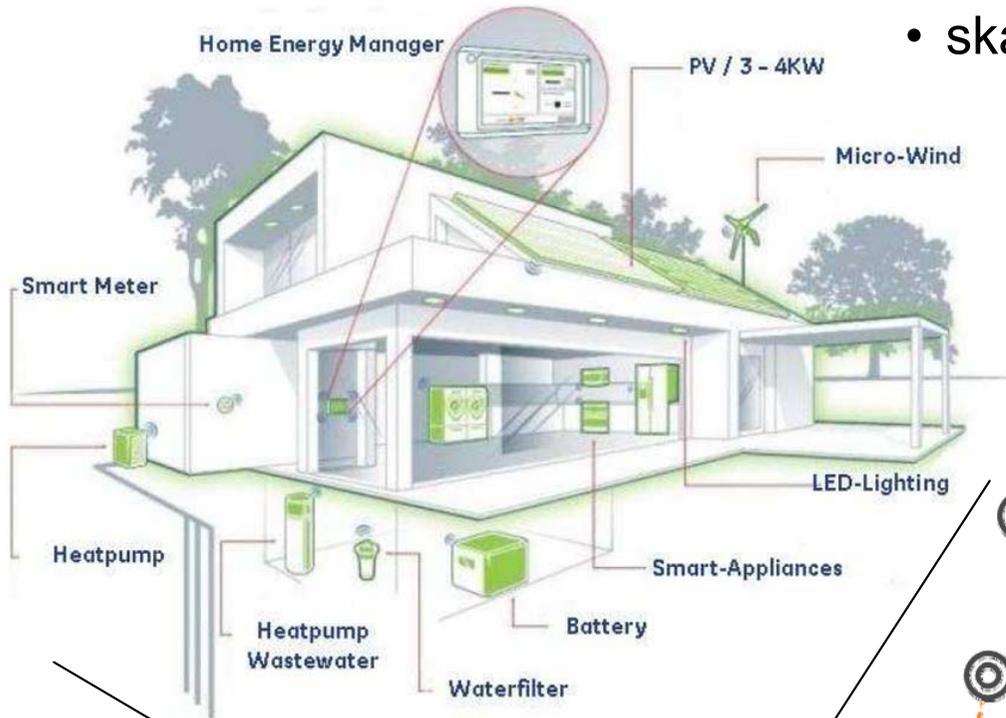
Quelle: VDE-Studie "Smart Distribution"

# Smart Grids - Kommunikationsstrukturen

Quelle: Alcatel-Lucent

In Entwicklung: **Drahtlose Sensornetzwerke**

- skalierbar, adaptiv



**WAM**



**Smart Homes**



**Smart Meters**



Quelle: FG Integrierte Elektronische Systeme

# Smart Grids - Kommunikationsstrukturen

Was erreicht man mit **Lastmanagement**?

Viele Haushaltsgeräte können gerade überschüssige Leistung aufnehmen und teilweise sogar speichern:

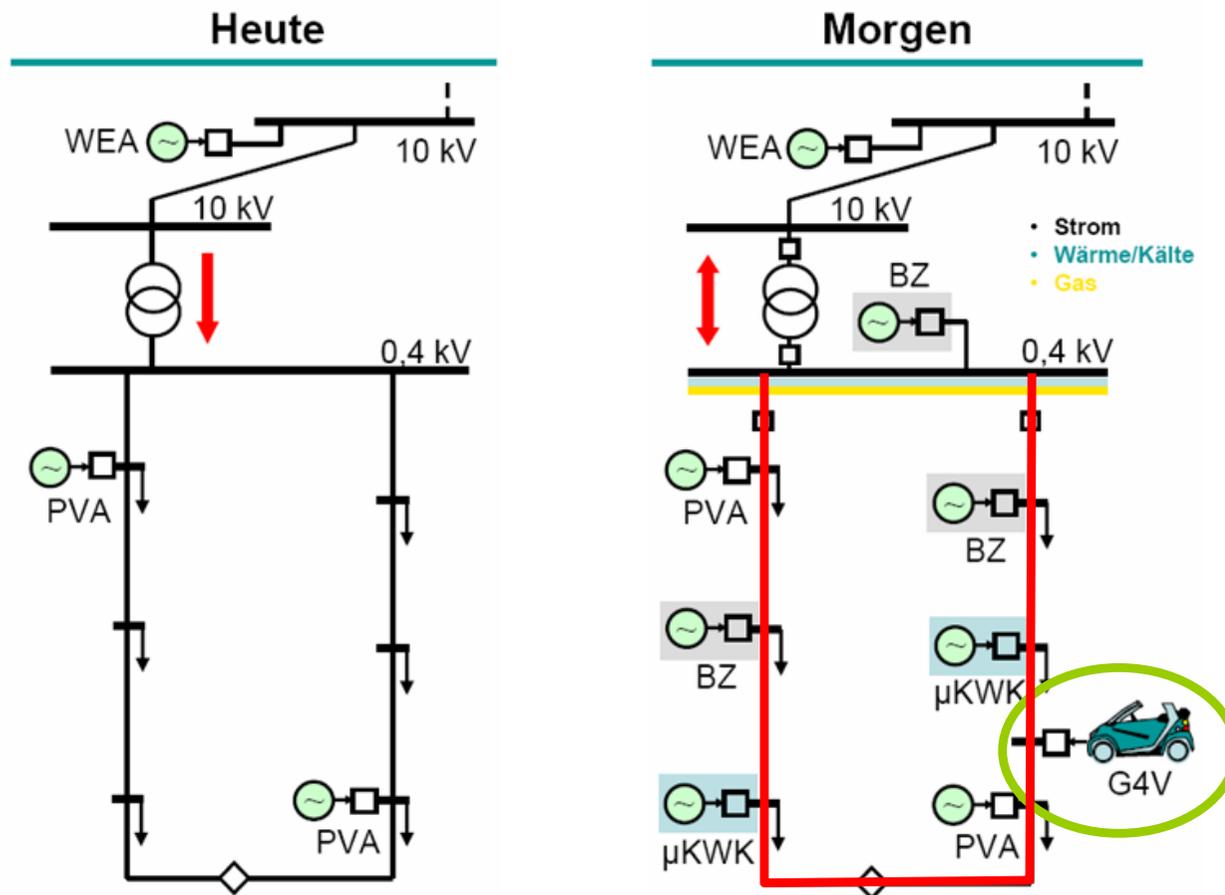
- **Waschmaschinen, Geschirrspüler** ("irgendwann" einschalten)
- **Tiefkühltruhen** ("auf Vorrat" abkühlen)
- **Wasserspeicher** ("auf Vorrat" aufheizen)



Quellen: Internet

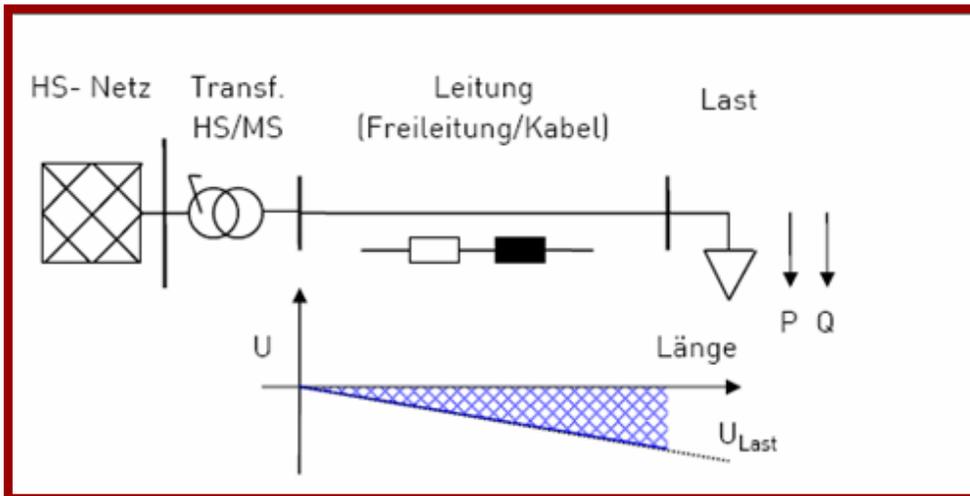
# Smart Grids – Netzstrukturen

Außer dem Aufbau von neuen Kommunikationsstrukturen müssen jedoch auch die **Netze verstärkt** und die **Einspeisung verbessert** werden.



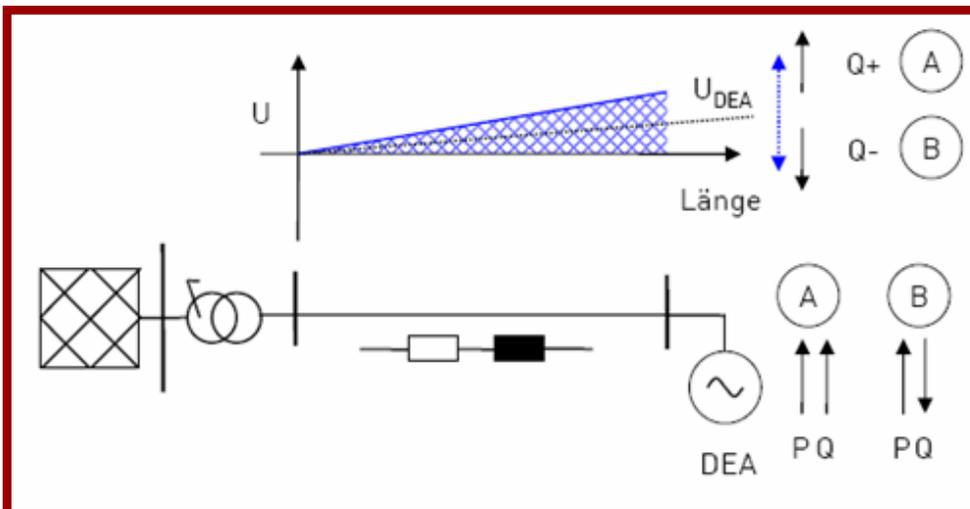
Quelle: RWE

## Spannungshaltung durch **Blindleistungsregelung**



### Netzanschluss von **Lasten**

- $P/Q$  durch Last vorgegeben
- $Q$  nur in Ausnahmefällen vorgebar



### Netzanschluss von **Erzeugern**

- $P$  vorgegeben
- $Q$  im Idealfall als Freiheitsgrad
  - Spannungs-Zwischenkreis-Umrichter
  - Synchronmaschine
  - Doppelt gespeiste Asynchronmaschine

Quelle: EnBW

# Smart Grids – Netzstrukturen



## Spannungshaltung durch **Blindleistungsregelung**

Anmerkung zur Printversion: im Folgenden fehlen 3 Folien mit Grafiken

### **Zulässige** Spannungsänderungen:

- am Hausanschluss  $\pm 10 \%$
- am Netzknoten  $\pm 2 \%$

Für einen  $\cos(\varphi) = 0,9 \dots 1,0$  muss ein Wechselrichter für **11% mehr Scheinleistung** dimensioniert werden, und er muss Blindleistung aufnehmen und abgeben können.

Beispiel **Photovoltaik**: Geschätztes PV-Dachflächenpotential für Deutschland: **ca. 160 GW Spitzenleistung!**

Davon aber in die heutigen typischen Verteilnetze nur (10...75)% **einspeisbar**.  
(Je nach Netz-Konfiguration, und ob mit oder ohne Blindleistungsfähigkeit)

# Smart Grids – Netzstrukturen

Blindleistungsfähige Umrichter helfen in diesem Fall **kurzfristig**. Langfristig ist ein **Ausbau der Netze dringend erforderlich**:

- Verstärkung von Leitungen und Kabelstrecken in **allen** Spannungsebenen
- Neue Schutzkonzepte im MS- und NS-Netz, die die künftigen **Lastflussverhältnisse** beherrschen
- Vermehrter Einsatz von Blindleistungskompensation (FACTS = Flexible AC Transmission Systems), **lokale** Bereitstellung von Blindleistung
- Bau von Fernübertragungen
- Weitere übergeordnete Spannungsebene (z.B. 800 kV)?
- Vermehrter Einsatz von Gleichstromübertragung?

# Zukunft HTSL-Netze?



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## Konzept für eine effiziente Energieversorgung von Ballungsräumen

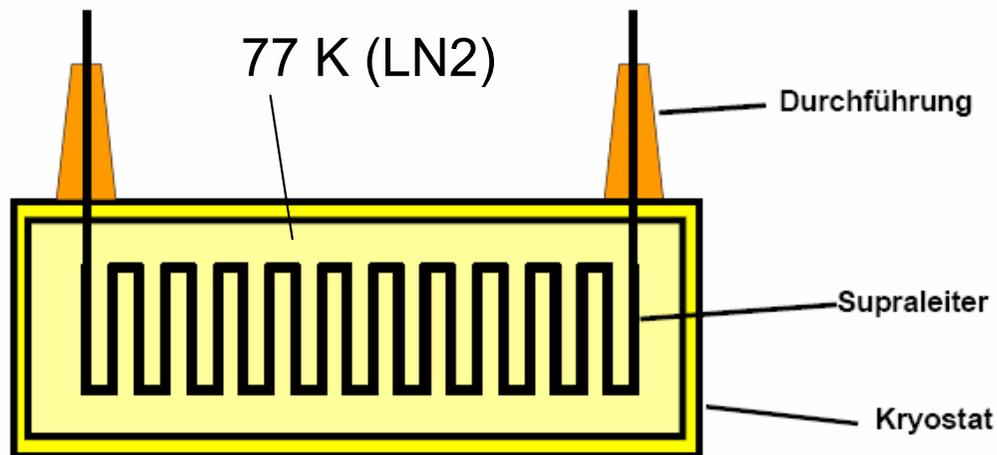
Eine Studie über supraleitende Betriebsmittel der Energietechnik  
– aktueller Stand und erforderliche Entwicklungen –  
mit Handlungsempfehlungen für Politik und Energiewirtschaft

Robert Bach, Wilfried Goldacker, Mathias Noe,  
Juri Poelchau, Werner Prusseit, Dag Willén

# Zukunft HTSL-Netze?

Erfahrungen für einige Betriebsmittel liegen bereits vor:

**Beispiel:** Resistiver HTSL-Kurzschlussstrombegrenzer



Nennleistung	10 MVA
Nennspannung	10 kV
Nennstrom	600 A
Betriebstemperatur	66 K
Strombegrenzung	18 kA → 7,8 kA
Begrenzungsdauer	60 ms

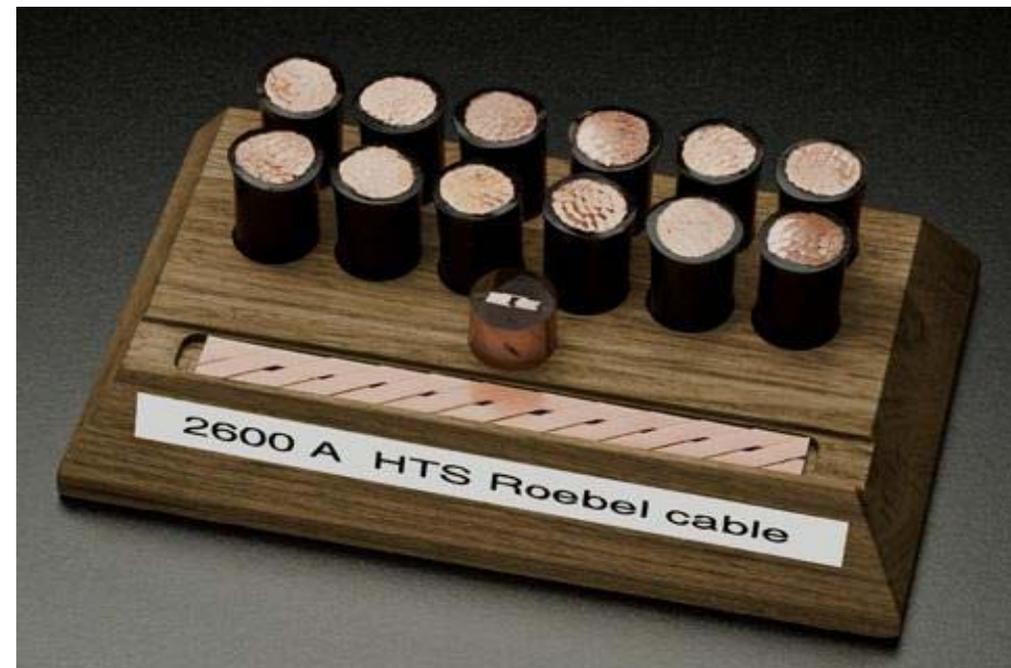
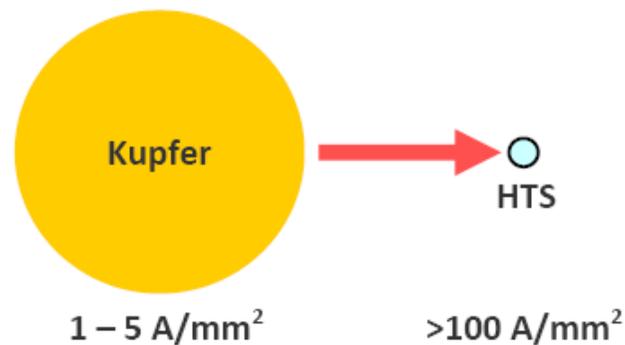


Quelle: ACCEL Instruments GmbH

# Zukunft HTSL-Netze?

Erfahrungen für einige Betriebsmittel liegen bereits vor:

**Beispiel:** Kabel



Maßstäbliche Querschnitte für  
gleiche Stromtragfähigkeit

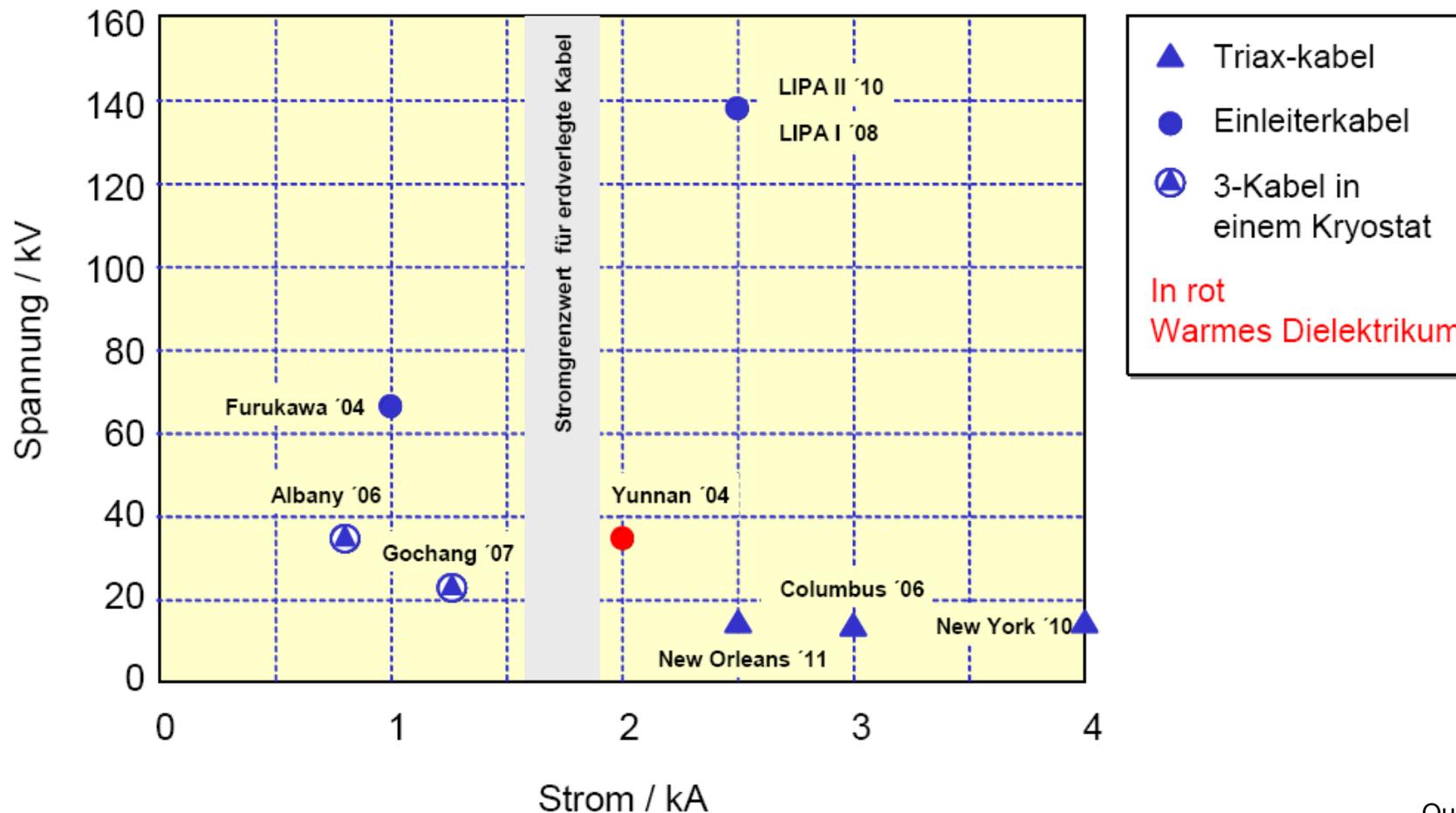
Stromtragfähigkeit 2600 A: ein HTSL-  
Roebel-Kabel oder 12 konventionelle  
Kabel parallel

Quelle: FZ Karlsruhe

# Zukunft HTSL-Netze?

Erfahrungen für einige Betriebsmittel liegen bereits vor:

**Beispiel:** Kabel – Daten einiger aktueller HTSL-Kabelprojekte

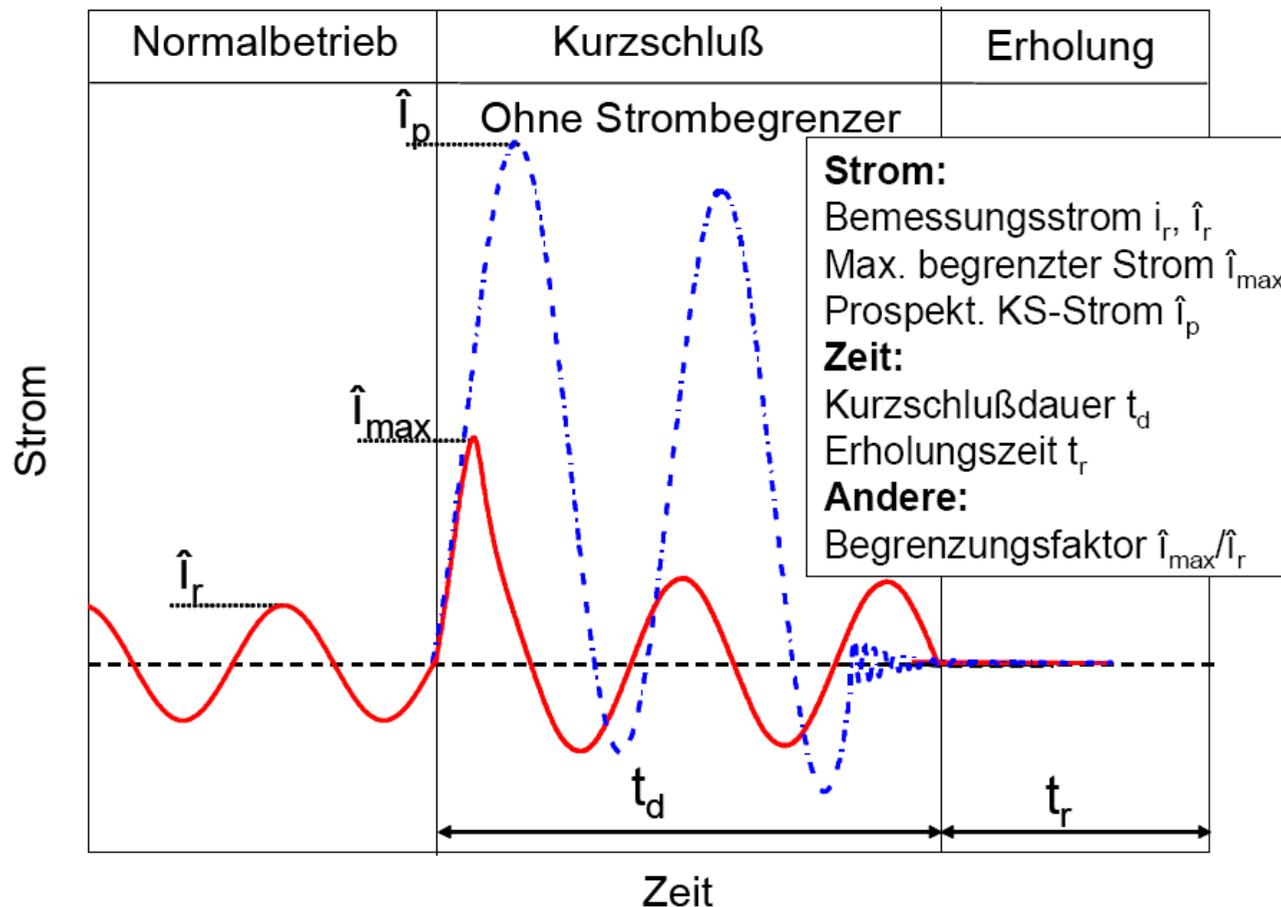


Quelle: HTSL-Studie

# Zukunft HTSL-Netze?

Erfahrungen für einige Betriebsmittel liegen bereits vor:

**Beispiel:** Kabel – Inhärente Kurzschlussstrombegrenzung → kurzschlussfreies Netz



Quelle: HTSL-Studie

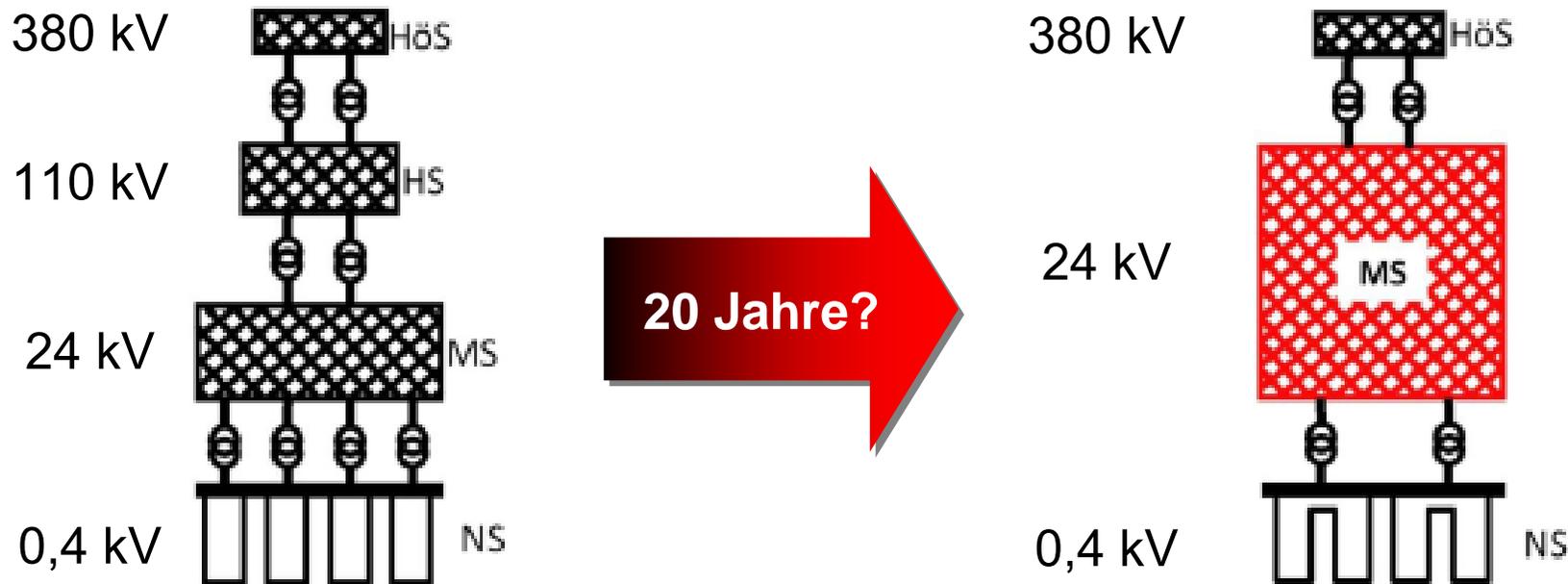
# Zukunft HTSL-Netze?



HTS Eigenschaft	Folge für Netzdimensionierung	Folge für Netzgestaltung
ohmscher Widerstand gegen Null sehr niedriger Spannungsabfall	längere Abgänge in Netzebene mit HTS Einsatz	geringere Gesamtleitungslänge, weniger Schaltfelder
	längere Abgänge in unterlagerter Netzebene	weniger Umspann- und Netzstationen
hohe Stromtragfähigkeit	höhere Anschlussleistung je Abgang möglich	geringere Gesamtleitungslänge, weniger Schaltfelder
	Verzicht auf Netzebene(n) denkbar	Entfall einer Leitungs- und einer speisenden Umspannebene
aktive Kurzschlussstrombegrenzung	Dimensionierung auf geringere Kurzschlussströme	so genannte kurzschlussfreie Netze

Quelle: HTSL-Studie

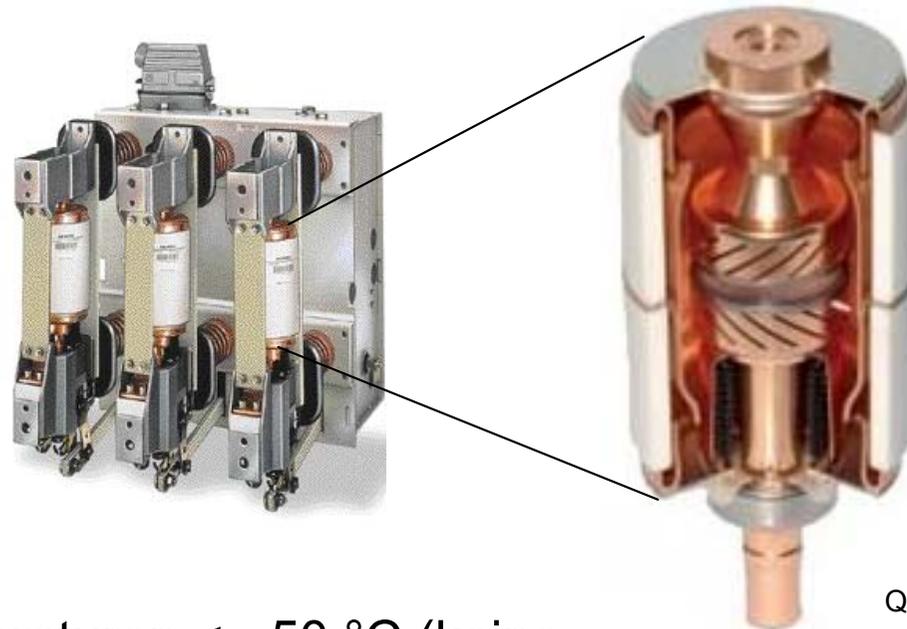
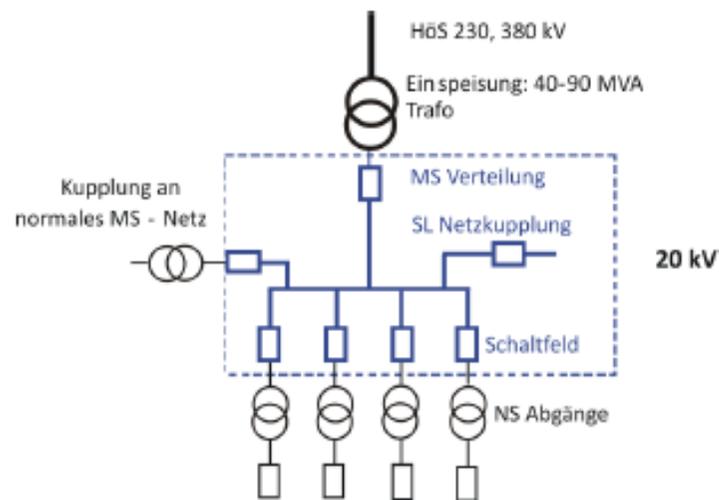
# Zukunft HTSL-Netze?



- Entfall der 110-kV-Ebene → ersetzt durch HTSL-24-kV-Ebene
- Ströme von einigen 1000 A möglich
- Größere Stromtragfähigkeit durch weitere Abkühlung erreichbar (Skalierbarkeit)
- Weniger Umspannstationen durch Quasi-Kurzschlussfreiheit

# Zukunft HTSL-Netze?

FG HST-Projekt: "**Schalten** bei HTSL-Temperaturen" (Projektstart: 2010)



- Halbleiter scheiden aus bei Temperaturen  $< - 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (keine Ladungsträgerbeweglichkeit mehr)
  - $\text{SF}_6$ -Schalter scheiden aus bei Temperaturen  $< - 60^{\circ}\text{C}$  ( $\text{SF}_6$  verflüssigt sich)
- **Vakuum-Schalter** erscheint als geeignetes Schaltprinzip!

# Zwei Projekte, die derzeit Schlagzeilen machen DESERTEC-EUMENA, European Supergrid



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: Internet

# Zwei Projekte, die derzeit Schlagzeilen machen DESERTEC-EUMENA, European Supergrid



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

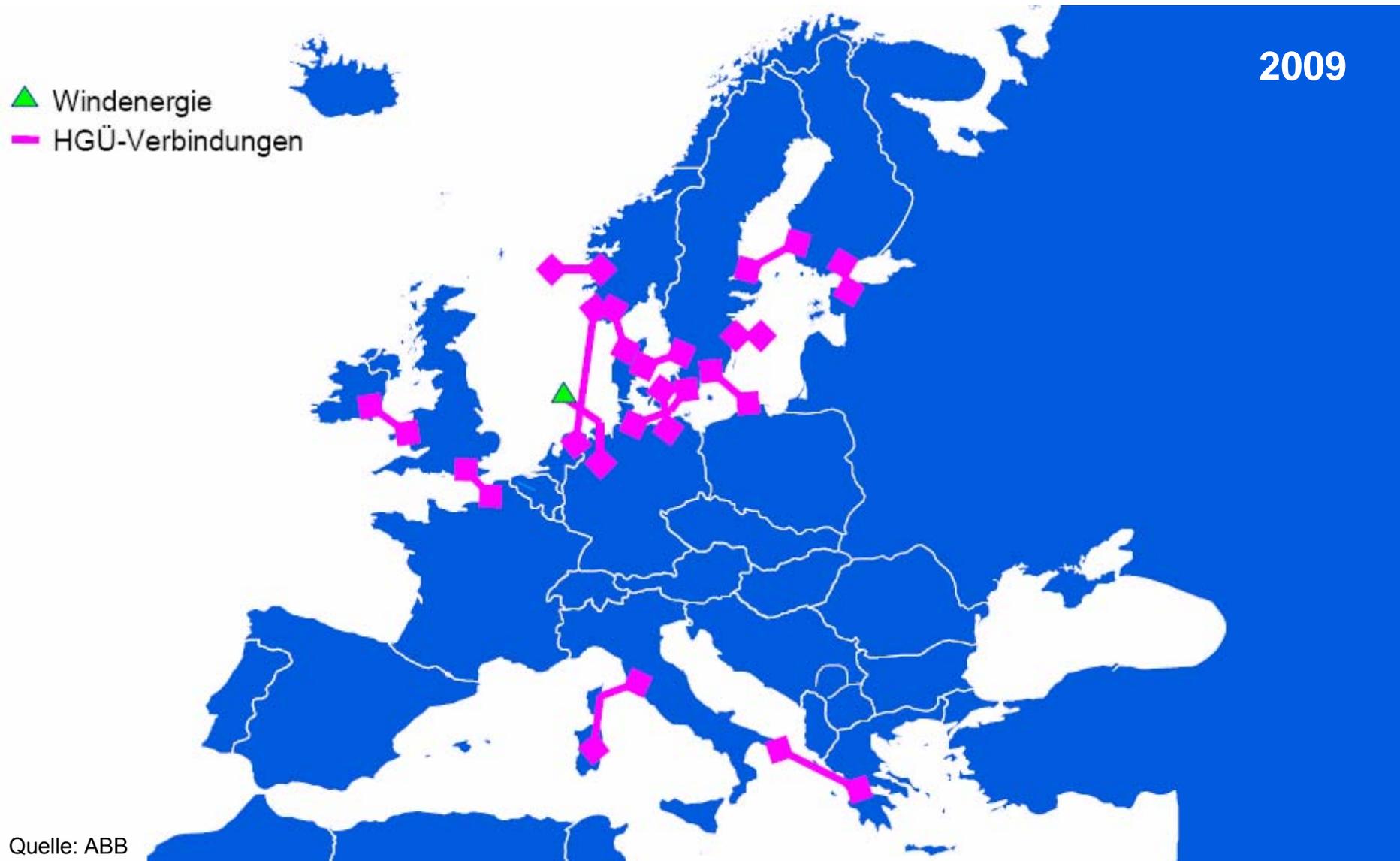


Quelle: Internet

# Zwei Projekte, die derzeit Schlagzeilen machen DESERTEC-EUMENA, European Supergrid



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: ABB

# Zwei Projekte, die derzeit Schlagzeilen machen DESERTEC-EUMENA, European Supergrid



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

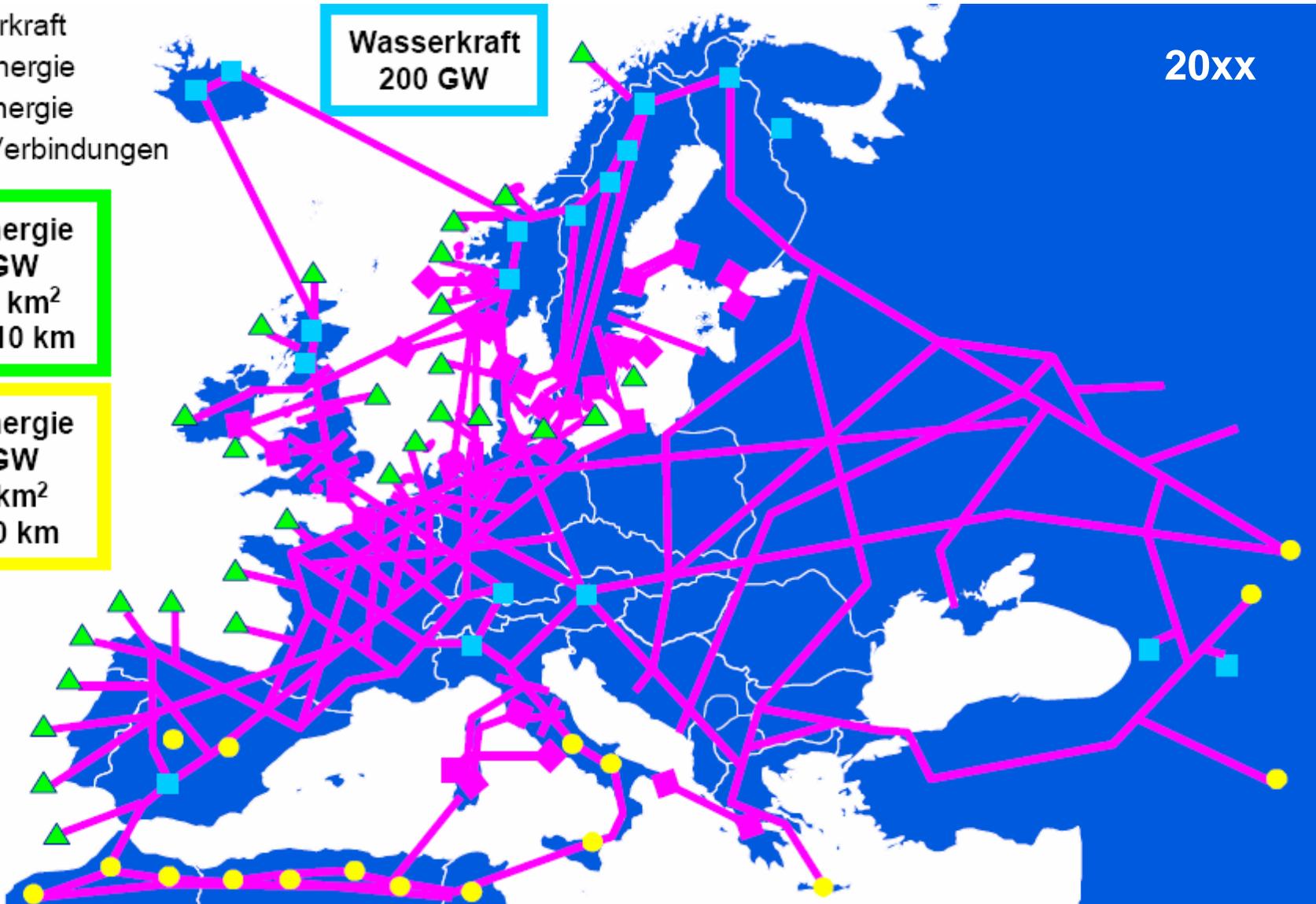
- Wasserkraft
- Solarenergie
- ▲ Windenergie
- HGÜ-Verbindungen

20xx

Wasserkraft  
200 GW

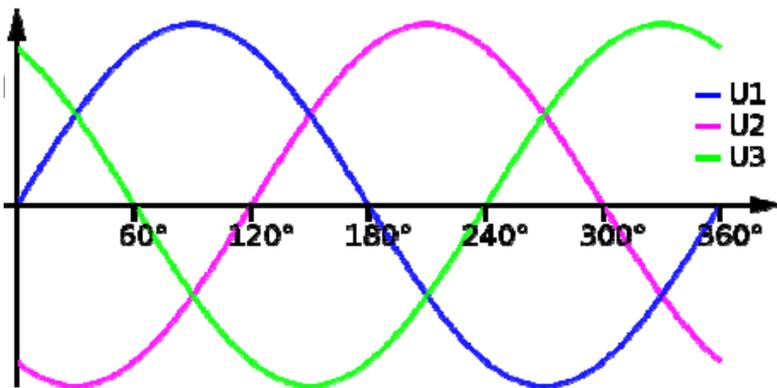
Windenergie  
300 GW  
25 000 km<sup>2</sup>  
5000 x 10 km

Solarenergie  
700 GW  
8000 km<sup>2</sup>  
90 x 90 km

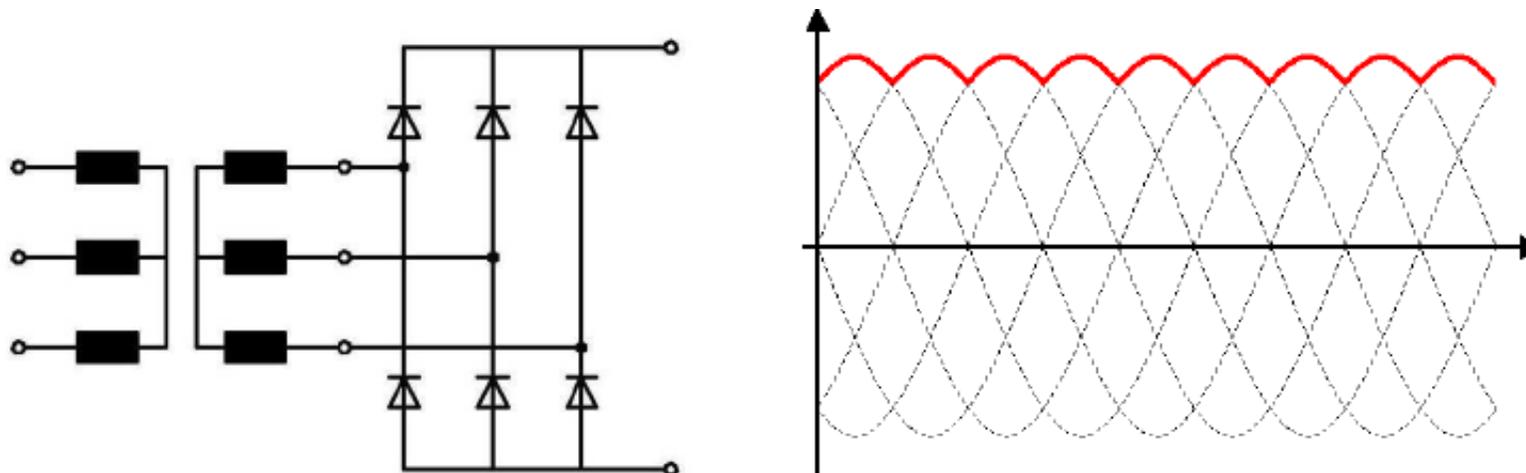


# Warum HGÜ?

**DHÜ** = Drehstrom-Hochspannungsübertragung → 2-Phasen-Wechselstrom



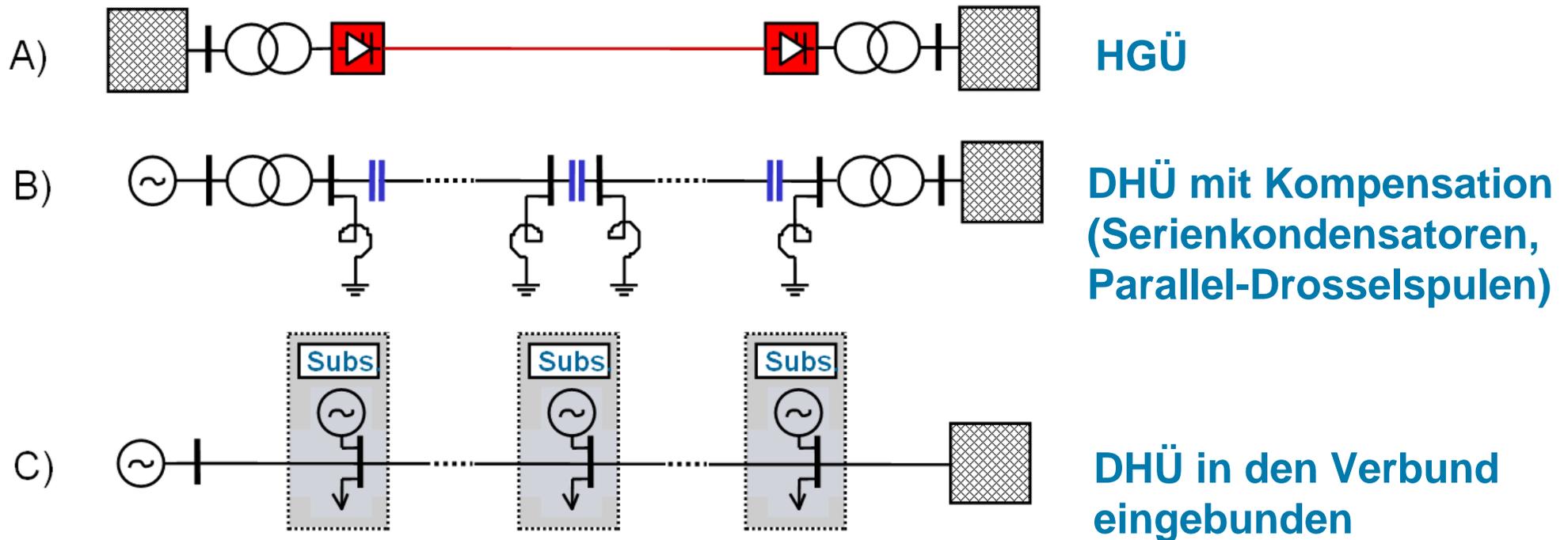
**HGÜ** = Hochspannungs-Gleichstromübertragung



Quelle: Uni Hannover

# Warum HGÜ?

## Verschiedene Möglichkeiten einer Fernübertragung



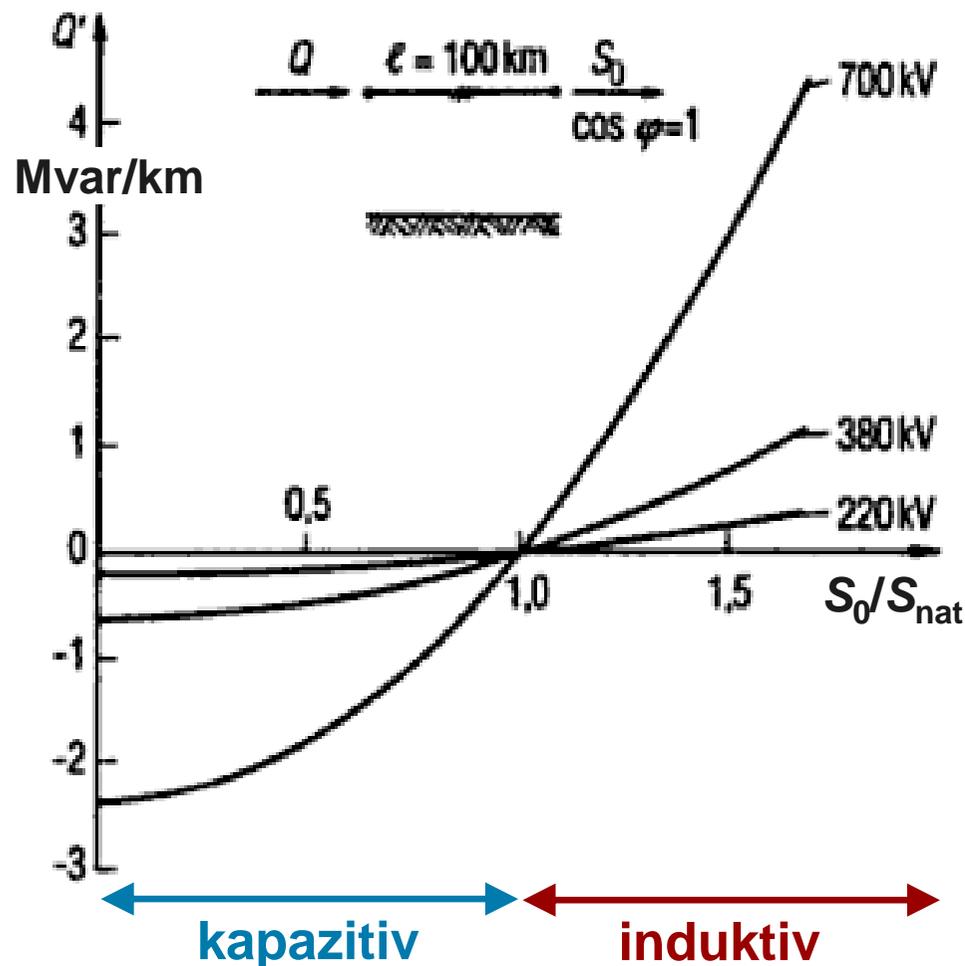
Quelle: Siemens

Beschränkung der DHÜ durch

- Blindleistungsbedarf
- Verluste
- Phasenwinkel zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung ( $6^\circ/100 \text{ km}$ )

# Warum HGÜ?

## Blindleistungsbedarf einer DHÜ-Freileitung



Nur wenn eine Übertragungsleitung mit ihrer **natürlichen Leistung**

$$S_{nat} = U^2/Z$$

betrieben wird, hat sie keinen Blindleistungsbedarf.

- Bei  $S < S_{nat} \rightarrow$  **kapazitives** Verhalten
- Bei  $S > S_{nat} \rightarrow$  **induktives** Verhalten

Damit die Blindleistung nicht über die ganze Leitungslänge geliefert werden muss, ist eine örtlich verteilte Kompensation durch Kondensatoren oder Drosseln erforderlich.

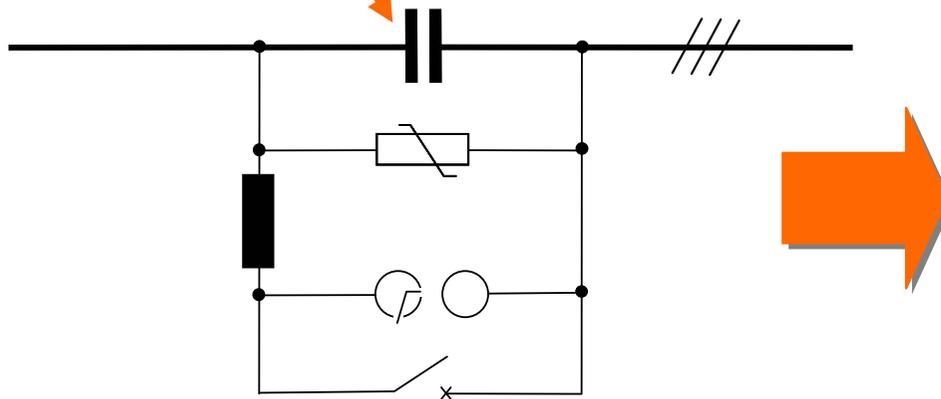
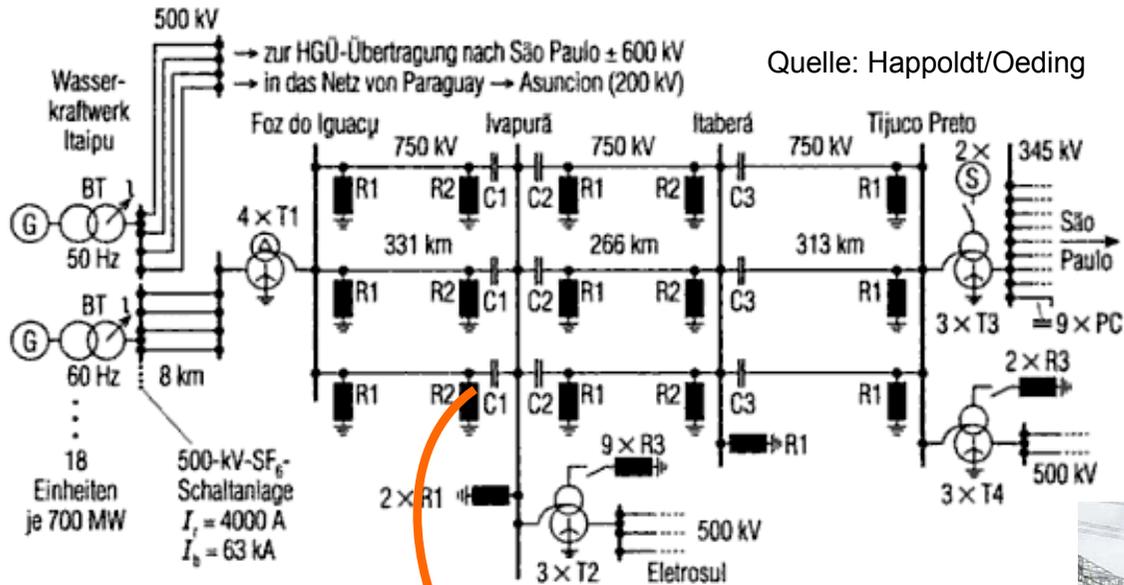
Üblich: Betrieb bei  $(2...3) \cdot S_{nat}$

Quelle: Happoldt/Oeding

# Warum HGÜ?



## Blindleistungsbedarf einer DHÜ-Freileitung (Beispiel Itaipu – São Paulo)



# Warum HGÜ?

## Platzbedarf DHÜ vs. HGÜ: Beispiel einer Übertragung von **7000 MW**



DHÜ: **8 x** 420 kV / 1200 A



DHÜ: **3 x** 800 kV / 1700 A



HGÜ: **2 x**  $\pm$ 500 kV / 3500 A



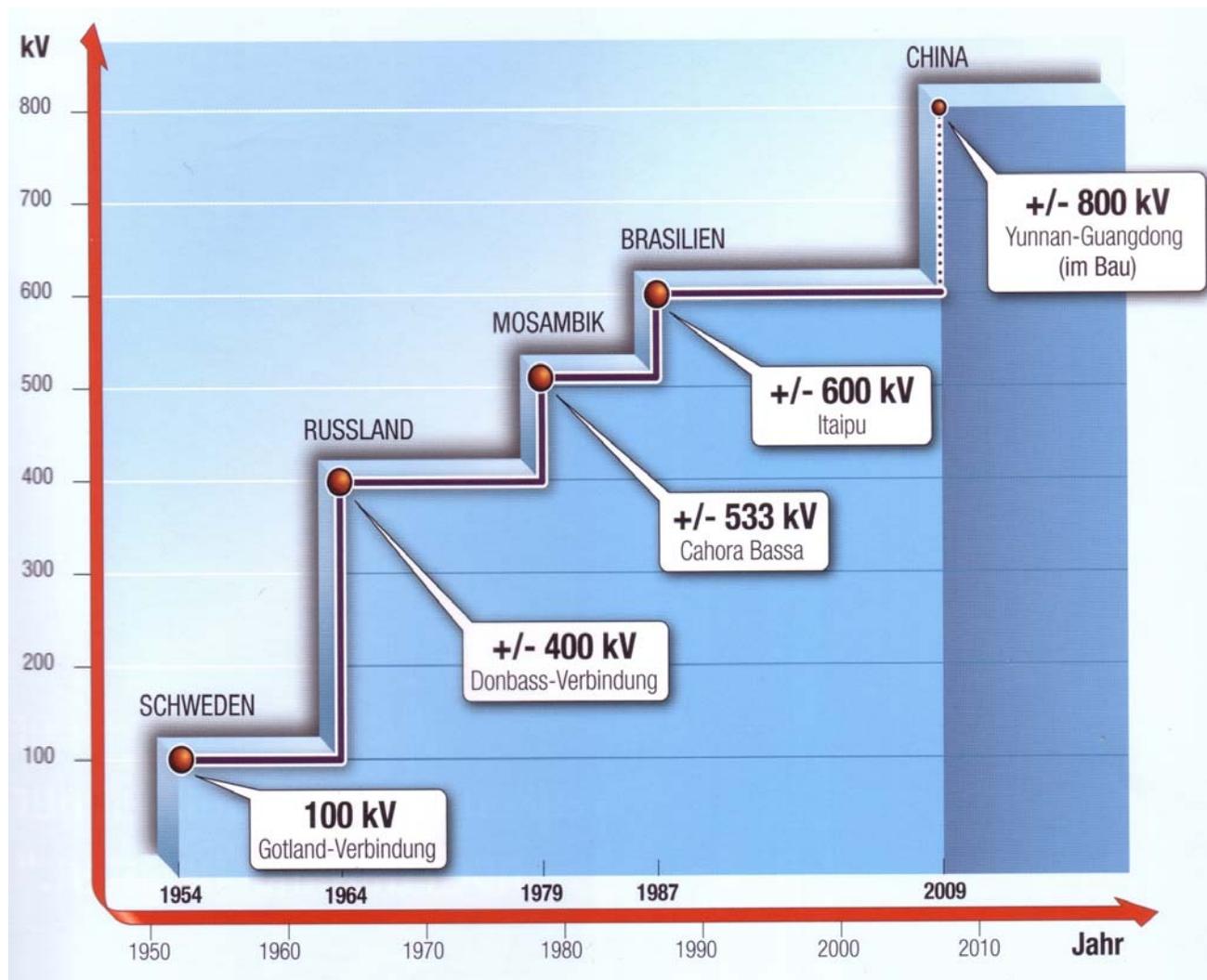
**HGÜ: 1 x  $\pm$ 800 kV / 4400 A**

Quelle: ABB

# Warum HGÜ?



±800 kV DC – eine neue Errungenschaft!



Quelle: Areva

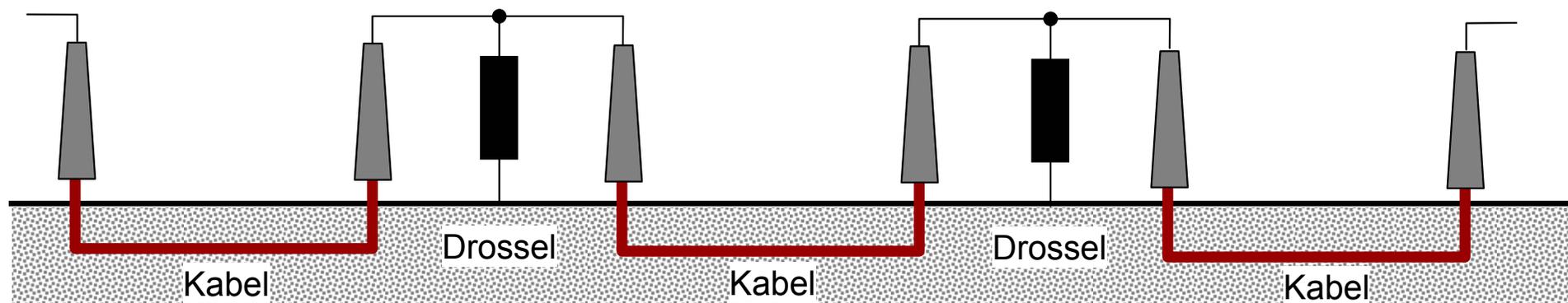
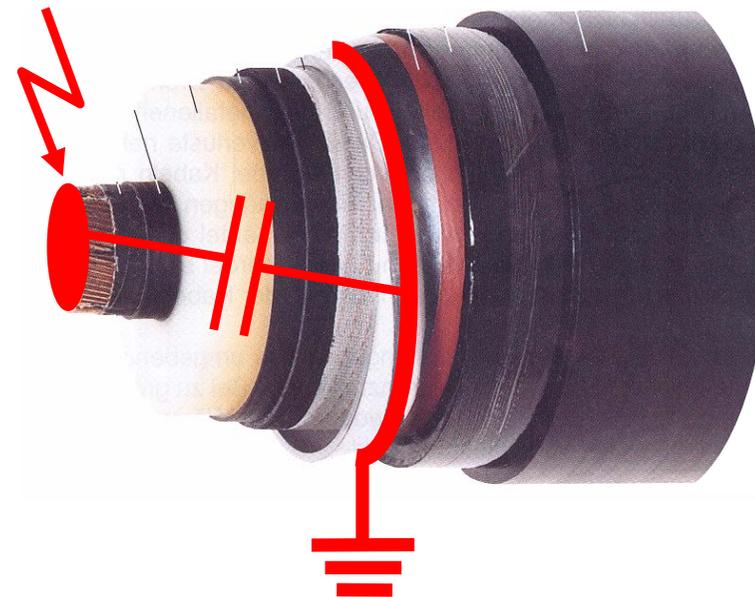
# Warum keine Kabel?

## Blindleistungsbedarf von Wechselspannungskabeln

- Kabel haben eine **sehr große Kapazität**.
- Wegen ihrer geringen thermischen Belastbarkeit müssen (ungekühlte) Kabel weit **unterhalb ihrer natürlichen Leistung** betrieben werden.

→ Extrem großer (kapazitiver)  
**Blindleistungsbedarf**

→ **Kompensation** jeweils nach einigen 10 km  
erforderlich → unrealistisch!



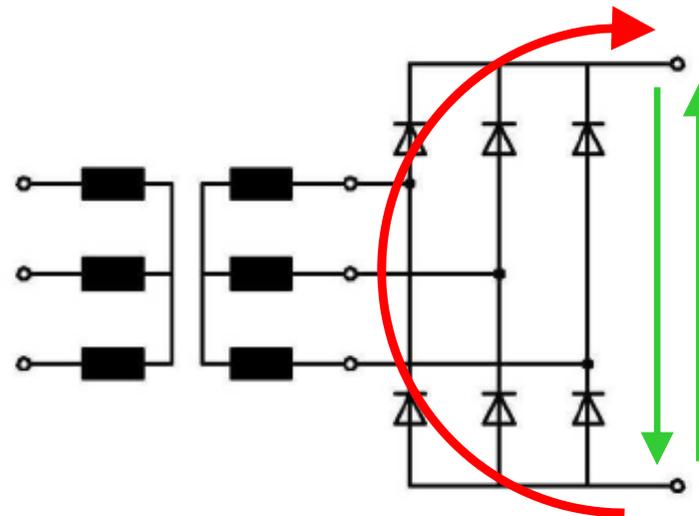
# Warum keine Kabel?

**Gleichspannungskabel** könnte man beliebig lang verlegen.  
Jedoch: zzt. noch **Spannungsbeschränkung!**

Ölpapierisoliertes Kabel bis  $\pm 500$  kV

XLPE-Kabel heute bis max.  $\pm 320$  kV

• **nicht** umpolbar!



Umpolen für Lastfluss-  
richtungsänderung erforderlich



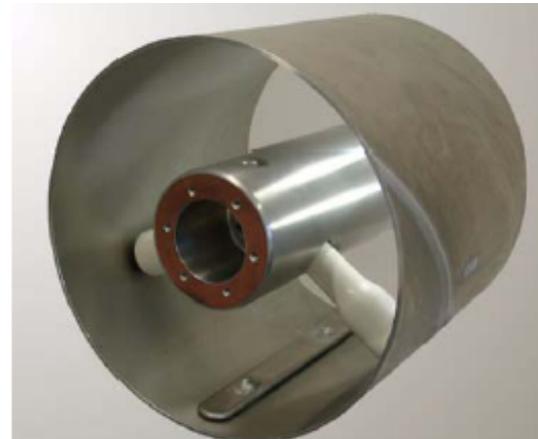
Quelle: ABB

# Alternative: GIL

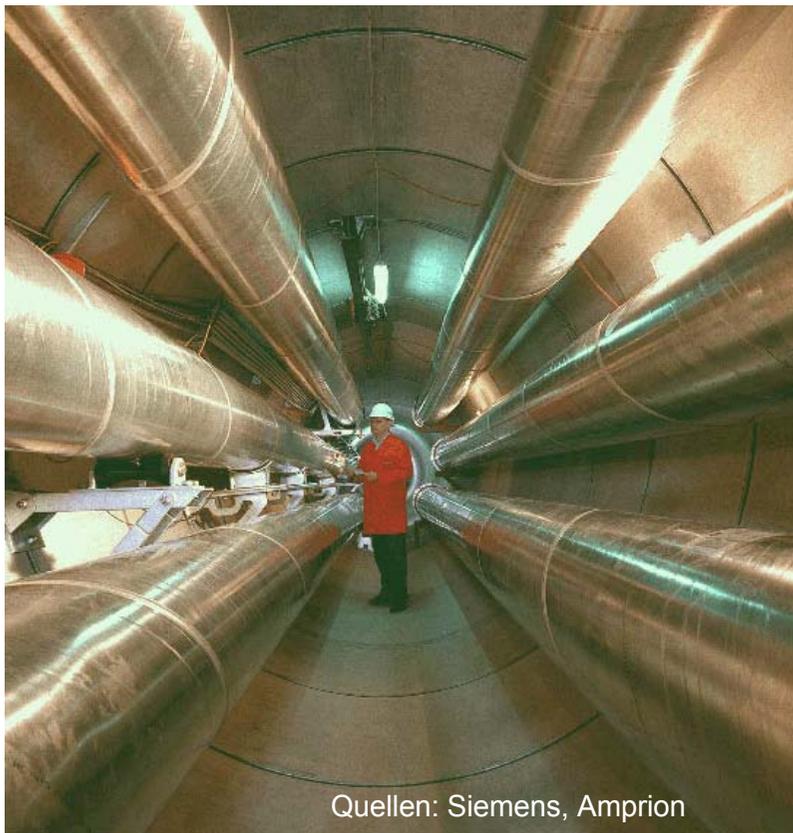


**GIL** = Gasisolierte Leitung

- + kleinere Kapazität als Kabel
- + geringere Verluste als Kabel und Freileitung
- sehr hohe Invest- und Verlegekosten



entspr. **2 x**  
Freileitung!



Quellen: Siemens, Amprion

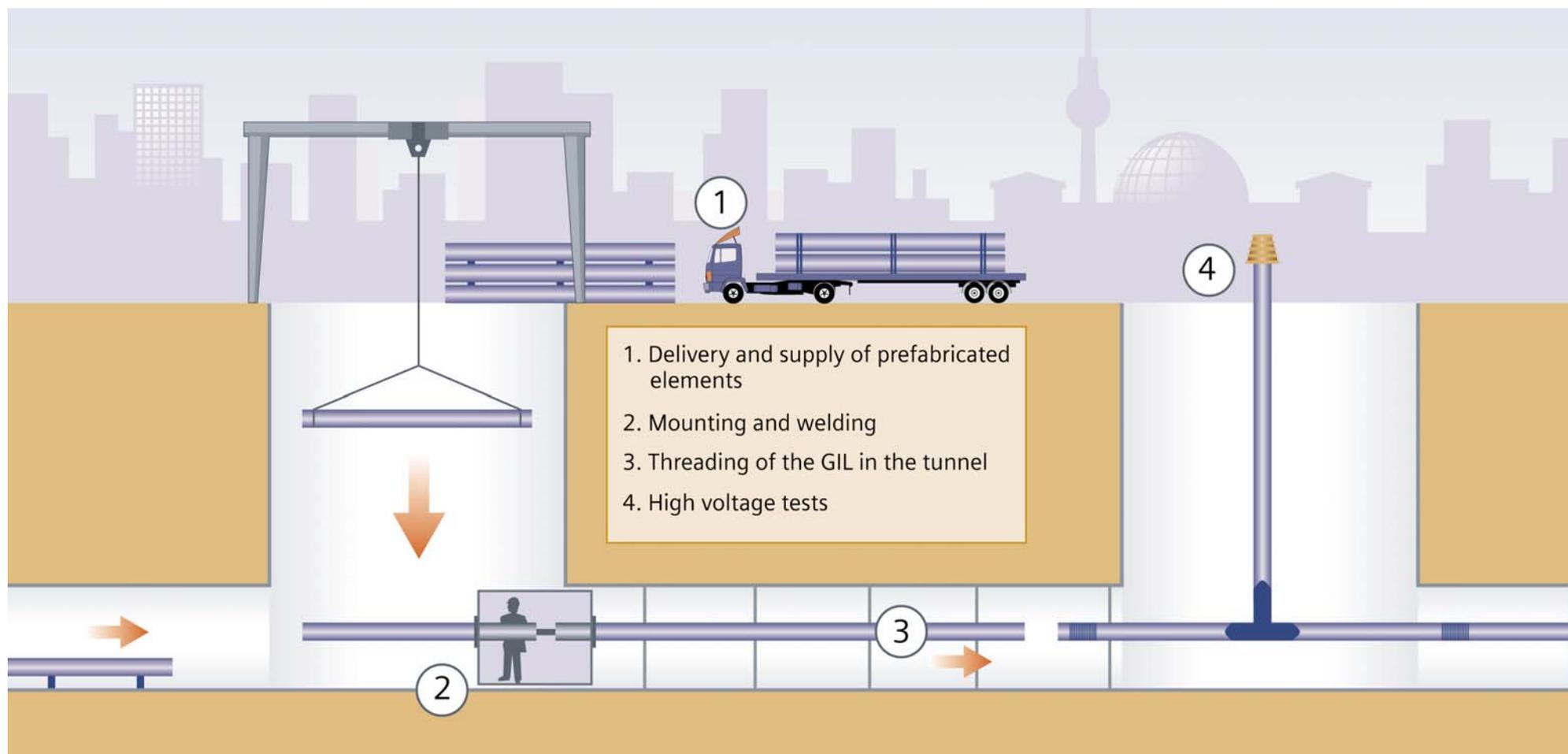
Max. Betriebsspannung	420 kV
Bemessungsstrom	2750 A
Bemessungsdauerlast	1800 MVA
Nennkurzzeitstrom	63 kA
Nenngasdruck	7 bar
Isoliergasgemisch	80 % N <sub>2</sub> , 20 % SF <sub>6</sub>
Kapseldurchmesser (außen)	517 mm
Leiterdurchmesser (außen)	180 mm
Max. Leitertemperatur	80°C
Max. Manteltemperatur	50°C

# Alternative: GIL



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Varianten: Tunnelverlegung

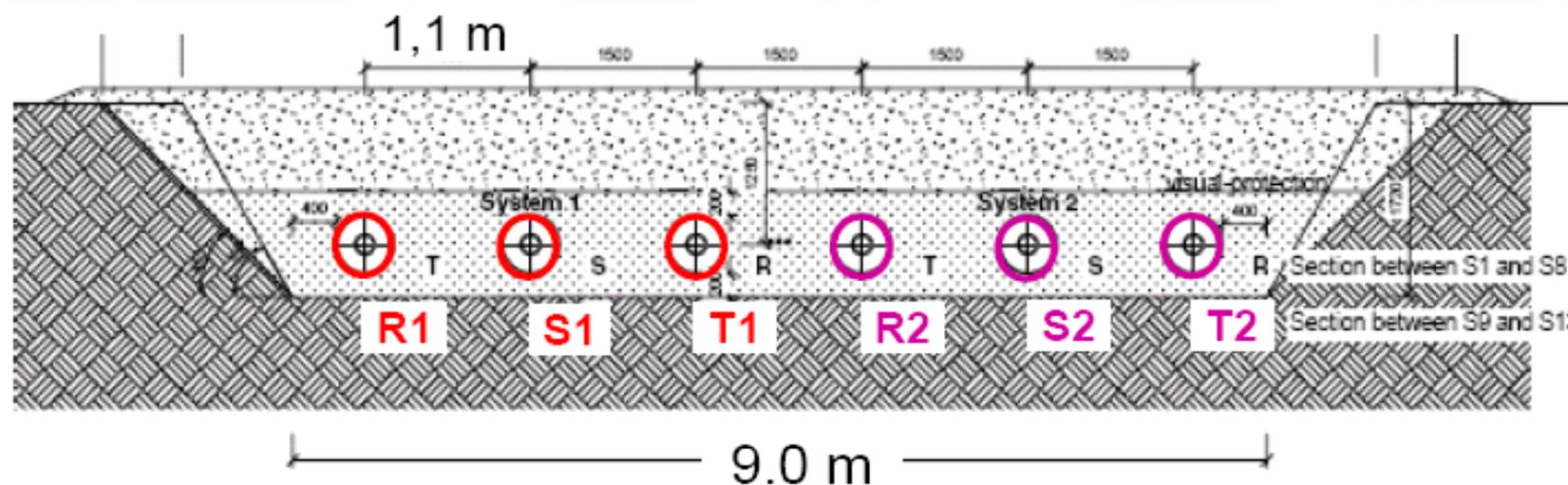


Quelle: Siemens



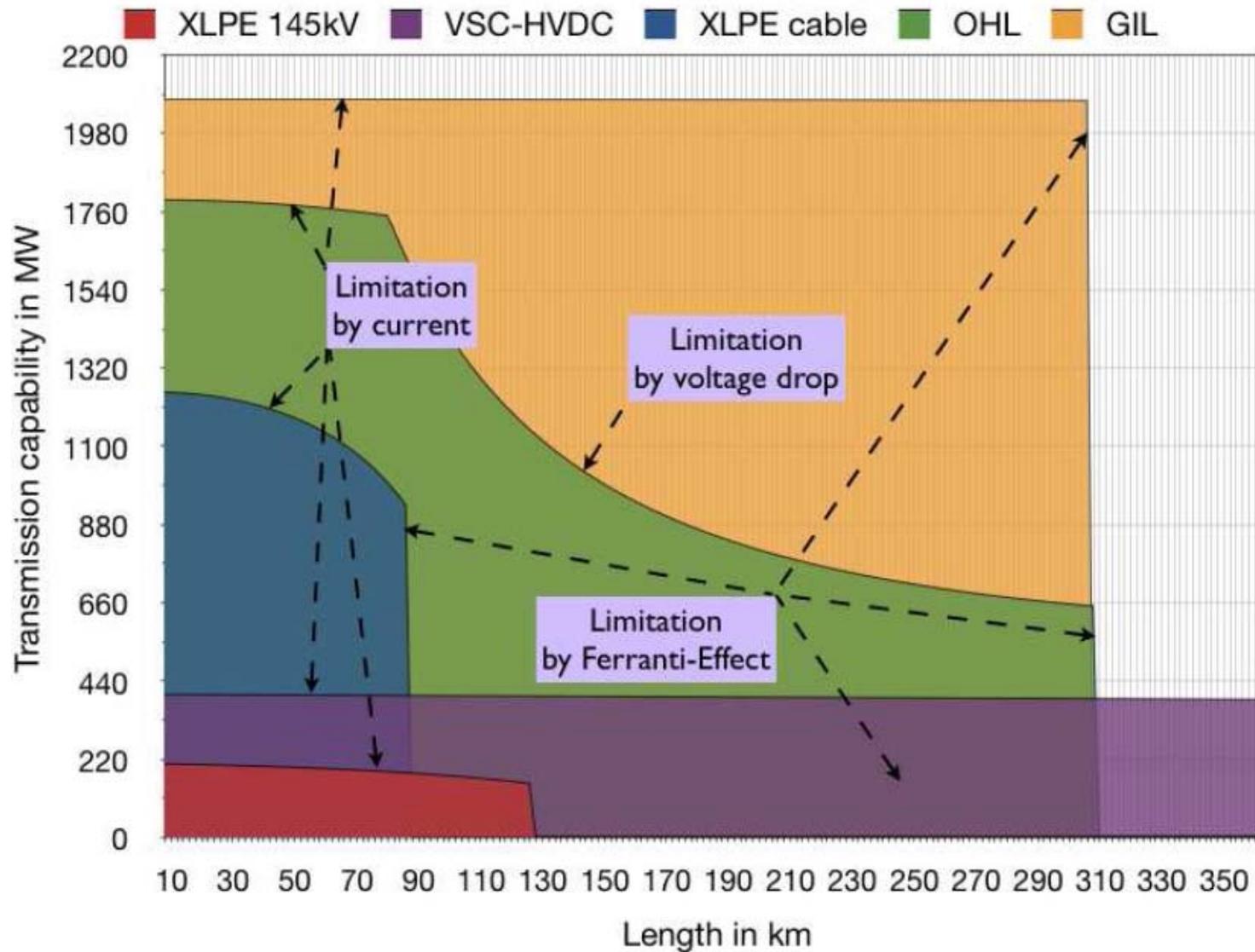
# Alternative: GIL

## Varianten: Direkte Erdverlegung



Quelle: Amprion

# Vergleich der Alternativen



# Zusammenfassung



- Das System der elektrischen Energieversorgung befindet sich derzeit in einem beispiellosen Umbruch.
- Zur bedarfsdeckenden Einbindung erneuerbarer Energiequellen ist eine Neustrukturierung der Übertragung und der Verteilung notwendig.
- Die Mittel- und insbesondere die Niederspannungsebene müssen "intelligent" werden, um Lastmanagement und Einspeisung an jedem Ort zu ermöglichen.
- Die Mittel- und insbesondere die Niederspannungsebene müssen verstärkt werden, um steigenden Lastflüssen und Lastflussrichtungen gerecht zu werden.
- Es muss F&E-Arbeit in künftige HTSL-Netze investiert werden.
- Bereits jetzt ist ein Ausbau des Hoch- und Höchstspannungsnetzes erforderlich, um im großen Rahmen Offshore-Windkraftwerke anzubinden.
- Ein wesentlich erweitertes europäisches "Supergrid" könnte die in reichlichem Maße vorhanden erneuerbaren Energiequellen in EU-ME-NA erschließen.
- Der UHV-HGÜ kommt bei Fernübertragungen eine Schlüsselrolle zu – 800 kV derzeit im Aufbau, 1000 kV bereits angedacht.
- GIL ist eine mögliche akzeptierte Alternative zu Freileitungen und Kabeln.



# Danke für Ihre Aufmerksamkeit